



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

6.8.3 ANÁLISIS DE LAS PEORES POSICIONES DEL SISTEMA

Para poder analizar las conclusiones citadas en el apartado anterior en cuanto a las causas que producían pérdidas de calidad del sistema, se ha creído interesante representar aquellas posiciones donde se produce la interrupción de la llamada.

En las siguientes figuras se representa el escenario simulado: las líneas verticales y horizontales representan las calles que tienen 10 metros de ancho; las estaciones base están representadas por cruces y no se encuentran exactamente encima de la línea porque se supone que están arrimadas a la fachada de los edificios y no en el centro de la calle; finalmente, cada rombo representa una llamada que se ha interrumpido.

El número de llamadas interrumpidas no representa necesariamente que un sistema tenga mejor o peor calidad, ya que es un número absoluto y no está comparado con el de llamadas aparecidas. De esta forma un sistema con dos transceptores cursará más tráfico y también tendrá más llamadas interrumpidas, pero no tiene porque tener un peor GOS. La representación de las llamadas interrumpidas debe estudiarse de forma cualitativa y no cuantitativa. Asimismo, solamente se han representado aquellas llamadas que entran en estadísticas, es decir las que se generan en cualquiera de las 36 células centrales, por esta razón las calles periféricas casi no tienen interrupciones.

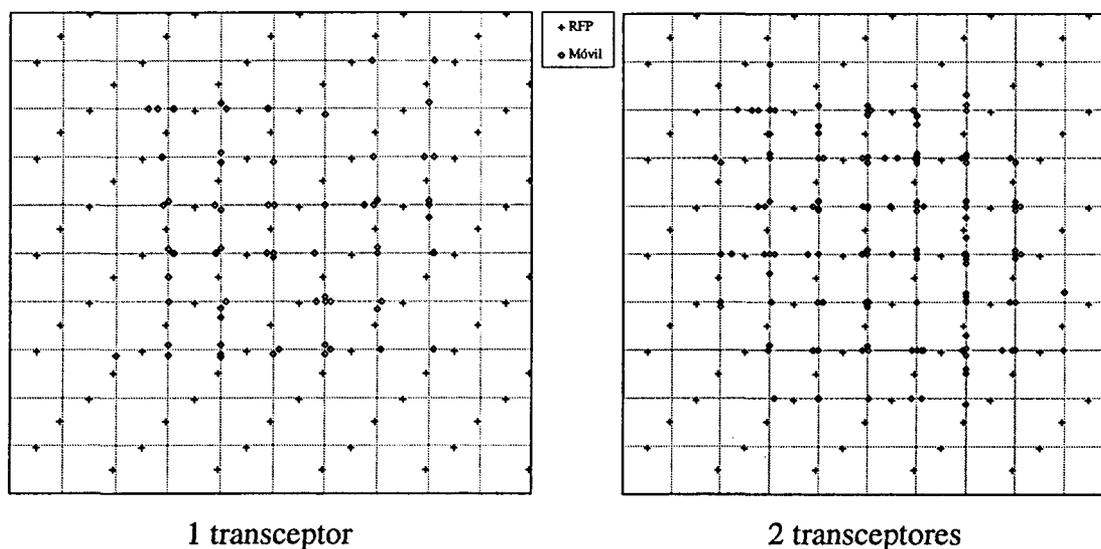


Figura 6.8.11 Posición de las llamadas interrumpidas en el sistema "1 CALLE".

La figura 6.8.11 representa a un sistema con estaciones base en calles alternadas ("1 CALLE"), con uno y dos transceptores. El sistema con un transceptor está básicamente limitado por capacidad, y la probabilidad de interrupción sólo afecta a los terminales móviles (figura 6.8.4) que generan traspasos intercélula debido a su desplazamiento. Los que no pueden llevarse a cabo es por falta de canales en la nueva estación base.

Observando la figura de un transceptor vemos tres tipos de llamadas interrumpidas: el primer tipo, que es la gran mayoría, se interrumpen a muy corta distancia del centro del cruce, un segundo tipo son las que se interrumpen en el centro exacto del cruce y el tercero las que se interrumpen dentro de una calle, pero alejadas del cruce.

El proceso de interrupción de las llamada del primer tipo es el siguiente: un terminal móvil se desplaza y entra en un cruce, en este momento recibe un incremento de interferencias debido a que ahora tiene visión directa de dos calles, pero su relación C/I todavía es suficiente por lo que no genera ningún traspaso. Cuando llega al centro del cruce gira hacia la derecha o izquierda y recorre otros 5 metros sin dificultades porque aún tiene visión directa con la estación base. En el momento que entra dentro de la nueva calle pierde visión directa y su potencia sufre una pérdida de 25 dB, su nivel de interferencia decrece porque ya está dentro de una sola calle, pero la pérdida de potencia es demasiado grande y la relación C/I cae por debajo del umbral, en este momento inicia un traspaso. El traspaso no tiene dificultad en cuanto a la interferencia recibida, pero sí con el número de canales disponibles y las llamadas se interrumpen por falta de capacidad. Antes de interrumpir una llamada el terminal dispone de 5 s. de calidad por debajo del umbral que aprovecha para adentrarse 5 metros más en la calle; la llamada acaba por interrumpirse a 10 metros del centro del cruce de calles.

El segundo tipo de llamadas son aquellas que tienen una relación C/I muy justa, al entrar en el cruce de calles y recibir más interferencias, cae por debajo del umbral y debe intentar un traspaso. Si no lo consigue recorre los 5 metros que le permiten los 5 segundos de mala calidad y se interrumpe justo en el centro cruce.

Finalmente, el tercer tipo de llamadas que encontramos son aquellas que aparecen en el centro de la calle y lejos del cruce. Estas llamadas inician el traspaso porque se encuentran en la frontera de la célula y disponen de una calidad muy baja.

Para el mismo sistema de "1 CALLE" pero con dos transceptores la situación cambia. Con un transceptor la mayoría de traspasos se deben a la pérdida de visión directa del terminal con la estación base ya que la relación C/I de los enlaces es muy buena y el entrar en un cruce o llegar a la frontera de la célula no es suficiente para desencadenar un traspaso. Con dos transceptores el nivel global de interferencias se incrementa y las conexiones no disfrutan de tan buena calidad, como consecuencia nuevas llamadas ya desencadenan traspasos. Los traspasos intercélula generados por el incremento de interferencia al llegar al cruce y por la pérdida de visión directa aparecen en cantidades similares. Sin embargo, las llamadas interrumpidas por llegar al extremo de la célula continúan siendo pocas. En este escenario las causas de no poder completar los traspasos son la limitación por capacidad y por interferencias en partes similares.

Como conclusión podemos decir que el punto débil de este sistema lo tienen los terminales móviles al llegar o traspasar los cruces de calles. Mientras que el punto fuerte está en las calles donde se interrumpen muy pocas llamadas. Los terminales estáticos

disfrutaban de una muy buena calidad en todos los puntos ya que siempre se conectan a una estación base con visión directa y no la abandonan a lo largo de toda la llamada.

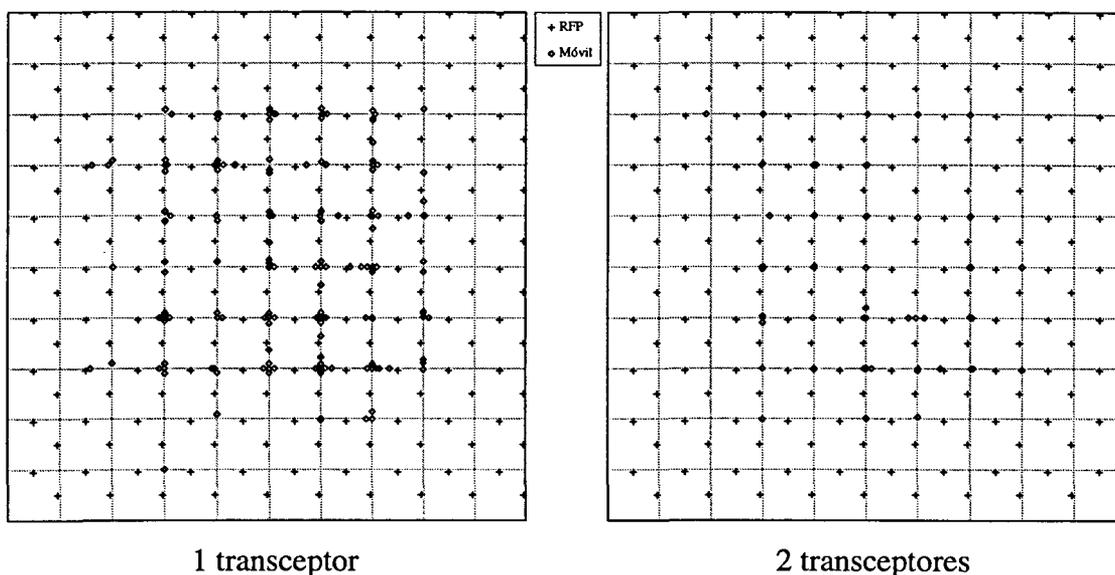


Figura 6.8.12 Posición de las llamadas interrumpidas en el sistema "2 CALLES".

El sistema de "2 CALLES" representado en la figura 6.8.12, con un sólo transceptor por RFP, está limitado básicamente por falta de canales en las estaciones base (figura 6.8.2). En este escenario disponemos del doble de estaciones base que en el anterior por lo que el tráfico global cursado por el sistema es también el doble, es comparable al sistema "1 CALLE" pero con dos transceptores. Al igual que este, las conexiones tienen una relación C/I media aceptable pero no excesivamente buena, por lo que aproximadamente la mitad de traspasos vienen generados por la entrada de los terminales en los cruces y la otra mitad por la pérdida de visión directa. Pueden observarse algunos casos en que se producen interrupciones cerca de una estación base. Estas llamadas son terminales móviles que proceden de la célula contigua pero al tener suficiente potencia no realizan el traspaso en la frontera de la célula sino una cierta distancia traspasada ésta. Si la estación base a la que quieren engancharse no dispone de ningún canal libre son interrumpidas.

El mismo sistema con 2 transceptores está totalmente limitado por interferencias (figura 6.8.7). El tráfico cursado es aproximadamente el doble que el del sistema "1 CALLE" con dos transceptores lo que produce que las conexiones tengan una relación C/I sólo ligeramente superior al umbral, y pequeños incrementos de interferencia ya producen un traspaso. En consecuencia la gran mayoría de traspasos se producen al entrar en el cruce y la llamada se interrumpe por interferencias 5 segundos más tarde en el centro del cruce.

Al igual que el caso "1 CALLE" el punto débil de este sistema son los cruces de calles, pero ahora el nivel de interferencias es mayor y los terminales ya inician el

traspaso al entrar en el cruce y no al perder visión directa al adentrarse en la otra calle como ocurría anteriormente. Otra diferencia radica en que la distancia media estación base - terminal es menor y en raras ocasiones se interrumpen llamadas en el centro de las calles.

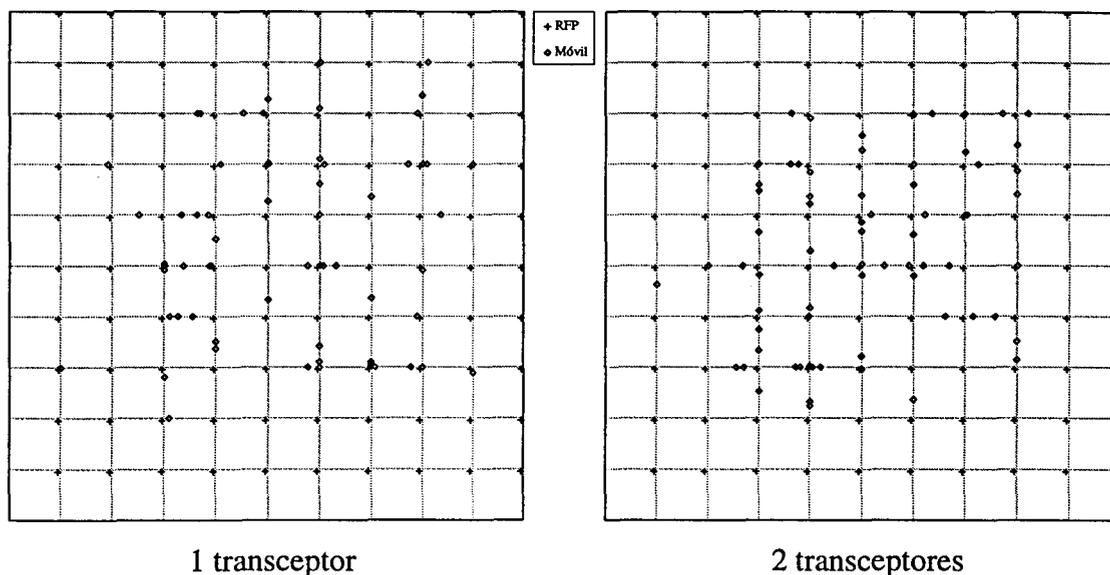


Figura 6.8.13 Posición de las llamadas interrumpidas en el sistema "ESQUINA".

La disposición de las estaciones base en las esquinas, figura 6.8.13, cambia la conducta de las llamadas interrumpidas. Con un transceptor el sistema se encuentra limitado por falta de canales en las estaciones base (figura 6.8.2). Se observan dos tipos de llamadas: las que se interrumpen en medio de una calle y otras que se interrumpen en los cruces de calles. La llamada interrumpida en el cruce viene provocada porque el móvil se aleja de la estación base a la que está conectado y se adentra en la célula contigua. Al disponer de suficiente potencia el terminal es capaz de llegar hasta el otro cruce donde debido a interferencias o a pérdida de señal intenta realizar un traspaso con la nueva estación base que se encuentra a muy corta distancia. En la mayoría de casos el traspaso se lleva a cabo pero en un pequeño porcentaje la estación base está saturada y la llamada se interrumpe. Las llamadas que se interrumpen en la mitad de la calle son aquellas que ya disponían de poca calidad y al llegar a la frontera de la célula ya generan un traspaso. Éste no podrá llevarse a cabo debido también a la falta de recursos en las estaciones base.

Para dos transceptores, al igual que ocurría con los casos de las distribuciones en las calles, el sistema está limitado por interferencias. El nivel de interferencia es superior y los trasposos ya no se realizan a tanta distancia de la estación base como ocurría con un transceptor. Como consecuencia disminuye el número de llamadas que intentan un traspaso en las esquinas y aumenta el de la mitad de la calle. En este caso los trasposos fallidos se deben básicamente al alto nivel de interferencias que tiene el sistema.

El punto débil de este sistema radica en que genera muchas interferencias lo que causa un grado de llamadas interrumpidas y traspasos intracélula mayor que el caso de "1 CALLE". Como punto fuerte está que el número de traspasos intercélula que generan los terminales móviles es menor reduciendo su probabilidad de interrupción.

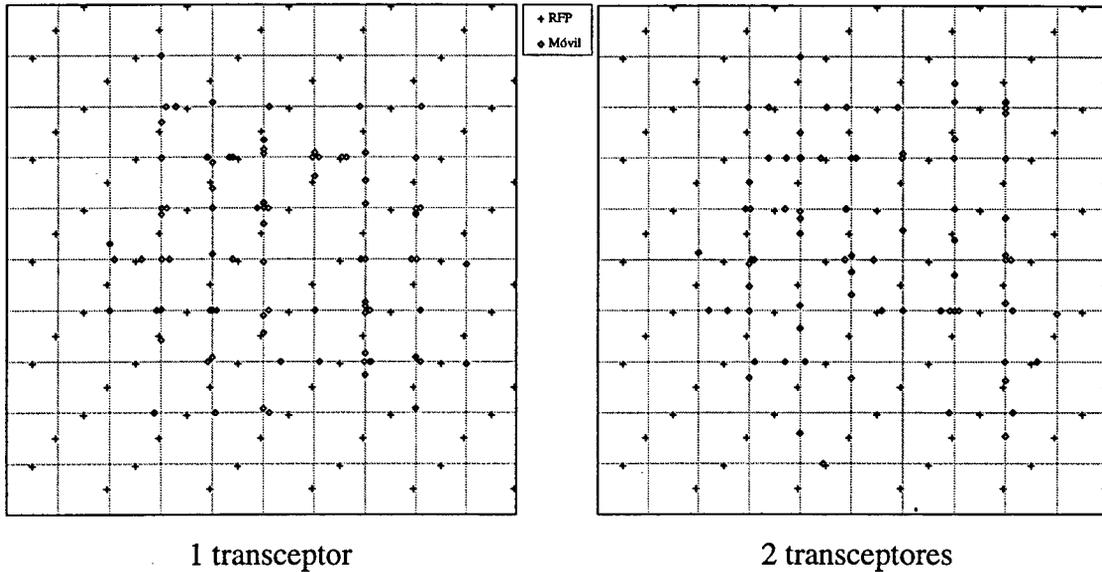


Figura 6.8.14 Posición de las llamadas interrumpidas en el sistema "1 CALLE" con antenas directivas de 180°.

El tráfico cursado por RFP con la distribución de "1 CALLE" con antenas directivas de 180° y con antenas omnidireccionales es muy similar. La diferencia está en que en el primer caso, el tráfico global es el doble del segundo ya que se sitúan dos estaciones base en cada emplazamiento. El hecho de disponer de antenas de 180° hace que los receptores sólo se vean interferidos por la mitad de las conexiones existentes. Con todo, resulta que el grado de interferencia que reciben los receptores es igual al que recibían con antenas omnidireccionales y con la mitad de tráfico. Como consecuencia el comportamiento y la causa de las llamadas interrumpidas son los mismos.

En este escenario sólo cabe destacar que aparece un pequeño número de llamadas interrumpidas muy cerca de los emplazamientos de estaciones base. Estas llamadas son las que realizan un traspaso al moverse por debajo del emplazamiento de estaciones base. Cuando un terminal que esté conectado a una estación base pasa por debajo de ella, el diagrama de radiación hace que se produzca una pérdida muy importante de potencia. Lo cual causa que el terminal intente un traspaso a la otra estación base del mismo emplazamiento. Si esta estación base está saturada el traspaso no es posible con la consiguiente interrupción de llamada.

Los puntos fuertes y débiles de este sistema son los mismos que los del sistema "1 CALLE", pero con la ventaja añadida de que el sistema es capaz de cursar el doble de

tráfico: mientras que los terminales se comportan de modo excelente dentro de las calles quedan perjudicados al entrar o traspasar los cruces.

Finalmente, para poder contrastar el número de traspasos que no se pueden realizar debido a la falta de recursos en las estaciones base, se ha confeccionado la tabla 6.8.1 que muestra el porcentaje de interrupciones por capacidad. Se observa que con 1 transceptor la limitación por capacidad es determinante para todos los casos y se reduce aproximadamente a la mitad cuando se utilizan dos transceptores, aunque aún es muy significativa. La excepción es el caso de "2 CALLES" con dos transceptores donde la limitación es por interferencia.

	1 CALLE	2 CALLES	ESQUINA	1 CALLE (180°)
1 transceptor	84 %	71 %	75 %	85 %
2 transceptores	43 %	12 %	40 %	38 %

Tabla 6.8.1 Porcentaje de llamadas interrumpidas por falta de canales en la estación base al intentar un traspaso.

6.8.4 TERMINALES CON VELOCIDADES ELEVADAS

Los sistemas de comunicaciones sin cordón fueron diseñados para usuarios estáticos o que se movían dentro de edificios. Cuando exportamos estos sistemas al exterior de edificios y definimos nuevos servicios como el CTM que permite a los usuarios moverse dentro de su propia red o entre dos redes, se supone que lo hacen en las mismas condiciones, es decir a bajas velocidades. Al instalar este servicio en zonas urbanas resulta muy interesante el hecho de que los usuarios también puedan moverse a velocidades superiores. Velocidades típicas de coches moviéndose en zonas urbanas son 20, 30 o 40 Km/h. En este apartado estudia el efecto que tendrían terminales móviles desplazándose a estas velocidades, desde el punto de vista de interrupción y bloqueos de llamadas debidas a la falta de recursos o potencia y a un excesivo nivel de interferencias.

Se ha simulado un escenario con la distribución de estaciones base que daba los mejores resultados en el apartado anterior: "1 CALLE". La figura 6.8.15 muestra los resultados cuando se tiene un transceptor por RFP. Se observa como la influencia de la velocidad del terminal comporta al GOS la misma tendencia que en el apartado anterior. A más velocidad peor comportamiento ya que se realizan más traspasos y existe más probabilidad de interrupción. La capacidad del sistema para un GOS del 1 % pasa de los 5.45 Erlangs para terminales estáticos a 3.75 para los que se mueven a 40 Km/h, lo que representa unas pérdidas del 31 %. Cabe destacar que los terminales a velocidades elevadas no afectan a los usuarios estáticos y lentos. Para un sistema sin terminales rápidos el sistema cursa 4.7 Erlangs por RFP con un GOS del 1 % para que los terminales de 1 m/s (figura 6.8.2). Añadiendo terminales rápidos podemos cursar 4.8 Erlangs para obtener la misma calidad en los usuarios de 1 m/s.

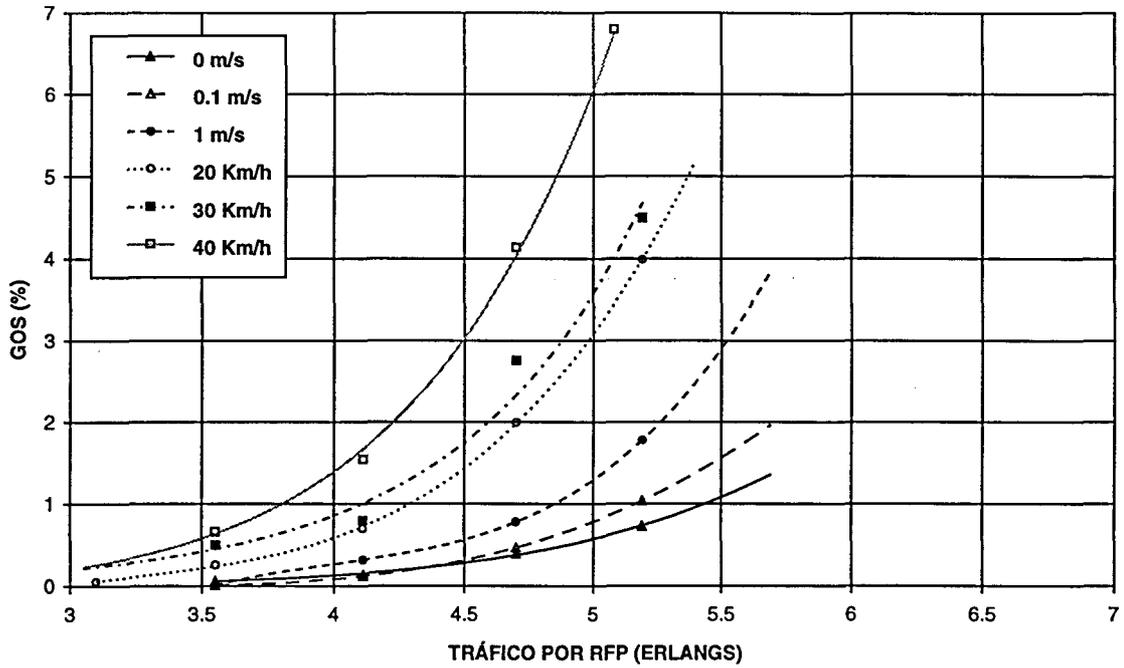


Figura 6.8.15 Capacidad del sistema "1 CALLE" con 1 transceptor por RFP con terminales móviles a velocidades medias.

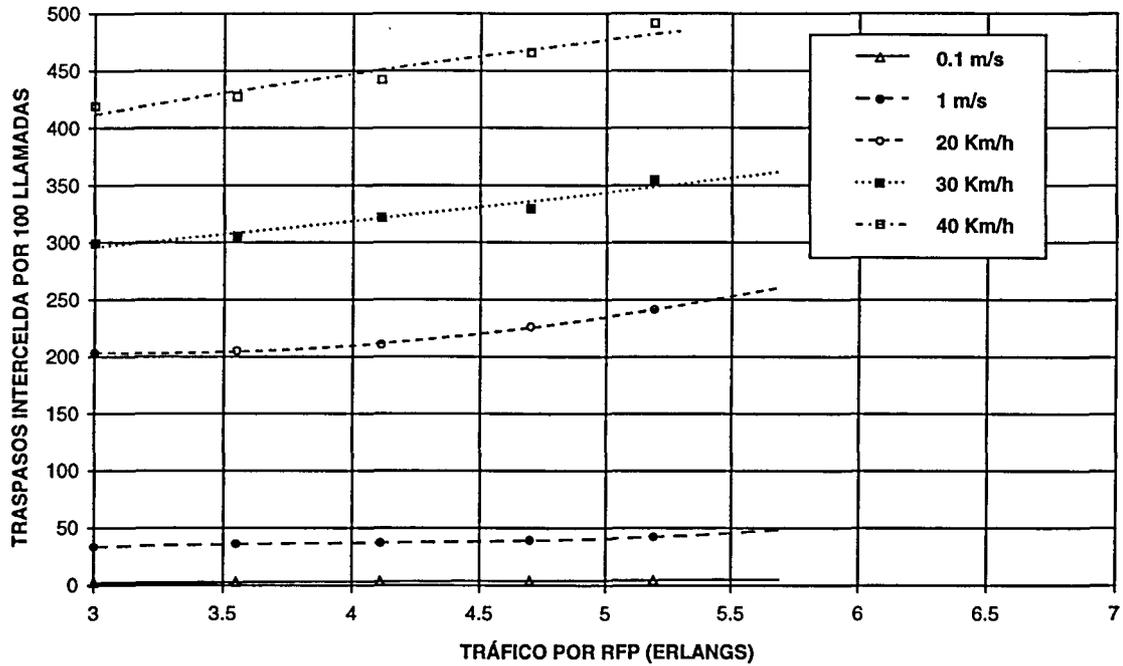


Figura 6.8.16 Número de traspasos intercélula para un sistema "1 CALLE" con 1 transceptor por RFP con terminales móviles a velocidades medias.

Debido a que los traspasos intercélula son los determinantes y que aumentan con la velocidad de los terminales, en la figura 6.8.16 se ofrece la evolución de los mismos. Podemos ver como el número de traspasos aumenta ligeramente con el tráfico cursado y que es proporcional a la velocidad. Para tráficos cursados bajos, los terminales de 1 m/s realizan 0.4 traspasos/llamada y si aumentamos la velocidad a 40 Km/h (11.1 m/s) pasamos a 4.2 traspasos/llamada. Estos resultados son coherentes ya que si consideramos que las estaciones base de una misma calle están separadas 220 metros, durante 100 segundos que dura una llamada, un terminal a 40 Km/h recorre en media 1111 metros que es aproximadamente la longitud de 5 células. Si tenemos en cuenta que un traspaso no tiene porque realizarse justo en la frontera de la célula sino que puede desencadenarse más lejos, obtenemos aproximadamente el mismo resultado.

6.8.5 CONCLUSIONES

En este apartado se ha estudiado la viabilidad de un sistema CTM utilizando el DECT. Para ello se ha simulado un área urbana, con una distribución de calles y edificios tipo Manhattan. El objetivo del estudio era analizar la influencia de la distribución de las estaciones base en la superficie a cubrir y la penalización por la velocidad de los móviles.

Se ha visto que la distribución de estaciones base en calles alternadas (“1 CALLE”), con una RFP en cada manzana, tiene la ventaja de que las estaciones base sólo tienen visibilidad directa con los terminales situados en su calle, generándose de esta forma un bajo nivel de interferencias. Como contrapartida, cuando un terminal móvil pierde la visibilidad directa con su estación base al girar una esquina requiere, en la mayoría de casos, un traspaso, hecho siempre perjudicial al existir una cierta probabilidad de que no pueda llevarse a cabo.

La distribución de las estaciones base en las esquinas de los edificios disminuye el número de traspasos a realizar por los terminales móviles que giran dicha esquina, disminuyendo por consiguiente el riesgo de llamadas interrumpidas. Como desventaja, una estación base situada en una esquina tiene visibilidad directa en dos calles por lo que interfiere y es interferida por los terminales situados en dichas calles, resultando en un nivel de interferencia superior al del caso anterior.

Al utilizar un sólo tranceptor por RFP, el sistema está limitado por la falta de canales en las estaciones base y las interferencias tienen escasa influencia. En este escenario los terminales estáticos se comportan prácticamente igual para las dos distribuciones de estaciones base ya que el GOS está formado casi por completo por la probabilidad de bloqueo por capacidad. Los usuarios móviles tienen una mejor calidad con la distribución en esquinas ya que realizan menos traspasos y su probabilidad de interrupción disminuye.

Si cada RFP dispone de dos transeptores la influencia de las interferencias en el GOS es comparable a la de la falta de recursos. En este caso, el hecho de que las estaciones base situadas en las esquinas interfieran en dos calles en lugar de una perjudica tanto a los terminales estáticos como a los móviles. Ambos tipos de terminales tendrán peor calidad que en una distribución de estaciones base en las calles.

Si utilizamos dos RFP por manzana localizadas en las calles, tenemos dos opciones: la primera situar una estación base en cada calle ("2 CALLES"), y la segunda utilizar dos estaciones base en el mismo emplazamiento, en calles alternadas y con antenas directivas de 180°.

Con un sólo transeptor por RFP, los dos sistemas se comportan igual y están limitados por falta de canales en las estaciones base. En [SAN] se muestran algunos resultados pero están limitados a un área de simulación menor y con una sola posición de estaciones base, sin embargo también se llega a la conclusión de que en el escenario ("2 CALLES") la principal limitación es la falta de recursos en las estaciones base. Cuando instalamos dos transeptores por RFP, el volumen de tráfico ya es muy elevado y el sistema está limitado por interferencias. En estas circunstancias es mejor disponer del sistema de antenas directivas ya que las interferencias influyen en menor medida. El incremento conseguido al utilizar el sistema de antenas directivas respecto al de las omnidireccionales es aproximadamente de un 15 %. En cuanto a infraestructura, un sistema con emplazamientos de dos estaciones base es más viable económicamente que otro con el doble de emplazamientos y con una sola estación base en cada uno de ellos.

La movilidad de los terminales resulta en un incremento de traspasos, tanto intracélula como intercélula. Este aumento de traspasos tiene como consecuencia una mayor probabilidad de interrupción y a su vez un empeoramiento de la calidad. Por ello, los terminales que circulan a más velocidad son aquellos que peor grado de servicio tienen.

En el documento [ETR310] se describe el tráfico que debe soportar una aplicación que dé acceso telefónico público a peatones en calles de zonas urbanas o suburbanas. Se supone que cada usuario genera un tráfico de 30 mErlangs y que la penetración máxima puede llegar a ser del 5 %. En el citado documento se calcula un caso extremo que sería una calle principal con aceras de 5 metros en cada lado; las estaciones base tienen una cobertura de 200 metros a cada lado, por lo que el área a cubrir es de 4000 m² de aceras. En la acera se supone una persona cada 10 m², un total de 400 personas, pero sólo el 5 % está llamando, lo que representa 20 personas. Si cada usuario genera 30 mErlangs, el tráfico medio que debe cursar una estación base de estas características es de 0.6 Erlangs. En cualquier caso se supone que el tráfico no superará 1 Erlangs por estación base. Todos los escenarios simulados cumplen este requisito y lo superan con creces. Por consiguiente, la aplicación de CTM puede implementarse sin ningún problema con el estándar DECT, e incluso podría reducirse el número de portadoras asignadas a este servicio sin provocar pérdidas de calidad.

6.9 MÉCANISMOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LOS RECURSOS DE UN SISTEMA DE BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

En los capítulos anteriores se han buscado métodos para aumentar al máximo la capacidad de tráfico de las estaciones base y dar servicio a áreas con gran densidad de usuarios. Existen igualmente otro tipo de servicios que tienen como principal requerimiento la cobertura de grandes áreas con poca densidad de tráfico.

Clientes potenciales de sistemas DECT en exteriores solicitan la posibilidad de comprar sistemas escalables, empezando con baja capacidad y cuando sea necesario realizar ampliaciones [MAC]. Sin embargo, se requiere que estos sistemas a pequeña escala tengan cobertura en toda el área solicitada por el cliente.

Hasta hace poco tiempo, la única opción de bajo coste para instalar un sistema DECT, era la opción de escasa cobertura que proporciona una estación base tipo residencial. Otra opción de conseguir más cobertura era la compra de un sistema completo microcelular con su correspondiente PABX, pero resulta un sistema caro e ineficiente para el uso requerido.

En este apartado se han evaluado dos métodos que permiten hacer más eficientes y económicos los recursos disponibles: las antenas distribuidas y las estaciones repetidoras. Casos típicos de utilización son áreas rurales y residenciales con escasa densidad de abonados, menos de 1 Erlang/Km² [ETR310]. Aquí no es posible instalar una sola estación base de gran radio, bien porque no se dispone de suficiente potencia o porque el terreno es muy irregular y causa muchas zonas de sombra. Otro factor a tener en cuenta es que el DECT no permite grandes distancias entre estación base y terminal debido a que no dispone de ecualizador en el receptor. Para obtener una calidad aceptable, en condiciones de propagación en visión directa y con antenas de 12 dB de ganancia en ambos extremos de la comunicación, las distancias máximas conseguidas se aproximan a los 5 Km [ETR308].

La principal diferencia entre los dos métodos es que los repetidores son más sencillos de instalar y controlar pero las antenas distribuidas ofrecen más capacidad y sus equipos son más económicos.

6.9.1 AGRUPACIONES DE ESTACIONES BASE O ANTENAS DISTRIBUIDAS

El concepto de antena distribuida es muy simple, en esencia consiste en que las estaciones base tengan más de una antena y mediante un conmutador sean capaces de conectar una u otra antena en cada tiempo de slot. Con este método se introduce una multiplexación por división en el espacio que funciona en conjunción con la estructura de división en el tiempo del DECT. Las antenas están situadas en diferentes localizaciones ampliando de esta forma el área de cobertura.

La figura 6.9.1 nos muestra un sistema DECT estándar, como los que se han venido evaluando hasta el momento, con un varias estaciones base conectadas a un mismo controlador. Las tres estaciones base representadas pueden pertenecer a tres emplazamientos de estaciones base diferentes, con antenas omnidireccionales, o bien pueden representar las tres estaciones base localizadas en un mismo emplazamiento de un sistema sectorizado con antenas de 120°.

El sistema de antenas distribuidas propuesto se muestra en la figura 6.9.2. Cada estación base está formada por este esquema, es decir, las estaciones base de la figura 6.9.1 son sustituidas por un sistema de la figura 6.9.2. De esta forma un controlador de canales radio es compartido por un grupo de antenas cada una de ellas con su sistema radio.

En las citadas figuras se supone que cada estación base puede cursar 12 conversaciones simultáneas, el equivalente a un sólo transceptor, aunque se podrían realizar otros modelos con más transceptores.

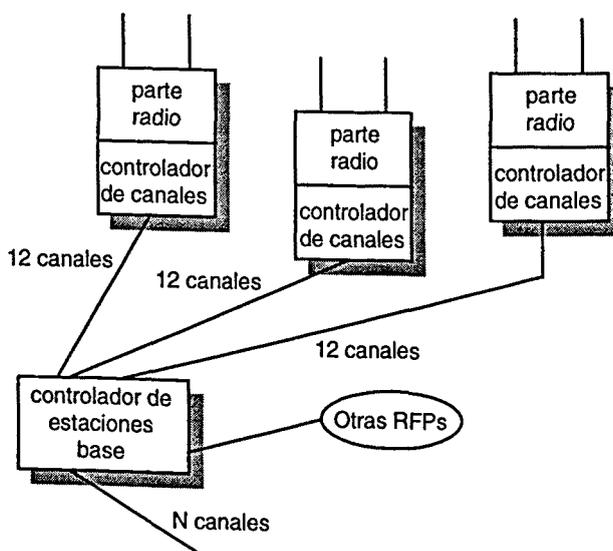


Figura 6.9.1 Infraestructura estándar de un sistema DECT con tres estaciones base y su correspondiente controlador.

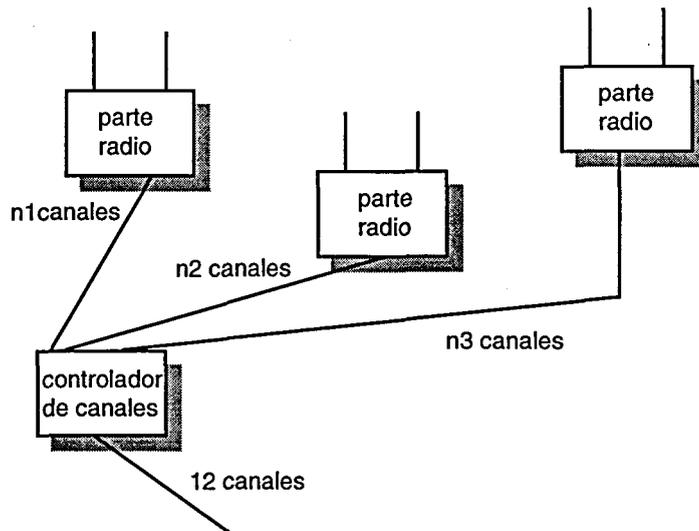


Figura 6.9.2 Infraestructura con antenas distribuidas, cada estación base de la figura anterior es sustituida por esta estructura.

Con este sistema se intenta dar solución a dos problemas considerando que el tráfico ofrecido es bajo. El primero, ya comentado anteriormente, aumentar la cobertura del sistema sin grandes costes de infraestructura. El segundo, aumentar la eficiencia de los equipos. Nótese que para los sistemas estudiados en los apartados anteriores, en particular para un entorno que utilice 3 frecuencias y antenas omnidireccionales en las estaciones base y en los terminales, se consigue una eficiencia de los canales del 15 %; y para antenas directivas de 120° en ambos extremos del 29 % (Tabla 6.9.1).

	Estación base y terminal omnidireccionales	Estación base y terminal directivos de 120°
Canales radio por emplazamiento	12	36
Tráfico cursado por estación base	1.8 Erlangs	3.5 Erlangs
Tráfico cursado por emplazamiento	1.8 Erlangs	10.5 Erlangs
Eficiencia (utilización del canal radio)	$1.8 / 12 = 15 \%$	$10.5 / 36 = 29 \%$

Tabla 6.9.1 Eficiencia de los canales de un sistema RLL estándar, para un GOS del 1%.

La señal de entrada de los controladores de canales de las dos figuras tiene que ser la misma: una trama de 24 slots. Los controladores de canales no tienen la capacidad para conmutar señales de las diferentes entradas y sólo aceptan que una antena distribuida se comuniquen con ellos en cada tiempo de slot. Esto significa que las partes radio multiplexan sus señales en los 24 slots, pero sólo se les permite recibir o transmitir en un grupo de ellos y no en todos como ocurría en el caso de un sistema convencional.

El controlador de canales es una entidad centralizada que contiene todas las funciones propias de una estación base. En el nuevo sistema tendrá la función adicional de repartir los 12 canales entre las diferentes antenas. Las antenas son alimentadas desde la estación base a través de cables coaxiales con algún tipo de amplificador para compensar las pérdidas de transmisión. Para utilizar cable de bajo coste es necesario reducir la frecuencia de las señales. Es posible instalar un convertidor de frecuencia de la banda utilizada por el DECT (1.9 GHz) a una frecuencia intermedia cerca de los 100 MHz.

Para asegurar que terminales que cumplan el estándar GAP del DECT puedan conectarse al nuevo sistema, éste debe transmitir un identificador de célula diferente por cada antena. De esta forma el terminal cree que cada antena es una célula diferente con su correspondiente estación base. El terminal monitoriza, se conecta y realiza trasposos entre las antenas igual que si se tratara de un sistema convencional con diferentes estaciones base.

Existen diversas estrategias para compartir el grupo de 12 canales del controlador de canales entre las antenas distribuidas [CAS5]:

- Asignación de slots fija: Este método consiste en una asignación estática de slots a cada antena distribuida. En nuestro caso el controlador de canales dispone de 12, por lo que si los repartimos entre M antenas, se asignan $12/M$ canales por antena. Las partes radio de las antenas tienen un solo transceptor y multiplexan las comunicaciones en los 12 slots full duplex, pero acceden sólo a los que les corresponden, que son siempre los mismos.
- Asignación del número de slots fija: Este caso es bastante similar al anterior porque a cada antena se le asigna un número fijo de slots, pero no es necesario que sean siempre los mismos. En un principio, parece que este método puede dar mejores resultados porque las partes radio tienen más posibilidades al elegir un canal. En el caso anterior, una parte radio sólo podía escoger un canal de entre $36/M$ (3 frecuencias \times $12/M$ slots), ahora puede elegir de entre los 36 posibles, pero con la condición de que el slot escogido no esté siendo utilizado por otra antena del grupo. Este hecho introduce una complejidad adicional al sistema. En ambos casos, cada antena distribuida puede cursar sólo $12/M$ conversaciones simultáneas.

- Asignación del número de slots variable: La última estrategia propuesta consiste en permitir utilizar en cada antena el número de slots que ésta requiera, pero con dos condiciones. La primera, que un slot no puede ser utilizado por dos antenas simultáneamente y que la suma de los slots utilizados por todas las antenas no supere el número de canales de salida del controlador. En nuestro caso : $n_1 + n_2 + n_3 \leq 12$.

Un controlador de canales puede ser compartido entre diferente número de partes radio, en este estudio se presentan resultados para grupos de 3 y de 4 antenas distribuidas, omnidireccionales o directivas y situadas en el mismo o diferente emplazamiento. Los terminales siempre disponen de antenas directivas de 120°. Los casos estudiados son:

- Sin agrupar: Sistema convencional sin utilizar antenas distribuidas. Estaciones base con antenas directivas de 120°.
- 3 - omni: El sistema tiene partes radio con antenas omnidireccionales. Un controlador de canales controla 3 antenas que cubren tres células hexagonales y que están ubicadas en distintos emplazamientos. En las asignaciones fijas se asignan 4 slots a cada antena.
- 3 - 120 - igual: El sistema tiene partes radio con antenas directivas de 120°. Un controlador de canales controla las tres antenas que cubren los tres sectores del mismo emplazamiento. En las asignaciones fijas se asignan 4 slots a cada antena.
- 3 - 120 - diferente: El sistema tiene partes radio con antenas directivas de 120°. Un controlador de canales controla 3 antenas que cubren 3 sectores orientados en la misma dirección de distintos emplazamientos. En las asignaciones fijas se asignan 4 slots a cada antena.
- 4 - omni: El sistema tiene partes radio con antenas omnidireccionales. Un controlador de canales controla 4 antenas que cubren 4 células hexagonales y que están ubicadas en distintos emplazamientos. En las asignaciones fijas se asignan 3 slots a cada antena.
- 4 - 120 - diferente: El sistema tiene partes radio con antenas directivas de 120°. Un controlador de canales controla 4 antenas que cubren 4 sectores orientados en la misma dirección de distintos emplazamientos. En las asignaciones fijas se asignan 3 slots a cada antena.

6.9.1.1 Asignación de slots fija

La primera asignación estudiada es la que tiene menos complejidad tecnológica ya que consiste en asignar unos slots determinados a cada antena distribuida. En la

figura 6.9.3 se representa el GOS respecto al tráfico cursado por cada RFP que en este caso está formado por dichas antenas distribuidas.

Se observa que para todos los tipos de agrupaciones el sistema está limitado por capacidad, con pequeñas diferencias entre ellos. El efecto de dividir el grupo de 12 canales iniciales en subgrupos de 3 y 4 canales implica una reducción de capacidad. Para los casos en que cada parte radio dispone de 4 canales (3 - omni, 3 - 120 - igual, 3 - 120 - diferente) se consigue una capacidad cercana a 0.8 Erlangs para cada parte radio. Éste es límite máximo que podemos conseguir con los recursos disponibles según la fórmula de Erlang-B. El conjunto de los 12 canales del controlador de canales cursan un total de $0.8 \times 3 = 2.4$ Erlangs frente a los 3.5 que se conseguían sin la distribución de antenas. El efecto de la división de canales es todavía peor si tomamos 4 partes radio para cada controlador de canales (4 - omni, 4 - 120 - diferente), en este caso se consiguen 0.5 Erlangs por parte radio o 2 Erlang por controlador de canales. Asimismo, se observa una pequeña tendencia de mejora para las agrupaciones de antenas omnidireccionales respecto a las directivas de 120° que es debida a que el tráfico global que cursa el sistema en el primer caso es 3 veces inferior al que cursa el sistema en el segundo caso.

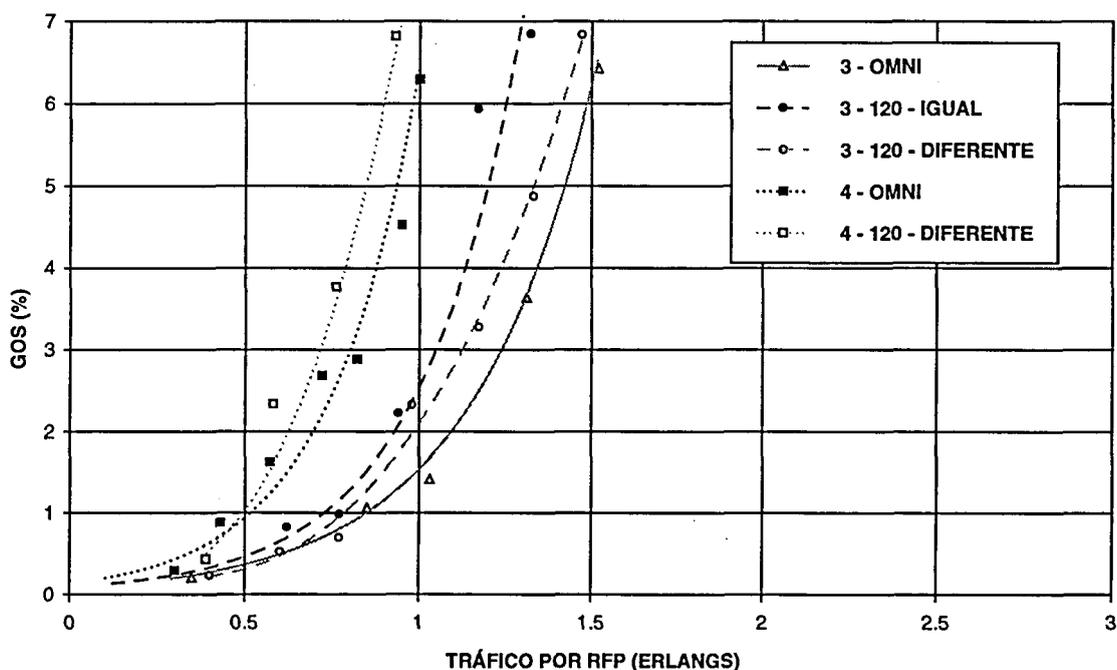


Figura 6.9.3 Antenas distribuidas con asignación de slots fija.

En el caso de tener células hexagonales sectorizadas con antenas de 120°, el hecho de agrupar antenas que pertenezcan al mismo o diferente emplazamiento no repercute en ninguna diferencia significativa. Por lo tanto es mejor agrupar partes radio que estén localizados en el mismo emplazamiento porque se requiere menos

infraestructura. Como consecuencia este caso se ha desestimado y no se representa resultados posteriores.

En todos los casos el tráfico cursado global disminuye respecto al sistema sin agrupaciones, la causa es que el sistema que sin agrupaciones está limitado por interferencias, con agrupaciones lo está por capacidad. En los casos de agrupaciones de antenas directivas la eficiencia por canal también disminuye (tabla 6.9.2) pasando del 29 % al 19 % y 17 % dependiendo de si se trata de agrupaciones de 3 ó 4 antenas respectivamente. No obstante para antenas omnidireccionales la eficiencia por canal mejora, pasando del 15 % sin agrupaciones al 20 % y 17 % para agrupaciones de 3 y 4 antenas respectivamente.

	Tráfico por parte radio	Tráfico por controlador de canales	Eficiencia por emplazamiento (tráfico / número de canales)
3 - omni	0.8 E	2.4 E	$0.85 / 4 = 20 \%$
3 - 120 - igual	0.7 E	2.1 E	$2.1 / 12 = 18 \%$
3 - 120 - diferente	0.75 E	2.55 E	$2.4 / 12 = 19 \%$
4 - omni	0.5 E	2 E	$0.5 / 3 = 17 \%$
4 - 120 - diferente	0.5 E	2 E	$1.5 / 9 = 17 \%$

Tabla 6.9.2 Capacidad y eficiencia de un sistema de antenas distribuidas con asignación de slots fija, para un GOS del 1 %.

6.9.1.2 Asignación del número de slots fija

En la figura 6.9.4 y en la tabla 6.9.3 se pueden observar los resultados obtenidos para una sistema de antenas distribuidas con asignación del número de slots fija. Esta distribución es algo más compleja de implementar que la anterior porque permite a las diferentes antenas distribuidas escoger cualquiera de los 12 slots mientras no esté siendo utilizado en otra. No obstante, en ningún caso pueden ocupar simultáneamente más slots que los de la asignación anterior.

El resultado obtenido es bastante predecible ya que el efecto que produce la posibilidad de cambiar los slots de una a otra parte radio es disminuir las probabilidades de bloqueo y de interrupción debidas a las interferencias. Sin embargo no disminuye la limitación por capacidad. Por ello los resultados y las conclusiones que de ellos se pueden extraer son los mismos que en la asignación de slots fija.

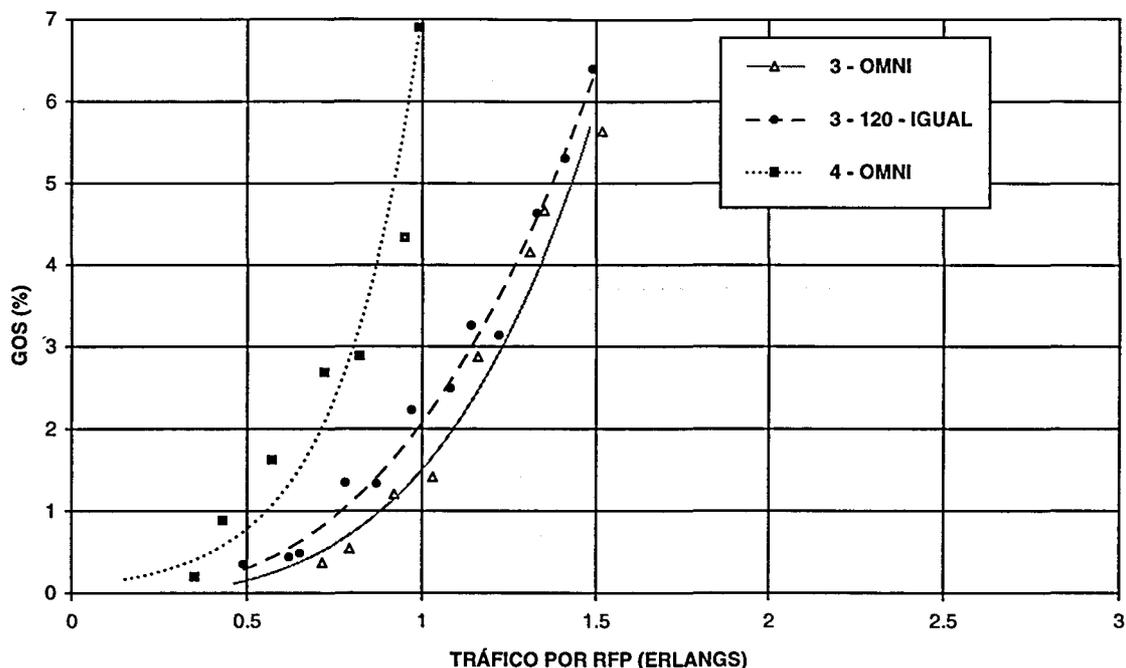


Figura 6.9.4 Antenas distribuidas con asignación del número de slots fija.

	Tráfico por parte radio	Tráfico por controlador de canales	Eficiencia por emplazamiento (tráfico / número de canales)
3 - omni	0.85 E	2.55 E	$0.85 / 4 = 21 \%$
3 - 120 - igual	0.75 E	2.25 E	$2.25 / 12 = 19 \%$
4 - omni	0.55 E	2.2 E	$0.55 / 3 = 18 \%$

Tabla 6.9.3 Capacidad y eficiencia de un sistema de antenas distribuidas con asignación del número de slots fija, para un GOS del 1 %.

6.9.1.3 Asignación del número de slots variable

El siguiente paso es permitir el uso de diferente número de slots en cada parte radio. De esta forma si un terminal debe iniciar una llamada o realizar un traspaso puede utilizar cualquier slot libre del controlador de canales. Este hecho solucionará parte de la limitación por capacidad ya que ahora los 12 canales del controlador están compartidos por todas las antenas distribuidas.

Los resultados de este sistema se representan en la figura 6.9.5 y en la tabla 6.9.4. El efecto de compartir todos los canales disponibles permite que los controladores de canales cursen un tráfico de 5.8 Erlangs. Estos 5.8 Erlangs se dividen entre las

diferentes partes radio de cada controlador, obteniéndose 1.45 Erlangs por antena distribuida con agrupaciones de 4 y 1.9 Erlangs con agrupaciones de 3 antenas. En este caso aún estamos limitados por capacidad pero los canales se usan al máximo. La eficiencia que se obtiene llega al 47 % en todos los casos frente a la que se conseguía sin antenas distribuidas que era del 29 % para antenas directivas y del 15 % para omnidireccionales.

Aunque este método sea más complejo de implementar se consigue una eficiencia máxima. Su desventaja es que no consigue la misma capacidad por emplazamiento de estaciones base que se obtenía sin las antenas distribuidas. Sin embargo, una de las hipótesis de partida era que se utiliza el sistema en entornos de bajo tráfico. Ahora se obtienen 5.8 Erlangs por emplazamiento, mientras que antes y con antenas directivas, se conseguían 10.5 Erlangs. Esto es debido a que los 12 canales que antes eran disponibles en cada estación base ahora deben ser compartidos en cada agrupación. Por consiguiente, con antenas distribuidas tenemos limitación por capacidad y sin ellas limitación por interferencias.

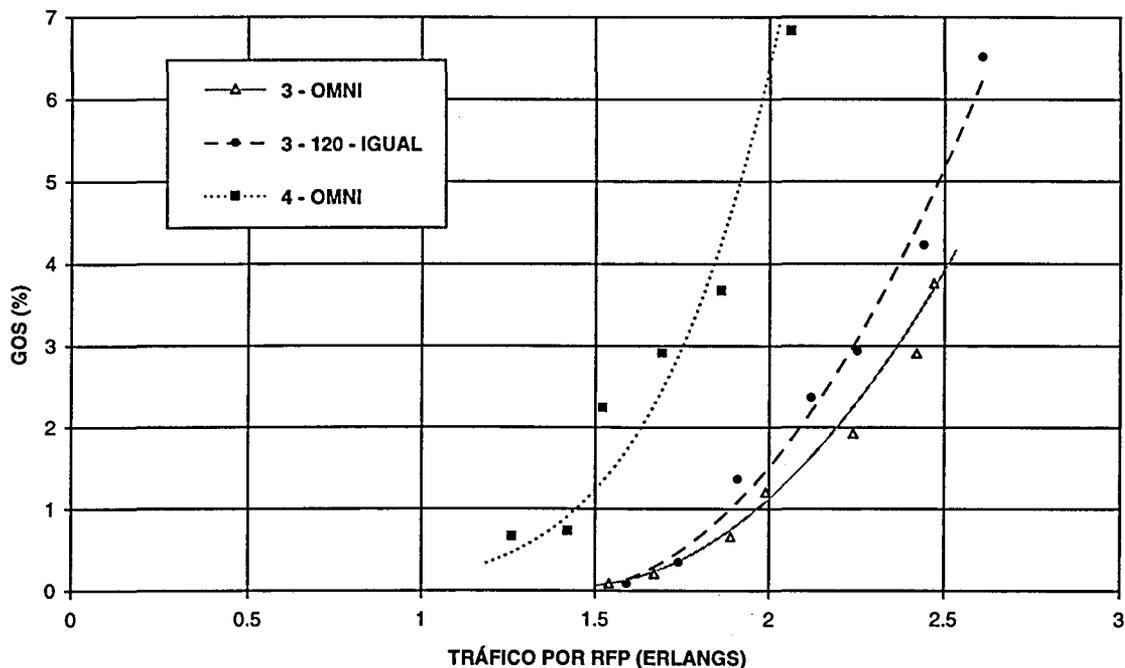


Figura 6.9.5 Antenas distribuidas con asignación de slots variable.

Por otro lado se ha conseguido el objetivo propuesto de disminuir los costes de un sistema cuyos requerimientos eran baja capacidad pero con una cobertura muy extensa; se consigue instalando los equipos mínimos y éstos utilizarlos al máximo. Se dispone de tres configuraciones que permiten adaptar el sistema a las necesidades del usuario mediante tres niveles de tráfico cursado. La agrupación de 3 antenas distribuidas directivas de 120° situadas en el mismo emplazamiento es la que soporta más tráfico pero utiliza más equipos, resultando la más cara. El nivel intermedio son las

agrupaciones de 3 antenas distribuidas omnidireccionales. Finalmente, la configuración que cursa menos tráfico, pero que requiere de menos infraestructura son las agrupaciones de 4 antenas distribuidas omnidireccionales.

	Tráfico por parte radio	Tráfico por controlador de canales	Eficiencia por emplazamiento (tráfico / número de canales)
3 - omni	1.95 E	5.85 E	$1.95 / 4 = 48 \%$
3 - 120 - igual	1.9 E	5.7 E	$5.7 / 12 = 47 \%$
4 - omni	1.45 E	5.8 E	$1.4 / 3 = 47 \%$

Tabla 6.9.4 Capacidad y eficiencia de un sistema de antenas distribuidas con asignación del número de slots variable, para un GOS del 1 %.

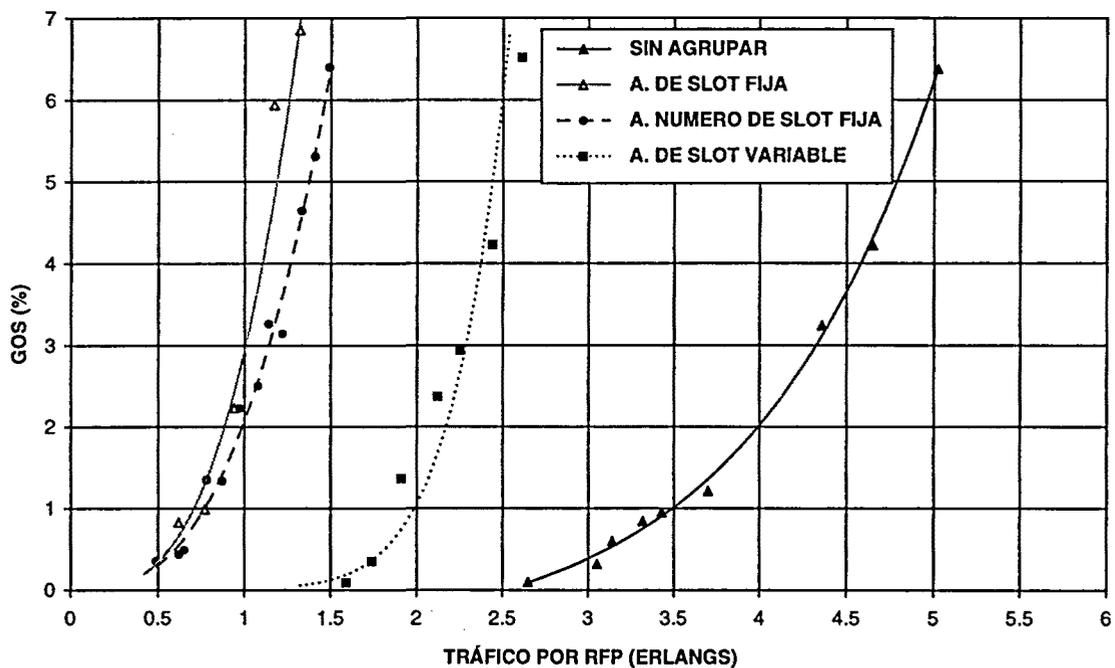


Figura 6.9.6 Antenas distribuidas con agrupaciones "3 - 120 - igual" para los diferentes tipos de distribución de slots.

Para concluir este punto la figura 6.9.6 compara las diferentes estrategias de distribución de slots para las agrupaciones de antenas distribuidas directivas situadas en el mismo emplazamiento. Véase como para agrupaciones con el número de slots por antena fijo, cada parte radio cursa un tráfico muy bajo por lo que no es recomendable utilizar estos mecanismos. El mejor caso es con asignaciones del número de slots

variable ya que el sistema se beneficia de la compartición de los canales entre las diferentes antenas distribuidas.

6.9.1.4 Utilización de mayor número de canales

En el punto anterior se ha visto que la limitación del sistema reside en la falta de canales disponibles en el controlador de canales. Se ha partido de la base de que un controlador de canales de un sistema con antenas distribuidas era igual al de un sistema que no las tuviera. Si existiera la posibilidad de utilizar más canales la capacidad aumentaría. En este apartado se evalúa un sistema con estas características. La figura 6.9.7 presenta las capacidades de sistemas cuyos controladores de canales disponen de más canales para repartir entre sus antenas distribuidas.

Se ha tomado el mejor escenario de los estudiados hasta el momento: se agrupan 3 antenas distribuidas directivas localizadas en el mismo emplazamiento y es posible utilizar cualquier número de slots en cualquier parte radio con la condición de que la suma de slots no supere el número de canales disponibles.

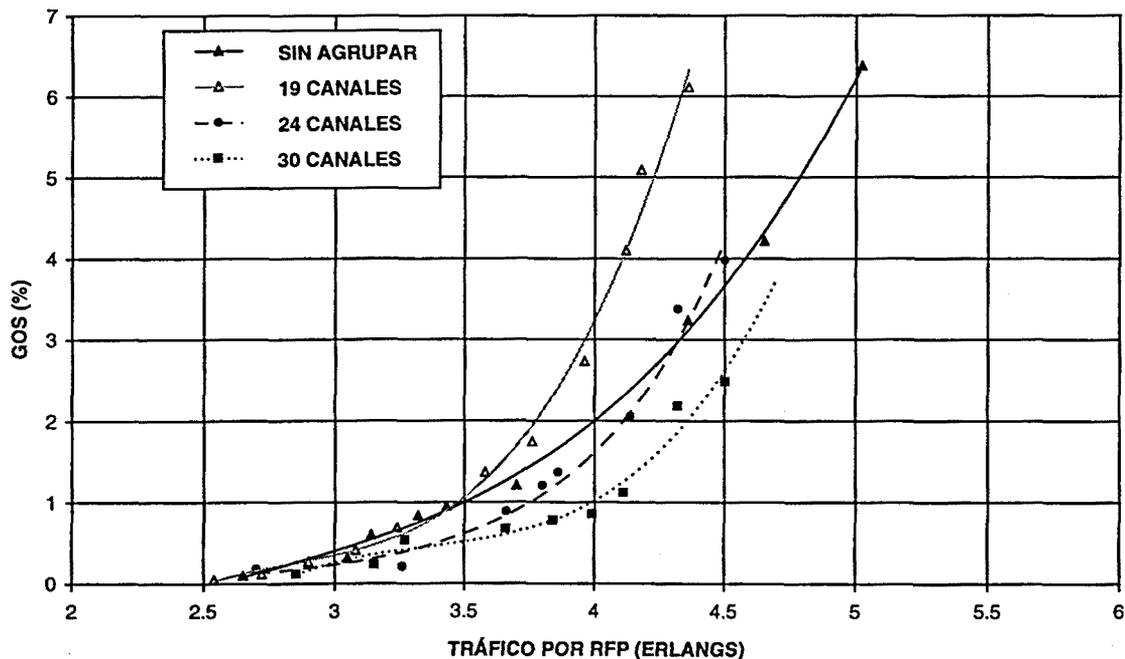


Figura 6.9.7 Antenas distribuidas con agrupaciones 3 - 120 - igual y controladores de canales que disponen de mayor número de canales.

En esta situación el sistema aumenta su complejidad, ahora es posible que una parte radio tenga establecidas más de 12 conexiones simultáneas, con lo cual será necesario más de un transceptor. En particular para los casos de 19 y 24 canales tendremos 2 transceptores en cada RFP y para 30 canales 3. Desde el punto de vista del

controlador de canales, este caso es similar al de un sistema convencional (figura 6.9.1) con más de un transceptor por estación base. En consecuencia, cada controlador de canales podrá aceptar tantas conversaciones simultáneas de las tres antenas distribuidas por el mismo slot, como transceptores tengan las partes radio. Así, en los casos de 19 y 24 canales pueden haber en el conjunto de las 3 antenas distribuidas 2 conversaciones utilizando el mismo slot, y en el caso de los 30 canales pueden existir 3.

De la figura 6.9.7 y la tabla 6.9.5 se observa que si el sistema de antenas distribuidas tiene la posibilidad de compartir un mayor número canales se incrementa su capacidad y también la eficiencia de los recursos. El sistema convencional, trisectorial, puede llegar a cursar un tráfico de 10.5 Erlangs por emplazamiento de estaciones base y para ello dispone de un total de 12 canales por sector o 36 por emplazamiento. Dicho sistema está limitado por interferencias por lo que sus 36 canales están infrutilizados. En particular, para cursar 10.5 Erlangs con una probabilidad de bloqueo del 1 %, se requieren solamente 19 canales. Si al nuevo sistema de antenas distribuidas le dejamos acceder a dichos 19 canales, vemos que para un GOS del 1 % también es capaz de cursar los 3.5 Erlangs por parte radio, pero con una eficiencia del 55 % en lugar del 29 % del sistema convencional. Para tráficos más elevados el sistema con 19 canales, además de la limitación por interferencias, tiene una fuerte componente de bloqueo por capacidad y se comporta peor que el convencional. Se ha comentado anteriormente que las partes radio del sistema de antenas distribuidas precisan de más de un transceptor, este hecho nos permite una mayor libertad en el instante de elegir un canal, decrementando ligeramente la influencia de las interferencias. Por ello, el sistema de 19 canales está prácticamente limitado por capacidad para un tráfico de 10.5 Erlangs por emplazamiento. Añadiendo más canales a la agrupación el tráfico cursado puede incrementarse. En particular, el máximo tráfico cursado se consigue a partir de los 30 canales y es de 4 Erlangs por RFP, con una eficiencia del 40 %. Si aumenta más el número de canales la eficiencia disminuye y no se consigue aumentar el tráfico cursado.

Número de canales	Tráfico cursado por parte radio	Eficiencia en emplazamiento (tráfico / número de canales)
19	3.5 E	$10.5 / 19 = 55 \%$
24	3.75 E	$11.25 / 24 = 47 \%$
30	4 E	$12 / 30 = 40 \%$
36 (sin agrupar)	3.5 E	$10.5 / 36 = 29 \%$

Tabla 6.9.5 Capacidad y eficiencia de un sistema de antenas distribuidas "3 - 120 - diferente" con asignación del número de slots variable y diferente número de canales, para un GOS del 1 %.

Todos los sistemas anteriores disponen tan solo de una franja del espectro asignado al DECT, 3 frecuencias. Dividir el espectro entre los diferentes operadores es útil para evitar interferencias entre sistemas pero como contrapartida disminuye su capacidad.

En el apartado 6.5.1 se vio que un sistema RLL que utilizara las 10 portadoras, antenas directivas de 120° y 1 transceptor estaba limitado por capacidad. Con 2 transceptores las limitaciones por interferencias ya eran superiores a las de capacidad consiguiéndose un tráfico por RFP de 13.9 Erlangs. Para el conjunto de todas las estaciones base localizadas en un mismo emplazamiento se utilizaban un total de 72 canales (24×3), cuando en realidad, para cursar todo el tráfico 41.7 Erlangs (13.9×3) sólo se requieren 55 según Erlang-B. En la figura 6.9.8 se comparan los resultados de un sistema convencional, con antenas directivas de 120° y 2 transceptores utilizando 10 frecuencias con otro que utiliza antenas distribuidas, con agrupaciones tipo "3 - 120 - igual", asignación del número de slots variable y también las 10 portadoras del DECT. El número de canales a compartir se ha escogido ligeramente superior a 55 para evitar pérdidas de calidad por capacidad. Puede observarse que con el sistema de antenas distribuidas se consigue prácticamente la misma capacidad, incluso ligeramente superior, que con el sistema convencional pero utilizando un 20 % menos de canales. La eficiencia por canal llega en este caso al 74 % frente al 58 % que se conseguía sin antenas distribuidas (tabla 6.9.6).

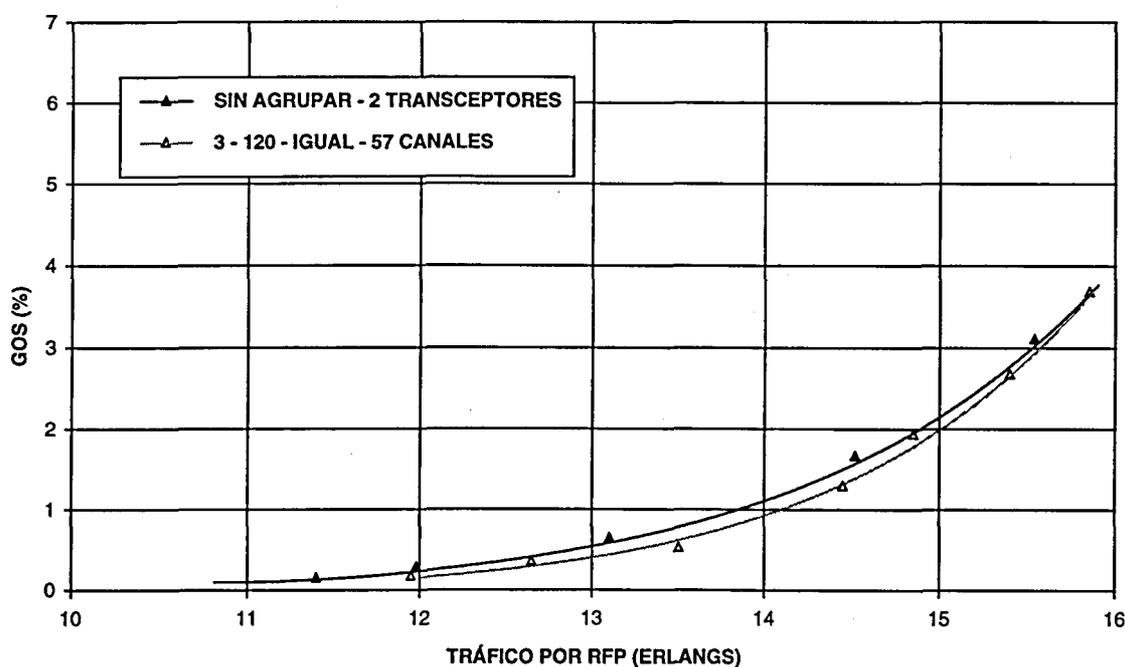


Figura 6.9.8 Antenas distribuidas con agrupaciones 3 - 120 - igual y controladores de canales que disponen de mayor número de canales, cuando se dispone de 10 frecuencias.

La tendencia de las dos curvas del GOS es prácticamente la misma lo que indica que el comportamiento de los dos sistemas respecto a sus limitaciones es semejante. Para tráficos altos, cercanos a los 16 Erlangs por RFP, el sistema de antenas distribuidas que dispone de menos recursos, empieza comportarse peor que el convencional, esto es debido a que se ve afectado por una componente de limitación debida a la falta de canales, mientras que el otro sistema no la tiene.

Número de canales	Tráfico cursado por emplazamiento de estaciones base	Eficiencia en emplazamiento (tráfico / número de canales)
57 (antenas distribuidas)	42.3 E	$42.3 / 57 = 74 \%$
72 (sistema convencional)	41.7 E	$41.7 / 72 = 58 \%$

Tabla 6.9.6 Capacidad y eficiencia de un sistema de antenas distribuidas “3 - 120 - diferente” con asignación del número de slots variable y 10 portadoras, para un GOS del 1 %.

6.9.2 ESTACIONES REPETIDORAS

Las estaciones repetidoras sin hilos son particularmente apropiadas para casos donde es difícil, inconveniente o sencillamente económicamente inviable la instalación de líneas de transmisión para unir las partes radio con sus respectivos controladores de canales. Una estación repetidora es una estación base satélite conectada a la estación base principal mediante un enlace radio que utiliza el mismo estándar DECT. La estación repetidora se sitúa en la frontera de la célula, escucha las transmisiones de la estación base transmitiéndolas después al terminal y viceversa. De esta forma se consigue una extensión del área de cobertura de un sistema DECT. Tan solo requiere una fuente de potencia, que puede ser suministrada por un panel de células fotoeléctricas y baterías recargables [AKE]. Su estructura es comparable al de los de una estación base pero sin los codificadores de voz ni las interfaces de línea. Conceptualmente, para las estaciones base, una estación repetidora es otro terminal cualquiera, y para el terminal, la estación repetidora es una estación base. Estas estaciones repetidoras pueden ser instaladas desde el principio del diseño del sistema o una vez esté en funcionamiento y se encuentren zonas de sombras (figura 6.9.9) o se requiera una extensión de cobertura.

Otro tipo de estaciones repetidoras son aquellas que están unidas con la estación base principal vía un enlace radio punto a punto de microondas o frecuencias ópticas. En este caso se requiere un convertidor de frecuencias que module la señal desde la frecuencia del DECT a la del radioenlace [GAR]. Este tipo de repetidores no son

contemplados en el presente estudio ya que el radioenlace no interfiere en el sistema porque utiliza otro rango de frecuencias. Asimismo, estos repetidores pueden ser considerados como otras estaciones base independientes que en lugar de conectarse mediante cable lo hacen mediante radioenlaces.

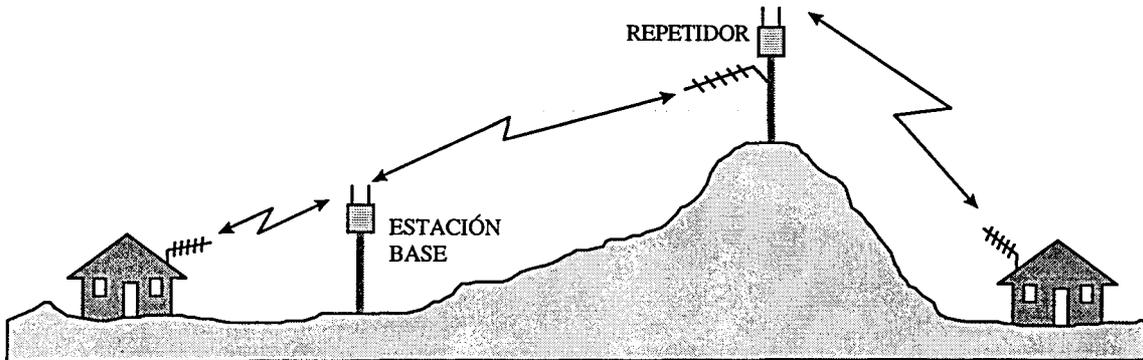


Figura 6.9.9 Utilización de una estación repetidora debido a un área de sombras.

La figura 6.9.10 muestra el área de cobertura de los dos sistemas estudiados para aumentar la cobertura sin una infraestructura excesivamente cara. La estación repetidora sin hilos extiende la cobertura media célula. Esto se debe a que la estación repetidora tiene que estar instalada dentro del área de cobertura de la estación base principal, y por consiguiente existen zonas con varias coberturas solapadas. Por el contrario cada antena distribuida extiende la cobertura toda una célula, pero tiene que conectarse a la estación base mediante algún tipo de cable.



Figura 6.9.10 Áreas de cobertura de un sistema con 6 estaciones repetidoras y otro con antenas distribuidas omnidireccionales con un controlador de canales para 4 partes radio.

La ETSI define varias aplicaciones con dos tipos de estaciones repetidoras [ETR308]. La primera utilización consiste en la presentada en las figuras 6.9.9 y 6.9.11, las estaciones repetidoras, normalmente bajo el control del operador de red, están colocadas en lugares estratégicos aumentando la cobertura del sistema. Sus posibles

usuarios son terminales en casa del abonado que dispone de antenas directivas (figura 6.9.9) o servicios CTM con usuarios móviles que disponen de aparatos de alcance limitado y requieren de distancias de transmisión cortas. Otro tipo de estaciones repetidoras son aquellas que están instaladas en casa del usuario y permiten la movilidad en ella. En estos casos el propietario de la estación repetidora es el mismo abonado (figura 6.9.11) y dependiendo del equipo se pueden realizar funciones de conmutación interna. El presente estudio se enfoca hacia el primer tipo de estaciones repetidoras y dando servicio de bucle de abonado vía radio, es decir usuarios fijos en sus casas.

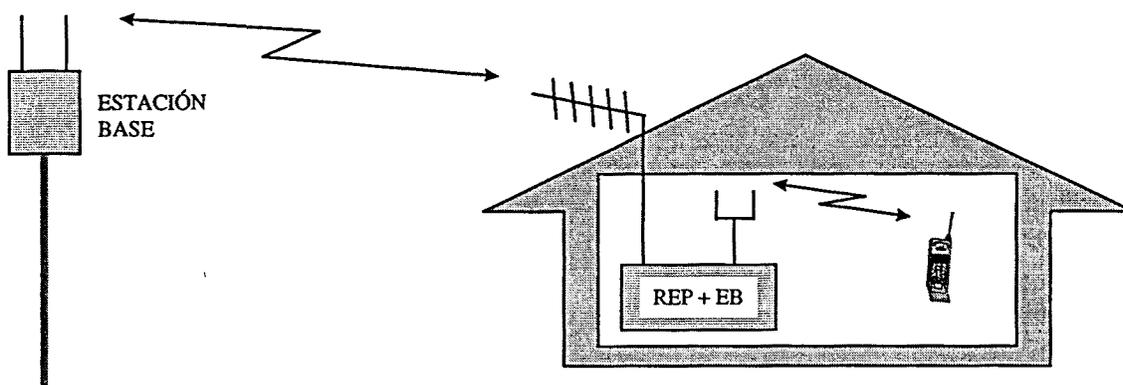


Figura 6.9.11 Estación repetidora que aumenta la cobertura dentro de la casa del abonado.

Una estación repetidora DECT tiene 12 canales o 24 slots. Recibe la señal en un slot y la retransmite en otro. No obstante existe un cierto compromiso entre la capacidad del mismo y la calidad subjetiva que percibe el abonado en cuanto al retardo de la señal. La ETSI contempla en su documento [ETR246] dos tipos de funcionamiento para estaciones repetidoras, dependiendo de si se prefiere una u otra cualidad. A los equipos que ejercen funciones de estaciones repetidoras la ETSI los denomina *Wireless Relay Stations* (WRS).

El primer tipo de WRS son las denominadas “partes radio fijas sin cordón” (*Cordless Radio Fixed Part, CRFP*). Su funcionamiento básico puede observarse en la figura 6.9.12. Cada comunicación entre un terminal y su RFP que requiera de una CRFP utiliza dos canales. Uno de ellos sirve para la comunicación RFP - CRFP y el otro para la CRFP - terminal. Cada enlace realiza sus funciones básicas de forma independiente: procedimientos de establecimiento, traspaso, finalización, etc. La CRFP sólo se encarga de retransmitir la información recibida en un slot por otro. Como puede observarse se crea un retardo adicional de una trama en una de las direcciones dependiendo del slot elegido en cada canal. En la figura el extremo perjudicado es la estación base que recibe la señal transmitida por el terminal en el slot correcto pero de la siguiente trama. Este retardo adicional es percibido por el usuario como un eco que puede resultar especialmente molesto si se encadenan varias CRFP.

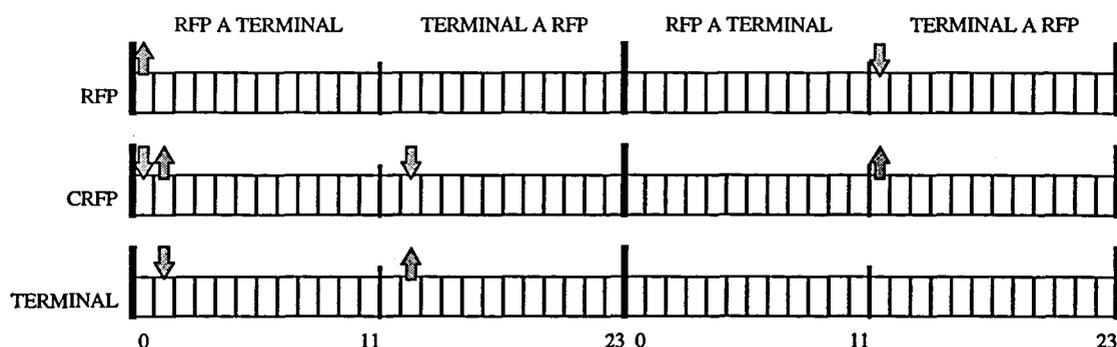


Figura 6.9.12 Mecanismo de funcionamiento de una CRFP.

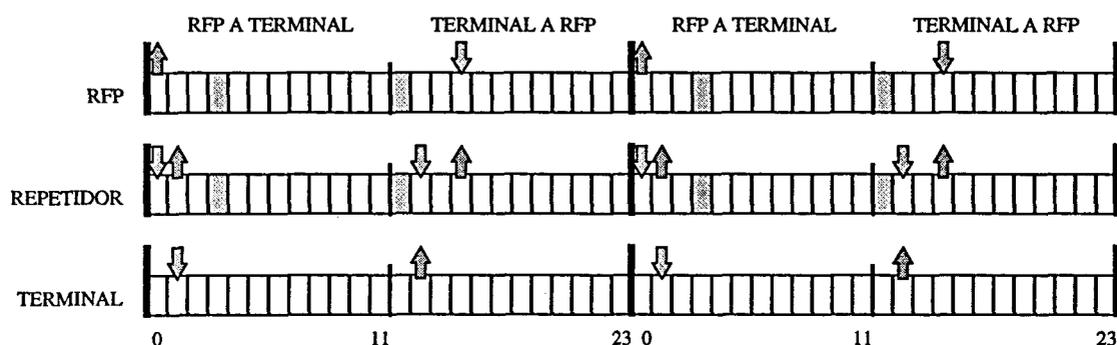


Figura 6.9.13 Mecanismo de funcionamiento de un repetidor.

El otro tipo de estaciones repetidoras tratan de solucionar el problema del retardo, la ETSI las denomina repetidores (*Repeaters*). La solución reside en utilizar 3 canales para la transmisión tal y como muestra la figura 6.9.13. Una vez el terminal ha escogido un canal para comunicarse con el repetidor, éste debe habilitar dos canales con la RFP, uno en un slot anterior al utilizado por el terminal y otro en una posición posterior. De esta forma la información que transmite el terminal será enviada por el repetidor a la RFP en el slot posterior, y la información que transmita la RFP deberá transmitirse al repetidor antes de que éste deba enviarla de nuevo al terminal, es decir por el canal del slot anterior.

La utilización de repetidores no debe afectar al terminal por lo que éste siempre tendrá un sólo par de slots ocupados, con la restricción de que no pueden utilizarse los dos extremos. Para evitar su uso, el repetidor puede enviar información como si se trataran de slots ciegos. La estación base requiere dos pares de slots que sólo están activos en un sentido, mientras que el repetidor utiliza tres pares de slots pero dos de ellos también están activos sólo en una sola dirección de la conexión.

Estas transmisiones adicionales consumen parte de la capacidad del sistema que resulta en estos casos muy baja. Para evitar desaprovechar los slots que quedan vacíos existen algunas alternativas [BON2] que utilizan pares no simétricos de slots para la

transmisión y recepción en la estación base y el repetidor, consiguiéndose hasta un máximo de 5 conversaciones simultáneas en el repetidor.

En este estudio se han elegido las estaciones tipo CRFP ya que nuestro sistema no contempla la posibilidad de repetidores en cascada y por lo tanto el retardo no es tan perjudicial. Por otra parte, este tipo de estaciones repetidoras son las que utilizan menos recursos para una sola comunicación y por lo tanto las que proporcionan la máxima capacidad.

El escenario estudiado es una extensión del utilizado en las anteriores secciones. El área de simulación está formada por 100 células como las de la figura 6.9.10 donde cada estación base utiliza 6 WRSs tipo CRFP para aumentar su cobertura. La distancia entre estaciones base es ahora de 1200 metros y entre estación base y CRFP de 300 metros, con lo que el radio de cobertura de una estación base y sus WRSs resulta de 600 metros. Se supone un espectro partido donde sólo se dispone de 3 frecuencias. Todas las antenas del sistema tienen un diagrama de radiación omnidireccional.

Este escenario básico descrito tiene el inconveniente de que las CRFPs están instaladas en los extremos de la célula que son las peores posiciones debido a las fuertes pérdidas de propagación. Otra desventaja que tienen es que las conexiones que requieren una CRFP están utilizando dos canales con lo que su probabilidad de bloqueo e interrupción resultante es la suma de las respectivas probabilidades de los dos canales. También se debe tener en cuenta que los grados de servicio presentados hasta el momento eran valores medios, y su distribución no es uniforme en todo el área de servicio, ya se ha comentado anteriormente que las peores posiciones son las fronteras de las células. Como consecuencia, el enlace RFP - CRFP siempre resulta con baja calidad y los terminales que lo utilizan son la gran mayoría. Si consideramos que un terminal se conecta a la estación más cercana, tan solo aquellos que estén a una distancia menor de $D/4$, siendo $D/2$ la distancia entre una RFP y una CRFP se conectan directamente a la estación base. Aproximando el área de cobertura de una estación base con sus WRLs a un círculo de radio D , solamente una $1/16$ parte no pasa por el CRFP. Con ello queremos hacer notar que si el enlace entre estación base y CRFP es de baja calidad las probabilidades de bloqueo e interrupción del sistema aumentan en gran medida.

Para solucionar este problema se prevé que el enlace entre la RFP y la CRFP sea de mayor calidad que uno de convencional. En los resultados presentados a continuación se han considerado dos alternativas para mejorar su calidad. La primera que el enlace sea de visión directa sin ningún objeto dentro de la primera zona de Fresnel que pueda entorpecer la trayectoria de la señal. Con ello se supone que el enlace no sufre pérdidas debidas al factor de sombras, por lo que éste siempre es de 0 dB para dicho enlace. La segunda alternativa es disponer dos antenas en la CRFP: una antena omnidireccional para comunicarse con los terminales como en un caso normal y otra antena adicional, directiva (60°), que esté permanentemente apuntada hacia la RFP. Siempre que la CRFP

transmita o reciba señales de terminales utiliza la antena omnidireccional y cuando se comunica con la RFP utiliza la direccional.

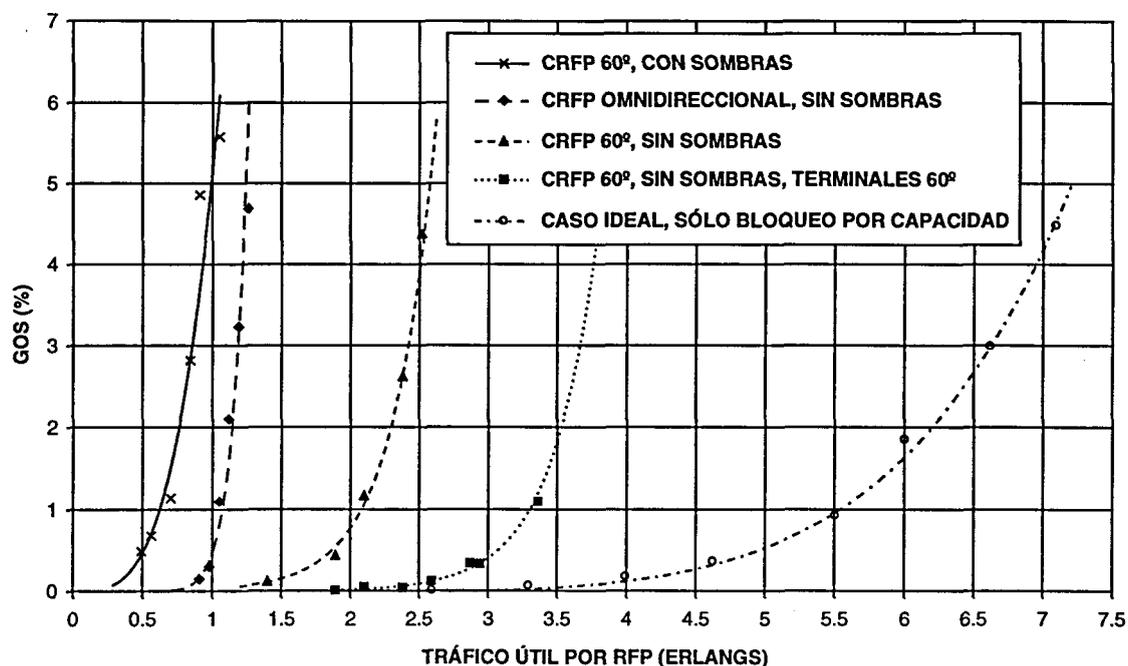


Figura 6.9.14 Capacidad de tráfico de un sistema con CRFPs.

La figura 6.9.14 presenta los resultados obtenidos con el sistema descrito. El tráfico cursado por RFP hace referencia a todo el tráfico que la RFP tiene que enviar a la red fija para que está lo conmute. Parte de este tráfico procede de CRFPs y otra parte, de los terminales que se conectan directamente a la estación base.

En la figura se representa un caso ideal de referencia en el que se supone que no existen interferencias y todas las llamadas son bloqueadas por falta de recursos. En este caso la probabilidad de interrupción de las llamadas es 0. Se observa que el tráfico cursado para un grado de servicio del 1 % es de 5.5 Erlangs, ligeramente inferior al límite que proporcionan los 12 canales. Esto es debido a que en nuestro caso la gran mayoría de llamadas, el 94 %, se conectan a la estación base a través de una CRFP (solamente 1/16 se conecta directamente a la RFP). El procedimiento de establecimiento de llamada lo inicia el terminal. Primero establece una comunicación entre él mismo y la CRFP y luego ésta debe establecer el otro enlace con la RFP. Sin embargo, mientras que el terminal tiene 12 slots posibles para conectarse a la CRFP, ésta sólo dispone de 11 para el nuevo enlace con la RFP ya que uno lo está utilizando para la conexión con el terminal y no es útil aunque en la RFP esté libre. Esta limitación introduce algunas pérdidas por falta de recursos adicionales rebajando ligeramente la capacidad del sistema. La probabilidad de bloqueo en el enlace terminal - CRFP es prácticamente nula debido al muy bajo tráfico que cursan, aproximadamente una sexta parte del que cursa la RFP.

En la figura 6.9.14 observamos que si consideramos un enlace entre la CRFP y su respectiva RFP de baja calidad se obtiene una capacidad mínima. Considerando por separado las dos mejoras que se habían comentado para disminuir las pérdidas en el citado enlace, antenas directivas de 60° en la CRFP apuntando a la RFP y visibilidad completa, se obtiene para el primer caso un tráfico cursado por estación base de 0.65 Erlangs y para el segundo de 1 Erlang. Para estos niveles de tráfico tan bajos toda la limitación procede de las interferencias y en particular, el mayor problema continua estando en el enlace RFP - CRFP, para ello debemos asegurar que se cumplan las dos mejoras simultáneamente. En dicho caso el tráfico se multiplica por dos llegando hasta los 2 Erlangs por RFP.

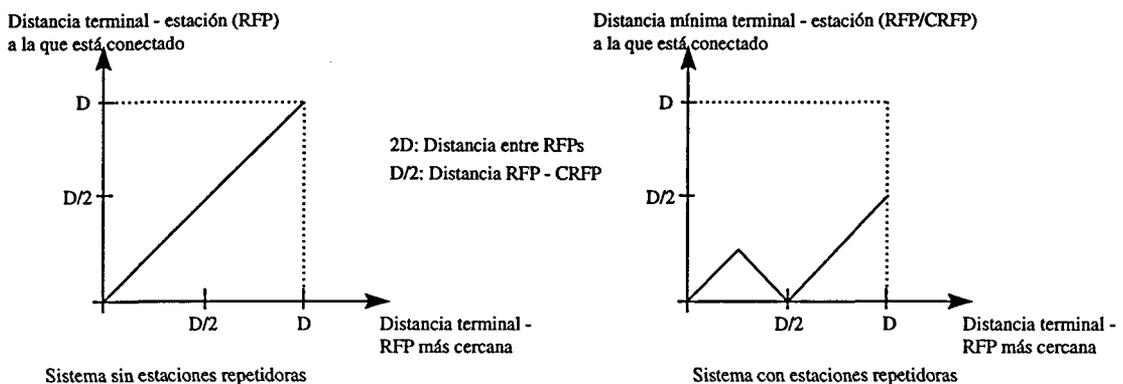


Figura 6.9.15 Distancia mínima terminal - estación fija respecto a la distancia terminal RFP más cercana para sistemas con y sin estaciones repetidoras.

Recordemos que para un sistema convencional con antenas omnidireccionales en las partes fijas y terminales, el tráfico que podía cursar cada estación base era de 1.8 Erlangs. En el caso de utilizar estaciones repetidoras, con un enlace RFP - CRFP de alta calidad que no degrade el GOS del sistema, sobrepasamos ligeramente los 2 Erlangs. En los dos casos la limitación es por interferencias ya que para estos tráficos la limitación por falta de recursos es inexistente. La diferencia está en que los terminales se encuentran, en media, a menor distancia de la parte fija a la que están conectados en un sistema con estaciones repetidoras que en otro sin ellas. Aunque en el modelo simulado la distancia entre RFPs de los sistemas sea diferente, ya se vio con anterioridad que si no existían problemas con las potencias recibidas y las sensibilidades de los receptores, el valor absoluto de esta distancia no modificaba los resultados (figura 6.4.6), siempre y cuando se respeten las distancias máximas permitidas por las temporizaciones de trama y por la dispersión temporal de la señal. De tal forma, si observamos el comportamiento de la distancia del terminal a la estación a la que están conectados (sin importar si es RFP o CRFP) de la figura 6.9.15, vemos que cuando se tienen estaciones repetidoras la distancia es menor. Esto es debido a que cuando el terminal se aleja de la RFP tiene la posibilidad de conectarse a una CRFP, disminuyendo la distancia en lugar de aumentar como ocurre en el caso convencional. De todas formas, el sistema continua estando muy limitado por las interferencias.

El siguiente paso a realizar y que no representa un coste adicional para el operador es la sustitución de las antenas omnidireccionales de los terminales por otras directivas y permanentemente apuntadas hacia la mejor RFP o CRFP. Si consideramos que las nuevas antenas tienen un diagrama de radiación de 60° el tráfico cursado es un 65 % superior al anterior, es decir llega hasta 3.3 Erlangs por RFP. Según se vio en la figura 6.5.4, un sistema convencional con antenas omnidireccionales en las estaciones base y directivas de 60° en los terminales cursaba un tráfico de 5.8 Erlangs por RFP. Con el sistema de estaciones repetidoras tenemos el mismo tipo de antenas pero la capacidad disminuye si bien la distancia terminal - estación fija media continúa siendo inferior. En este caso se debe tener en cuenta otro factor. Cada conversación que utiliza una estación repetidora, que son el 94 % del total, está utilizando dos canales, con lo que el tráfico real que está soportando el sistema es prácticamente el doble del útil. Si consideramos el tráfico total de los 6 repetidores y la estación base principal ($3.3 + 3.3 * 0.94 = 6.4$ Erlangs), el sistema está cursando un 10 % más de tráfico que el sistema sin repetidores (5.8 Erlangs), aunque sólo la mitad del primero es tráfico útil para los usuarios. Nótese que mientras el caso sin repetidores está limitado por capacidad el sistema con repetidores lo está por interferencias.

En todos los casos el sistema se encuentra limitado por interferencias consiguiéndose tráficos bajos. Estos resultados eran de esperar ya que la utilización de antenas omnidireccionales en las estaciones base perjudica en gran medida a la capacidad. Sin embargo, con el último modelo propuesto se consiguen 3.3 Erlangs por RFP frente a un máximo, marcado por el número de recursos, de 5.5 Erlangs, lo que representa un 61 % de la capacidad máxima. Cabe recordar que estos sistemas están diseñados para abarcar grandes áreas de cobertura con baja densidad de usuarios. En particular el documento de la ETSI [ETR310] define capacidades requeridas para áreas rurales con bajas capacidades de tráfico que oscilan entre los 0.1 Erlangs/Km² y 7.3 Erlangs/Km². El sistema descrito que proporciona 3.3 Erlangs por RFP equivale a una densidad de tráfico, suponiendo una separación entre estaciones base de 1200 metros, de aproximadamente 2.75 Erlangs/Km²; capacidad que se enmarca perfectamente dentro de este tipo de aplicaciones definidas por la ETSI.

6.9.3 CONCLUSIONES

Para que el servicio de bucle de abonado vía radio tenga una amplia aceptación debe ser rentable en todo tipo de entornos. En áreas con altas densidades de usuarios se requieren estaciones base con radios de cobertura pequeños que puedan cursar grandes capacidades de tráfico. En los apartados anteriores se ha visto que el DECT es un buen candidato para implementar este tipo de servicios. Sin embargo, existen otros entornos donde los requerimientos son opuestos. Son zonas rurales donde la densidad de tráfico es baja y para hacer rentables los equipos suelen utilizarse pocas estaciones base omnidireccionales, con grandes radios de cobertura. Uno de los puntos débiles del DECT es su poca potencia de transmisión (250 mW), aunque actualmente se permite

utilizar antenas directivas que concentren esta potencia en una sola dirección; de todas formas este parámetro está siendo revisado por la ETSI para aumentarlo. El otro punto débil es que sólo tolera distancias relativamente cortas entre transmisor y receptor debido a la ausencia de ecualizador en los receptores. Anteriormente se vio que sistemas que utilizan estaciones base con antenas omnidireccionales soportan capacidades de tráfico muy bajas que comportan una utilización de los recursos poco eficiente. En sistemas de estaciones base con grandes radios de cobertura, es típico encontrar accidentes geográficos que produzcan zonas de sombras donde la señal no llega. Para estos casos también resulta ineficiente y caro instalar una estación base solamente para dar servicio a una pequeña zona en sombra.

Con todo ello se quiere hacer notar que es interesante el desarrollo de sistemas que permitan aumentar la eficiencia de los recursos disponibles y su cobertura, teniendo en cuenta que el tráfico requerido no será excesivamente elevado.

En este apartado se han estudiado dos soluciones que son aptas para diferentes circunstancias: las antenas distribuidas y las estaciones repetidoras. Una antena distribuida es una estación base que alimenta múltiples antenas y que pueden estar geográficamente dispersas para aumentar la cobertura. Una estación repetidora es una estación base satélite que no está conectada a la red fija sino que debe comunicarse con una estación base principal. Su función es recibir señales por unos determinados slots y retransmitirlas por otros.

La principal diferencia entre las dos es que mientras las primeras están unidas a su controlador mediante un cable, las segundas utilizan el mismo mecanismo radio. Las antenas distribuidas tienen la ventaja de que no producen interferencias adicionales al sistema, ofrecen el doble de cobertura que las estaciones repetidoras y sus equipos son más sencillos. Como contrapartida está la instalación del cableado requerido. Las estaciones repetidoras son muy fáciles de instalar y debido a su autonomía son especialmente aptas para lugares de difícil acceso. Como desventajas están el retardo que se introduce en la comunicación y la utilización de dos canales para cada comunicación, que comporta un mayor nivel de interferencia y el consumo de más recursos. Existen alternativas de estaciones repetidoras que permiten el uso de más de dos canales por conexión y que evitan los retardos de una trama en un enlace.

Uno de los principales parámetros de diseño de las antenas distribuidas es la forma en que se distribuyen los slots por los cuales pueden transmitir y recibir las diferentes antenas. La capacidad del sistema está estrechamente ligada al hecho de que el número de slots asignados a cada antena sea fijo o variable. En los dos casos el sistema está limitado por falta de recursos, pero si se permite compartir el número de canales entre las diferentes antenas, la capacidad es mayor que si se dividen los 12 canales en subgrupos y se asigna uno a cada antena.

La mejor forma de repartir los canales es permitiendo que cada antena utilice los que requiera, sin que se utilice un mismo slot en dos antenas o que el número de slots

sobrepase el máximo permitido. En este caso, la capacidad obtenida por el grupo de antenas y controlador de canales es 5.8 Erlangs, límite permitido por los 12 canales. Con éste método, aparte de ampliar la cobertura, también se ha conseguido aumentar la eficiencia de los canales. Con un sistema convencional se obtiene para antenas omnidireccionales en todos los equipos radio, una utilización de canales del 15 % y del 30 % con antenas directivas de 120°. El sistema de antenas distribuidas descrito consigue una eficiencia del 48 %.

El otro parámetro a definir al diseñar un sistema con antenas distribuidas es el tipo de agrupación que se desea. En el presente estudio se han considerado dos tipos de agrupaciones: las que utilizan antenas distribuidas omnidireccionales y las que las utilizan directivas. Mientras que las primeras extienden al máximo la cobertura con la infraestructura mínima y proporcionan poco tráfico, las segundas son un termino medio entre las primeras y los sistemas convencionales. El tráfico cursado por controlador de canales para los dos tipos de antenas es prácticamente el mismo, aunque con las antenas omnidireccionales el tráfico global es menor.

Se ha visto que la principal limitación de la capacidad del sistema es la falta de canales en los controladores de canales. Para poder comparar este tipo de sistemas con los convencionales, se ha supuesto que existen 12 canales que unen el controlador de canales con el controlador de estaciones base. Se ha conseguido la eficiencia máxima permitida por la limitación del número de canales. En este momento, si se desea aumentar más la eficiencia, el único recurso que queda es compartir un mayor número de canales. En caso de disponer de más canales en el controlador de canales, se consiguen dos objetivos: aumentar la eficiencia y aumentar la capacidad que estaba limitada por la falta de canales. Para un sistema de 3 frecuencias la máxima eficiencia se consigue con 19 canales y es del 55 % para un tráfico de 3.5 Erlangs por agrupación. El tráfico máximo se consigue a partir de 30 canales, en este caso la eficiencia es del 40 % con un tráfico de 4 Erlangs por agrupación.

En los casos que se utilizan más de 12 canales por agrupación, al ser posible que una antena pueda cursar cualquier número de conversaciones, inclusive el número total de canales, las antenas distribuidas deben tener suficientes transceptores para que sea posible. De esta forma se instalan 2 ó 3 transceptores en las antenas distribuidas, que aparte de permitir cursar más conversaciones simultáneas, también permiten disminuir la limitación por interferencias debido a que es más difícil que una estación base tenga slots ciegos.

Cuando se requiera el uso de antenas distribuidas deberá buscarse un compromiso entre todos los parámetros que influyen: mayor complejidad tecnológica porque deben distribuir el acceso a los slots por parte de las estaciones base; menos canales entre el controlador de canales y el controlador de estaciones base porque se utilizan de forma más eficiente; al compartir un mayor número de canales se requieren más transceptores en las antenas; al tener más transceptores en las antenas la capacidad del sistema aumenta.

Las estaciones repetidoras, aparte de utilizar más de un canal para una conexión, tienen la propiedad que el enlace radio que une la estación base principal con la repetidora es el más utilizado y a la vez se encuentra en una de las peores posiciones de la célula. Se ha visto que si no se toman medidas para proporcionar una buena transmisión en dicho enlace la capacidad del sistema es mínima. Para compensar el hecho de que la estación repetidora esté en la frontera de la célula se ha supuesto que la estación repetidora dispone de una antena directiva apuntando permanentemente a la principal. Además se considera que el citado enlace tiene una visibilidad perfecta, no existe ningún elemento que se interfiera en la primera zona de Fresnel, ni existen reflexiones, por lo que puede considerarse que la atenuación por sombras es de 0 dB.

En estas condiciones si comparamos un sistema con repetidores con otro sin ellos encontramos dos circunstancias que influyen en la capacidad. En el sistema con repetidores, la distancia media entre los terminales y las partes fijas a las que están conectados es menor, en consecuencia su relación C/I aumenta. Como contrapartida, las llamadas que utilizan repetidores requieren de dos canales aumentando el nivel de interferencias y disminuyendo la relación C/I .

Se han estudiado sistemas que utilizan antenas omnidireccionales en los terminales consiguiéndose 2 Erlangs por RFP, y otros que utilizan antenas directivas de 60° , y que llegan a cursar un tráfico de 3.3 Erlangs por RFP. Ambos casos están dentro de los niveles de tráfico requerido por la ETSI para entornos rurales con bajas densidades de tráfico.

6.10 COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO EN ENTORNOS DE TRÁFICO NO UNIFORME

El diseño de sistemas de telecomunicaciones móviles celulares es un proceso complejo que requiere de grandes cantidades de datos medidos y de previsiones. Incluso bajo las circunstancias más ideales, cuando los sistemas móviles celulares crecen, aparecen distribuciones de tráfico no uniforme, que pueden convertirse en zonas con altas capacidades de tráfico también denominadas "*hot spots*". Para aliviar este tipo de tráfico inesperado en determinadas zonas se pueden buscar varias soluciones como la división y sectorización de células y reubicación de canales [YUM].

La división y sectorización de células consiste en dividir una célula en varias de tamaño inferior. En el primer caso las nuevas células tienen la misma geometría que la original pero un radio de cobertura menor. En el segundo caso, los diagramas de radiación de las antenas se estrechan, con lo que se requieren más estaciones base en el mismo emplazamiento para cubrir el área original.

Ambos métodos son muy eficientes si las áreas de alta densidad de tráfico son permanentes. No obstante, si éstas son fenómenos temporales debidas a la movilidad de los usuarios, el incremento de recursos instalados resulta infrutilizado y poco eficiente durante gran parte de tiempo.

Otra técnica utilizada es la reubicación de canales desde las células adyacentes hacia la célula que soporta más tráfico. Cuando se emplean sistemas con asignación fija de canales este método resulta bastante complejo de gestionar ya que se requieren varias planificaciones frecuenciales que deben variar a lo largo del tiempo. Sin embargo, en sistemas de asignación dinámica de canales como el DECT, esta reubicación de canales se realiza de forma automática, sin ningún tipo de control adicional y permite una buena eficiencia [MAN]. Uno de los puntos fuertes del DECT es que es capaz de seguir las zonas de alto tráfico mientras se mueven por el área de servicio.

En este apartado se estudia la capacidad que tiene un sistema de bucle de abonado vía radio implementado con el DECT para absorber de forma eficiente fuertes variaciones de tráfico en áreas limitadas. En la simulación de este entorno se han dispuesto una o varias zonas cuadradas, de diferente extensión, donde se ofrece más tráfico que en el resto de la superficie, y dispuestas en diferentes posiciones respecto a las estaciones base. Para poder comparar estos sistemas con los resultados obtenidos en los anteriores apartados, las gráficas siguientes presentan el GOS del sistema respecto al tráfico medio de toda la superficie. En las zonas de más tráfico se ofrece el triple del tráfico medio, mientras que en el resto de superficie, el tráfico ofrecido será ligeramente inferior a la media. En las figuras se representan los grados de servicio de los usuarios que aparecen dentro de la zona de alto tráfico, de los que aparecen fuera y de la media de los dos tipos. Un usuario pertenece a uno de los dos tipos dependiendo de su posición y no de la estación base a la que se conecte.

El entorno simulado dispone de 3 estaciones base por emplazamiento, con antenas directivas de 120° en todos los equipos radio y se permite el uso de 3 de las 10 frecuencias de que dispone el DECT.

6.10.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA CON UNA ZONA DE ALTO TRÁFICO DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

En este apartado se evalúa la incidencia de una zona de alto tráfico de medidas comparables a las de una célula hexagonal. El *hot spot* es un área cuadrada de 600 metros de lado situada en diferentes posiciones con relación a las estaciones base presentadas en la figura 6.10.1. En la posición 1 el *hot spot* está centrado justo encima del área de cobertura de las estaciones base de un sólo emplazamiento, mientras que en las restantes se encuentra en las áreas de cobertura de dos o más emplazamientos, abarcando más estaciones base.

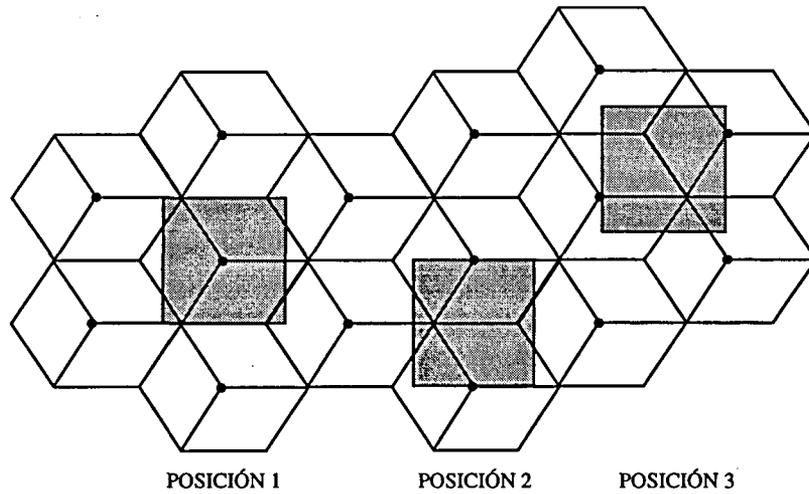


Figura 6.10.1 Posiciones relativas de las zonas de alta densidad de tráfico respecto a las estaciones base.

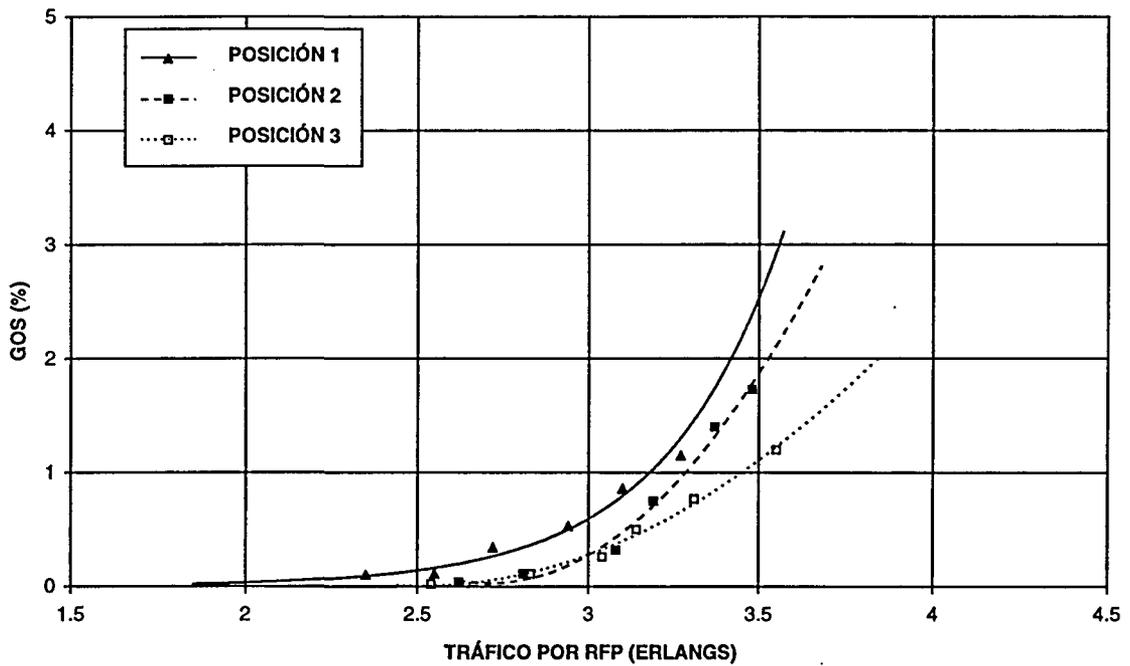


Figura 6.10.2 GOS de un sistema RLL con un área de alta densidad de tráfico situada en varias posiciones respecto a las estaciones base.

La figura 6.10.2 representa el grado de servicio medio de todos los usuarios para las diferentes posiciones del *hot spot*. Puede observarse que no existen grandes diferencias de resultados entre los tres casos, se consiguen capacidades que varían entre 3.2 Erlangs por RFP hasta 3.45. Recordemos que para un sistema con distribución de tráfico uniforme la capacidad es de 3.5 Erlangs por RFP, con lo que la diferencia es

mínima. Sin embargo, como la cantidad de usuarios que están dentro del *hot spot* es muy inferior al total de los que aparecen en toda el área, una medida del GOS medio para todos los usuarios no es muy representativa, ya que enmascara la realidad de la zona de alto tráfico.

Resulta más interesante comprobar la calidad que obtienen los usuarios que están dentro del *hot spot*, representada en la figura 6.10.3. Puede observarse que el tráfico ha descendido considerablemente y que para las capacidades antes mencionadas, cercanas a 3.5 Erlangs por RFP, los usuarios de dentro del *hot spot* no obtienen calidades razonables. Nótese, sin embargo, que estos usuarios están en un entorno donde el tráfico ofrecido es 3 veces superior a la media que indica la gráfica, por lo que en el peor caso, donde para un GOS del 1 % tenemos una capacidad de 2.5 Erlangs por RFP, el usuario se encuentra realmente en un entorno donde se ofrecen aproximadamente 7.5 Erlangs por RFP, muy superior a todos los anteriores.

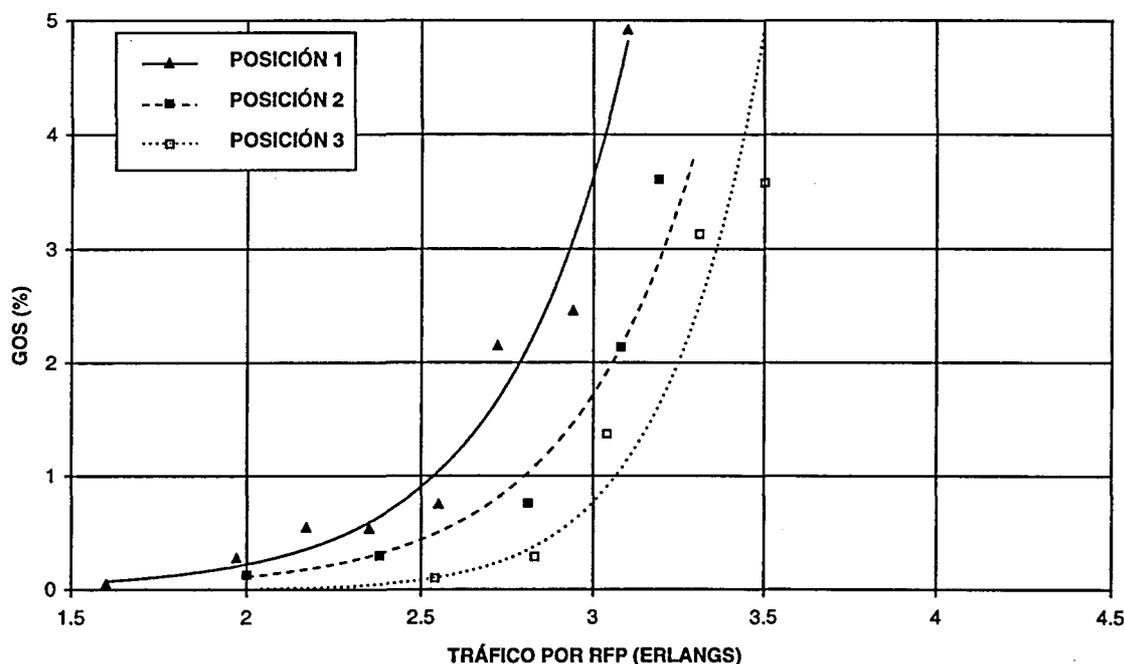


Figura 6.10.3 GOS de los usuarios situados dentro de la zona de alta densidad de tráfico.

La posición de la zona de alta densidad de tráfico en relación a la posición de estaciones base influye significativamente en el grado de servicio de los usuarios aparecidos de la zona de alta densidad. El comportamiento del sistema es el que cabría esperar, cuando la sobrecarga de tráfico se reparte entre más estaciones base los usuarios obtienen mejor calidad que si este mismo tráfico lo tiene que soportar un número menor de estaciones base. De esta forma, la peor ubicación es la Posición 1, ya que el *hot spot* se encuentra justo encima de un emplazamiento de estaciones base. Para esta posición, el tráfico medio que puede cursar el sistema para que los usuarios de dentro la zona de

alto tráfico tengan un GOS del 1 % es de 2.5 Erlangs por RFP. En la Posición 2, la zona con más densidad de tráfico se reparte entre las estaciones base de dos emplazamientos y es posible cursar 2.8 Erlangs por RFP. Finalmente, cuando el *hot spot* está entre 4 emplazamientos, Posición 3, se llega a obtener 3.05 Erlangs por RFP.

Los resultados de este modelo se han presentado respecto al tráfico medio que cursan todas las estaciones base del sistema. En la zona de alto tráfico se ofrece el triple de tráfico que en el resto del área, con lo que el tráfico ofrecido en esta zona varía de entre 7.5 y 9 Erlangs por RFP. Sin embargo, para obtener una probabilidad de bloqueo del 1 % el tráfico máximo que pueden cursar los 12 canales de una estación base es de 5.8 Erlangs. Si se observa el tráfico real que cursan las estaciones base que se encuentran ubicadas dentro del *hot spot* es de 5.8 Erlangs, el máximo que pueden cursar. El tráfico ofrecido restante lo cursan las estaciones base vecinas al *hot spot* por dos motivos.

El primero porque la geometría del *hot spot* no le permite adaptarse perfectamente a la forma de las coberturas de las estaciones base, y se solapa ligeramente sobre coberturas de estaciones base que están fuera de él (figura 6.10.1). Con ello, usuarios que aparecen dentro del *hot spot* se conectan a estaciones base situadas fuera del mismo.

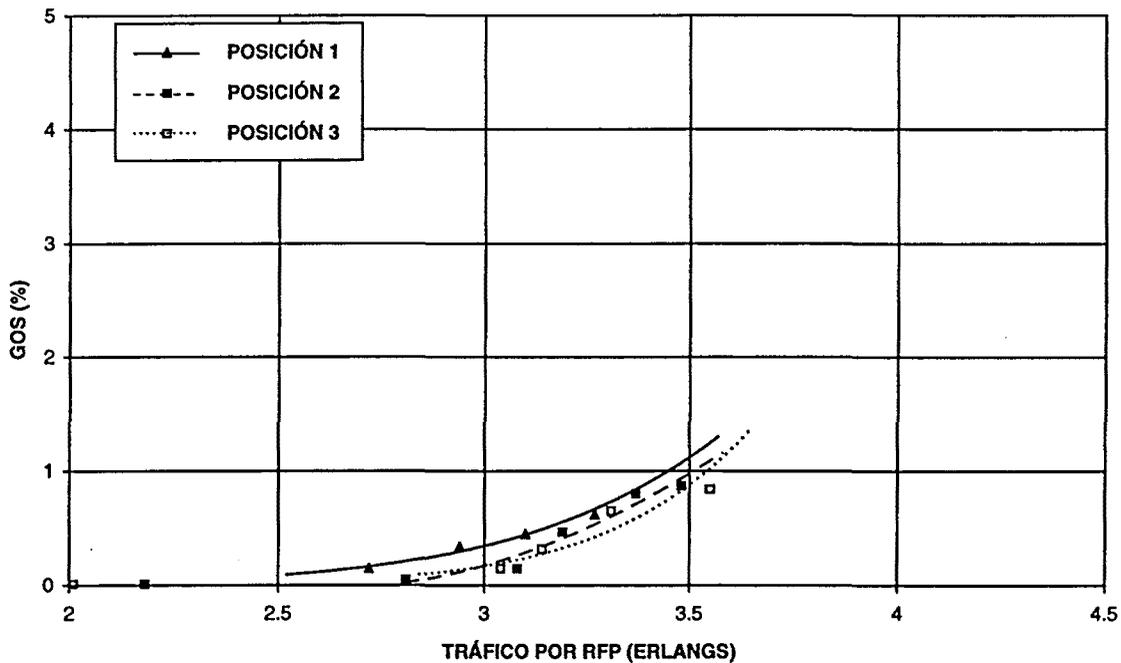


Figura 6.10.4 GOS de los usuarios situados fuera de la zona de alta densidad de tráfico.

El segundo motivo que desvía usuarios que aparecen dentro *hot spot* hacia estaciones base de fuera es el factor aleatorio con distribución lognormal debida a

sombras. Para cada usuario que aparece en el área de simulación se calcula la potencia recibida de todas las estaciones base. La potencia recibida de cada una de ellas depende de dos factores, la distancia a la que se encuentra y la variable aleatoria debida a sombras que es diferente para cada dirección. La combinación de los dos factores hace que un usuario no siempre se conecte a la estación base más cercana. Si la distribución de usuarios es uniforme en toda el área y consideramos que un usuario debería pertenecer a la estación base más cercana, existe un intercambio de usuarios de unas estaciones base hacia otras que se compensa. Finalmente, cada estación base acaba teniendo los usuarios que le corresponderían si este efecto no tuviera lugar. En una situación donde se tiene una zona con más densidad de usuarios, el flujo de usuarios saliente es superior al entrante, por lo que las estaciones base vecinas al *hot spot* reciben más usuarios de los que ofrecen, cursando una parte del tráfico ofrecido dentro del *hot spot*.

De esta forma aunque se ofrezca un tráfico equivalente superior a los 5.8 Erlangs por RFP dentro del *hot spot* es posible cursarlo ya que se desvía hacia otras estaciones base.

Los usuarios que se encuentran fuera de la zona de alto tráfico apenas ven su calidad degradada por la posición del *hot spot* (figura 6.10.4). Su situación es muy buena respecto a los que se encuentran dentro y para los tráficos que éstos permiten manejar, los primeros apenas tienen ninguna limitación.

La figura 6.10.5 resume los diferentes resultados obtenidos para un escenario con una zona de alta densidad de tráfico en la Posición 1. Se observa la gran diferencia que existe entre los usuarios que aparecen dentro del *hot spot* y los de fuera. La media está más cercana a los usuarios de fuera ya que estos aparecen en mayor número.

Para todas las posiciones de la zona de alta densidad de tráfico, el sistema se encuentra limitado por falta de canales en las estaciones que se encuentran afectadas por *hot spot* y por interferencias en las que no. Al estar limitado por capacidad, la mejor situación será aquella en que el *hot spot* aparezca sobre el mayor número estaciones base, ya que de esta forma el tráfico ofrecido a cada estación base es menor. Si se desea que el GOS de todos los usuarios no sobrepase el 1 %, aquellos que se encuentren en la zona con más tráfico son los que limitan al sistema, llegando al GOS del 1 %, mientras que el resto disfrutan de una calidad mucho más alta, cercana al 0.1 %.

Se observa como el DECT es capaz de reubicar los canales de que dispone de forma automática y sin ningún tipo de planificación adicional, absorbiendo las puntas de tráfico hasta el límite que le permite su número de canales. Debe tenerse en cuenta que al tener un *hot spot* de dimensiones bastante reducidas, comparables al área de una célula hexagonal, las interferencias no afectan a la capacidad del sistema ya que son pocas las estaciones base que cursan alto tráfico. En un apartado posterior se estudia la posibilidad de tener un *hot spot* de mayores dimensiones pudiéndose observar el efecto perjudicial de dichas interferencias.

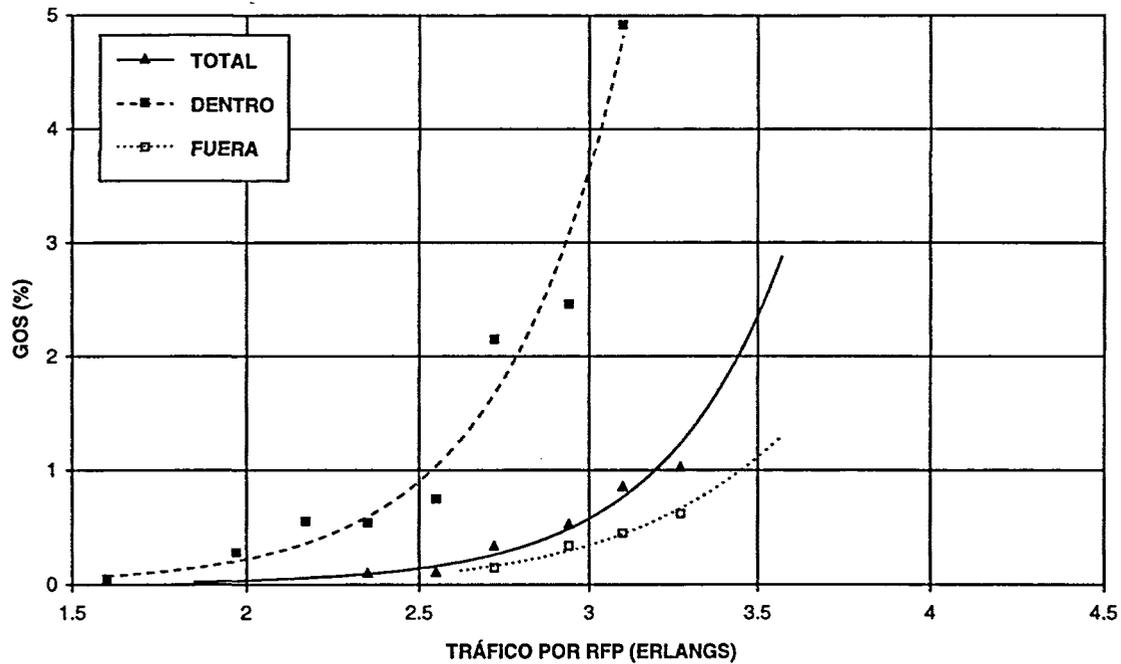


Figura 6.10.5 GOS de los distintos tipos de usuarios para un sistema con una zona de alta densidad de tráfico situada en la posición 1 respecto a las estaciones base.

Si la planificación del sistema se hubiera realizado con un sistema de asignación fija de canales (FCA), para cursar el mismo tráfico que el modelo estudiado, con una distribución uniforme de tráfico uniforme, que es de 3.5 Erlangs por RFP, se hubieran instalado 9 canales en cada estación base. En caso de aparecer algún pico de tráfico, no se puede absorber con el mismo grado de servicio sin modificar la planificación del sistema. Si de todas formas se trata de cursar el mismo tráfico que cursan las estaciones base DECT de dentro del *hot spot*, 5.8 Erlangs, la probabilidad de bloqueo que se obtendría es del 6.7 %, muy superior a la ofrecida por un sistema de asignación dinámica de canales (DCA) como el DECT.

El protocolo DECT contempla la posibilidad de intentar acceder a varias estaciones base durante un establecimiento o traspaso de llamada. Este mecanismo es especialmente interesante cuando la limitación es por falta de recursos, ya que se comparten 24 canales entre dos estaciones base en lugar de tener 12 en exclusiva. Sin embargo también se vio con anterioridad que cuando la limitación es por interferencias, aquellas llamadas conectadas a una segunda estación base tienen una relación C/I media inferior por recibir menos potencia y con ello una mayor probabilidad de interrumpirse.

En la figura 6.10.6 se presentan los resultados para un entorno igual a los anteriores, con una zona de alta densidad de tráfico situada en la Posición 1 pero con la posibilidad de acceder a dos estaciones base, realizando 7 intentos sobre la primera y 3 sobre la segunda. En este caso no se permite reapuntar la antena del usuario cuando accede a la segunda estación base.

Para los usuarios de dentro del *hot spot* se ha pasado de una capacidad media de 2.5 Erlangs por RFP a 2.7 Erlangs, lo que representa un 8 %. Para un sistema sin zonas de alto tráfico, con el sistema limitado por interferencias, el incremento que se obtenía era del 6 %. Los usuarios que aparecen fuera del *hot spot* tienen un incremento algo inferior, del 4.3 %.

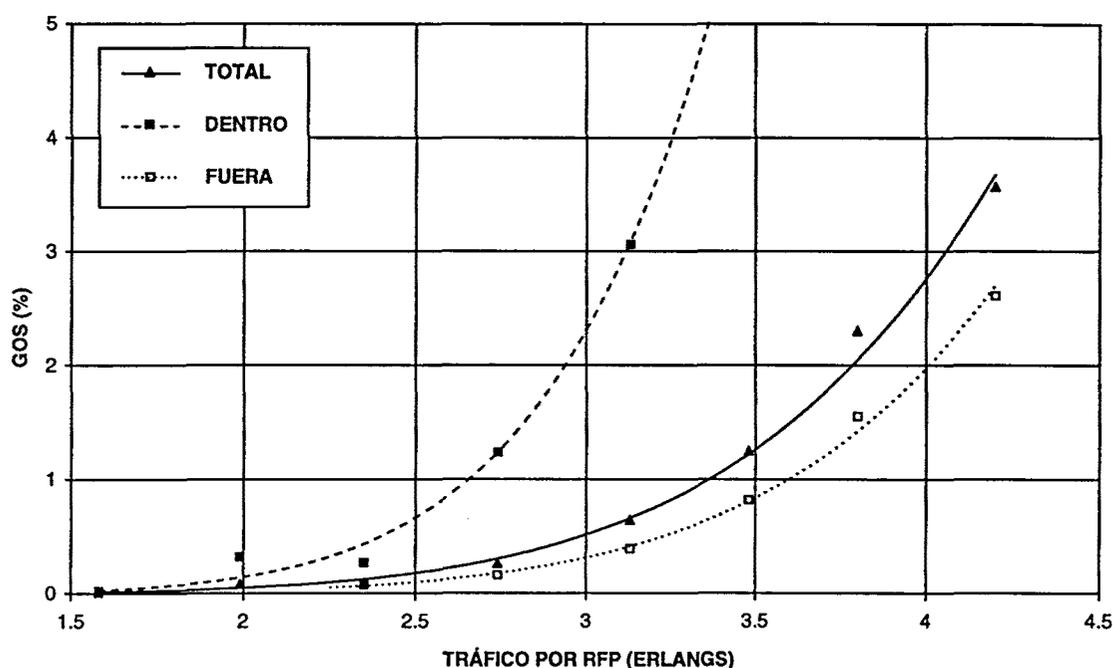


Figura 6.10.6 GOS de un sistema con una zona de alta densidad de tráfico, con la posibilidad de seleccionar una segunda estación base sin reapuntamiento.

Ya se vio en apartados anteriores que un sistema que accede a una segunda estación base sin posibilidad de reapuntar la antena del terminal hacia la nueva estación base no consigue toda la capacidad que este mecanismo le permite. En la figura 6.10.7 se presentan los resultados obtenidos para el mismo sistema anterior pero con reapuntamiento del terminal. De esta forma el terminal recibe tanto la primera como segunda estación base por el máximo del diagrama de radiación de su antena. Se puede observar que en estas circunstancias los dos tipos de terminales aumentan significativamente su capacidad. Los usuarios de dentro del *hot spot* llegan a un GOS del 1 % cuando las estaciones base cursan en media 3.2 Erlangs, un 28 % de incremento respecto a los 2.5 Erlangs que se consiguen con acceso a una sola estación base. Si se tienen en cuenta los usuarios de fuera del *hot spot* las estaciones base pueden cursar 4.05 Erlangs, frente a los 3.45 sin acceso a la segunda estación base, un 17 % más. Este incremento es el mismo que se consigue con un sistema convencional con una distribución uniforme de usuarios.

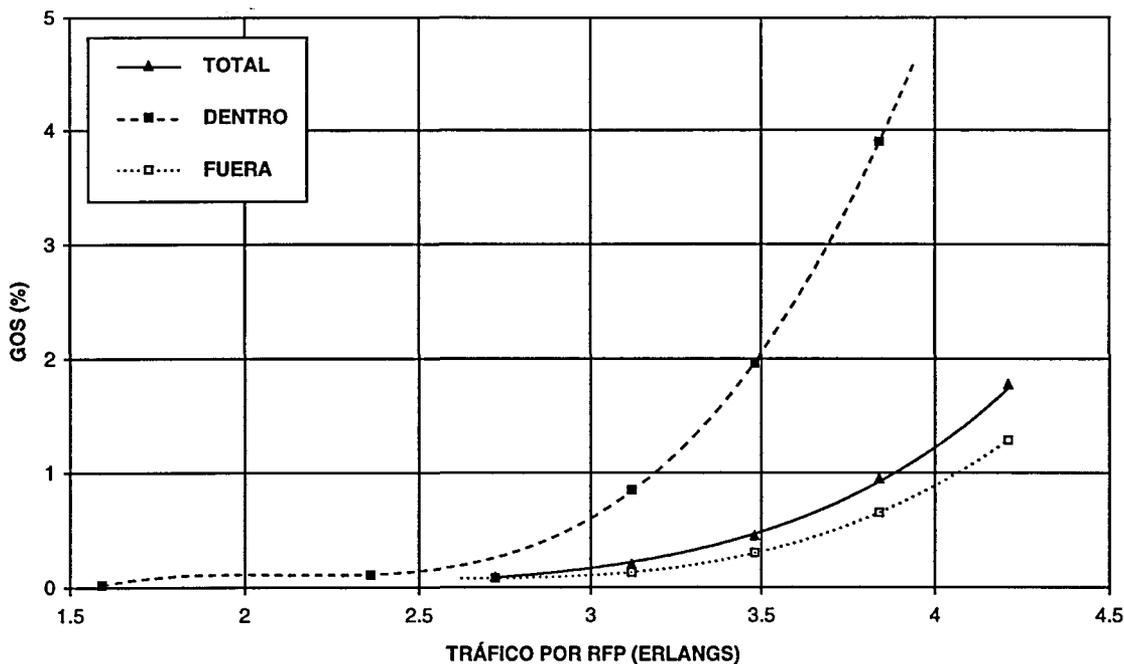


Figura 6.10.7 GOS de un sistema con una zona de alta densidad de tráfico, con la posibilidad de seleccionar una segunda estación base con reapuntamiento.

6.10.2 EVALUACIÓN DEL SISTEMA CON UNA ZONA DE ALTO TRÁFICO DE GRANDES DIMENSIONES

En este apartado se estudia el efecto que produce tener una zona de alto tráfico de mayores dimensiones. Se ha escogido un cuadrado de lado 1000 metros situado en la posición que presenta la figura 6.10.8 y que abarca aproximadamente las estaciones base situadas en 3 emplazamientos.

En la figura 6.10.9 se presentan los grados de servicios de los usuarios que aparecen dentro del cuadrado de alto tráfico, de los que aparecen fuera y de su media. Se observa como sus calidades son inferiores al caso de tener un *hot spot* de menor tamaño. Este efecto viene dado por dos causas. La principal es la falta de canales que existe dentro del *hot spot*. Al igual que en el caso anterior, las estaciones ubicadas dentro cursan los 5.8 Erlangs permitidos por sus 12 canales y sus usuarios están limitados por falta de recursos, con la diferencia de que ahora los usuarios situados más al interior del *hot spot* tienen menos posibilidades de acceder a una estación base situada en el exterior. La segunda causa es que, a pesar de que el tráfico por RFP dentro del *hot spot* ha decrecido, al haber más estaciones base que cursan este tráfico más elevado, el nivel de interferencias también crece causando pérdidas de llamadas. Con todo se consigue cursar una media 2.3 Erlangs por RFP, para que los usuarios de dentro del *hot spot* tengan un grado de servicio del 1 %.

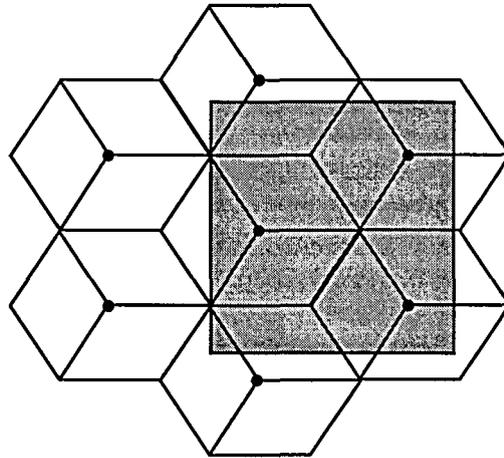


Figura 6.10.8 Posición relativa de la zona de alto tráfico respecto a las estaciones base.

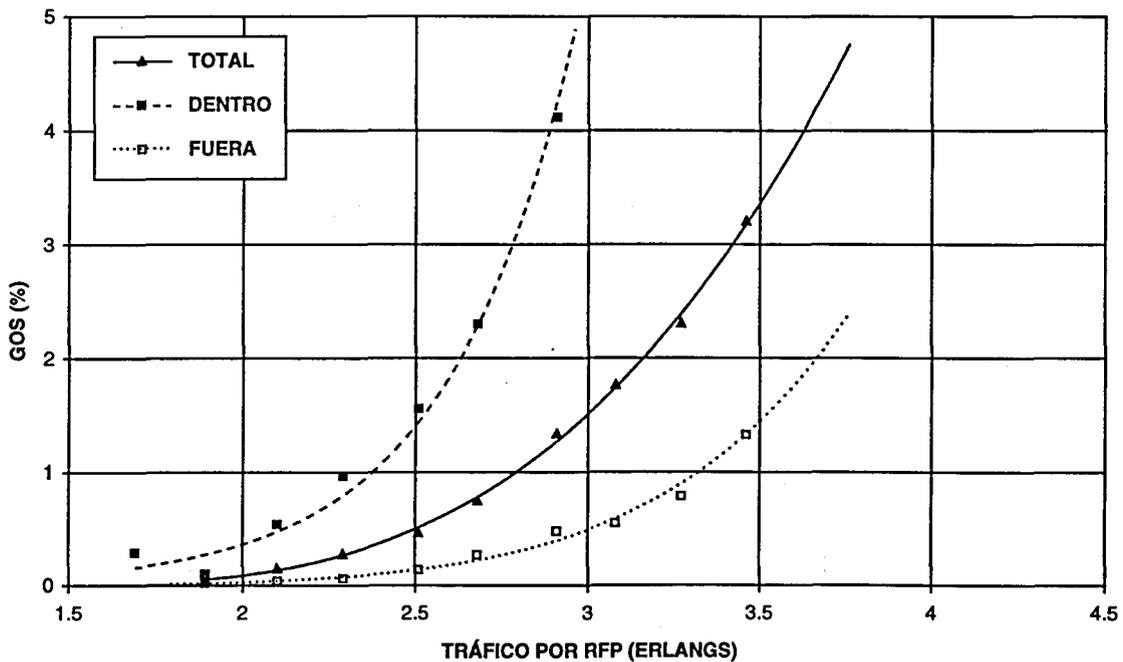


Figura 6.10.9 GOS de un sistema con un área de alta densidad de tráfico de grandes dimensiones.

La calidad de los usuarios exteriores no es uniforme, aquellos que están más cercanos al *hot spot* tendrán más interferencias y su calidad será peor que los situados en posiciones alejadas. Si tenemos un *hot spot* de mayores dimensiones, también existirán más usuarios externos afectados por él y como consecuencia su calidad se verá mermada. En el caso estudiado, se pasa de 3.45 Erlangs para el *hot spot* menor a 3.3 Erlangs para el mayor.

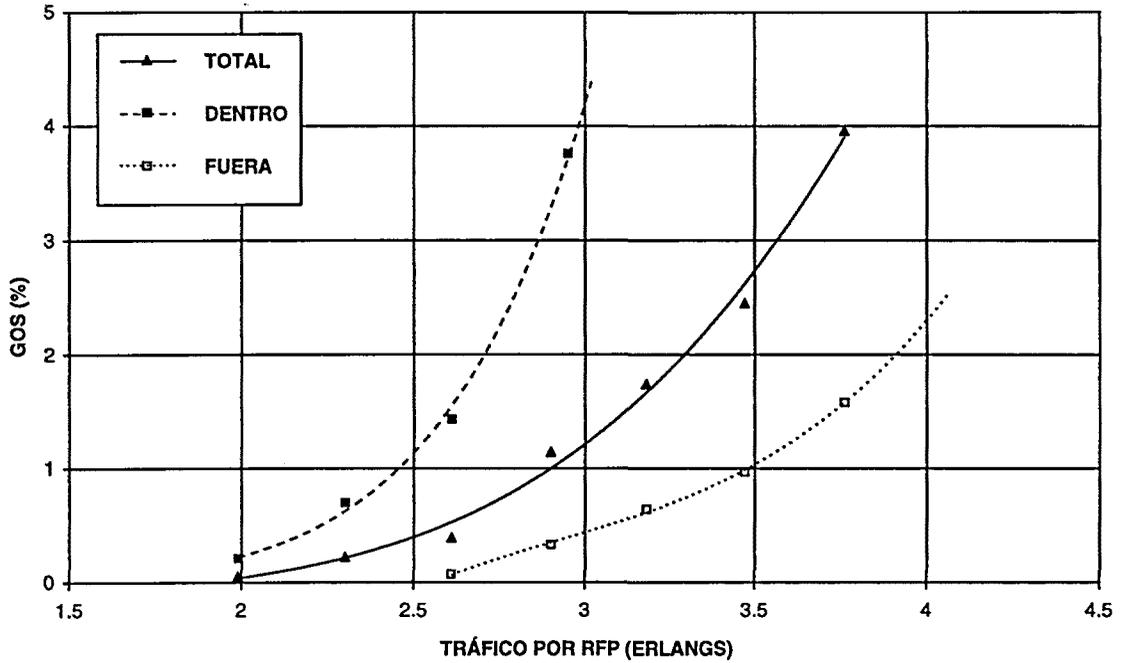


Figura 6.10.10 GOS de un sistema con un área de alta densidad de tráfico de grandes dimensiones, con la posibilidad de seleccionar una segunda estación base sin reapuntamiento.

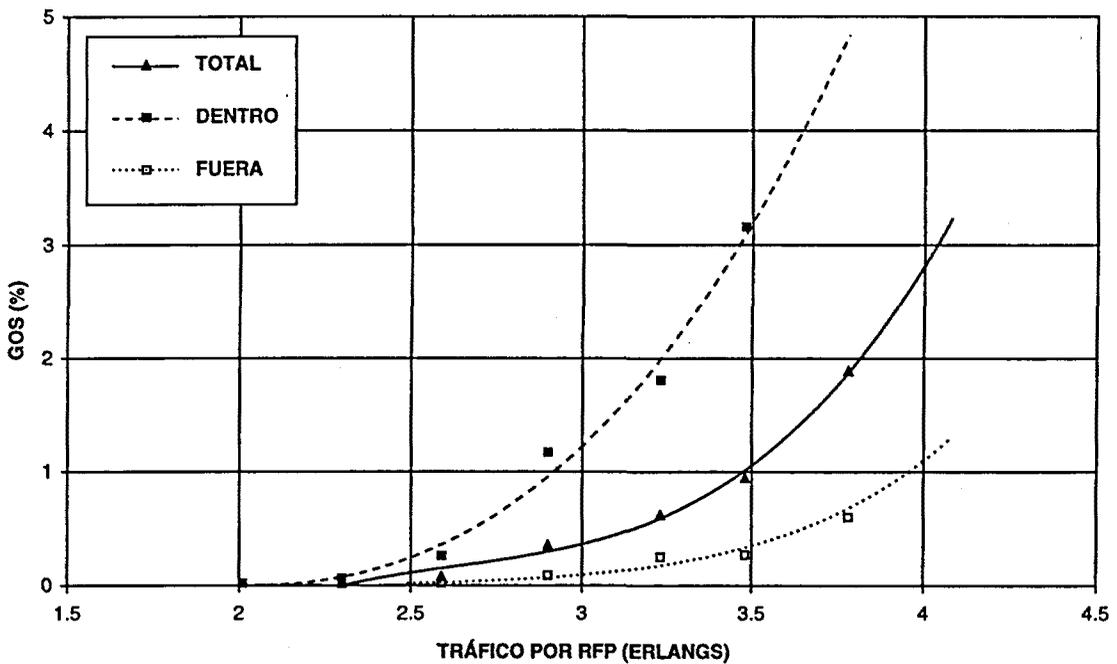


Figura 6.10.11 GOS de un sistema con un área de alta densidad de tráfico de grandes dimensiones, con la posibilidad de seleccionar una segunda estación base con reapuntamiento.

Para este caso también se ha estudiado el efecto que causa el poder acceder a una segunda estación base. La figura 6.10.10 presenta un escenario donde los terminales, al intentar establecer una conexión o realizar un traspaso, realizan 7 intentos en una primera estación base y 3 en una segunda sin reapuntar. Las capacidades obtenidas mejoran el caso sin acceso a una estación base en un 9 % para los usuarios que aparecen en el interior del *hot spot* y en un 6 % para los del exterior. Las mejoras conseguidas son similares a las del caso del *hot spot* menor, alcanzando mayores ganancias para zonas limitadas por falta de recursos que por interferencias.

La tendencia es similar cuando se tiene la posibilidad de reapuntar el terminal hacia la segunda estación base (figura 6.10.11). Los incrementos obtenidos respecto al caso sin acceso a la segunda estación son del 26 % para los usuarios de dentro del *hot spot* y del 20 % para los de fuera. Al igual que sin reapuntamiento, en este caso los resultados también son muy similares a los del *hot spot* pequeño.

6.10.3 APARICIÓN SIMULTÁNEA DE VARIAS ZONAS DE TRÁFICO ELEVADO

En muchas ocasiones las zonas aisladas con tráfico elevado no aparecen solas, puede darse el caso de que surjan varias simultáneamente. En este apartado se ha estudiado el caso en que aparecen tres *hot spots* de 600 metros de lado en dos situaciones. En la primera aparecen dispersos de forma aleatoria en el área de simulación con una separación mínima entre ellos de 600 metros. En el segundo caso, también aparecen de forma aleatoria pero se centran en emplazamientos de estaciones base como representa la Posición 1 de la figura 6.10.1. De esta forma se puede comparar con el caso de tener solamente uno.

La figura 6.10.12 presenta los resultados cuando se sitúan los *hot spots* en posiciones aleatorias. Para los usuarios aparecidos dentro del *hot spot* se consigue un tráfico de 2.85 Erlangs por RFP, que es un promedio de los tres casos de distintas posiciones con un solo *hot spot*. Con ello podemos decir que si tenemos varias zonas donde se ofrece alto tráfico, no se influyen entre ellas siempre y cuando estén separadas una cierta distancia. En el caso planteado ha sido suficiente la separación de una célula hexagonal. Esta conclusión tiene validez siempre y cuando la limitación de los usuarios de dentro del *hot spot* sea debida a la falta de recursos. El motivo es que las células vecinas al tener poco tráfico ofrecido en su área de cobertura, no tienen problemas para cursar aquellas llamadas que aparecen dentro de varios *hot spots* pero se enganchan fuera, por los motivos comentados anteriormente. Si el sistema estuviera limitado por interferencias, estas estaciones vecinas tendrían dificultades para poder establecer estas llamadas ya que estarían cerca de zonas con un elevado nivel de tráfico y el grado de servicio empeoraría.

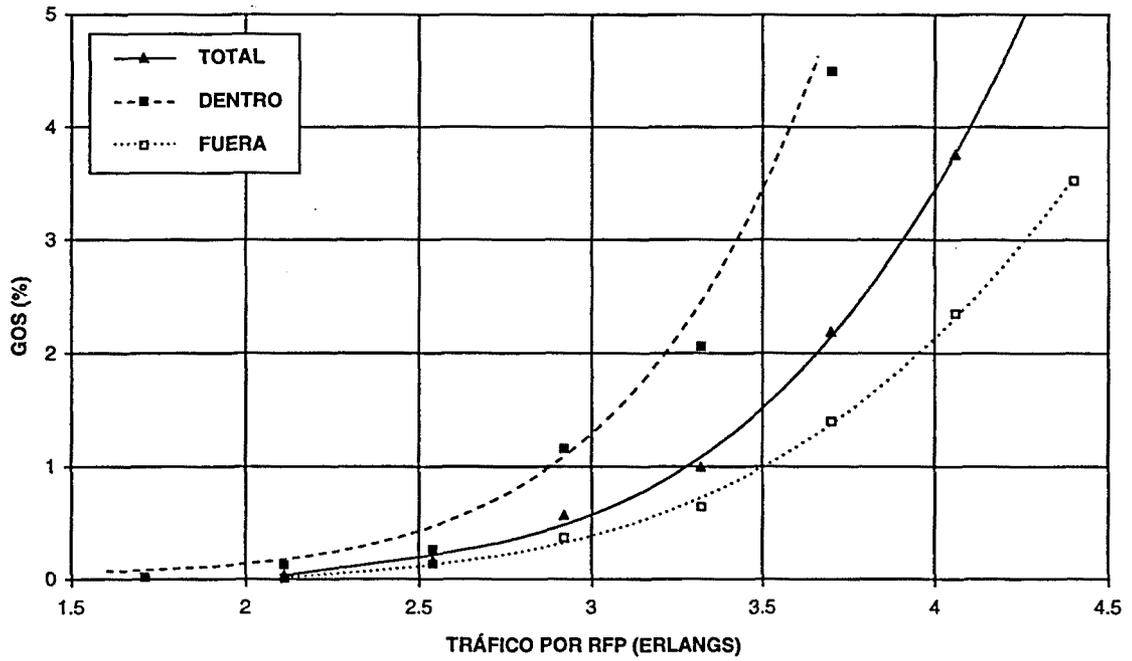


Figura 6.10.12 GOS de un sistema con varias áreas de alta densidad de tráfico situadas de forma aleatoria.

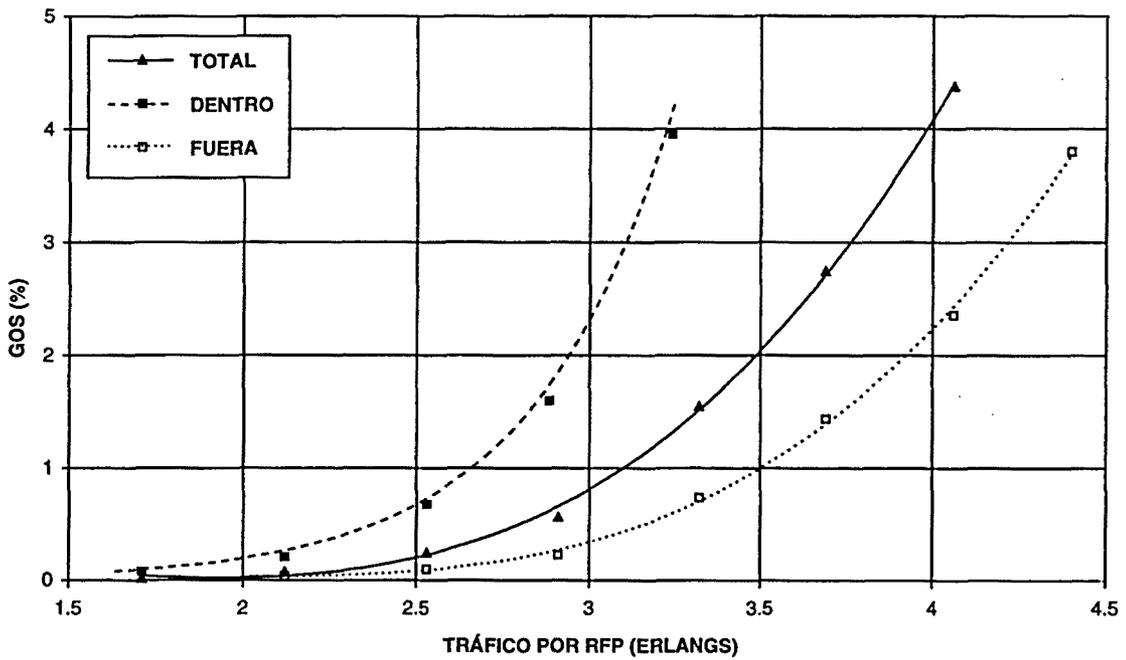


Figura 6.10.13 GOS de un sistema con varias áreas de alta densidad de tráfico centradas en los emplazamientos de estaciones base.

Observando la figura 6.10.13, donde se representan los resultados de un modelo como el anterior, pero con el centro de los *hot spots* situados justo encima del emplazamiento de estaciones base (Posición 1), llegamos a las mismas conclusiones que para la figura 6.10.12. El grado de servicio de los usuarios de dentro y fuera de los *hot spots* apenas varía respecto a la situación donde sólo existía uno. Los usuarios no se ven afectados por el número de zonas de alto tráfico si están suficientemente separadas.

Finalmente, también se han evaluado sistemas con varios *hot spots* donde los usuarios pueden acceder a una segunda estación base cuando no se consiguen conectar a la primera tras una serie de intentos. Utilizando 7 intentos en la primera estación base y 3 en la segunda las ganancias obtenidas son bastante parecidas a las de los otros tipos de *hot spots*. Para sistemas sin reapuntamiento (figura 6.10.14) se consiguen incrementos muy limitados, 4 % para los usuarios de dentro del *hot spot* y ninguna para los de fuera. Cuando se instalan en los terminales, antenas que permiten reapuntar el diagrama de radiación hacia la segunda estación base se obtienen incrementos de capacidad notables (figura 6.10.15); 28 % para los usuarios de dentro y 17 % para los de fuera.

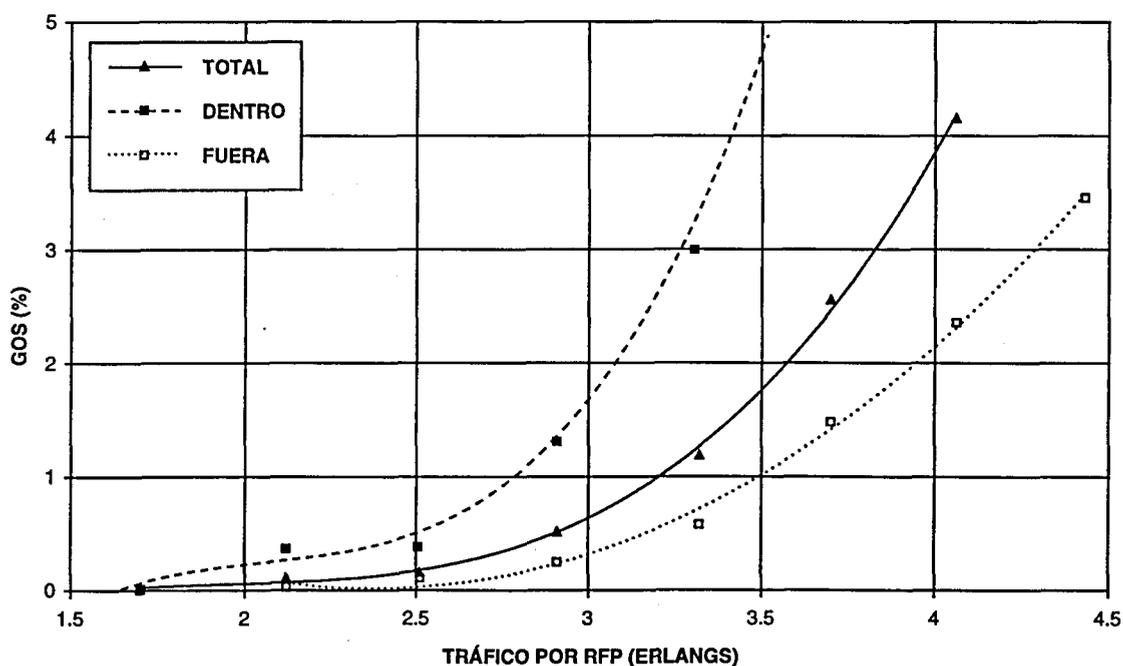


Figura 6.10.14 GOS de un sistema con varias áreas de alta densidad de tráfico centradas en los emplazamientos de estaciones base y con la posibilidad de acceder a una segunda estación base sin reapuntamiento.

Aunque los resultados entre uno o varios *hot spots* en la Posición 1 son muy similares, puede observarse una ligera tendencia de mejora cuando existen varios. Este efecto es debido a la forma en que se han realizado las simulaciones, ya que para una determinada media de tráfico ofrecido en toda el área, igual en los dos casos, se ofrece el triple en los *hot spots*, también igual en los dos casos, pero al tener varios y para

conservar la media, en las otras zonas decrece levemente. Si los distintos *hot spots* no se influyen, se tiene un sistema con varios *hot spots* rodeados de células con algo menos de tráfico que en el caso de uno solo, con lo que sus capacidades resultan muy similares pero con una cierta tendencia de mejora.

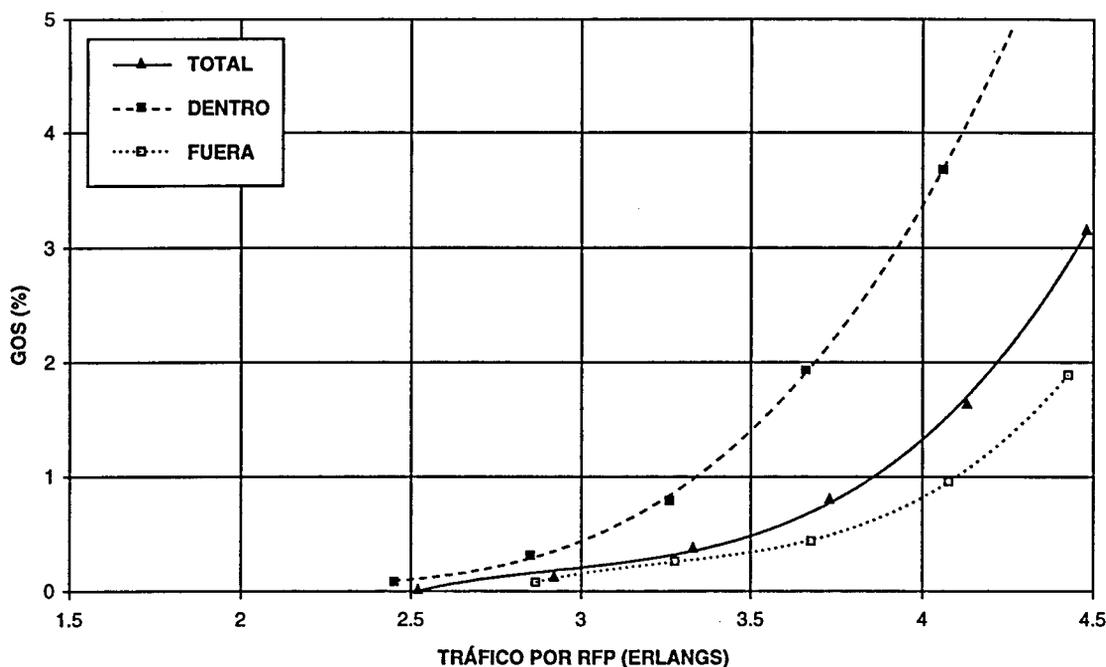


Figura 6.10.15 GOS de un sistema con varias áreas de alta densidad de tráfico centradas en los emplazamientos de estaciones base y con la posibilidad de acceder a una segunda estación base con reapuntamiento.

6.10.4 CONCLUSIONES

Se ha visto que el DECT es un buen sistema para absorber concentraciones de tráfico aparecidas de forma inesperada. Debido a su asignación dinámica de canales permite acomodarse fácilmente a los cambios de tráfico ofrecido, sin la necesidad de realizar ningún tipo de modificación en la infraestructura del sistema. En estos casos los sistemas de asignación dinámica de canal (DCA) son claramente superiores a los sistemas de asignación fija de canal (FCA).

La posición de las zonas de alta concentración de tráfico respecto a la posición de estaciones base resulta en algunas diferencias de capacidades aunque éstas no son muy acusadas. Como era de esperar, para un *hot spot* de las mismas dimensiones, en aquellas ocasiones en que se sitúe sobre más estaciones base el comportamiento será mejor, ya que el tráfico se reparte entre más equipos. En general, el sistema se comporta correctamente sea cual sea la posición del *hot spot*.

Partiendo de un sistema que no esté trabajando al límite de sus posibilidades, es decir que no esté limitado por interferencias ni por falta de recursos. Cuando aparecen zonas con elevado tráfico de dimensiones similares a una célula hexagonal, las estaciones involucradas aceptan el máximo tráfico que sus recursos les permiten, estando limitadas por capacidad.

Cuando el *hot spot* es de mayor tamaño e involucra varias células hexagonales, las llamadas interiores al *hot spot* empiezan a verse afectadas por la alta interferencia que sus células vecinas les transmiten. En estos casos aparece una componente de limitación debida a interferencias que perjudica la calidad de las llamadas.

No ocurre lo mismo en situaciones donde existen varios *hot spots* simultáneos. En estas circunstancias, si los *hot spots* están suficientemente separados sus interferencias no les afectan y pueden considerarse como si estuvieran solos. Una distancia equivalente a una célula hexagonal es suficiente para obtener estos resultados.

Finalmente, se ha considerado la posibilidad que los usuarios puedan acceder a dos estaciones base. Esta facilidad es más eficaz cuando las llamadas están limitadas por falta de recursos que cuando lo están por interferencias. En este último caso, las llamadas conectadas a la segunda estación tienen una relación C/I por debajo de la media y en entornos altamente interferidos son más sensibles a interrupciones. Se ha visto que aplicar el acceso a una segunda estación base sin permitir reapuntar al terminal resulta en unas mejoras muy limitadas, cercanas al 6 %. No obstante, si el terminal se reapunta a la segunda estación base se obtienen mejoras del 28 % para usuarios de dentro del *hot spot* y del 17 % para los de fuera.

6.11 EFECTO DE LA DESINCRONIZACIÓN DE SISTEMAS

Una de las características esenciales del DECT es su Selección Dinámica de Canal. La principal ventaja de este tipo de selección de canal es que el establecimiento de una nueva llamada tiene en cuenta la interferencia local en ese instante, en este aspecto el sistema es autoadaptativo. No hay necesidad de una planificación frecuencial del sistema, diferentes aplicaciones y operadores comparten dinámicamente el mismo espectro sin una asignación de canales específicos para cada uno de ellos.

Hasta el momento se ha supuesto que diferentes aplicaciones o operadores podían compartir el espectro del DECT asignando un determinado subgrupo de portadoras a cada uno de ellos. Así, cada sistema es independiente de los demás y no se provocan interferencias mutuamente. De todas formas, si realmente se quiere que la banda de frecuencias asignada al DECT no esté regularizada, debe estudiarse la posibilidad de que diferentes operadores compartan las mismas frecuencias.

Los sistemas públicos, generalmente cubren la misma área y compiten por los mismos abonados. Un servicio de bucle de abonado vía radio multi-operador con estaciones base por encima de los tejados es un ejemplo típico.

Cuando varios operadores pueden acceder a la totalidad del espectro la eficiencia del sistema es mayor que si se divide entre ellos; efecto debido a la compartición de recursos. Estas pérdidas se miden respecto al caso de que todos los operadores estén mutuamente sincronizados. La ETSI considera esencial el sincronismo entre diferentes sistemas para aplicaciones de alta capacidad con transmisión por encima de los tejados y en los anteriormente mencionados *hot spots* [ETR310]. Otros autores también han establecido que la sincronización en sistemas TDMA ayuda en gran medida a reducir la interferencia co-canal [AKA], [CHU1], [CHU2] y han estudiado algunos mecanismos de autosincronización [CHU3]. En su documento [ETS175] propone algunos métodos de sincronización de sistemas, entre los cuales se encuentra la utilización del sistema de satélites GPS.

En ocasiones la sincronización de sistemas resulta difícil de conseguir y cada uno tiene su propio reloj, que difiere de los demás. En este apartado se estudia el efecto de la sincronización sobre el grado de servicio de dos sistemas operando en la misma área y compartiendo las mismas frecuencias.

Para modelar el sistema se ha supuesto un entorno suburbano donde conviven dos operadores diferentes en que cada uno de ellos tiene 100 emplazamientos de estaciones base distribuidos de la misma forma que en los apartados anteriores. En cada emplazamiento se sitúa una estación base con una antena omnidireccional, con distancias entre emplazamientos de un mismo sistema de 600 metros. Los terminales también disponen de antenas omnidireccionales. Para el modelo de propagación se ha escogido el mismo utilizado en los apartados anteriores de no visión directa (NLOS) descrito en el apartado 6.4.1.1.

La desincronización de trama de dos sistemas tiene dos efectos principales. En un sistema totalmente sincronizado todas las estaciones base transmiten durante la primera mitad de trama y los terminales durante la segunda, de forma que un terminal siempre se ve interferido por las estaciones base y éstas por los terminales. El primer efecto de tener dos sistemas desincronizados es que el tipo de interferencias mutuas que se causan son diferentes. Dependiendo del número de slots desincronizados existirán estaciones base interferidas por estaciones base y terminales por terminales. Este número de slots de desincronización varía a lo largo del tiempo debido a que la desincronización de dos sistemas viene producida, en general, por una pequeña diferencia en la frecuencia de los respectivos relojes, y ésta provoca un deslizamiento continuo de las tramas digitales. Como consecuencia deberán estudiarse diferentes grados de desincronización.

El segundo efecto que se produce cuando dos sistemas están desincronizados un número no entero de slots, es que un slot de un sistema se ve interferido primero por un

slot del otro sistema y después por otro. Así, para que un canal sea válido para cursar una llamada debemos tener en cuenta las interferencias en cada parte del slot. Si una de las partes no cumple los requisitos mínimos, el canal no podrá utilizarse para la conversación. En la figura 6.11.1 podemos ver representados estas dos acciones [CAS8].

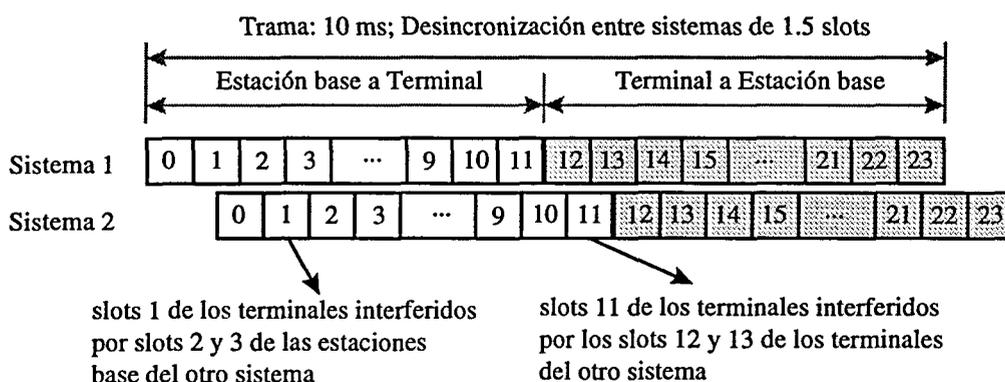


Figura 6.11.1 Interferencias producidas por la desincronización de dos sistemas.

Otro punto a tener en cuenta es la separación de las estaciones base de los dos sistemas. En general no es usual que los dos sistemas tengan las estaciones base en la misma posición geográfica sino que existirá una cierta separación entre ellas. Para comparar los sistemas estudiados hasta el momento con otros no sincronizados, sin que afecten las distancias entre estaciones base, se han realizado diversas simulaciones que consideran las estaciones base de los dos sistemas emplazadas en el mismo lugar. Sin embargo, un usuario que pertenezca a un sistema sólo podrá conectarse a las estaciones base de dicho sistema. En los resultados finales se sitúan las estaciones base de ambos sistemas separadas una distancia de un radio de célula hexagonal tal y como presenta la figura 6.12.2.

Para poder ver el efecto que produce la desincronización en la calidad del sistema sin que los resultados se vean afectados por otros motivos que no sean el incremento de las interferencias, se han realizado algunas pruebas donde no se tienen en cuenta los factores de atenuación debida a sombras ni las interferencias de canal adyacente.

En todas las gráficas presentadas se representa el GOS respecto al tráfico por RFP. Cabe señalar que este tráfico es la suma de los tráficos medios que cursan ambos sistemas por RFP. De esta forma se obtiene una medida de tráfico global del sistema que es comparable a sistemas de estaciones base con dos transceptores. Si bien en este último caso una llamada puede acceder indistintamente a cualquiera de los dos transceptores y en el caso que nos ocupa, sólo puede acceder al del sistema al que pertenece.

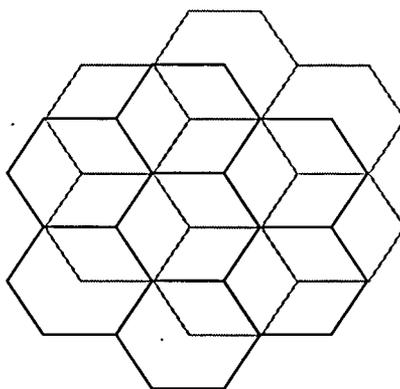


Figura 6.11.2 Posición relativa de los dos sistemas cuando las estaciones base no están situadas en el mismo emplazamiento.

La notación utilizada para las distintas gráficas hace referencia al número de slots que están desincronizados los dos sistemas. El grado de desincronización de dos sistemas raramente coincidirá con un número entero de slots, sin embargo, también se han realizado simulaciones en estas circunstancias para evaluar el primer efecto de la desincronización mencionado anteriormente. Los casos en que la desincronización no sea un número entero de slots se ha denominado con el sufijo “.5”.

La figura 6.11.3 presenta los resultados obtenidos para un entorno con dos sistemas desincronizados utilizando un modelo de propagación que no tiene en cuenta el factor de sombras ni las interferencias de canal adyacente. Los resultados se han presentado para dos sistemas que comparten 3 frecuencias y cuyas estaciones base están ubicadas en los mismos emplazamientos.

Si comparamos la capacidad conjunta de los dos sistemas totalmente sincronizados, 3.6 Erlangs por RFP, con la que obtenía un solo sistema, 3.55 Erlangs por RFP (figura 6.4.2), observamos que es ligeramente superior. Este pequeño aumento se debe a que al tener dos sistemas, cada sistema solamente cursa 1.8 Erlangs por RFP, lo que significa que cada llamada encuentra menos slots ocupados en su estación base y tiene más posibilidades al elegir canal y por lo tanto menos probabilidad de bloqueo.

Cuando introducimos un tiempo de desincronización de trama aleatorio entre los dos sistemas, la capacidad de los mismos resulta seriamente mermada. Se presentan las capacidades para diferentes grados de desincronización aleatoria, casos 0.5, 6.5 y 12.5. Se observa que la capacidad de los mismos es prácticamente la misma, un 20 % menor que la de dos sistemas sincronizados. Cuando la desincronización es en un número entero de slots, los sistemas casi no modifican su capacidad.

Estos resultados muestran que el motivo de la pérdida de calidad radica en que un slot de un sistema interfiere parcialmente a dos slots del otro. En este caso encontramos que cada slot tiene dos niveles de calidad distintos con lo que es más

probable encontrar uno de ellos no cumpla los requisitos mínimos y bloquee o interrumpa la llamada.

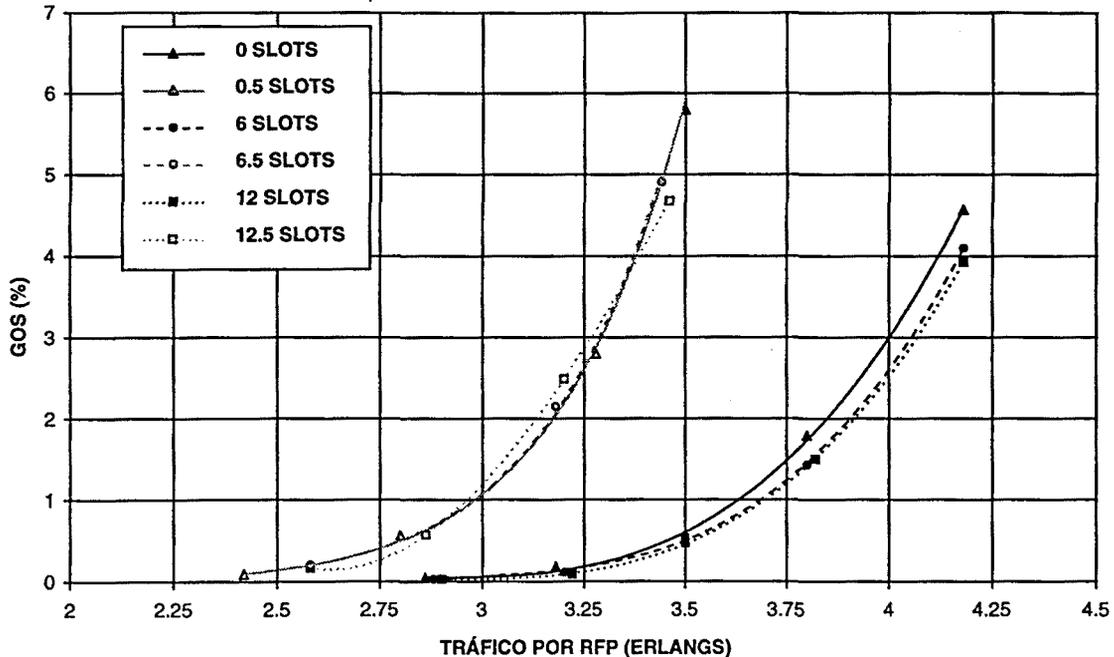


Figura 6.11.3 Capacidad de dos sistemas desincronizados, con estaciones base situadas en la misma posición, modelo de propagación sin efecto de sombras ni interferencias de canal adyacente y 36 canales disponibles.

Si se consideran desincronismos de slots enteros, cada slot de un sistema sólo afecta a uno del otro sistema. De tal forma que las modificaciones de calidad observadas en la figura son debidas únicamente a que estaciones base interfieren a otras estaciones base y terminales a terminales. El número de slots que se ven afectados por esta circunstancia coincide con el número de slots de desincronismo. Así, en el caso “6 slots”, una estación base recibe una interferencia del otro sistema proveniente de estaciones base durante 6 slots y de terminales durante los 6 restantes. Para los terminales el comportamiento es análogo. Se aprecia que la capacidad del sistema no se ve afectada por el hecho de que las interferencias provengan de los terminales o de las estaciones base.

En el siguiente escenario presentado se tiene en cuenta el modelo de propagación completo, con factor de sombras lognormal e interferencias de canal adyacente. Para observar el efecto de la situación de las estaciones base en la figura 6.11.4 las estaciones base de los dos sistemas se encuentran en el mismo emplazamiento y en la 6.11.5 en emplazamientos distintos, situación presentada por la figura 6.11.2.

En primer lugar advertimos que la posición de las estaciones base apenas modifica los resultados. De hecho, el único efecto negativo que podría darse es el

producido por las interferencias de canal adyacente. En sistemas sincronizados se ha visto que su influencia es mínima, pero para dos sistemas desincronizados cuyas estaciones base se encuentren en la misma posición y en aquellos slots en que estaciones base interfieran otras estaciones base, al disponer de 3 frecuencias y considerar 2 interferencias de canal adyacente, la emisión de una estación base puede cegar la recepción de la otra. En este caso se ha considerado que la separación entre estaciones base ubicadas en el mismo emplazamiento es de 1 metro y que la atenuación debida a los diagramas de radiación verticales es de 10 dB. Con todo ello más la selectividad de los receptores y considerando que para estos entornos el tráfico cursado por estación base es muy bajo, resulta en que la interferencia de canal adyacente entre estaciones base no repercute en los resultados.

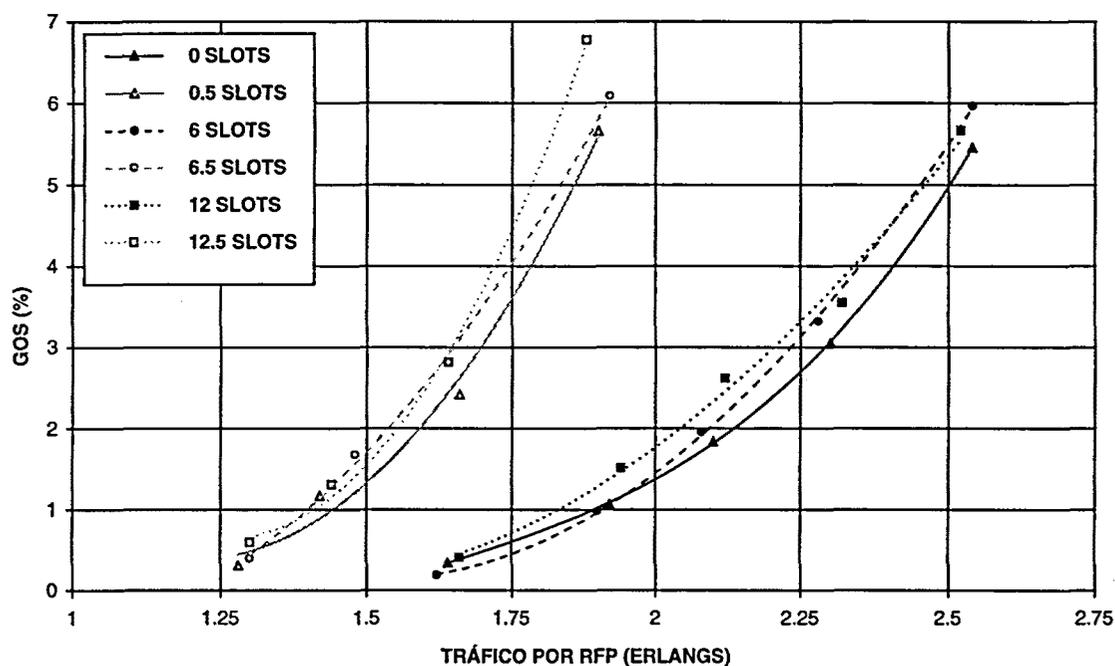


Figura 6.11.4 Capacidad de dos sistemas desincronizados, con estaciones base situadas en la misma posición y 36 canales disponibles.

Analizando los resultados de las figuras 6.11.4 y 6.11.5 se observa el mismo comportamiento que para el caso del modelo de propagación anterior pero para unos tráficos menores. El tráfico global cursado por los dos sistemas sincronizados es de 1.9 Erlangs por RFP igual que cuando existe un solo sistema (figura 6.4.2). Existen unas pérdidas importantes entre dos sistemas sincronizados y otros dos desincronizados un número aleatorio de slots. En este último caso se consiguen 1.4 Erlangs por RFP, el decremento es del 26 % sobre la capacidad inicial. Si la desincronización es un número entero de slots, la capacidad final del sistema no se ve alterada.

Con ello llegamos a la conclusión de que el factor de sombras no afecta al comportamiento del sistema frente a la desincronización, aunque, como ya se vio con anterioridad, sí que afecta a la capacidad del sistema.

La desincronización de un número entero de slots, aunque apenas influye en la capacidad final del sistema sí que afecta a su comportamiento interno y a la calidad de los dos enlaces de la comunicación.

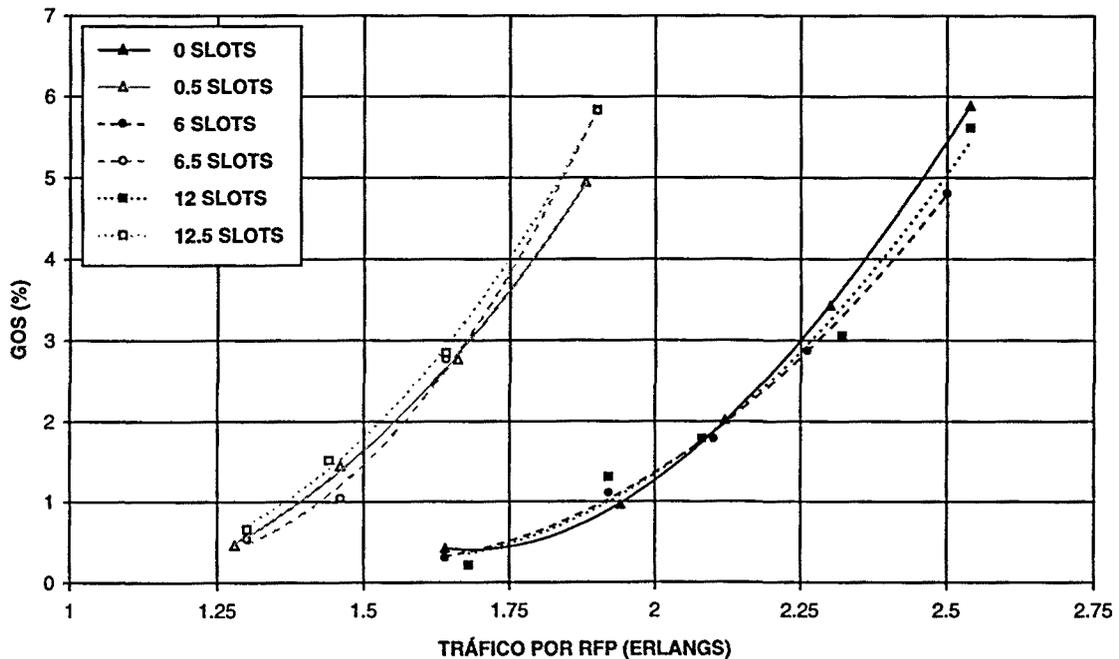


Figura 6.11.5 Capacidad de dos sistemas desincronizados, con estaciones base situadas en distintas posiciones y 36 canales disponibles.

En la figura 6.11.6 se representa la relación C/I media de ambos enlaces en el instante de establecimiento (EST) de la comunicación y la media obtenida a lo largo de toda la duración de la conversación (FUN) para dos sistemas sincronizados y dos que están desincronizados 12 slots exactos.

El mecanismo de acceso del DECT favorece indudablemente al canal de bajada. Mientras el terminal escoge el canal que tiene menos interferencia, a la estación base le viene impuesto, siempre y cuando cumpla con la calidad mínima. Este método resulta en que la relación C/I del canal de bajada sea, en establecimiento de llamada, muy superior a la del canal de subida. Puede verse en la figura que para el escenario estudiado la diferencia es de aproximadamente 7 u 8 dB, dependiendo del tráfico cursado, y tanto para sistemas sincronizados como desincronizados. La desincronización de un número entero de slots no influye en el momento de establecer una llamada. También se aprecia la pérdida de calidad respecto al tráfico global cursado por ambos

sistemas, resultado del todo predecible ya que a mayor tráfico, mayor nivel de interferencias y en consecuencia, una C/I menor.

Si bien en fase de establecimiento, dos sistemas sincronizados tienen la misma relación señal a interferencia que dos de desincronizados un número entero de slots, estos no evolucionan igual a lo largo de la conversación.

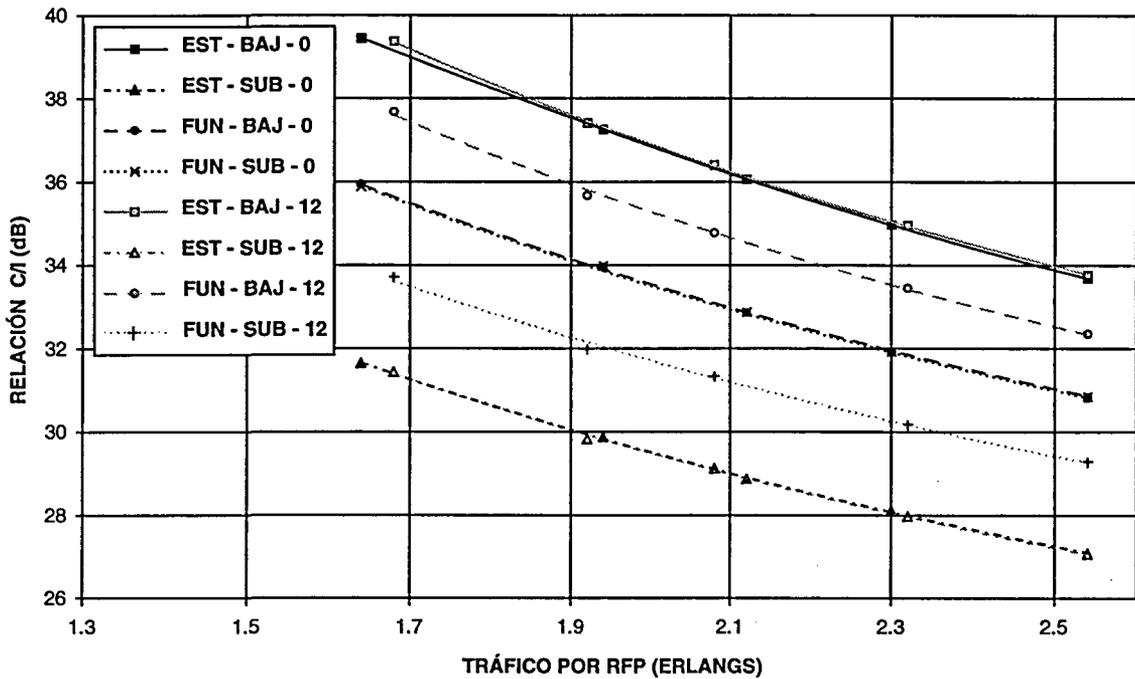


Figura 6.11.6 Relación señal a interferencia de los canales de subida y bajada, en establecimiento y funcionamiento para dos sistemas sincronizados (0 slots) y dos de desincronizados (12 slots).

En sistemas sincronizados, que pueden compararse sin pérdida de generalidad a uno solo, con más o menos estaciones base, las relaciones señal a interferencia de los dos canales evolucionan de forma inversa. El canal de bajada que era el mejor en establecimiento, pierde calidad, mientras que el de subida gana. El sistema DCA es autoadaptable, lo que significa que los canales se distribuyen de forma uniforme por el área de servicio. Con ello cabría esperar que la calidad de una llamada ya establecida mejorase a lo largo de la conversación debido a que su propia potencia transmitida impide que otras llamadas utilicen el mismo canal a distancias desfavorables. Sin embargo, se dan casos en que nuevas llamadas se establecen en posiciones perjudiciales y provocan traspasos a otras conexiones ya establecidas. Este efecto viene causado porque todas las posiciones tienen diferentes niveles de interferencias, y un pequeño incremento en una posición puede provocar un traspaso mientras que en otra no. Este efecto se ve acentuado dependiendo de si la interferencia proviene del canal de subida o de bajada.

Cuando aparece una nueva llamada el terminal busca el canal menos interferido. Para ello escucha la potencia procedente de las estaciones base y construye su lista de mejores canales. En el modelo simulado se ha supuesto que los dos enlaces de una comunicación reciben el mismo nivel de potencia, aunque no ocurre lo mismo con las interferencias y a los canales que interfieren. La potencia interferente que recibe el terminal de la llamada "a", procedente de la estación base de la llamada "b", no recorre el mismo camino y por consiguiente no es igual a la que recibe la estación base de la llamada "a", procedente del terminal de la llamada "b". Estas potencias interferentes pueden variar en gran medida, ya que si bien, la dos distancias de propagación serán del mismo orden de magnitud, el factor aleatorio lognormal debido a las sombras puede ser muy diferente. La consecuencia que tiene es que una nueva llamada interfiere de forma diferente a los terminales y a las estaciones base de conversaciones ya establecidas.

Son las llamadas nuevas las que configuran la evolución de la relación C/I de las llamadas en curso y las que provocan que el canal de subida mejore mientras que el de bajada se deteriore. Este efecto se debe a que al aparecer una nueva llamada, el terminal escoge el canal menos interferido, esto es que el canal en el cual la suma de las interferencias provenientes de las estaciones base utilizando la misma frecuencia y slot son menores. Como la potencia recibida en los dos enlaces entre una estación base y un terminal mutuamente interferentes es simétrica, el nuevo terminal interferirá de la misma manera a las estaciones base, es decir con un nivel de interferencia bajo. Con ello los enlaces de subida de las llamadas establecidas no se verán muy afectadas por la recién llegada. Por el contrario, la nueva estación base que no tiene oportunidad de escoger el canal, en la gran mayoría de casos, recibirá una potencia interferente mayor proveniente de los terminales ya establecidos. Al ser los enlaces simétricos en cuanto a potencia, esta estación base interferirá en el mismo grado a dichos terminales. Como consecuencia los terminales ya establecidos salen más perjudicados que sus respectivas estaciones base al aparecer una nueva llamada.

La consecuencia de este comportamiento es que el canal de subida mejora su calidad a lo largo de la llamada, ya que los nuevos terminales al elegir el canal, pueden realmente distribuir los canales de forma que la interferencia global procedente de las estaciones base con llamadas ya establecidas se minimice. Mientras que a los terminales ya establecidos se les imponen las nueva estaciones base interferentes y empeoran su relación C/I. En la figura 6.11.6 puede verse como las relaciones C/I de ambos enlaces que en establecimiento eran muy dispares, en funcionamiento y para dos sistemas sincronizados o uno de aislado, se van adaptando y llegan a coincidir.

Cuando los dos sistemas están desincronizados un número entero de slots el mecanismo de funcionamiento es el mismo pero tiene consecuencias diferentes. En este apartado se estudia el caso particular del máximo desincronismo posible, 12 slots, pero los razonamientos se pueden aplicar de igual manera a otros tiempos de desincronización.

Dentro del mismo sistema las condiciones de funcionamiento son completamente análogas a las citadas anteriormente. Son las interferencias que provienen del otro sistema las que influyen de forma diferente. Las relaciones C/I de ambos enlaces en establecimiento son prácticamente idénticas a las de dos sistemas sincronizados. Al establecerse una nueva llamada, la interferencia global del sistema es semejante y por tanto obtendrá la misma calidad. En este caso no importa si las interferencias provienen de estaciones base o de terminales. El resultado no sería el mismo si los equipos radio de las estaciones base y terminales tuvieran diferentes diagramas de radiación y potencias transmitidas, pero para el escenario estudiado estos coinciden.

Para una llamada ya está establecida, las nuevas conexiones pertenecientes al mismo sistema le mejoran la calidad del enlace de subida y le empeoran la del enlace de bajada, de igual forma que antes. Pero si la llamada recién llegada pertenece al otro sistema, el nuevo terminal interferirá a los terminales del primer sistema y la nueva estación base a las estaciones base. En este caso los efectos de aparición de llamadas son inversos. El terminal en fase de establecimiento escoge el mejor canal para él y para los otros ya establecidos mejorándoles los enlaces de bajada, las estaciones base con conexiones ya establecidas se ven afectadas por otras estaciones base que no pueden escoger canal perjudicándoles el enlace de subida. El resultado final es que el enlace de bajada se ve perjudicado por las nuevas llamadas de su propio sistema y mejorado por las del otro. El canal de subida evoluciona de forma inversa, mejora con nuevas llamadas pertenecientes a su sistema y empeora con las del otro. En la figura 6.11.6 puede verse como ni las pérdidas del canal de bajada ni la ganancia del de subida son tan pronunciadas como en los dos sistemas sincronizados.

En la figura 6.11.7 pueden verse representados los niveles medios de interferencia en funcionamiento que reciben los canales de subida y bajada, procedentes de su propio sistema o del otro, cuando éstos están sincronizados o desincronizados. Se observan claramente 3 tipos de interferencias. Las de menor nivel son las pertenecientes a las recibidas por el canal de bajada procedentes del otro sistema cuando éste se encuentra desincronizados. Son interferencias desde terminales a terminales, su bajo nivel se debe a que en establecimiento, el terminal ya escoge canales con pocas interferencias y durante el funcionamiento, al estar interferido por otros terminales que de igual forma escogen canal, le causan también pocas interferencias. Las de mayor potencia son las del enlace de subida procedentes del otro sistema desincronizado. Son interferencias de estación base a estación base, que al ser conexiones que no pueden elegir canal ni en establecimiento ni en funcionamiento son las peores. Finalmente, tenemos el grupo mayoritario donde se encuentran el resto de enlaces, son interferencias de terminal a estación base y viceversa. Este grupo de interferencias al tener un terminal, siempre puede elegir un canal o en establecimiento o en funcionamiento, con lo que la potencia interferente resultante se encuentra aproximadamente en la mitad de las dos citadas anteriormente.

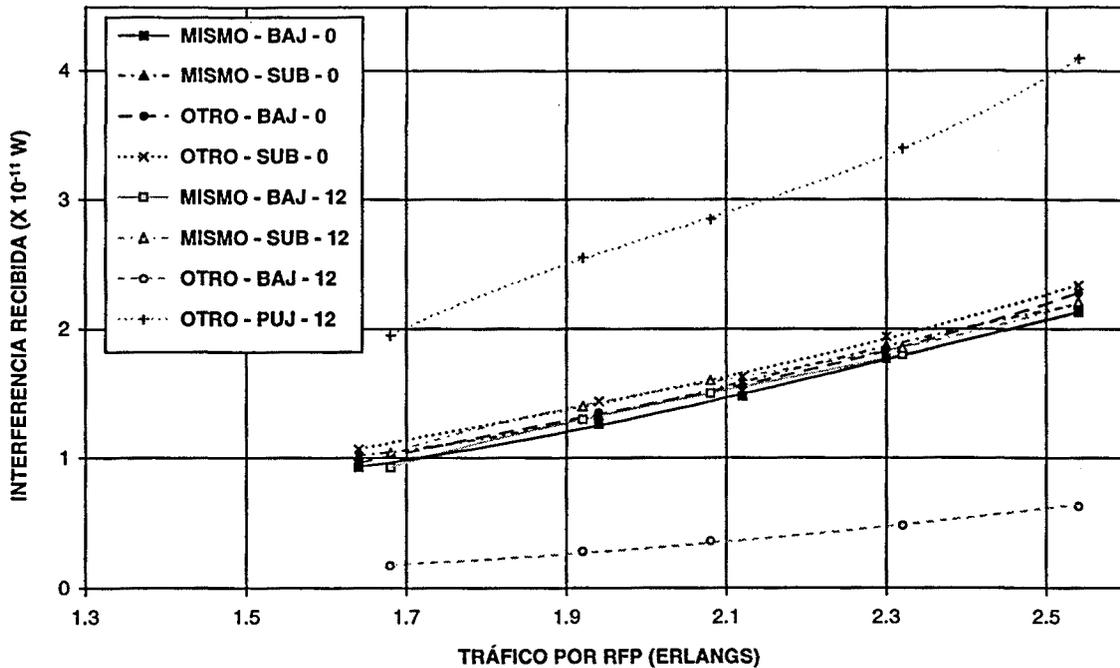


Figura 6.11.7 Interferencia media recibida en funcionamiento por los canales de subida y de bajada proveniente del mismo sistema o del otro, para dos sistemas sincronizados (0 slots) y dos de desincronizados (12 slots).

Estas potencias interferentes justifican los niveles de relación C/I en funcionamiento obtenidos en la figura 6.11.6. Dos sistemas sincronizados reciben las interferencias del propio sistema y del otro que se encuentran entre el grupo mayoritario de gráficas. Como consecuencia los dos enlaces obtienen la misma relación C/I . Por el contrario, cuando se tienen dos sistemas desincronizados, el canal de bajada recibe la interferencia del propio sistema situada en el grupo medio de gráficas más la del otro sistema que es la que tiene menor interferencia. La relación C/I resultante será mejor que la del canal de bajada de dos sistemas sincronizados. En cambio, al canal de subida le interfiere un nivel medio más el de mayor potencia, con lo que su relación C/I será peor que la de los sistemas sincronizados.

Otro aspecto a tener en cuenta es el número de traspasos que genera el sistema. Ya se comentó con anterioridad que los sistemas DCA tienen dos tipos de traspasos, los intercélula y los intracélula. En sistemas donde los terminales son estáticos, como el caso del bucle de abonado vía radio, los únicos traspasos que se dan son los intracélula, en los que se cambia de canal pero no de estación base. Recordemos que en este escenario no es necesario hacer traspasos entre estaciones base ya que la potencia recibida de ellas no cambia a lo largo de la conversación.

En la figura 6.11.8 se ven representados los traspasos realizados por llamada en un entorno con dos sistemas sincronizados. Estos resultados son totalmente comparables a los que se obtienen en un entorno con un solo sistema cursando el mismo tráfico

global. Ello es debido a que el número de trasposos está estrechamente ligado con la relación C/I media, y al tener ambos entornos, de uno o dos sistemas, estaciones base de la misma cobertura, tanto la interferencia como potencia recibida tienen la misma media siendo la relación C/I semejante.

Puede observarse como el número de trasposos generados por el sistema no es muy elevado, en particular para el tráfico con el que se obtiene un GOS del 1 %, 1.9 Erlangs por RFP, se realizan un total de 4.5 trasposos por cada 100 llamadas. En consecuencia podemos indicar que el sistema es bastante estable y además no genera mucho tráfico de señalización para trasposos.

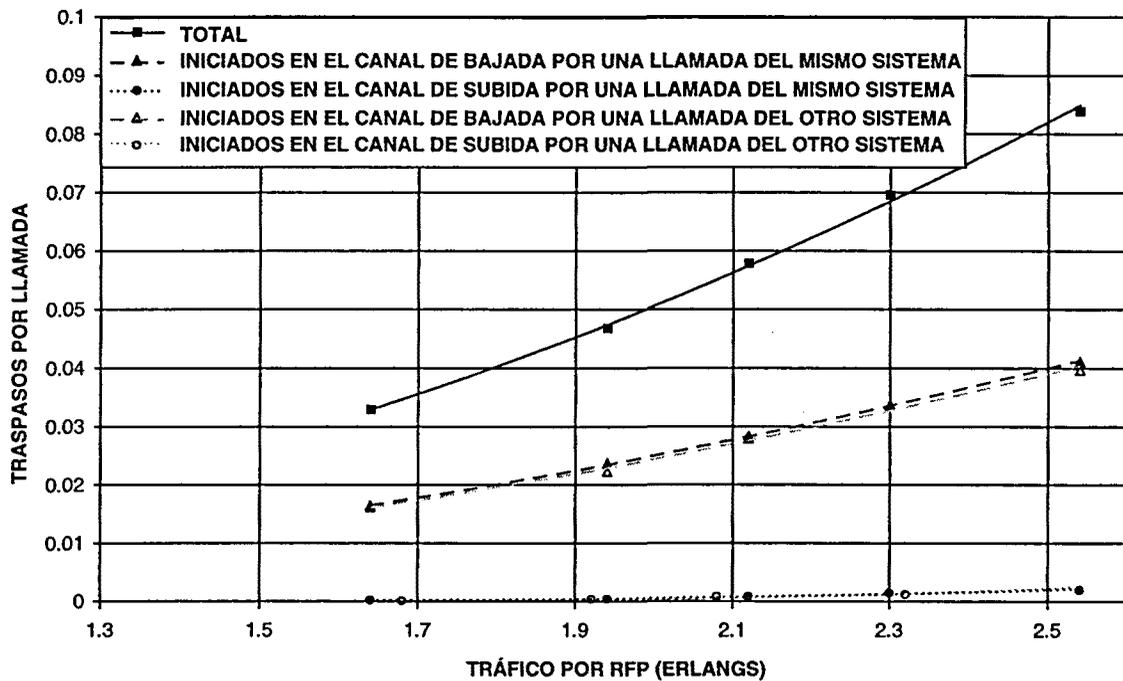


Figura 6.11.8 Número de trasposos por llamada para dos sistemas totalmente sincronizados.

En la citada figura también se incluyen las gráficas correspondientes al número de trasposos que son desencadenados en cada enlace y debidos a una llamada originada en el propio sistema o en el otro. Adviértase que el sistema origen de una llamada no es motivo de variación de ningún resultado debido a que ambos sistemas están sincronizados. Donde sí que existe diferencia de comportamiento es en los trasposos que genera cada uno de los enlaces. El enlace de bajada es el que los inicia prácticamente todos, mientras que el de subida tiene una tasa casi nula. La causa de este comportamiento es la misma que la que provoca que la relación C/I del enlace de bajada decrezca a lo largo de la conversación mientras que la del enlace de subida mejore. En las nuevas llamadas, que son las que provocan los trasposos, los terminales eligen canal e interfieren poco a las estaciones base afectadas, mientras que las nuevas estaciones

base, a las que se les impone el canal provocan una mayor interferencia a los terminales ya establecidos. Estos al ver aumentado su nivel de interferencia en mayor grado que la estación base a la que están conectados, son los primeros cuya relación C/I cae por debajo del umbral.

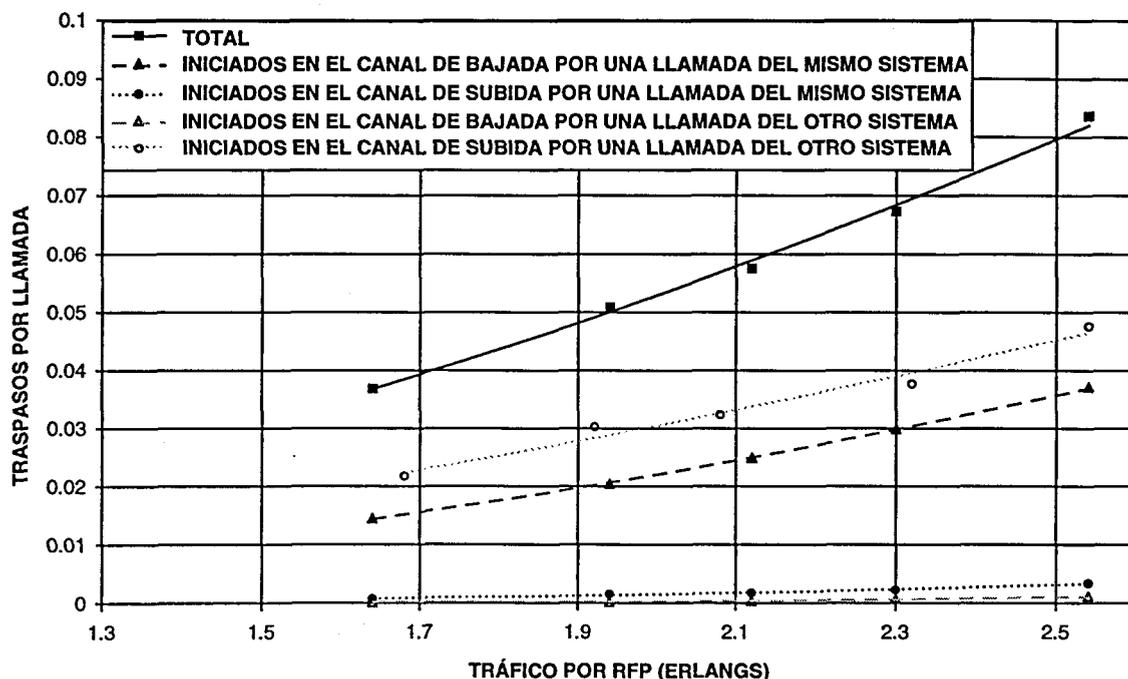


Figura 6.11.9 Número de traspasos por llamada para dos sistemas desincronizados 12 slots exactos.

Los mismos resultados para dos sistemas desincronizados 12 slots enteros se representan en la figura 6.11.9. Puede comprobarse como el número total de traspasos es básicamente el mismo, aunque el enlace en que son generados es diferente. Las interferencias problemáticas siempre son las procedentes de las estaciones base, con lo que aquellos enlaces que se ven interferidos por ellas son los que causan la mayoría de traspasos. En este caso ambos enlaces son interferidos por estaciones base, el de bajada por las estaciones base del propio sistema y el de subida por las del otro sistema. Además, la relación C/I en funcionamiento no es igual para los dos enlaces, con lo que el enlace que tiene peor calidad, el de subida, es el que sale más perjudicado y genera, sea cual sea el origen de la nueva llamada, más traspasos que el de bajada.

La figura 6.11.10 representa los traspasos por llamada para la situación de coexistencia de dos sistemas totalmente desincronizados, caso 12.5 slots. El comportamiento de este entorno es totalmente semejante al de 12 slots, pero debido a que la interferencia global es superior, recordemos que cada slot de un sistema interfiere a dos del otro, para un mismo tráfico cursado el número de traspasos es claramente superior. De esta forma para un grado de servicio del 1 %, obtenemos una capacidad de

1.4 Erlangs por RFP (figura 6.11.5), con un número total de trasposos de 4.5 por cada 100 llamadas, resultado análogo a los otros tipos de desincronizaciones.

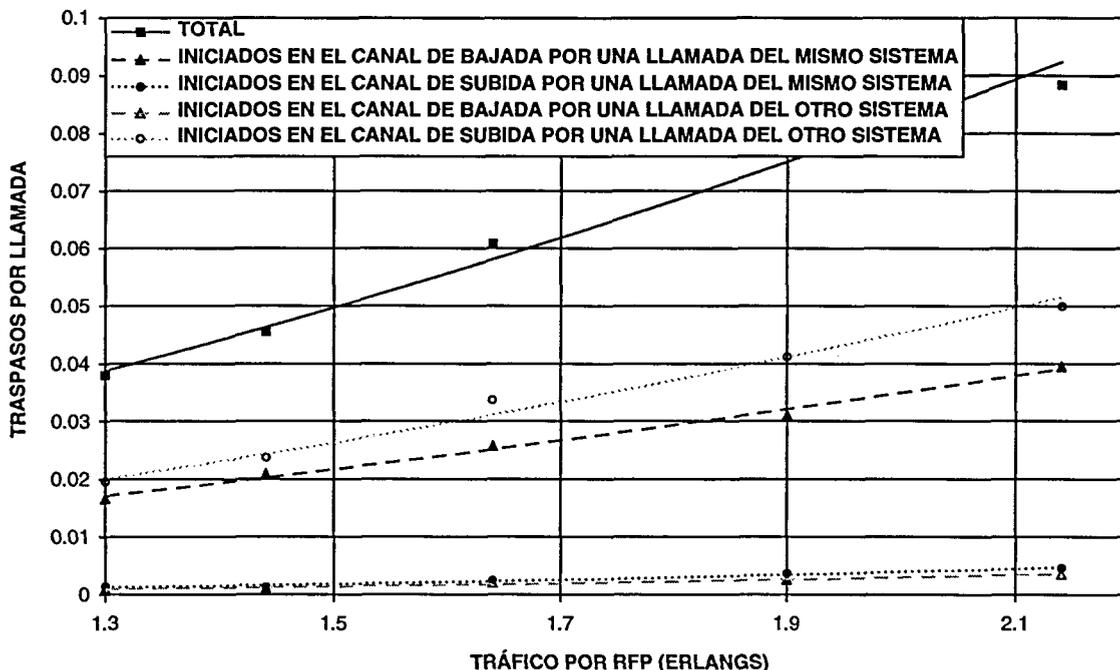


Figura 6.11.10 Número de trasposos por llamada para dos sistemas totalmente desincronizados (12.5 slots).

Finalmente, se ha simulado el efecto que produce la desincronización en sistemas con más tráfico global. La figura 6.11.11 nos presenta los resultados para un entorno con antenas omnidireccionales pero que dispone del espectro completo del DECT, 10 frecuencias.

Cuando se dispone de un solo sistema con antenas omnidireccionales y 120 canales, la capacidad que se obtiene es de 5.6 Erlangs por RFP (figura 6.5.5), cuando se tienen dos sistemas totalmente sincronizados se consiguen 7.6 Erlangs por RFP (figura 6.11.11), o bien 3.8 Erlangs por RFP y sistema. Este aumento de capacidad total se debe a que un solo sistema está básicamente limitado por capacidad, mientras que cuando disponemos de dos sistemas aumentamos el número de transceptores y la limitación pasa a ser por interferencias.

La diferencia existente entre sistemas que están desincronizados un número entero de slots y otros que lo están en un número no entero continua siendo muy alta. En este modelo evolucionamos de 7.6 Erlangs por RFP en el primer caso a 6.4, lo que representa unas pérdidas del 16 %.

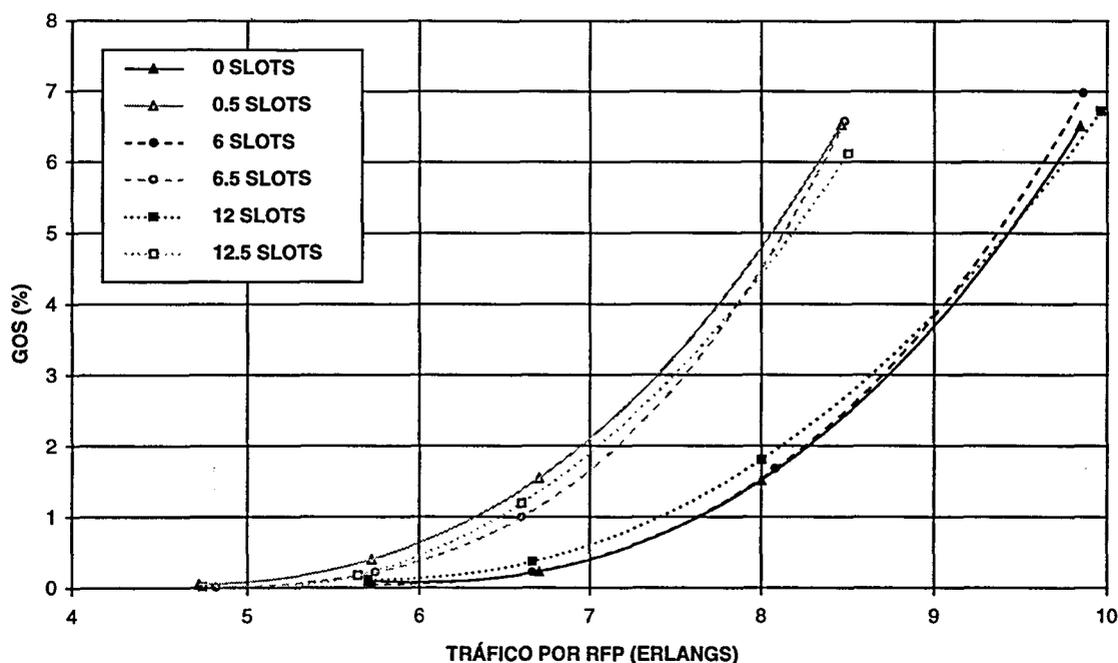


Figura 6.11.11 Capacidad de dos sistemas desincronizados, con estaciones base situadas en distintas posiciones y 120 canales disponibles.

6.11.1 CONCLUSIONES

Una de las principales características del DECT es su sistema de asignación dinámica de canales que permite compartir los diferentes canales sin una distribución previa de frecuencias. En una misma área pueden coexistir diferentes operadores o servicios y una cuestión esencial es si están o no desincronizados. Es obvio que si los sistemas están mutuamente sincronizados su capacidad debe ser superior a si no lo están, pero no tenemos referencia de las pérdidas que puede ocasionar tal desincronización en caso de que exista.

En general, la desincronización de dos sistemas es debida a una ligera variación de la frecuencia de sus relojes, ello provoca un deslizamiento continuo de sus tramas digitales. Como consecuencia, a lo largo del tiempo existen diferentes grados de desincronización que pueden evolucionar más o menos rápido dependiendo de la mencionada diferencia de frecuencia de sus relojes. Para evaluar este efecto se han simulado diferentes niveles de desincronización.

En este punto se ha estudiado el efecto de la desincronización entre dos sistemas que dan servicio de bucle de abonado vía radio en la misma zona. La desincronización entre dos sistemas repercute en dos puntos. El primero es que cada slot de un sistema se ve interferido por dos slots del otro sistema. Ello comporta que cada slot tenga dos

niveles diferentes de interferencia espaciados en su tiempo de duración y por lo tanto, más probabilidad de que uno de ellos esté por debajo del umbral de calidad requerido. El segundo es que con dos sistemas sincronizados todos los terminales se ven interferidos por las estaciones base y éstas por los terminales. Cuando existe desincronización, en algunos slots los terminales se ven interferidos por terminales y las estaciones base por estaciones base.

En los diferentes resultados se ha visto que el primer efecto es mucho más negativo que el segundo. El hecho de que un slot se vea interferido por dos comporta unas pérdidas de capacidad que varían desde el 26 % con sistemas que disponen de 3 frecuencias al 16 % para aquellos que disponen de las 10.

El segundo efecto no repercute en la calidad final del sistema aunque sí en sus parámetros internos. Al establecerse una nueva llamada la calidad de los enlaces de subida y bajada está desbalanceada. Por las características del sistema DCA del DECT, el enlace de bajada tiene una mayor relación C/I. Sin embargo, cuando se tienen dos sistemas sincronizados, a lo largo de la conversación los dos canales tienden a igualarse en calidad. Si los sistemas están desincronizados un número entero de slots (cada slot sólo interfiere a otro slot) ésta igualación no se consigue por el hecho de que terminales interfieren a terminales y estaciones base a estaciones base. Este comportamiento afecta básicamente a los traspasos. Aunque el número total de ellos no se modifique, y por consiguiente tampoco la probabilidad de interrupción de llamada, sí que varía el enlace que desencadena el traspaso. En sistemas sincronizados prácticamente el total de los traspasos vienen dados por el enlace de bajada. En sistemas desincronizados un número entero de slots se inician más en el canal de subida que en el de bajada pero en partes similares. Finalmente, si ambos sistemas están desincronizados un número no entero de slots el número de traspasos se incrementa en gran medida (más de un 350 %), aunque en este caso ya se ha comentado que la capacidad del sistema para un mismo grado de servicio también disminuye.

6.12 EFECTO DE LA DURACIÓN DE LAS LLAMADAS: TRÁFICO DE DATOS

En la actualidad estamos asistiendo al desarrollo e implementación de aplicaciones de datos cuyos tiempos medios de duración difieren del de la telefonía convencional. En diversos estudios se ha visto que el tiempo medio de una conversación telefónica varía entre 100 y 120 segundos [MON][GRA].

Encontramos otros servicios como el telefax, mensajería electrónica, transmisión de datos a baja velocidad (correo electrónico, acceso a Internet, acceso a bases de datos, etc.) que experimentan una creciente utilización. Para dar curso a estos servicios el estándar DECT proporciona dos alternativas. La primera es utilizar un módem o el fax

por la banda de voz. En este caso el codificador ADPCM no permite todo el rango de velocidades que ofrecen los módems que actualmente se encuentran en el mercado. La recomendación del ITU-T (*International Telecommunications Union - Telecommunications Standardization Sector*) G.721 con el algoritmo a 32 Kbps asegura el funcionamiento de módems del tipo V.21, V.22 bis, V.23 y V.26 ter, para velocidades de hasta 2400 bps. Módems a 4800, como la norma V.27 bis pueden utilizarse con una degradación adicional a la que se puede esperar en un sistema PCM a 64 Kbps [ETR139]. Acerca del servicio de telefax, el codificador soporta los de grupo 2 y 3 pero hasta una velocidad máxima de 7200 bps. Para obtener el funcionamiento completo de todos los módems que funcionan en banda vocal se debe utilizar un canal de 64 Kbps o un adaptador de terminal.

La segunda alternativa es utilizar el canal que proporciona el DECT sin el codificador. De esta forma se consigue un canal digital de 32 Kbps en los sentidos.

Para los diferentes servicios mencionados anteriormente existen estudios sobre su duración media:

- Transferencia de ficheros en lotes: 30 segundos disponiendo de un canal de 32 Kbps [ETR015].
- Telefax: La mayoría de fax del grupo 3 utilizan una velocidad de 9600 bps con una duración media por página transmitida de 20 segundos más 15 segundos para el protocolo inicial [BAR][CON]. Dado que la extensión media de un fax es de dos páginas, el tiempo de transmisión en estas circunstancias es de 55 segundos. Al transmitirlo mediante un enlace que utilice el protocolo DECT, si se utiliza la banda una velocidad de 7200 bps en la banda de voz el tiempo de transmisión resulta $55 \times 9600 / 7200 = 73$ segundos. Si utilizamos el canal a 32 Kbps es de $55 \times 9600 / 32000 = 16.5$ segundos.
- Correo electrónico: La estimación de del tiempo medio de transmisión la basamos en que la longitud media del mensaje es de 50 Kb [BAR] y que el número de mensajes por terminal y día es 8. Si suponemos que se accede a la red mediante un módem a 7200 bps la duración de un mensaje es de $50000 / 7200 = 7$ segundos por mensaje o 56 segundos al día. Si se considera que se revisa el correo dos veces al día se obtienen duraciones medias de llamada de 28 segundos. Utilizando el canal a 32 Kbps cada mensaje tiene una duración de 1.6 segundos.

Para evaluar el impacto del tiempo medio de duración de una llamada en un sistema RLL, se han realizado simulaciones donde se cursan llamadas convencionales de voz, con una duración media de 100 segundos, junto con otras que se consideran de datos y tienen una duración media de 30 segundos. El escenario simulado dispone de antenas de terminal y estación base omnidireccionales, utiliza las 10 frecuencias del DECT e instala dos transceptores por RFP. Para el modelo de propagación se ha escogido el de visión directa (LOS) descrito en el apartado 6.4.1.1.

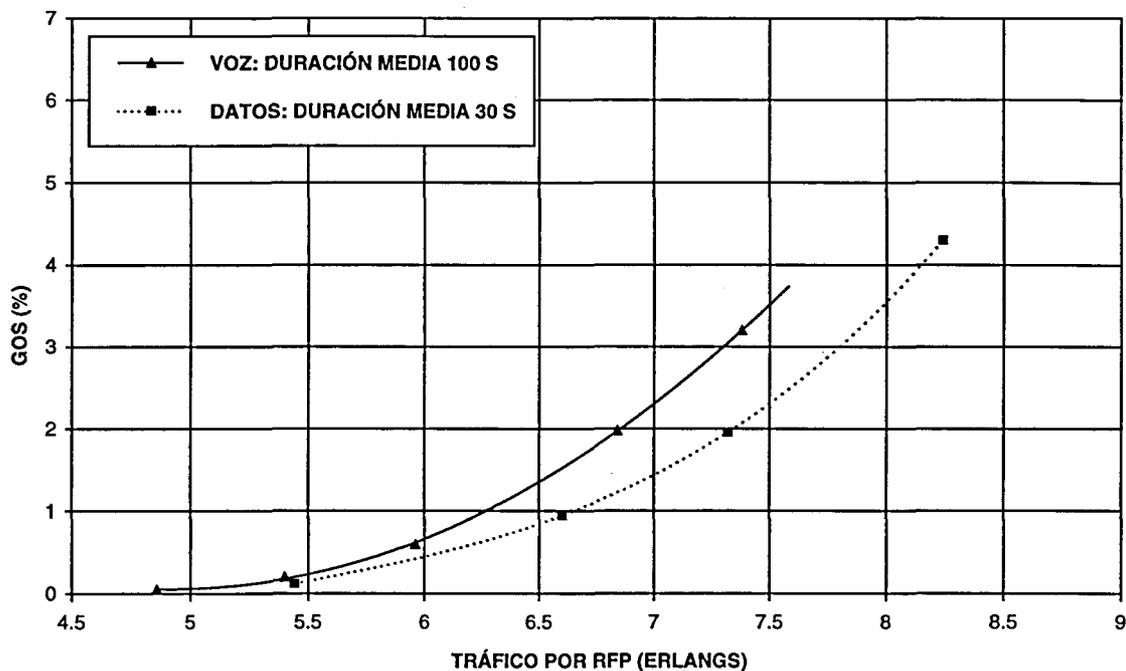


Figura 6.12.1 Comparación entre dos escenarios, cada una de ellos con un tipo de tráfico.

En la figura 6.12.1 se representan los resultados de dos simulaciones separadas donde cada una de ellas sólo ofrece un tipo de llamadas. Podemos observar que las llamadas de más corta duración se comportan mejor que las más largas. Este comportamiento es diferente al de las redes de telefonía fija donde para dos sistemas, con el mismo tráfico cursado, el grado de servicio se mantiene constante. Esta conducta se debe a que en los sistemas de telefonía fijos, las llamadas no se interrumpen, sólo pueden bloquearse en el establecimiento si no encuentran ningún canal disponible. Al tener igual tráfico, los dos sistemas tendrán también la misma probabilidad de bloqueo, aunque cuando se cursan menos llamadas, el número de bloqueadas es menor.

En un sistema de bucle de abonado vía radio, una llamada puede interrumpirse antes de finalizar y de la forma en que se ha definido el grado de servicio, estas llamadas son consideradas más perjudiciales que las bloqueadas. En particular se ponderan por 10. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la duración de las llamadas influye de igual forma en un sistema fijo que en uno de acceso radio si este último no está limitado por interferencias. Si por el contrario el sistema se encuentra limitado por interferencias, como en el caso de la figura 6.12.1, el comportamiento es peor cuando las llamadas se alargan.

Este efecto es debido a que la aparición de nuevas llamadas en sistemas DCA pueden causar traspasos a otras llamadas. Cada traspaso es considerado como una nueva llamada que intenta acceder al sistema, y como tal tiene una cierta probabilidad de bloqueo, que en caso de producirse se convertiría en una llamada interrumpida. Si una

llamada es más larga, sufrirá más traspasos y su probabilidad de interrupción también crecerá, empeorando el grado de servicio.

Podemos ver en la citada figura, como para los tiempos medios de llamada considerados para un GOS del 1 %, el sistema con llamadas de 100 segundos consigue 6.25 Erlangs por RFP mientras que el sistema con llamadas de 30 segundos consigue 6.6 Erlangs. Nótese que este incremento de capacidad del 5.6 % se consigue sin emplear ninguno de los métodos comentados anteriormente, sino que es fruto exclusivamente de la duración de las llamadas.

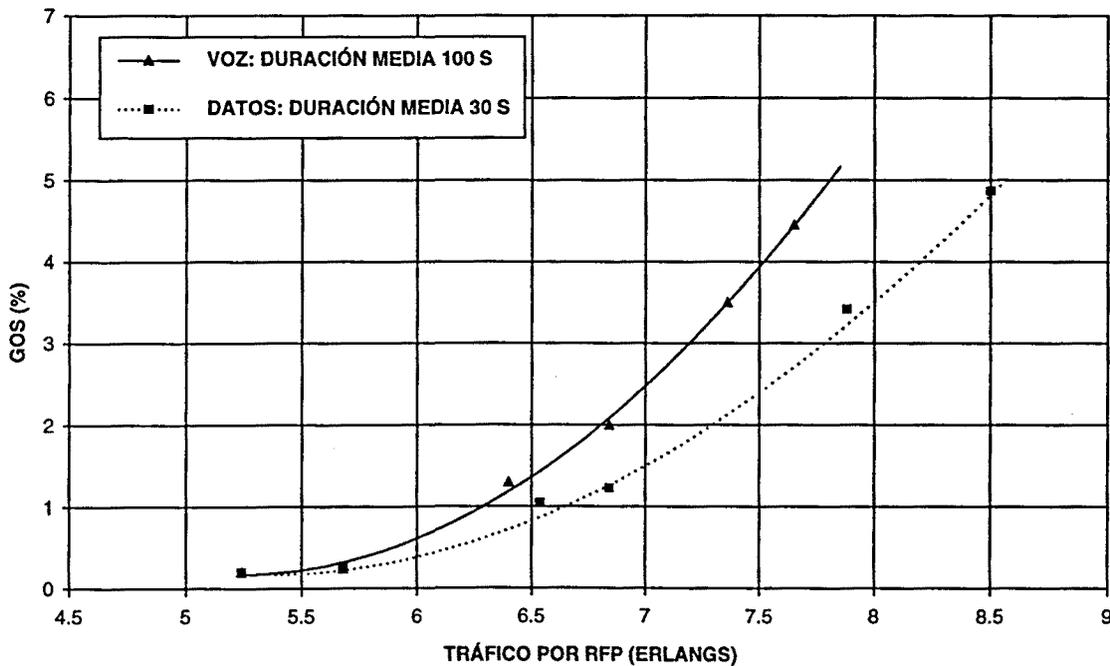


Figura 6.12.2 Calidad de las llamadas en un escenario con el 90 % de tráfico de voz y el 10 % de datos.

No es usual encontrar una situación como la simulada en que cada sistema tenga un solo tipo de tráfico. Lo más frecuente es encontrar redes de acceso donde los abonados ofrezcan toda clase de tráfico y en diferentes proporciones. Se ha querido evaluar el impacto que puede tener en la calidad del sistema la mezcla de llamadas de diferente duración. Las figuras 6.12.2 y 6.12.3 presentan los resultados de dos sistemas donde el primero cursa un 90 % de llamadas de voz y un 10 % de datos y el segundo un 75 % de voz y un 25 % de datos. En ambos casos, la calidad de los dos sistemas es muy aproximada a la obtenida en la figura 6.12.1, con lo que podemos afirmar que la duración de un tipo de llamadas no afecta al resto de tipos de la misma o de diferente duración.

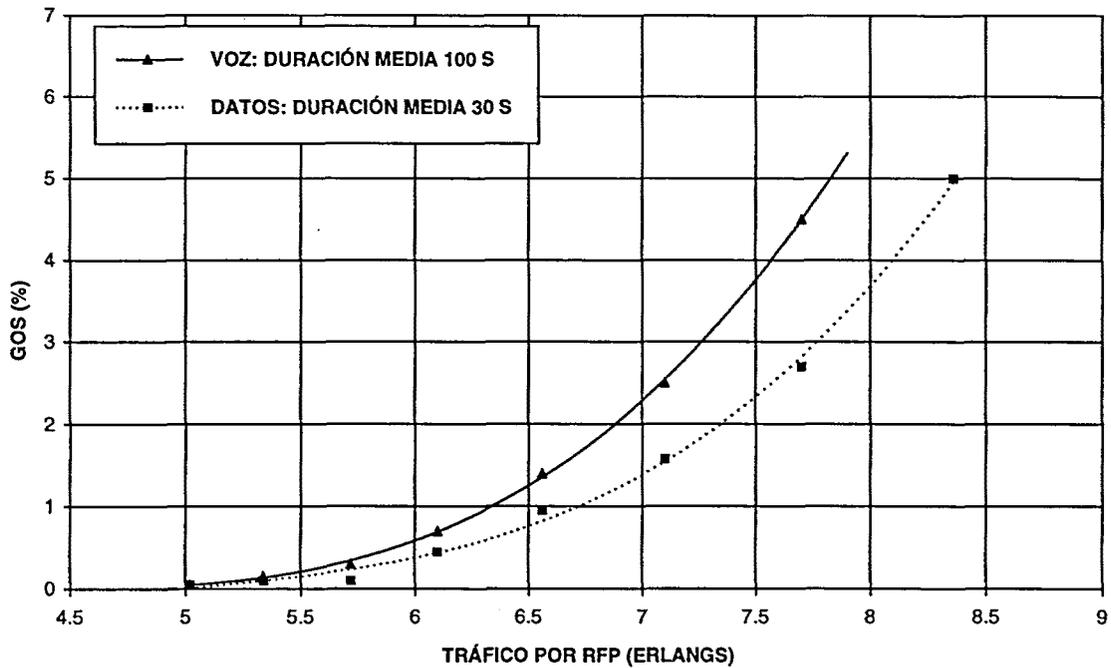


Figura 6.12.3 Calidad de las llamadas en un escenario con el 75 % de tráfico de voz y el 25 % de datos.

6.12.1 CONCLUSIONES

La conclusión que se extrae de estos resultados es que la duración de una llamada influye en su propia calidad y no en la de las demás. Además, siempre que exista una cierta probabilidad de interrupción, aquellas llamadas que al ser de mayor duración deban realizar más trasposos, la probabilidad de verse interrumpidas aumenta. Si esta probabilidad de interrupción tiene más peso que la de bloqueo, el grado de servicio del sistema disminuye.

7. ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL DECT UTILIZADO EN EXTERIORES

En el capítulo anterior se ha estudiado mediante métodos de simulación la capacidad que tiene el DECT utilizado en exteriores. Se ha mostrado básicamente el tráfico que pueden cursar este tipo de sistemas para un grado de servicio medio del 1 % pero no se ha hecho hincapié en otros parámetros de interés. En la primera parte de este capítulo se presentan y comentan estadísticas del sistema que ayudan a comprender mejor su funcionamiento. Entre ellas encontramos las distribuciones de potencias de señal deseada e interferencias recibidas por los equipos radio, las distancias entre estaciones base y terminales, o las posiciones de terminales que generan más trasposos e interrupciones.

En la segunda parte se realiza un estudio analítico de la probabilidad de bloqueo debida a interferencias para sistemas de asignación fija de canal (FCA). En un principio estos sistemas no deberían tener problemas de interferencias ya que al realizar el plan frecuencial, dos células utilizando el mismo grupo de frecuencias se sitúan a suficiente distancia para que no se interfieran entre ellas. Sin embargo, en estos casos no se puede prever las atenuaciones por sombras, que en algunos casos producen importantes pérdidas de señal y no permiten establecer una comunicación por falta de calidad en los receptores. En la tercera parte del capítulo se extiende este cálculo para sistemas FCA a sistemas de asignación dinámica de canal (DCA). Se supone que los sistemas DCA, al autoadaptarse a las condiciones interferentes, distribuyen las frecuencias reutilizadas de forma uniforme sobre el área de servicio. En estas condiciones un sistema DCA tendría una distribución de frecuencias parecida a un sistema FCA, aunque la posición de las mismas puede cambiar de células a lo largo del tiempo. Finalmente el modelo analítico obtenido se adapta a un entorno de bucle de abonado vía radio y se compara con el modelo simulado utilizado en el capítulo anterior.

7.1 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Para comprender el funcionamiento de un sistema de comunicaciones celulares no es suficiente el conocimiento de su capacidad de tráfico, sino que además resulta interesante observar el comportamiento de otras medidas. En este apartado se presentan los parámetros que se han creído más relevantes.

7.1.1 DISTANCIA ENTRE TERMINAL Y ESTACIÓN BASE

En los sistemas de comunicaciones móviles que utilizan el estándar DECT, el terminal escoge la estación base a la que debe engancharse en base a la potencia que recibe. Al conectarse, el terminal hace un barrido de todos los canales y ordena las estaciones base según la potencia que de ellas recibe, posteriormente se conecta a la mejor.

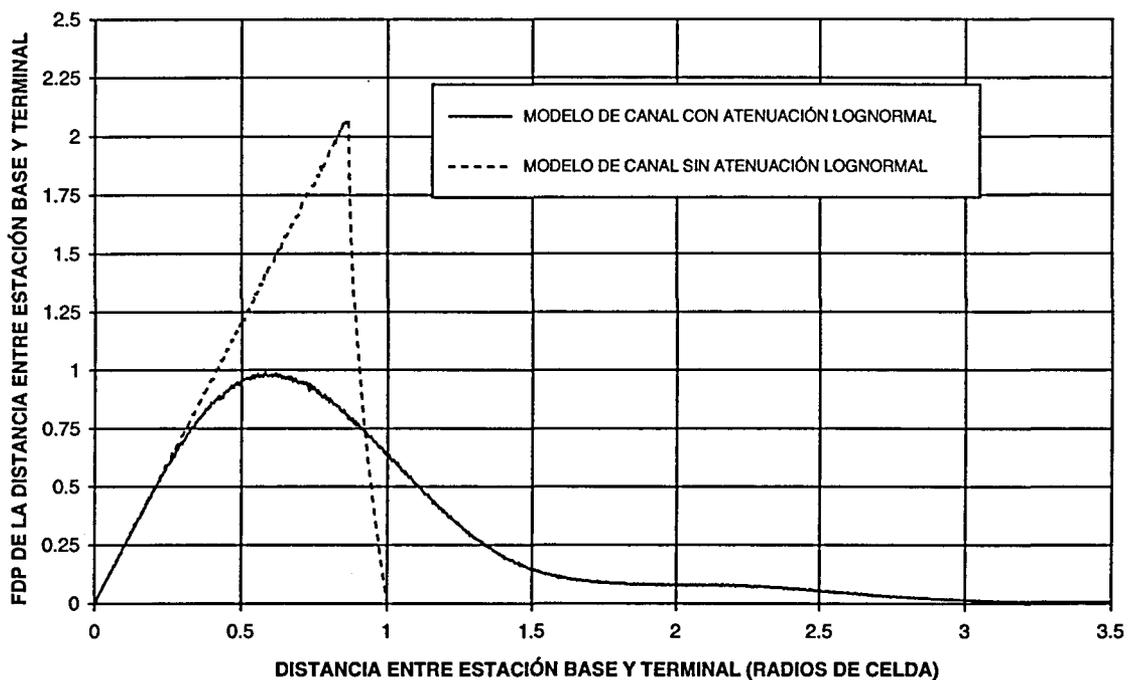


Figura 7.1.1 Función densidad de probabilidad de la distancia entre estación base y terminal.

En un principio podría parecer que la estación base de la que el terminal recibe más potencia es la que se encuentra más próxima, pero en realidad la potencia recibida depende de otros factores además de la distancia entre estación base y terminal. En particular depende de todos los parámetros que se tienen en consideración en el modelo de propagación.

En el modelo de pérdidas de propagación utilizado para realizar las simulaciones de un sistema de bucle de abonado vía radio se consideran la distancia entre transmisor y receptor, y una atenuación aleatoria con distribución lognormal debida a sombras. Esta distribución aleatoria tiene una media de 0 dB y desviación típica de 8 dB, con lo que existen valores que atenúan y otros que amplifican la señal transmitida.

En la figura 7.1.1 se ha representado la función densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones base y terminal para un sistema RLL bastante saturado con antenas omnidireccionales en todos los equipos radio, 100 estaciones base, disponibilidad de 3 portadoras y un tráfico cursado de 2.43 Erlangs por RFP que resulta en un GOS medio del 5 %. En dicha figura se presentan dos gráficas pertenecientes a dos sistemas diferentes, la única diferencia entre ambos es que en el primero, el modelo de pérdidas de propagación del sistema considera el factor de pérdidas debidas a sombras y en el segundo no se tiene en cuenta.

Cuando el modelo de canal no dispone de atenuación lognormal todos los terminales se enganchan a la estación base más cercana. En este caso la distribución de la distancia entre estación base y terminal depende de la distribución de las posiciones en que aparecen los terminales. En el modelo considerado los terminales aparecen de forma uniforme sobre un área de servicio donde las estaciones base omnidireccionales están distribuidas hexagonalmente. En estas circunstancias el número de terminales aparecidos a igual distancia de la estación base crece linealmente con la distancia a la que se encuentran de la estación base formando círculos concéntricos a la misma, hasta un radio máximo igual a la apotema del hexágono. A partir de este punto el número de usuarios decrece hasta llegar al radio del hexágono. Este proceso es el mismo que el obtenido por simulación y representado por la línea discontinua de la figura 7.1.1.

Al considerar la atenuación lognormal en el modelo de propagación, como ya se ha comentado anteriormente, la mayor potencia recibida no siempre resulta ser de la estación base más próxima. Observamos en la citada figura que existe una parte considerable de terminales que se conectan a estaciones base que no son las más cercanas, llegando incluso a distancias de varios radios de célula.

El hecho de permitir a terminales que se conecten a estaciones base que teóricamente no dan cobertura a la posición en que se encuentra dicho terminal, es una práctica común de los sistemas de comunicaciones celulares ya que estos se basan en potencias recibidas y no en distancias.

El porcentaje de terminales que se no conectan a la estación base más próxima depende de dos factores. El primero es el propio factor aleatorio lognormal, normalmente se considera que tiene media 0 dB, pero su desviación típica puede variar entre los 4 dB y los 12 dB [ZON], [JAK]. Cuanto mayor sea la desviación típica mayores serán las variaciones de potencia recibida y también más las llamadas que se conecten a estaciones base lejanas. El segundo factor que influye en el porcentaje es la pendiente de pérdidas por distancia considerada por el modelo. Si se utilizan pendientes

muy fuertes, se pondera más la componente de pérdidas debidas a la distancia y resulta más difícil que el factor aleatorio pueda compensar la diferencia existente entre la estación base próxima y las demás. En este caso el número de llamadas conectadas a estaciones base lejanas disminuye. Para pendientes de pérdidas cercanas a la propagación en visión directa el efecto es el contrario.

7.1.2 POTENCIAS RECIBIDAS: SEÑAL DESEADA E INTERFERENCIAS

En sistemas de comunicaciones celulares donde no se dispone de control de potencia, las distintas conexiones reciben diferentes niveles de potencia. La potencia media de señal deseada recibida en una posición depende de la distancia a la que se encuentre de la estación base y de la pendiente de pérdidas. En este caso no depende del factor aleatorio lognormal debido a sombras ya su media es de 0 dB.

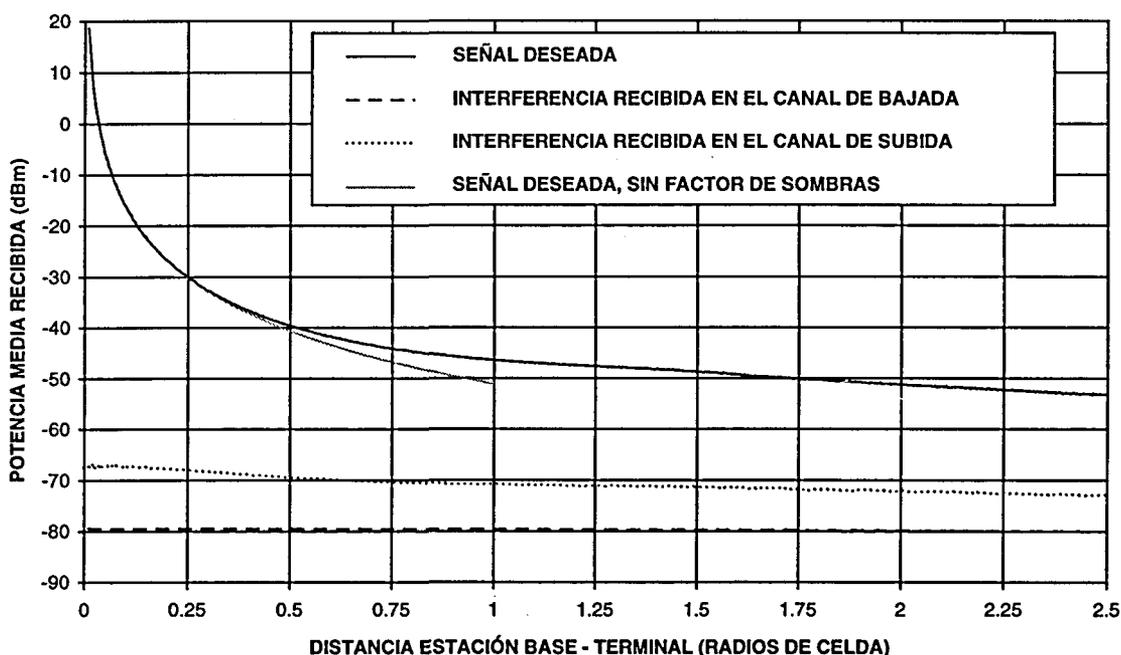


Figura 7.1.2 Potencias medias de la señal deseada y de las interferencias recibidas por el terminal y la estación base en fase de establecimiento y en relación a la distancia entre el terminal y la estación base.

La figura 7.1.2 representa las potencias medias de señal deseada y de interferencias recibidas en los extremos de una conexión en el momento de establecer una llamada, en relación a la distancia que los separa. El sistema simulado es el mismo que el del apartado anterior: sistema RLL bastante saturado con un tráfico cursado de 2.43 Erlangs por RFP y que proporciona un GOS medio del 5 %, antenas

omnidireccionales en todos los equipos radio, 100 estaciones base y disponibilidad de 3 portadoras. Podemos observar que a medida que el terminal se aleja de la estación base la potencia de señal deseada decrece potencialmente y en dependencia directa de la pendiente de pérdidas por distancia. Sin embargo, al llegar al extremo de la célula la curva de potencia deseada se suaviza y no decrece tanto como una función potencial. Este efecto es consecuencia del factor aleatorio de sombras. Aquellas llamadas que reciben poca potencia debido a que se encuentran cercanas a la frontera de la célula y se les ha asignado un factor aleatorio desfavorable, con gran probabilidad encuentran otra estación base más lejana pero de la que reciben mayor potencia. Con ello, en el momento de realizar la media, aquellas llamadas que reciben menor potencia no se contabilizan, ya que se han enganchado a otras estaciones base, mientras que las de mayor potencia sí. En consecuencia la potencia media recibida resulta mayor de lo que se esperaría. Este razonamiento también se aplica para las llamadas que se enganchan a estaciones base que no son las más cercanas (distancias mayores a 1 radio de célula). En estas posiciones sólo aparecen llamadas que tienen un factor de sombras muy favorable y la potencia media resulta superior al que se obtendría sin este factor aleatorio. Para contrastar este resultado se ha realizado una simulación del mismo sistema pero sin asignar el factor de sombras al modelo de pérdidas de propagación. Podemos observar en la misma figura que la distancia máxima a la que se encuentra el terminal es de un radio y la potencia recibida decrece de forma más pronunciada.

Otro elemento que influye en la calidad del sistema es la interferencia recibida en los dos enlaces de la conexión. La primera característica que podemos observar en la figura 7.1.2 es que las interferencias recibidas por los enlaces de subida y de bajada son diferentes. Ya se comentó con anterioridad que en establecimiento, el canal de bajada resulta mejor que el de subida como consecuencia de que es el terminal quien escoge el canal para la conexión. En este caso la diferencia existente es bastante significativa y varía entre los 12 dB para terminales muy próximos a la estación base y 7 dB para los más alejados. Esta diferencia de potencia interferente recibida explica porque el canal de subida es casi siempre peor que el de bajada.

En la figura 7.1.2 se observa que la potencia interferente media recibida por los enlaces de bajada y subida es prácticamente constante para toda distancia entre terminal y la estación base. En sistemas FCA se realiza una planificación frecuencial de forma que una célula ve a otras células utilizando el mismo canal formando coronas concéntricas a ella. En sistemas DCA, la posición de las conexiones interferentes no es fija pero el propio sistema las distribuye de forma que queden lo máximo separadas unas de otras. La distribución final es la misma que para los sistemas FCA, cada receptor encuentra a sus interferencias co-canal distribuidas en coronas concéntricas. Normalmente se realiza la aproximación de que únicamente influyen en la calidad de la comunicación las 6 más próximas que son las pertenecientes a la primera corona. La ubicación del terminal dentro de la célula hace que el receptor esté más cerca de unas interferencias que de otras, cuando modifica su posición, las distancias también cambian pero, continúa estando más cerca de unas que de otras, aunque no sean las mismas que

antes. La consecuencia de ello es que la suma de estas interferencias resulta prácticamente constante ya que unas se compensan con otras. Además de que las diferencias entre distancias son relativamente pequeñas respecto a la distancia total entre transmisor interferente y receptor. Otra forma de verlo es que la variabilidad de la distancia entre transmisor y receptor es mucho mayor en la señal deseada que en las interferencias.

Sin embargo se percibe una cierta tendencia de decremento de la potencia interferente a medida que el terminal se aleja de la estación base. En el enlace de bajada este decremento sólo se produce para aquellos terminales que se enganchan a estaciones base muy lejanas, distancias superiores a 1.5 radios de células y de forma prácticamente inapreciable. En el enlace de subida el decremento es más significativo, existiendo 4 dB de diferencia entre aquellos terminales muy próximos a la estación base y los que aparecen en la frontera de la célula. Esta disminución de las interferencias es debida a cuanto más alejado esté el terminal de la estación base menos potencia de señal deseada recibe, por lo que para cumplir con los requerimientos de relación C/I la estación base debe ser más rigurosa al aceptar un canal para la conexión. En el estándar DECT, la estación base acepta el canal que le sugiere el terminal siempre y cuando la relación C/I supere el umbral mínimo. En aquellas posiciones donde la potencia recibida es alta la estación base normalmente acepta el primer canal que le propone el terminal, aunque la interferencia en el mismo sea alta. En las posiciones donde la potencia recibida de señal deseada sea menor, la estación base rechaza los canales con mayor nivel de interferencia y sólo acepta los que tienen poca interferencia, con lo que la media se reduce.

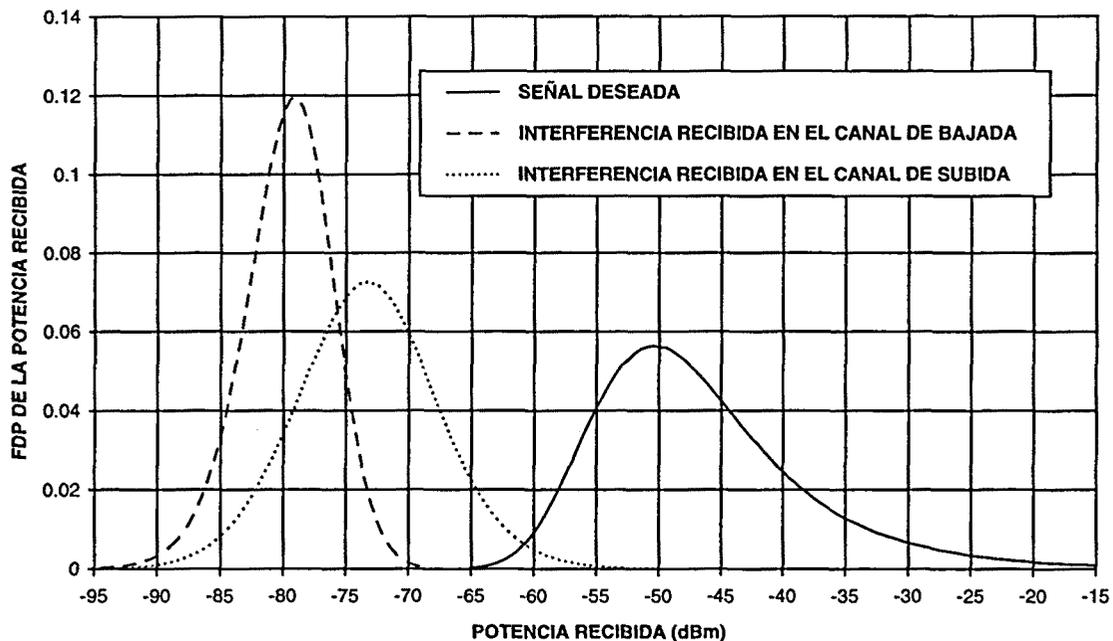


Figura 7.1.3 Función densidad de probabilidad de las potencias recibidas de la señal deseada y de las interferencias.

Además de las medias de las potencias recibidas en función de la posición del terminal respecto a la estación base, también resulta interesante observar sus distribuciones. En la figura 7.1.3 se representan las funciones de densidad de probabilidad de los diferentes valores de potencia recibida de señal deseada e interferencias para el mismo entorno de 100 estaciones base omnidireccionales de la figura 7.1.2. Se observa que la potencia recibida que tiene mayor variación es la de la señal deseada. Ya se comentó en párrafo anterior que la potencia interferente tiene una varianza menor. También puede comprobarse que las interferencias del canal de bajada son más constantes que las del canal de subida. Este efecto es debido a que, el terminal, al poder elegir el canal, su interferencia tiene un cierto grado de orden, mientras que el canal de subida, al imponérsele el canal, sus niveles de interferencia fluctúan más. Sin embargo, ambas funciones de densidad de probabilidad de interferencias, aunque menores que la de la potencia deseada, son bastante anchas. Si calculamos el número de interferencias que una llamada recibe en el escenario simulado vemos que tan solo son 6 de media:

$$2.43 \frac{\text{Erlangs}}{\text{Estación Base}} * 100 \text{ Estaciones Base} * \frac{1}{36 \text{ Canales}} = 7 \text{ Conexiones co - canal}$$

7 señales co-canal repartidas en: una para la llamada estudiada y 6 interferencias. Al haber pocas interferencias la distancia entre ellas fluctúa bastante. Si consideramos la llamada estudiada en el centro y las interferentes formando una corona concéntrica, éstas últimas al no tener ninguna otra interferencia en el borde exterior, pueden variar mucho de posición. La forma de obtener resultados más precisos para estos parámetros es aumentando el área de simulación.

En la figura 7.1.4 se muestran también las funciones densidad de probabilidad de las potencias recibidas, pero en este caso el escenario cuenta con 2500 estaciones base omnidireccionales. Se ha dispuesto que el número de canales disponible sea de 12 (2 frecuencias y 6 slots) y se consigue un GOS del 14.83 % para un tráfico por RFP de 0.42 Erlangs. Con ello el número de interferencias co-canal medio por llamada es de 86:

$$0.42 \frac{\text{Erlangs}}{\text{Estación Base}} * 2500 \text{ Estaciones Base} * \frac{1}{12 \text{ Canales}} = 87.5 \text{ Conexiones co - canal}$$

Puede observarse en la citada figura como ahora la función densidad de probabilidad de potencia de la señal deseada se mantiene, mientras que las funciones de las interferencias se estrechan en gran medida. El resultado son unas interferencias mucho más constantes. Cabe destacar que el canal de subida continúa siendo más variable que el de bajada.

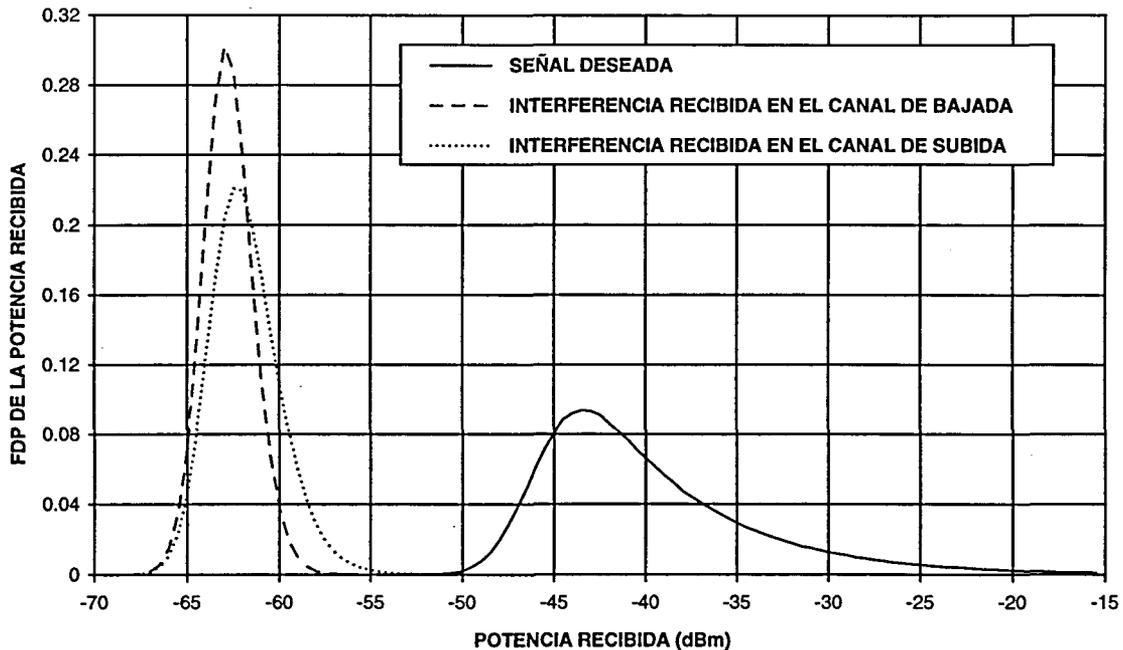


Figura 7.1.4 Función densidad de probabilidad de las potencias recibidas de la señal deseada y de las interferencias para un sistema RLL con 2500 estaciones base.

7.1.3 CALIDAD DE LAS CONEXIONES: RELACIÓN C/I Y GOS

El siguiente parámetro estudiado es la distribución de la relación señal a interferencia. En sistemas de comunicaciones radio donde los equipos no disponen de control de potencia, la calidad de los enlaces depende de la posición de los terminales.

En la figura 7.1.5 puede observarse la relación C/I media en función de la distancia entre el terminal y la estación base, para el mismo escenario de 100 estaciones base omnidireccionales de las figuras del punto anterior. El resultado es el esperado teniendo en cuenta la evolución de las potencias de señal deseada e interferencias. La potencia de señal deseada es la misma para los dos enlaces mientras que el de subida tiene más interferencia que el de bajada. Ello tiene como consecuencia que la relación C/I del enlace de bajada sea superior a la del de subida. Además, la evolución de ambas gráficas de dicha figura sigue la evolución de la potencia de señal deseada de la figura 7.1.2, ya que las interferencias son prácticamente constantes para cualquier distancia de separación entre el terminal y la estación base. Cuanto más próximo esté el terminal a la estación base mejor es su calidad.

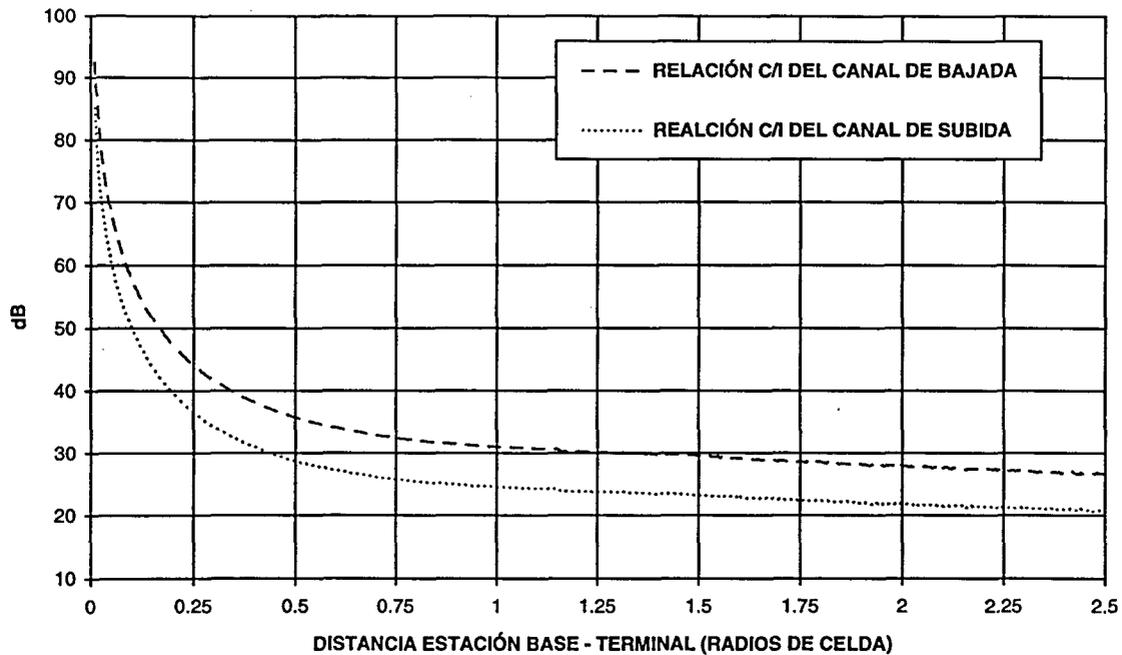


Figura 7.1.5 Relación C/I medias de los dos enlaces de la conexión en relación a la distancia entre el terminal y la estación base.

Obsérvese que a pesar de que la relación C/I media del canal de subida de las llamadas ubicadas en la frontera de la célula sea de 25 dB y de las enganchadas en células lejanas sea de 21 dB, mientras que el umbral mínimo está situado en los 14 dB, se obtiene un GOS deficiente del 5 %. El margen de 11 dB o 7 dB para las dos situaciones no es suficiente para compensar las fluctuaciones de la relación C/I. Para poder observar estas fluctuaciones en la figura 7.1.6 se representan las funciones de densidad de probabilidad de las relaciones C/I a lo largo de la llamada de los dos enlaces.

Ambas funciones de densidad de probabilidad de la relación C/I tienen una forma gaussiana procedente de la combinación de las distribuciones de potencia de señal deseada e interferencia mostradas en la figura 7.1.3. En este caso la relación C/I del canal de bajada continúa siendo superior a la del de subida.

Puede observarse un truncamiento de las dos gráficas en los 14 dB, efecto debido a que cuando un enlace cae por debajo de este umbral la llamada realiza un traspaso o es interrumpida. El hecho de que la función del enlace de subida esté truncada en una posición más cercana al máximo indica que la mayoría de bloqueos e interrupciones de llamada vendrán dadas por este enlace.

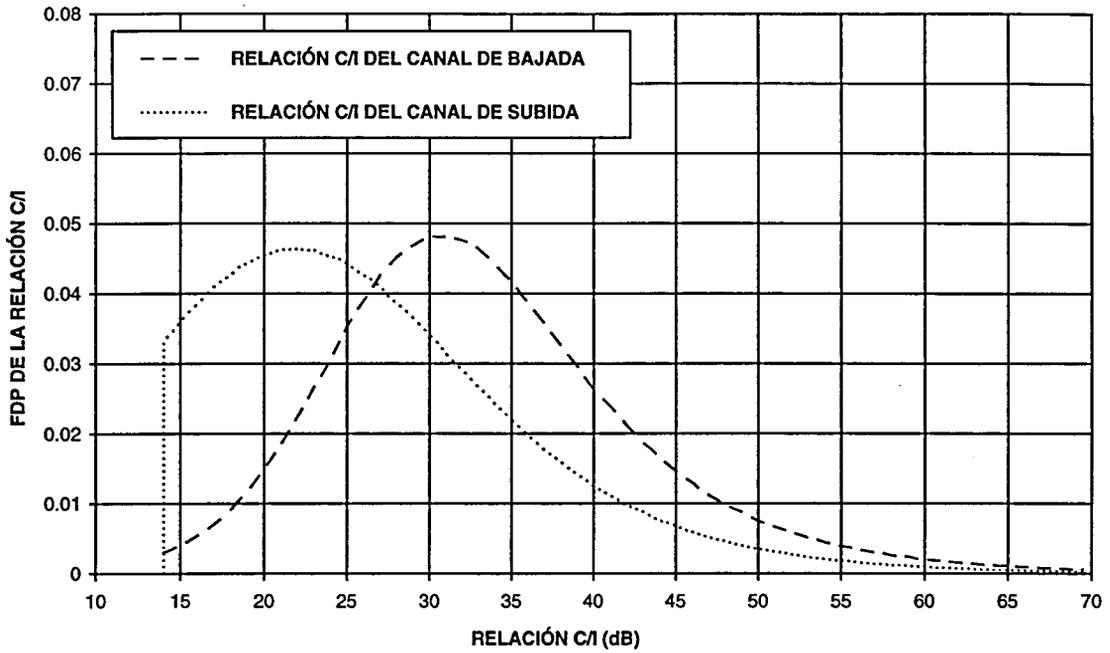


Figura 7.1.6 Función densidad de probabilidad de la relación C/I de los dos enlaces de la conexión.

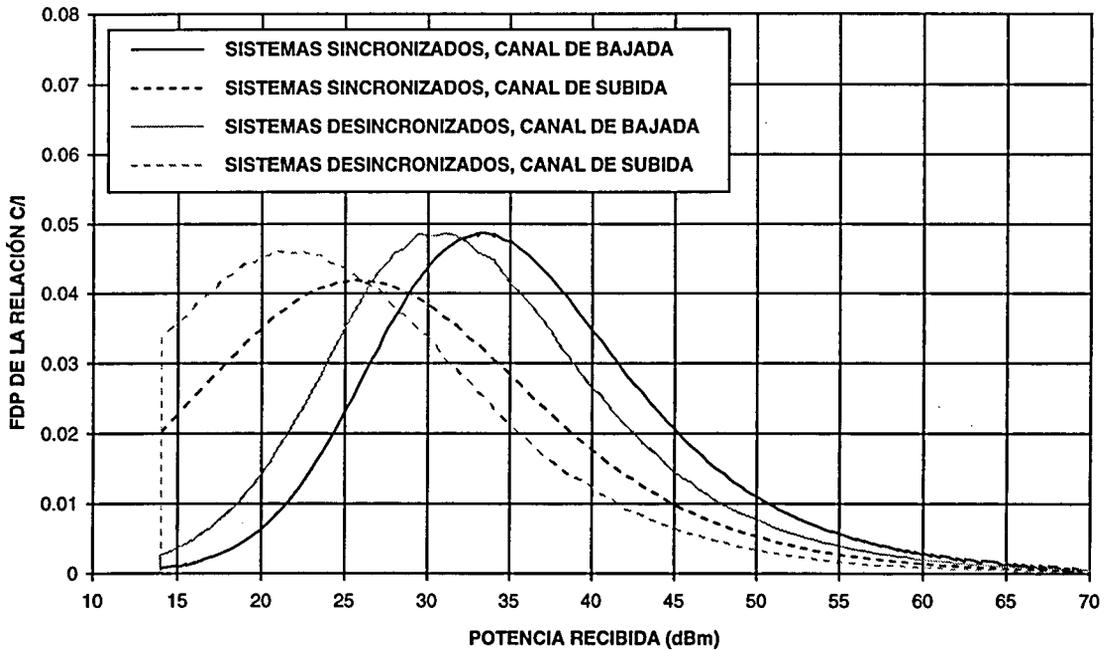


Figura 7.1.7 Comparación de las funciones de densidad de probabilidad de la relaciones C/I de los dos enlaces de la conexión para dos sistemas sincronizados y dos sistemas desincronizados.

En el punto 6.11 se estudió el efecto que producía la desincronización entre dos sistemas. Se vio que la capacidad de dos sistemas desincronizados descendía aproximadamente un 25 % respecto de la capacidad obtenida cuando estaban sincronizados. Se ha creído interesante representar en este punto las funciones de densidad de probabilidad de las relaciones C/I para dos sistemas sincronizados y dos desincronizados 12.5 slots. El escenario simulado es el mismo en ambos casos: 2 sistemas con 100 estaciones base omnidireccionales cada uno, terminales omnidireccionales, 3 frecuencias disponibles y un tráfico cursado en cada caso igual a 0.95 Erlangs por estación base. Cuando se tienen los dos sistemas sincronizados el GOS obtenido es del 1.13 % y en caso contrario de 5.94 %.

El resultado obtenido se muestra en la figura 7.1.7. Puede verse que la consecuencia directa de la desincronización es un aumento de las interferencias y por lo tanto un desplazamiento de las curvas de relación C/I hacia la izquierda. Según la relación C/I, el efecto que produce la desincronización es semejante a un aumento del umbral mínimo de C/I requerido en unos 4 dB. De esta forma podríamos decir que dos sistemas desincronizados son equivalentes a dos de sincronizados pero con un requerimiento de C/I mínima superior en 4 dB, resultado que concuerda por el presentado en [CHU2].

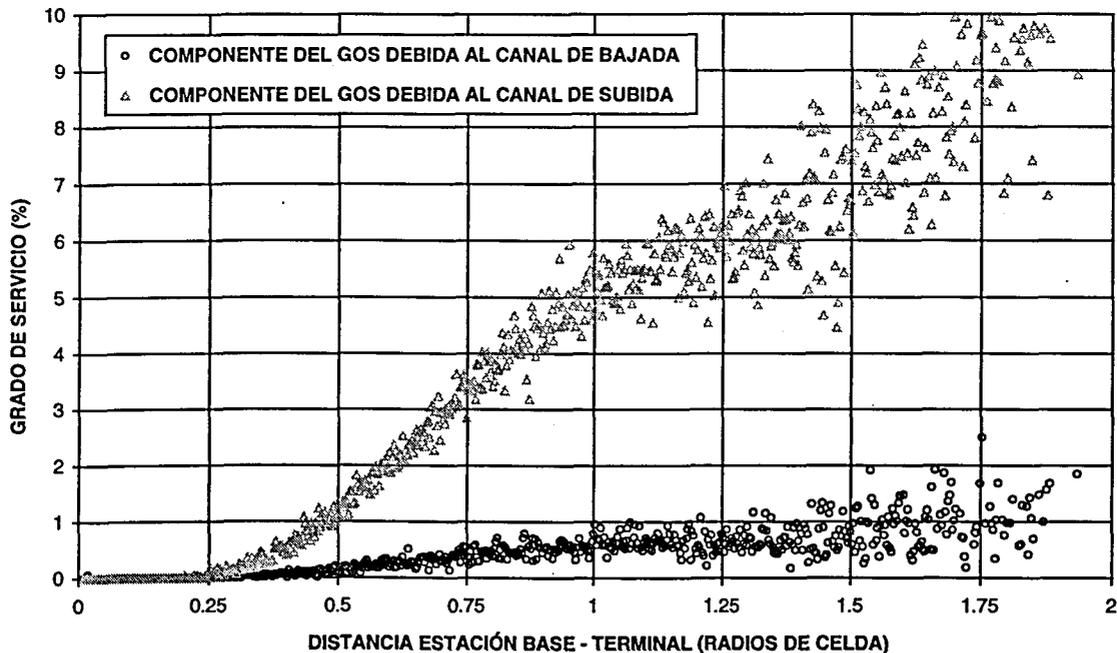


Figura 7.1.8 Grados de Servicio de los dos enlaces de la conexión en relación a la distancia entre el terminal y la estación base.

Para finalizar el estudio de las calidades de los enlaces se ha representado en la figura 7.1.8 las componentes del grado de servicio debidas al canal de subida y al de bajada en función de la distancia del terminal a la estación base. El entorno simulado es

el del sistema de 100 estaciones base omnidireccionales utilizado en los puntos anteriores.

En la figura 7.1.8 puede verse la clara diferencia que existe entre las calidades de los enlaces de bajada y de subida y su dependencia con la distancia. El GOS del canal de bajada es muy inferior al de subida y prácticamente despreciable para terminales que se encuentran a distancias menores a medio radio de célula de la estación base. A partir de este punto experimenta un cierto crecimiento pero casi siempre se mantiene por debajo del 1 %.

No ocurre lo mismo para el canal de subida, ya se vio en las curvas de relación C/I que tenía peor calidad. Esta degradación de la calidad se traduce en un considerable aumento del grado de servicio. Solamente aquellas llamadas que se encuentran a muy corta distancia de la estación base, menor de un cuarto de radio de célula, disfrutan de un GOS del canal de subida nulo. A partir de este punto, el GOS del canal de subida aumenta rápidamente llegando al 5 % para las llamadas que aparecen en la frontera de la célula y sigue creciendo para aquellas que se enganchan a estaciones base que no son las más cercanas.

7.1.4 PROBABILIDAD DE TRASPASO

Un aspecto importante a tener en cuenta en sistemas de comunicaciones móviles es el número de traspasos por llamada y la posición en que se desencadenan. En el sistema de bucle de abonado vía radio estudiado, los terminales son estáticos, por lo que la potencia recibida es constante. Ello provoca que los traspasos sean únicamente originados por una variación de la relación señal a interferencia y no por una falta de potencia.

En la figura 7.1.9 se representa la función densidad de probabilidad de las distancias a las estaciones base en que aparecen los terminales que generan algún traspaso y se comparan en con las distancias a las que aparecen los terminales. El entorno simulado es el mismo que el de los puntos anteriores de 100 estaciones base omnidireccionales con 3 frecuencias disponibles. Se observa una gran correlación entre las dos gráficas ya que es normal que en las posiciones donde aparece un mayor número de llamadas también aparezcan más traspasos. Sin embargo, otro factor influyente es la relación C/I que tienen los terminales situados a distintas distancias. Aquellos terminales muy cercanos a la estación base, tienen una alta calidad por lo que no deben realizar muchos traspasos, sin embargo aquellos que están más alejados deben realizar un mayor número de ellos. Esto repercute en que la función densidad de probabilidad de los traspasos que debería ser igual a la de la aparición de llamadas se distorsione, decreciendo para distancias cortas y aumentando para distancias grandes. Se observa que las posiciones donde se producen más traspasos son aquellas situadas cerca de la

frontera de la célula. Ello es debido a que en esta zona existe un gran número de llamadas y que a la vez tienen una calidad bastante pobre.

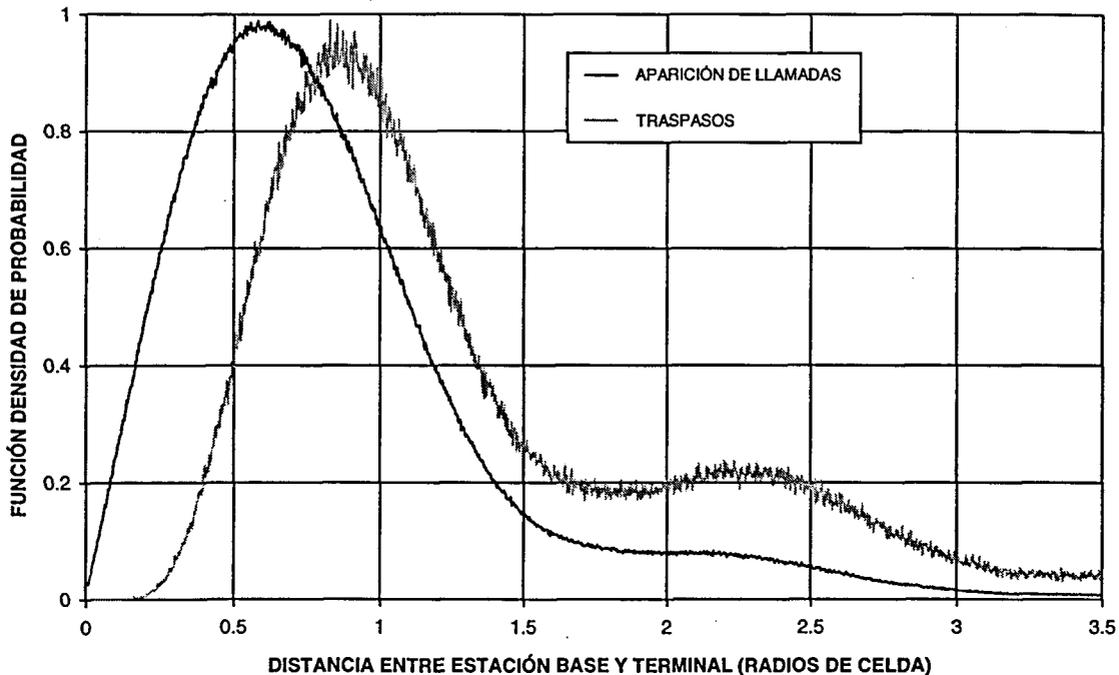


Figura 7.1.9 Función densidad de probabilidad de la distancia entre un terminal que genera un traspaso y su estación base.

Un aspecto a recalcar es que una gran parte de los traspasos vienen dados por aquellas llamadas que no se enganchan a la estación base más cercana. Aunque sólo el 25 % de las llamadas no se enganchan a la estación base más cercana, éstas provocan más del 55 % de los traspasos.

A parte de la densidad lineal de traspasos también resulta conveniente conocer el número de traspasos que debe realizar cada llamada. Este dato nos proporciona información de la calidad de la conexión, ya que cuantos más traspasos realice una llamada mayor será su probabilidad de interrupción.

En la figura 7.1.10 se representan el número de traspasos por llamada en función de la distancia que separa el terminal de la estación base para el mismo escenario que en la figura 7.1.9. Se observa que aquellas llamadas que están conectadas a la estación base más cercana tienen un nivel de traspasos muy bajo: a distancias inferiores al medio radio de célula apenas practican traspasos. Sin embargo, a partir de este punto el número de traspasos por llamada crece linealmente con la distancia a la que se encuentra el terminal de la estación base. Siguiendo la curva vemos que las llamadas situadas justo en el borde de la célula realizan 0.1 traspasos por llamada, mientras que las situadas a distancia de 3 radios de célula deben realizar 0.3 traspasos por llamada. Estos valores

absolutos también dependen del tráfico que el sistema soporta por lo que no pueden tomarse como referencia, pero nos dan una noción del orden de magnitud del número de trasposos y de la tendencia que estos siguen dependiendo de la distancia entre emisor y receptor.

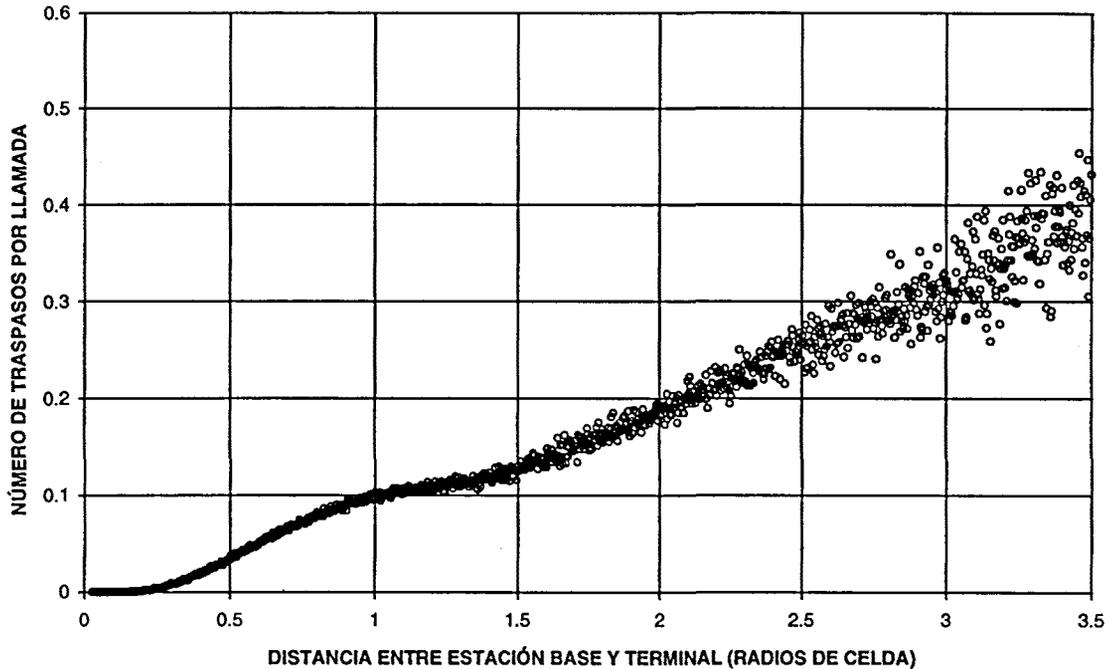


Figura 7.1.10 Número de trasposos por llamada en relación a la distancia entre el terminal y su estación base.

Para concluir el estudio de las características de funcionamiento del sistema de bucle de abonado vía radio, la figura 7.1.11 representa la probabilidad de bloqueo de una llamada en el momento de establecerse y en el momento de realizar un traspaso. En este último caso si la llamada no puede continuar cursándose se considera interrumpida. El entorno simulado el sistema de 100 estaciones base omnidireccionales con 3 frecuencias considerado anteriormente.

Se observa en dicha figura que existe una marcada diferencia entre las probabilidades de bloqueo en establecimiento y en traspaso. Normalmente, los trasposos ocurren en condiciones de picos de tráfico y para llamadas que tienen una relación C/I ajustada al umbral debido a que disponen de una potencia recibida baja. En estas circunstancias la búsqueda de un nuevo canal se hace más difícil por lo que la probabilidad de no conseguirlo aumenta respecto al caso de establecimiento de una nueva llamada.

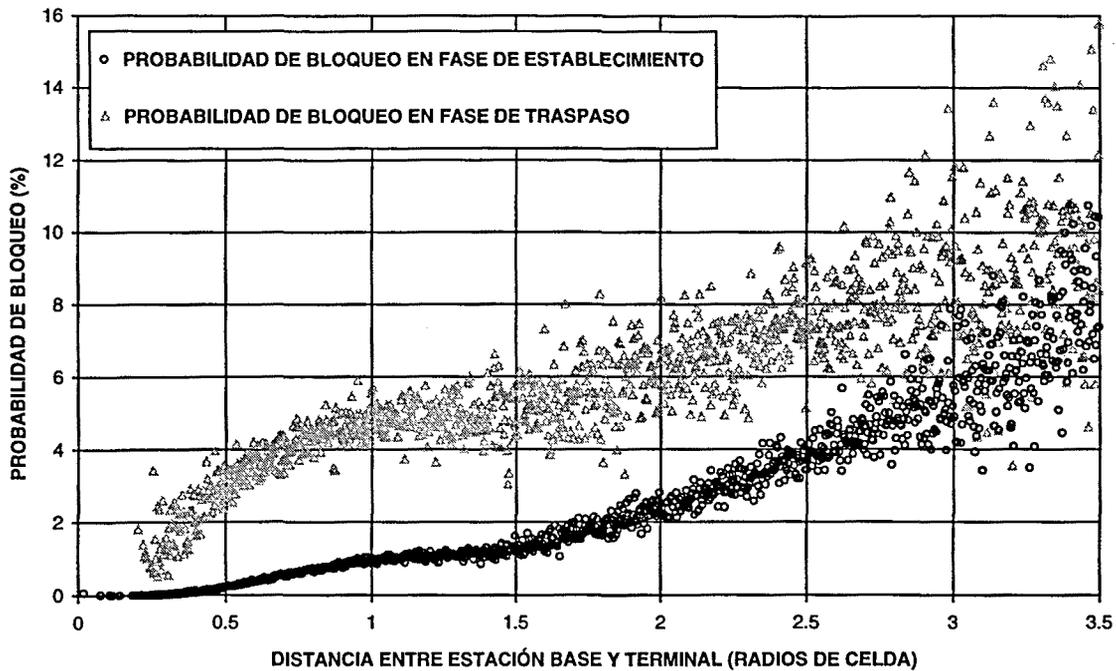


Figura 7.1.11 Probabilidades de bloqueo de una llamada en establecimiento y al intentar un traspaso.

7.2 PROBABILIDAD DE BLOQUEO EN ESTABLECIMIENTO PARA UN SISTEMA FCA

Uno de los problemas más cruciales a resolver en el campo de las redes de comunicaciones móviles es la evaluación de la probabilidad de bloqueo, para un enlace cualquiera, debida a las características variables del sistema de transmisión, esencialmente determinadas por condiciones anómalas de propagación, interferencias co-canal y movilidad de los usuarios. La solución analítica del problema es muy compleja independientemente de la implementación del sistema. Sin embargo es de gran importancia a la hora de realizar planificaciones frecuenciales para sistemas celulares o microcelulares.

Sobre este tema existen diversos artículos que han estudiado el problema en varios escenarios y desde puntos de vista diferentes [SOW1], [SOW2], [SOW3], [PAT], [LIP], [YEH], [CHO], y [LEE3]. En este apartado se realiza una aproximación analítica de la probabilidad de bloqueo debida a efectos de propagación e interferencias también denominada, en los mencionados artículos, probabilidad de *outage* (P_{out}), donde no se consideran las llamadas bloqueadas por falta de canales en las estaciones base. El escenario estudiado es una adaptación del modelo FDMA/TDMA propuesto en [CAI] y adaptado a un modelo de comunicaciones celulares con asignación fija de canal, donde

los terminales son estáticos y que puede representar un sistema de bucle de abonado vía radio.

7.2.1 DEFINICIÓN DE LA PROBABILIDAD DE *OUTAGE* Y CARACTERIZACIÓN DE LA INTERFERENCIA

Definimos la probabilidad de *outage*, P_{out} , para un terminal cualquiera, como la probabilidad de que éste no consiga obtener una probabilidad de error de bit P_e inferior o igual a un umbral predeterminado P_{eo} , de tal forma que:

$$P_{out} = Pr\{P_e \geq P_{eo}\} \quad (7.2.1)$$

Si consideramos que para obtener una probabilidad de error de bit inferior al umbral P_{eo} se requiere una relación señal a interferencia Z en el receptor, superior al umbral Z_o , para el cual $P_e = P_{eo}$, podemos escribir:

$$P_{out} = Pr\{Z \leq Z_o\} \quad (7.2.2)$$

Si suponemos que existen N canales interferentes simultáneamente activos idénticos, con la misma densidad espectral que la señal deseada, la relación señal a interferencia en el receptor puede expresarse como:

$$Z = \frac{c_o^2}{\sum_{i=1}^N c_i^2} \quad (7.2.3)$$

siendo c_o y c_i las envolventes de las señales recibidas deseada e interferentes respectivamente.

En este caso se ha supuesto que las señales interferentes se suman de forma coherente, es decir, están en fase. En [WAN] se estudia un modelo en que las potencias interferentes no se consideran en fase y son sumadas de forma incoherente.

Consideremos Z como la relación entre variables aleatorias:

$$Z = \frac{X}{Y} \quad (7.2.4)$$

donde

$$X = c_o^2 \tag{7.2.5}$$

e

$$Y = \sum_{i=1}^N c_i^2 \tag{7.2.6}$$

y cuyas funciones densidad de probabilidad (fdp) son $p_X(x)$ y $p_Y(y)$ respectivamente, sus funciones de distribución $F_X(x)$ y $F_Y(y)$, con valores medios \bar{x} e \bar{y} , y varianzas σ_x^2 y σ_y^2 . Asimismo definimos la función densidad de probabilidad de Z como $p_Z(z)$ y su función de distribución $F_Z(z)$.

En este caso:

$$F_Z(z) = Pr\{Z \leq z\} = Pr\left\{\frac{X}{Y} \leq z\right\} \tag{7.2.7}$$

las zonas del plano $x - y$ donde se cumple la desigualdad son:

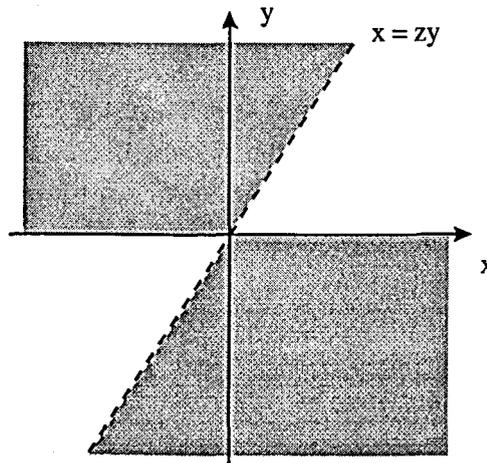


Figura 7.2.1 Areas del plano $x - y$ donde se cumple que $x/y \leq z$.

según la figura 7.2.1 podemos expresar:

$$F_Z(z) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{zy} p_{X,Y}(x,y) dx dy + \int_{-\infty}^0 \int_{zy}^{\infty} p_{X,Y}(x,y) dx dy \tag{7.2.8}$$

siendo $p_{X,Y}(x, y)$ la función de densidad conjunta. Al ser X e Y variables aleatorias independientes podemos escribir:

$$p_{X,Y}(x, y) = p_X(x) * p_Y(y) \quad (7.2.9)$$

Aplicando 7.2.9 en 7.2.8 tenemos

$$F_Z(z) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^{zy} p_X(x) p_Y(y) dx dy + \int_{-\infty}^0 \int_{zy}^\infty p_X(x) p_Y(y) dx dy \quad (7.2.10)$$

Para buscar la función densidad de probabilidad derivamos respecto a z:

$$p_Z(z) = \frac{dF_Z(z)}{dz} \quad (7.2.11)$$

teniendo en cuenta que:

$$\frac{d}{dz} \left[\int_{f(z)}^{g(z)} h(x) dx \right] = \frac{dg(z)}{dz} h(g(z)) - \frac{df(z)}{dz} h(f(z)) \quad (7.2.12)$$

nos queda:

$$p_Z(z) = \int_0^\infty y p_X(zy) p_Y(y) dy - \int_{-\infty}^0 y p_X(zy) p_Y(y) dy \quad (7.2.13)$$

Considerando que X e Y son valores de potencias y por lo tanto siempre positivos:

$$X \geq 0; Y \geq 0 \quad (7.2.14)$$

tenemos que la función densidad de probabilidad vale:

$$p_Z(z) = \int_0^\infty y p_X(zy) p_Y(y) dy \quad (7.2.15)$$

y la función de distribución, partiendo de 7.2.10:

$$F_Z(z) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^{zy} p_X(x) p_Y(y) dx dy + \int_{-\infty}^0 \int_{zy}^\infty p_X(x) p_Y(y) dx dy$$

$$F_Z(z) = \int_0^\infty \left(\int_{-\infty}^{zy} p_X(x) dx \right) p_Y(y) dy \quad (7.2.16)$$

$$F_z(z) = \int_0^{\infty} F_x(zy) p_Y(y) dy \quad (7.2.17)$$

Llegados a este punto si demostramos que se cumple:

$$\sigma_x^2 \gg \sigma_y^2 \quad (7.2.18)$$

se puede aproximar la función densidad de probabilidad de la potencia interferente a una delta de Dirac situada en la potencia media y que tiene como función:

$$p_Y(y) \cong \delta(y - \bar{y}) \quad (7.2.19)$$

Ahora substituyendo 7.2.19 en 7.2.15 y en 7.2.16 se obtiene:

$$p_Z(z) \cong \bar{y} p_X(z\bar{y}) \quad (7.2.20)$$

y

$$F_Z(z) \cong F_X(z\bar{y}) \quad (7.2.21)$$

Esta aproximación simplifica en gran medida el cálculo de la probabilidad de bloqueo en establecimiento, ya que permite considerar la estadística de las interferencias igual a su media.

A continuación se aplica esta aproximación en los modelos de potencias recibidas para un entorno de comunicaciones móviles celulares.

7.2.2 MODELO DE PROPAGACIÓN PARA UN ENTORNO CELULAR

Consideremos una estructura de sistema celular típica donde tanto la señal deseada como la interferente están afectadas por desvanecimientos Rayleigh y efectos de sombras con distribución lognormal.

Bajo estas suposiciones la envolvente de la señal recibida c_i tiene una función densidad de probabilidad Rayleigh [PAR], dada por:

$$p_{c_i}(c_i) = \frac{2c_i}{c_i^2} \exp\left(-\frac{c_i^2}{c_i^2}\right) \quad (7.2.22)$$

siendo c_i^2 la potencia instantánea y $\overline{c_i^2}$ la potencia media local de señal recibida. Si aplicamos la transformación de la función densidad de probabilidad de dos variables:

$$p_Y(y) | dy | = p_X(x) | dx | \quad (7.2.23)$$

obtenemos la función densidad de probabilidad de la potencia instantánea recibida:

$$p_{c_i^2}(c_i^2) dc_i^2 = p_{c_i}(c_i) dc_i \quad (7.2.24)$$

$$p_{c_i^2}(c_i^2) = \frac{p_{c_i}(c_i) dc_i}{dc_i^2} \quad (7.2.25)$$

al ser:

$$dc_i^2 = 2 c_i dc_i \quad (7.2.26)$$

tenemos:

$$p_{c_i^2}(c_i^2) = \frac{p_{c_i}(c_i)}{2c_i} \quad (7.2.27)$$

finalmente, la función densidad de probabilidad de la potencia recibida c_i^2 de una señal respecto a su potencia media local $\overline{c_i^2}$ es exponencial:

$$p_{c_i^2}(c_i^2) = \frac{1}{\overline{c_i^2}} \exp\left(-\frac{c_i^2}{\overline{c_i^2}}\right) \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (7.2.28)$$

donde se considera la señal deseada $i = 0$, y el resto de interferentes $i = 1, 2, \dots, N$.

La potencia media local de una señal recibida en un punto ($\overline{c_i^2}$) está bajo los efectos de sombras o desvanecimientos lentos. Estos desvanecimientos le infieren una distribución lognormal centrada en la potencia media recibida ($\overline{c_{im}^2}$) que únicamente depende de la distancia entre transmisor y receptor y del modelo de pérdidas de propagación.

Así, una vez fijada la distancia entre el i -ésimo transmisor y el receptor D_i , existen diversos estudios sobre la potencia media local recibida ($\overline{c_i^2}$) y se demostrado

que está bien representada por una distribución lognormal. Con todas las potencias expresadas en dB (\overline{C}_i^2 , \overline{C}_{im}^2) tiene la forma [LEE2]:

$$p_{\overline{C}_i^2}(\overline{C}_i^2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\overline{C}_i^2 - \overline{C}_{im}^2)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7.2.29)$$

Para expresar esta función densidad de probabilidad con las potencias en unidades lineales (c_i^2 , c_{im}^2) aplicamos el cambio de 7.2.23:

$$p_{\overline{C}_i^2}(\overline{C}_i^2) d\overline{C}_i^2 = p_{c_i^2}(c_i^2) dc_i^2 \quad (7.2.30)$$

con:

$$\overline{C}_i^2 = 10 \log_{10}(c_i^2) = 10 \log_{10}(e) \text{Ln}(c_i^2) \quad (7.2.31)$$

$$d\overline{C}_i^2 = 10 \log_{10}(e) \frac{1}{c_i^2} dc_i^2 \quad (7.2.32)$$

definimos

$$h = 10 \log_{10}(e) \quad (7.2.33)$$

y substituyendo 7.2.31 en 7.2.29 y éste resultado junto con 7.2.32 y 7.2.33 en 7.2.30 obtenemos:

$$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(h \text{Ln}(c_i^2) - h \text{Ln}(c_{im}^2))^2}{2\sigma^2}\right) h \frac{1}{c_i^2} dc_i^2 = p_{c_i^2}(c_i^2) dc_i^2 \quad (7.2.34)$$

finalmente:

$$p_{c_i^2}(c_i^2) = \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\text{Ln}(c_i^2) - \text{Ln}(c_{im}^2))^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) h \frac{1}{c_i^2} \quad (7.2.35)$$

En esta última expresión σ , expresada en dB, es la desviación típica de la distribución lognormal y se ha encontrado experimentalmente que puede variar entre un rango de valores de 4 - 12 [ZON], [JAK], que depende en gran medida del tipo de terreno. En este estudio se ha considerado que σ es igual para toda el área del sistema celular y para las señales deseadas e interferentes.

La potencia media ($\overline{c_{im}^2}$) recibida ha sido considerada como:

$$\overline{c_{im}^2} = k D_i^\beta \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (7.2.36)$$

donde k es la misma constante para cada i , y β es la pendiente de pérdidas de propagación.

Con todo ello la función densidad de probabilidad de la potencia instantánea (c_i^2) recibida en un punto respecto a la potencia media ($\overline{c_{im}^2}$) está representada por la expresión:

$$p_{c_i^2}(c_i^2) = \int_0^\infty \frac{1}{c_i^2} \exp\left(-\frac{c_i^2}{c_i^2}\right) \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(c_i^2) - \ln(\overline{c_{im}^2})\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) d\overline{c_i^2} \quad (7.2.37)$$

El valor medio de c_i^2 teniendo en cuenta los efectos de desvanecimientos rápidos multicamino Rayleigh y los efectos de las sombras lognormal, $E[c_i^2]$, se puede calcular como:

$$\begin{aligned} E[c_i^2] &= \int_0^\infty c_i^2 p_{c_i^2}(c_i^2) dc_i^2 = \\ &= \int_0^\infty \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(c_i^2) - \ln(\overline{c_{im}^2})\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \int_0^\infty \frac{c_i^2}{c_i^2} \exp\left(-\frac{c_i^2}{c_i^2}\right) dc_i^2 d\overline{c_i^2} = \\ &= \int_0^\infty \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(c_i^2) - \ln(\overline{c_{im}^2})\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \overline{c_i^2} d\overline{c_i^2} \end{aligned}$$

Realizando el cambio:

$$t = \text{Ln} \left(\frac{\overline{c_i^2}}{c_{im}^2} \right)$$

nos queda:

$$E[c_i^2] = \frac{\overline{c_{im}^2}}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(- \left(\frac{t^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}} - t \right) \right) dt =$$

$$\frac{\overline{c_{im}^2}}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp \left(\frac{\sigma^2}{2h^2} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(- \left(\frac{t}{\sqrt{2} \frac{\sigma}{h}} - \frac{\sqrt{2} \frac{\sigma}{h}}{2} \right)^2 \right) dt =$$

resolviendo la integral impropia, el resultado que se obtiene es:

$$E[c_i^2] = \overline{c_{im}^2} \exp \left(\frac{\sigma^2}{2h^2} \right) \tag{7.2.38}$$

y haciendo uso de 7.2.36 obtenemos

$$E[c_i^2] = k D_i^{-\beta} \exp \left(\frac{\sigma^2}{2h^2} \right) \tag{7.2.39}$$

Para poder calcular la varianza de c_i^2 , $\sigma_{c_i^2}^2$, se requiere $E[(c_i^2)^2]$ que puede obtenerse de la siguiente forma:

$$E[(c_i^2)^2] = \int_0^{\infty} (c_i^2)^2 p_{c_i^2}(c_i^2) dc_i^2 =$$

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{\frac{\sigma}{c_i} \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{\left(\text{Ln}(\overline{c_i^2}) - \text{Ln}(\overline{c_{im}^2}) \right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}} \right) \int_0^{\infty} \frac{(c_i^2)^2}{c_i^2} \exp \left(- \frac{c_i^2}{c_i^2} \right) dc_i^2 d\overline{c_i^2} =$$

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(\overline{c_i^2}) - \ln(\overline{c_{im}^2})\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) 2(\overline{c_i^2})^2 d\overline{c_i^2}$$

Utilizando el mismo cambio de variable que en la obtención de 7.2.38 y resolviendo de forma análoga se obtiene:

$$E\left[(c_i^2)^2\right] = 2(\overline{c_{im}^2})^2 \left(\exp\left(\frac{\sigma^2}{h^2}\right)\right)^2 \quad (7.2.40)$$

finalmente, substituyendo 7.2.36 en 7.2.40 se obtiene:

$$E\left[(c_i^2)^2\right] = 2(k D_i^{-\beta})^2 \left(\exp\left(\frac{\sigma^2}{h^2}\right)\right)^2 \quad (7.2.41)$$

En consecuencia la varianza vale:

$$\sigma_{c_i^2}^2 = E\left[(c_i^2)^2\right] - (E[c_i^2])^2 = (k D_i^{-\beta})^2 \exp\left(\frac{\sigma^2}{h^2}\right) \left[2 \exp\left(\frac{\sigma^2}{h^2}\right) - 1\right] \quad (7.2.42)$$

Esta expresión muestra que para entornos celulares típicos, donde la distancia del receptor al transmisor deseado es mucho menor que a los transmisores interferentes ($D_0 \ll D_i$; $i = 1, 2, \dots, N$), la varianza de las interferencias resulta mucho menor que la varianza de la señal deseada. Este aspecto requería ser demostrado para validar la aproximación 7.2.19 a través de 7.2.18.

7.2.3 EVALUACION ANALITICA DE LA PROBABILIDAD DE BLOQUEO EN ESTABLECIMIENTO

Al intentar establecer una comunicación en un entorno celular puede resultar bloqueada fundamentalmente por tres motivos. El primero es que los receptores reciban una potencia inferior a su sensibilidad, en este estudio suponemos que esto no ocurre y que todas las llamadas aparecen dentro de la zona de cobertura de la estación base. El segundo, que el terminal encuentre todos los canales de la estación base ocupados, esta situación está modelada por Erlang-B una vez se conoce el tráfico ofrecido y el número de canales disponibles en cada estación base. Finalmente, el tercer motivo es que la relación señal a interferencia de los enlaces no alcance el umbral requerido por los equipos receptores. A pesar de que el sistema esté correctamente diseñado, los efectos de desvanecimientos multicamino y de sombras pueden ocasionar variaciones de la

calidad de la señal. En este caso si conocemos la estadística de la relación señal a interferencia (Z), la probabilidad de bloqueo será la función de distribución para $Z = Z_0$, siendo Z_0 el umbral mencionado anteriormente, que está directamente relacionado con la probabilidad de error de bit deseada P_{eo} y las características del sistema (7.2.1).

En este apartado se evaluará la probabilidad de bloqueo debida a efectos de desvanecimientos multicamino, sombras y pérdidas de propagación con las expresiones presentadas anteriormente.

Consideremos a continuación la expresión de la función densidad de probabilidad aproximada de Z (7.2.20) donde utilizamos también la expresión de la función densidad de probabilidad de la potencia recibida de la señal deseada, $i = 0$, descrita por (7.2.37):

$$p_Z(z) = \bar{y} p_X(\bar{y}z)$$

$$p_Z(z) = \bar{y} \int_0^\infty \frac{1}{c_0^2} \exp\left(-\frac{z\bar{y}}{c_0^2}\right) \frac{1}{c_0^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(\bar{c}_0^2) - \ln(c_{0m}^2)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) d\bar{c}_0^2 \quad (7.2.43)$$

Integrando la función (7.2.43) desde 0 hasta Z_0 obtenemos la probabilidad de bloqueo buscada:

$$P_{out} = Pr\{Z \leq Z_0\} = \int_0^{Z_0} p_Z(z) dz = \int_0^{Z_0} \bar{y} p_X(\bar{y}z) dz \quad (7.2.44)$$

$$P_{out} = \int_0^{Z_0} \left[\bar{y} \int_0^\infty \frac{1}{c_0^2} \exp\left(-\frac{z\bar{y}}{c_0^2}\right) \frac{1}{c_0^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(\bar{c}_0^2) - \ln(c_{0m}^2)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) d\bar{c}_0^2 \right] dz =$$

$$\int_0^\infty \frac{1}{c_0^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(\bar{c}_0^2) - \ln(c_{0m}^2)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \bar{y} \int_0^{Z_0} \frac{1}{c_0^2} \exp\left(-\frac{z\bar{y}}{c_0^2}\right) dz d\bar{c}_0^2 =$$

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\infty} \frac{1}{\frac{\bar{c}_0^2}{c_0^2} \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\text{Ln}(\bar{c}_0^2) - \text{Ln}(c_{0m}^2)\right)^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{Z_0 \bar{y}}{\bar{c}_0^2}\right)\right) d\bar{c}_0^2 = \\
 & \int_0^{\infty} \frac{1}{\frac{\bar{c}_0^2}{c_0^2} \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\text{Ln}(\bar{c}_0^2) - \text{Ln}(c_{0m}^2)\right)^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) d\bar{c}_0^2 - \\
 & \int_0^{\infty} \frac{1}{\frac{\bar{c}_0^2}{c_0^2} \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\text{Ln}(\bar{c}_0^2) - \text{Ln}(c_{0m}^2)\right)^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \exp\left(-\frac{Z_0 \bar{y}}{\bar{c}_0^2}\right) d\bar{c}_0^2 = \\
 & 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{\frac{\bar{c}_0^2}{c_0^2} \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\text{Ln}(\bar{c}_0^2) - \text{Ln}(c_{0m}^2)\right)^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \exp\left(-\frac{Z_0 \bar{y}}{\bar{c}_0^2}\right) d\bar{c}_0^2 \tag{7.2.45}
 \end{aligned}$$

Aplicando el cambio:

$$x = \frac{\bar{c}_0^2}{c_{0m}^2} \tag{7.2.46}$$

nos queda

$$P_{out} = 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{x \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\text{Ln}(x))^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \exp\left(-\frac{Z_0 \bar{y}}{x c_{0m}^2}\right) dx \tag{7.2.47}$$

A continuación podemos substituir el valor medio de la potencia interferente total, obtenido a través de la suma de las N interferencias que afectan al receptor y cuyo valor medio individual viene dado por (7.2.39):

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^N E[c_i^2] = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) \sum_{i=1}^N k D_i^{-\beta} \tag{7.2.48}$$

Substituyendo ahora (7.2.36) y (7.2.48) en (7.2.47) obtenemos:

$$P_{out} = 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{x \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x))^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \exp\left(-\frac{Z_0 \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) \sum_{i=1}^N D_i^{-\beta}}{x D_0^{-\beta}}\right) dx \quad (7.2.49)$$

En escenarios dinámicos los terminales pueden aparecer en cualquier posición y por lo tanto las distancias entre transmisores y receptor varían. De todas formas, al realizar la planificación frecuencial fija estamos distribuyendo las células interferentes en coronas concéntricas a la célula bajo estudio. Bajo estas circunstancias, las variaciones de distancias de los transmisores interferentes pertenecientes a la misma corona y el receptor interferido, son varias veces inferiores a la distancia entre la corona y dicho receptor. Con ello podemos aproximar que las interferencias pertenecientes a una misma corona son equidistantes al receptor y que todas interfieren con la misma potencia. Asumiremos que esta potencia es la potencia media de todas las interferentes pertenecientes a la misma corona. Asimismo, suponemos que las interferencias que realmente influyen son únicamente las de la primera corona, por lo que el resto se pueden despreciar. Así podemos escribir:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^N E[c_i^2] = \sum_{i=1}^N \langle E[c_i^2] \rangle = k \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) \sum_{i=1}^N \langle D_i^{-\beta} \rangle$$

$$\bar{y} = k \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) N \langle D^{-\beta} \rangle \quad (7.2.50)$$

Donde $\langle * \rangle$ indica la media de las potencias interferentes pertenecientes a la misma corona que depende de la función densidad de probabilidad de las distancias entre el transmisor interferente y el receptor D_i . De igual modo, D indica la distancia entre un transmisor interferente genérico y el receptor.

Llegados a este punto sólo queda fijar el umbral de relación señal a interferencia, Z_0 , para obtener la probabilidad de bloqueo en establecimiento en función de la distancia entre el móvil y su estación base, D_0 . Realizando la última substitución, (7.2.50) en (7.2.49) obtenemos:

$$P_{out} = 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{x \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x))^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \exp\left(-\frac{Z_0 \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) N < D^{-\beta} >}{x D_0^{-\beta}}\right) dx \quad (7.2.51)$$

En esta última expresión (7.2.51) la integral no tiene resolución analítica por lo que debe calcularse por métodos numéricos, no obstante la potencia de cálculo requerida es mínima. En [WIL] y [FRE] se realizan estudios similares de la probabilidad de bloqueo llegando a expresiones semejantes y que también tienen que resolverse por métodos numéricos. Existen también otros estudios, [CAI] y [WAN], donde se considera que los desvanecimientos multicamino tienen una distribución de Rice en lugar de Rayleigh.

Para evaluar la probabilidad de bloqueo se ha supuesto que los dos enlaces de una comunicación son simétricos cuando en realidad pueden existir pequeñas variaciones debido a que las distancias entre transmisor interferente y receptor son diferentes (figura 7.2.2). De todas formas las aproximaciones realizadas son válidas para los dos casos [CAI].

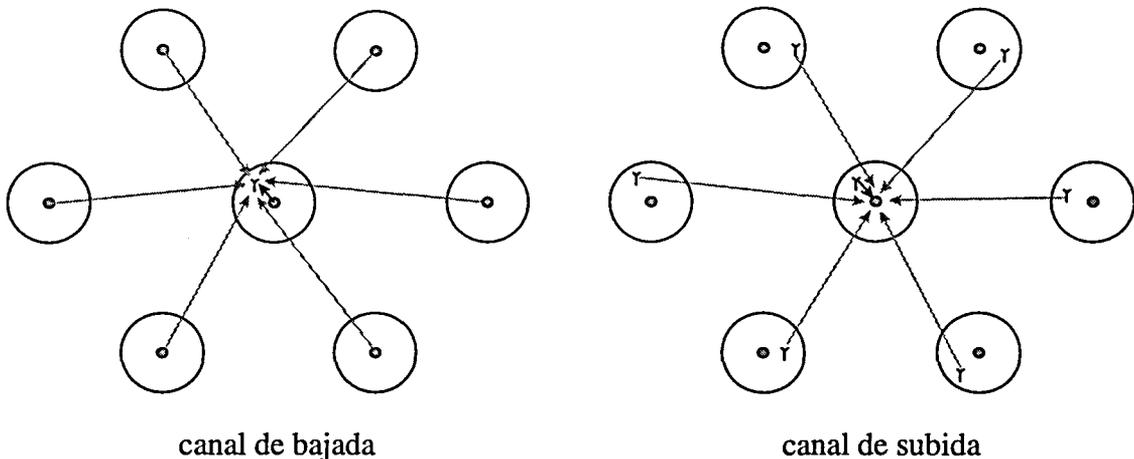


Figura 7.2.2 Interferencias de los canales de bajada y subida.

En un sistema celular sin control de potencia como el considerado no todos los terminales tienen la misma calidad, en particular dependen de la distancia a la que se encuentran de la estación base. Esta circunstancia está expresada en (7.2.51), por lo que si se requiere conocer la probabilidad de bloqueo media de toda la célula se deberá integrar P_{out} , desde 0 hasta la distancia máxima a la que pueda encontrarse un terminal teniendo en cuenta la función densidad de probabilidad de D_0 . Si por el contrario se desea conocer la peor probabilidad de bloqueo del área de cobertura de una estación base, basta con substituir D_0 por la distancia máxima a la que puede encontrarse un terminal. La expresión (7.2.51) también puede utilizarse a la inversa, es decir para

dimensionar sistemas celulares: dada una probabilidad de bloqueo media o máxima podemos encontrar la distancia a la que deben ubicarse las células co-canal.

Finalmente, en [CAI] se comprueba la bondad de (7.2.51) comparándola con otro resultado donde no se realiza ninguna aproximación y con resultados de simulación. La conclusión a la que se llega es que es que la aproximación (7.2.51) concuerda en gran medida con los otros dos resultados.

7.3 PROBABILIDAD DE BLOQUEO EN ESTABLECIMIENTO PARA UN SISTEMA DCA

En el apartado anterior se ha estudiado una aproximación para el cálculo de la probabilidad de bloqueo en establecimiento para sistemas de asignación fija de canal y debida a una falta de calidad en un enlace de la conexión. En ningún caso se consideran las llamadas bloqueadas por la falta de recursos en las estaciones base. El método, se basa en que $\sigma_x^2 \gg \sigma_y^2$, (donde x es la potencia de señal deseada e y la potencia interferente), lo cual permite aproximar la distribución de la potencia interferente a una delta de Dirac centrada en la potencia media interferente. Se deduce el valor de la varianza cuando están presentes desvanecimientos de Rayleigh y efectos de sombras con distribución lognormal (7.2.42):

$$\sigma_{e_i}^2 = (k D_i^{-\beta})^2 \exp\left(\frac{\sigma^2}{h^2}\right) \left[2 \exp\left(\frac{\sigma^2}{h^2}\right) - 1 \right]$$

De esta fórmula se desprende que aquellas señales que se encuentren a mayor distancia (D_i) son las que tienen una varianza menor. Las interferencias, normalmente se encuentran a mayor distancia que la señal deseada por lo que su varianza es realmente inferior.

De este modo, el parámetro principal que permite aplicar la aproximación es la distancia entre el transmisor, deseado o interferente, y el receptor. En sistemas celulares FCA, la distancia a la que se encuentra la interferencia es aproximadamente igual a la separación entre dos células co-canal. Estrictamente podríamos considerar que varía ya que la posición de los terminales no es fija en el centro de la célula, pero en sistemas típicos, donde la separación entre células co-canal es mucho mayor que un radio de célula, podemos aproximarla por aquella.

Los sistemas celulares con asignación dinámica de canal (DCA) adaptan la reutilización de frecuencias de la mejor forma según el tráfico que se ofrezca al sistema. Separan al máximo las células utilizando el mismo canal y consiguen una distribución en coronas concéntricas muy similar a la de los sistemas FCA aunque puede que no tan

regular. Para tráficos elevados la distancia entre células co-canal disminuye mientras que para tráficos bajos aumenta. Los sistemas FCA, por el contrario no son capaces de realizar esta reubicación de frecuencias y los canales interferentes siempre aparecen a la misma distancia del receptor interferido. Los sistemas de comunicaciones son dimensionados para trabajar correctamente durante la hora cargada, situación en la cual el tráfico cursado es máximo. Sin embargo, durante gran parte del tiempo no trabajan en estas condiciones, sino que el tráfico ofrecido es menor. En la figura 7.3.1 puede apreciarse que cuando los sistemas trabajan a capacidad máxima, la distancia entre una célula y su primera corona interferente es igual para los dos tipos de sistemas, FCA y DCA. Si bien, en estos casos tienen un mejor grado de servicio los sistemas FCA ya que resulta difícil para los DCA conseguir una distribución frecuencial tan regular con el sistema trabajando al límite de interferencias. En estas circunstancias la aproximación 7.2.51 es igualmente válida para los dos tipos de sistema ya que la diferencia entre varianzas de la señal deseada y de las interferentes es aproximadamente la misma. La diferencia está cuando los sistemas no trabajan al límite de sus posibilidades, que suele ser la mayor parte del tiempo. En sistemas FCA existe un menor número de interferencias en las sucesivas coronas interferentes, aunque estas continúan estando a la misma distancia del terminal interferido, por lo que la aproximación no modifica su validez. En sistemas DCA, cuando existe un menor volumen de tráfico, las células interferentes se distancian entre sí y continúan formando coronas concéntricas pero de mayor radio (figura 7.3.1). En estas circunstancias la varianza de las señales interferentes tiende a disminuir ya que la distancia al receptor aumenta. Con ello se consigue que en sistemas DCA la aproximación sea mejor.

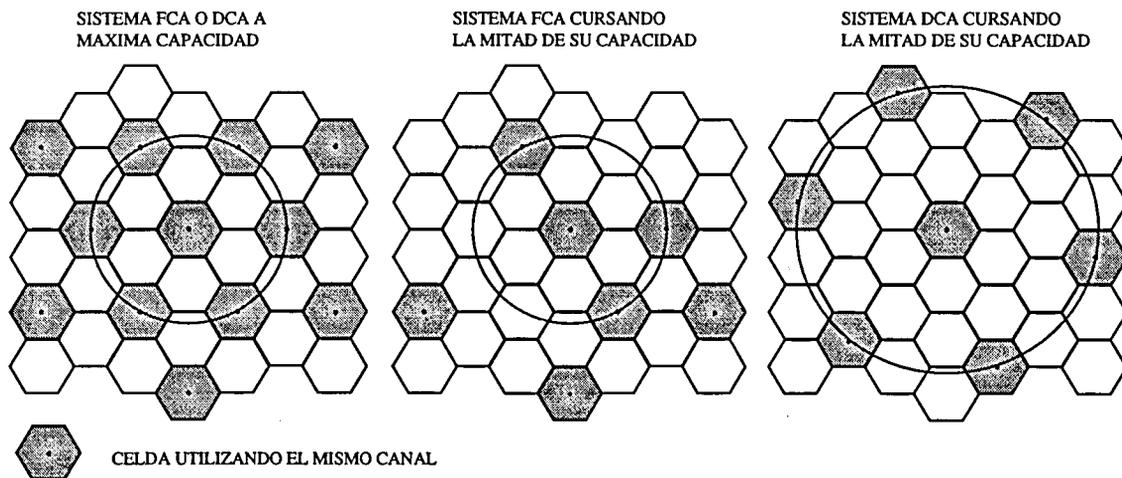


Figura 7.3.1 Ubicación de las células co-canal para sistemas FCA y DCA, en situaciones de poco tráfico y tráfico máximo.

Para comprobar que la expresión de probabilidad de bloqueo en establecimiento se ajusta para sistemas DCA, se han realizado diversas simulaciones con el simulador de bucle de abonado vía radio utilizando el DECT empleado en el capítulo anterior.

En dicho simulador, el modelo de propagación contempla las pérdidas de propagación y las atenuaciones debidas a sombras y con distribución lognormal. Sin embargo, los desvanecimientos rápidos debidos a efectos multicamino se modelan dejando un margen suplementario a la relación señal a interferencia. Para poder realizar la comparación correctamente se buscará la expresión equivalente a (7.2.51) pero, donde se contemplan, únicamente, los efectos de sombras y no de desvanecimientos multicamino.

Partimos de las aproximaciones expresadas por (7.2.20) y (7.2.21) donde Z expresa la relación señal a interferencia, x la potencia de señal deseada recibida e y la potencia de señal interferente recibida:

$$p_z(z) \equiv \bar{y} p_x(z\bar{y}) \quad (7.2.20)$$

$$F_z(z) \equiv F_x(z\bar{y}) \quad (7.2.21)$$

Ahora la función densidad de probabilidad de potencia de señal recibida respecto a su media tiene una distribución lognormal:

$$p_{c_i^2}(c_i^2) = \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(c_i^2) - \ln(\bar{c}_{im}^2)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (7.3.1)$$

siendo $h = 10 \log_{10}(e)$ (7.2.33), σ expresada en dB, es la desviación típica de la distribución lognormal y \bar{c}_{im}^2 la potencia media recibida en un punto definida por (7.2.36).

El valor medio de la potencia recibida es en este caso:

$$E[c_i^2] = \int_0^{\infty} c_i^2 p_{c_i^2}(c_i^2) dc_i^2 = \int_0^{\infty} c_i^2 \frac{1}{c_i^2 \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln(c_i^2) - \ln(\bar{c}_{im}^2)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) dc_i^2 = \bar{c}_{im}^2 \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) \quad (7.3.2)$$

expresión totalmente equivalente al caso de contemplar desvanecimientos tipo Rayleigh (7.2.38). Haciendo uso de 7.2.36 tenemos:

$$E[c_i^2] = k D_i^{-\beta} \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) \quad (7.3.3)$$

siendo D_i la distancia entre el transmisor interferente y el receptor, y β el coeficiente de pérdidas de propagación.

Calculamos entonces la expresión de la probabilidad de *outage* siguiendo el mismo método empleado para los sistemas FCA descrito en el apartado anterior. Se considera que el umbral mínimo para que el sistema funcione correctamente es de Z_0 dB.

$$P_{out} = Pr\{Z \leq Z_0\} = \int_0^{Z_0} p_Z(z) dz = \int_0^{Z_0} \bar{y} p_X(\bar{y}z) dz \quad (7.3.4)$$

$$\begin{aligned} p_{out} &= \int_0^{Z_0} \bar{y} \frac{1}{z\bar{y} \frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\text{Ln}(z\bar{y}) - \text{Ln}(c_{om}^2)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) dz = \\ &= \frac{1}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \int_0^{Z_0} \frac{1}{z} \exp\left(-\frac{\left(\text{Ln}\left(\frac{z\bar{y}}{c_{om}^2}\right)\right)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) dz \end{aligned} \quad (7.3.5)$$

siendo $\overline{c_{om}^2}$ la potencia media de señal deseada recibida en un punto. Realizamos el cambio:

$$t = \frac{\bar{y}z}{c_{om}^2} \quad (7.3.6)$$

nos queda:

$$p_{out} = \frac{1}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\bar{y}Z_0}{c_{om}^2}} \frac{1}{t} \exp\left(-\frac{(\text{Ln } t)^2}{2 \frac{\sigma^2}{h^2}}\right) dt \quad (7.3.7)$$

aplicamos, ahora el cambio:

$$u = \text{Ln } t \quad (7.3.8)$$

y resulta:

$$p_{out} = \frac{I}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Ln}\left(\frac{\bar{y}Z_0}{c_{om}^2}\right)} \exp\left(-\frac{u^2}{2\frac{\sigma^2}{h^2}}\right) du \quad (7.3.9)$$

Finalmente, aplicamos el cambio,

$$t = \frac{u}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2}} \quad (7.3.10)$$

junto con la aproximación de que la potencia recibida de una señal interferente es igual a su media (7.3.3) y que la potencia media de señal deseada recibida en un punto es proporcional a la distancia entre el terminal y la estación base (D_o) con un coeficiente de pérdidas de propagación (β):

$$\overline{c_{om}^2} = k D_o^\beta \quad (7.3.11)$$

nos queda en este caso:

$$p_{out} = \frac{I}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^k \exp(-t^2) dt \quad (7.3.12)$$

con:

$$k = \frac{I}{\frac{\sigma}{h} \sqrt{2}} \text{Ln} \left(Z_0 \exp\left(\frac{\sigma^2}{2h^2}\right) \frac{\sum_{i=1}^N D_i^{-\beta}}{D_o^{-\beta}} \right) \quad (7.3.13)$$

Podemos considerar, ahora, que las interferencias más significativas son las 6 de la primera corona y que se encuentran todas a la misma distancia, siendo esta distancia igual a la separación entre células co-canal (D), figura 7.3.1. También puede verse D

como la distancia media entre un receptor y los transmisores interferentes más próximos. Teniendo en cuenta estas consideraciones podemos expresar:

$$k = \frac{1}{\frac{\sigma}{h}\sqrt{2}} \operatorname{Ln} \left(Z_0 \exp \left(\frac{\sigma^2}{2h^2} \right) \frac{6 D^{-\beta}}{D_0^{-\beta}} \right) \quad (7.3.14)$$

Las expresiones 7.3.12 y 7.3.14 definen una integral impropia que debe ser determinada por métodos numéricos pero que requiere una potencia de cálculo muy inferior al de una simulación.

Para comprobar la validez de dichas expresiones se ha simulado un entorno de bucle de abonado vía radio utilizando el sistema de comunicaciones celulares DECT que opera con un sistema de asignación de frecuencias dinámico. Se ha tomado el mismo escenario simulado en el capítulo anterior con antenas omnidireccionales en las estaciones base y en los terminales. Sin embargo, para poder representar probabilidades de bloqueo muy bajas, del orden de 10^{-3} , de forma válida se requiere un gran número de llamadas establecidas y bloqueadas. Por ello se han realizado simulaciones de mucha más duración y con un grado de servicio mucho mayor que el utilizado en el capítulo anterior y del que los usuarios estarían dispuestos a soportar.

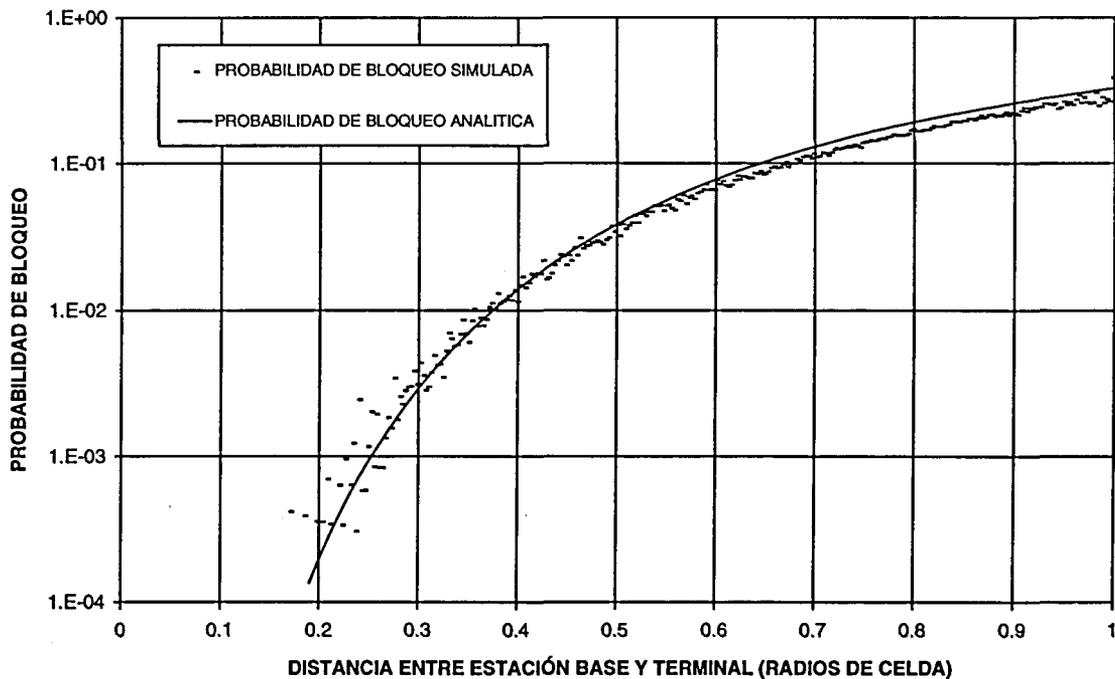


Figura 7.3.2 Comparación entre la probabilidad de bloqueo en establecimiento analítica y la simulada para un área cubierta con 400 estaciones base.

En la figura 7.3.2 se compara el resultado de la probabilidad de bloqueo en establecimiento, causada por falta de calidad en la conexión y no por falta de canales disponibles en las estaciones base, obtenido por ambos métodos: analítico y por simulación. Para calcular el resultado analítico se requiere la distancia de separación entre células co-canal. Para calcularla se ha considerado que el propio sistema distribuye las células en agrupaciones o *clústers* donde se utiliza cada canal una única vez. Para distribuciones hexagonales de células, la expresión:

$$D = \sqrt{3NR} \quad (7.3.15)$$

relaciona la distancia entre células co-canal pertenecientes a dos agrupaciones contiguas (D), el radio de una célula (R) y el número de células por agrupación (N). Para el escenario simulado $R = 346.4$ metros. A causa de tener un sistema de asignación dinámica de canal no se puede hablar de agrupaciones estrictas de células ya que éstas no existen, aunque sí que es cierto que los canales se reparten más o menos uniformemente por toda el área y en cada célula solamente se utilizan, en un momento determinado, un grupo de ellos. Podemos, en estas condiciones, considerar que se forman agrupaciones dinámicas de N células que equivaldrían a las agrupaciones fijas de sistemas FCA. Para obtener N es suficiente con dividir el número de canales que dispone el sistema por el tráfico medio cursado por célula.

Teniendo en cuenta estos aspectos, el escenario representado en la figura 7.3.2, es un sistema DECT, con 400 estaciones base (20 x 20), que dispone sólo de 9 canales (3 slots por trama y tres portadoras), que cursa un tráfico medio de 0.37 Erlangs por estación base con lo que el número de células por agrupación es de 24.3 y la separación entre células co-canal es de 8.5 radios de célula. El GOS es del 41 % y la probabilidad de bloqueo en establecimiento del 9 %.

Podemos observar como los dos resultados son muy próximos, aunque para situaciones en que el terminal se encuentra cerca de la frontera de la célula el sistema simulado proporciona mejores resultados que el analítico. Este efecto es debido a que 400 estaciones base, con un tráfico por estación base tan bajo, no permiten tener un gran número de células co-canal, reduciendo la interferencia y distorsiona el modelo de plano con infinitas estaciones base que pretendemos simular. Por ello se han realizado otras simulaciones con un área donde coexiste un mayor número de estaciones base.

En figura 7.3.3 puede observarse la probabilidad de bloqueo en establecimiento debida a la mala calidad del enlace para un área cubierta con 900 estaciones base (30 x 30). En este caso la probabilidad de bloqueo en establecimiento es del 10 % y el GOS del 41 % para un tráfico por estación base de 0.35 Erlangs con 9 canales disponibles, lo que resulta en agrupaciones de 25.7 células y separación entre ellas de 8.8 radios de célula.

El número de células por agrupación y la distancia entre células co-canal es muy similar al modelo de 400 estaciones base, aunque antes, el número de estaciones base solamente permitía tener 16 estaciones base co-canal y ahora 35, con ello nos acercamos más a un modelo de plano con infinitas estaciones base. El resultado puede observarse en la figura 7.3.3 donde la simulación prácticamente coincide con el resultado analítico. La diferencia con la figura anterior radica en un aumento general de la potencia interferente que tiene como consecuencia un aumento de la probabilidad de bloqueo sea cual sea la posición del terminal.

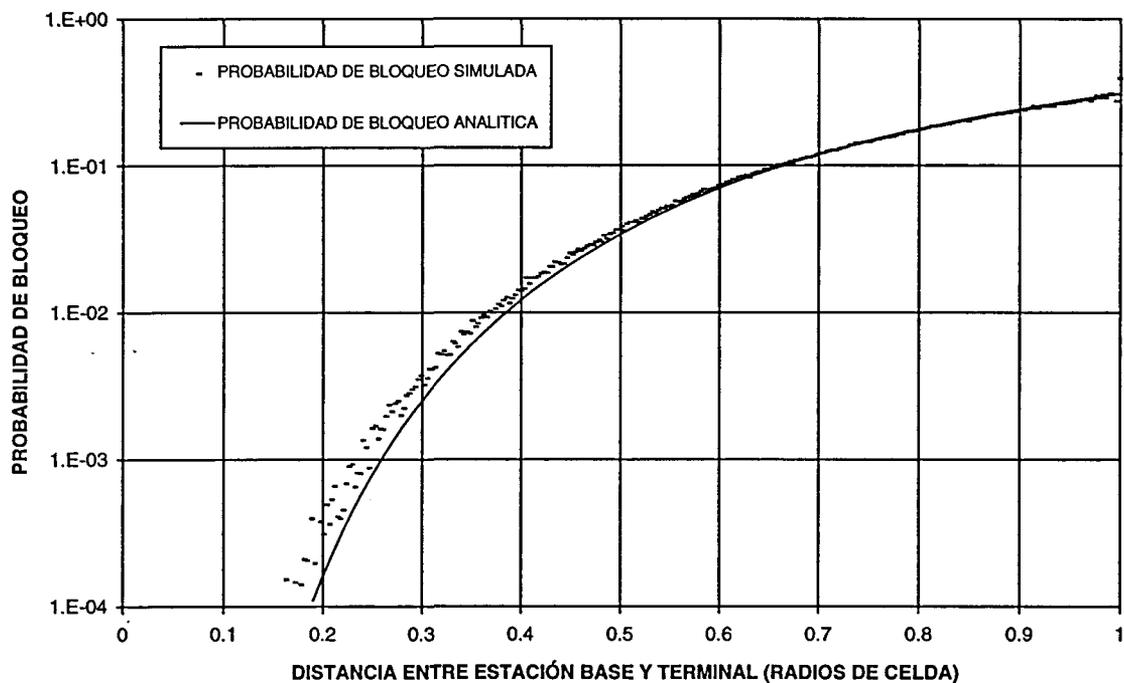


Figura 7.3.3 Comparación entre la probabilidad de bloqueo en establecimiento analítica y la simulada para un área cubierta con 900 estaciones base.

Otro punto a considerar es que en el modelo analítico sólo se calcula la primera corona de células interferentes, es decir 6 señales, mientras que el modelo simulado tiene en cuenta todas las interferencias del área de simulación. Por ello, aunque las interferencias que no pertenezcan a la primera corona tengan menos influencia, sí que contribuyen a aumentar ligeramente la interferencia con lo que la probabilidad de bloqueo puede ser mayor que en el modelo analítico.

Como ya se ha comentado con anterioridad, se han escogido escenarios con grados de servicio elevados para poder obtener suficientes muestras en un tiempo de simulación razonable. En estas condiciones de carga elevada los sistemas DCA empiezan a comportarse peor que los FCA, ya que la distribución de células co-canal es menos uniforme. Este efecto también contribuye a que la probabilidad de bloqueo del sistema DCA sea ligeramente superior a la del modelo analítico donde se ha

considerado que las interferencias están uniformemente distribuidas. No obstante, para sistemas trabajando con menos cargas, esta componente disminuye ya que los canales se reparten mejor.

Finalmente, para verificar si la tendencia de aumento de interferencias continúa cuando aumenta el número de estaciones base en el área a estudiar, se ha simulado un modelo con 2500 estaciones base (50 x 50). El resultado obtenido se muestra en la figura 7.3.4. Se observa que la probabilidad de bloqueo sólo a aumentado ligeramente aunque el número de estaciones base se haya triplicado, con ello se considera que un aumento adicional del número de estaciones base no modificaría significativamente los resultados.

En este escenario los resultados obtenidos son prácticamente iguales a los anteriores: un GOS del 41 %, una probabilidad de bloqueo del 10.2 % y un tráfico cursado de 0.34 Erlangs por estación base. Considerando que se dispone de 9 canales diferentes el tamaño de la agrupación de células es de 26.5 con una separación entre ellas 8.9 radios de célula. En estas condiciones el número medio de células co-canal situadas en el área de simulación es de 94, consiguiéndose así un gran número de coronas de células interferentes, lo cual justifica que un mayor número de estaciones base en el área de simulación no afectare prácticamente al resultado.

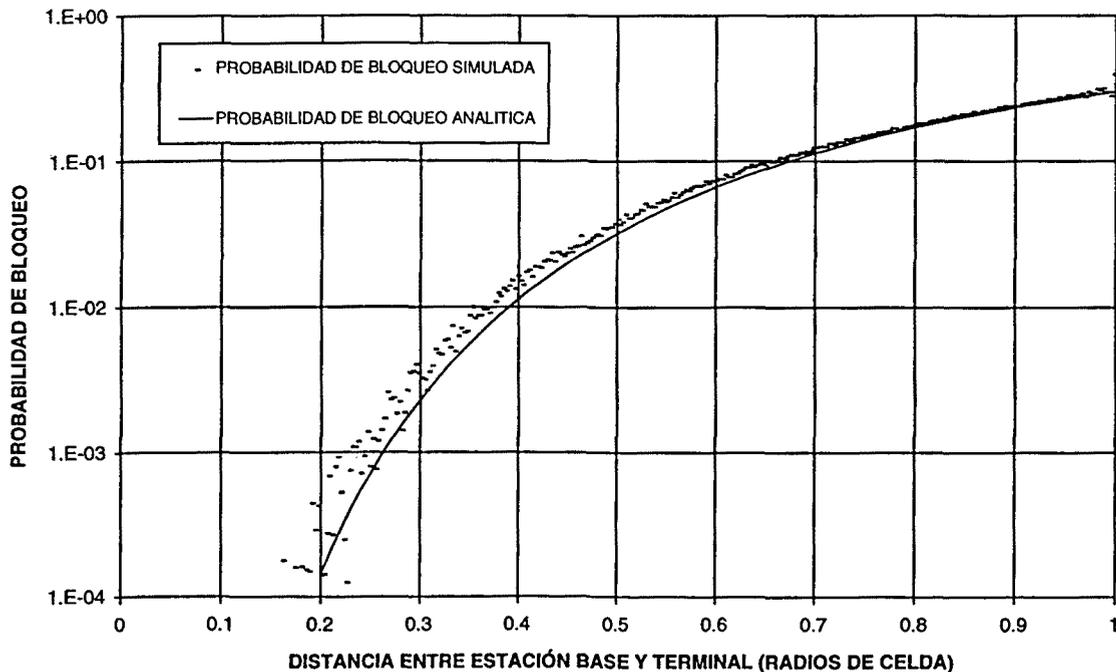


Figura 7.3.4 Comparación entre la probabilidad de bloqueo en establecimiento analítica y la simulada para un área cubierta con 2500 estaciones base.

Como conclusión final podemos decir que la aproximación del cálculo de la probabilidad de bloqueo en establecimiento debida a condiciones adversas de la propagación de la señal, se ajusta en gran medida al modelo simulado. Asimismo, a pesar de que la expresión obtenida sea una integral impropia que deba resolverse mediante métodos numéricos, su evaluación requiere una potencia de cálculo muy inferior a la requerida por los mecanismos de simulación.

7.4 CONCLUSIONES

Este capítulo se compone básicamente de dos partes. En la primera se han estudiado los parámetros más relevantes de las conexiones del modelo de bucle de abonado vía radio con el estándar DECT. Las principales conclusiones que pueden extraerse son:

- El efecto de sombras en la propagación de la señal provoca que un significativo número de terminales no se conecten con su estación más próxima.
- La potencia media recibida de señal deseada decrece a medida que el terminal se aleja de la estación base y, por el contrario la potencia interferente media se mantiene constante.
- La potencia interferente del canal de subida es superior a la del de bajada.
- Las funciones de densidad de probabilidad de potencias recibidas muestran que la varianza de la potencia de señal recibida es mayor que la de las interferencias.
- La relación señal a interferencia del canal de bajada es mayor que la del de subida y cuanto más cercano se encuentra el terminal a la estación base mejor calidad dispone en ambos enlaces.
- Cuando se tienen dos sistemas totalmente desincronizados, su relación señal a interferencia decrece unos 4 dB de cuando están sincronizados.
- El enlace que fija mayoritariamente el GOS de la conexión es el de subida.
- Las llamadas que se encuentran a distancias inferiores al radio de célula de la estación base generan muy pocos trasposos, menos de un 0.1 por llamada. Son las que se conectan a estaciones base lejanas las que tienen un mayor número de trasposos por llamada pudiendo llegar hasta los 0.5.
- La probabilidad de bloqueo al ejecutar un traspaso es mayor que la probabilidad de bloqueo en establecimiento de llamada.

En la segunda parte se tiene en cuenta que, durante la fase de establecimiento de la conexión, aparte de la probabilidad de bloqueo por falta de recursos en las estaciones base, existe una cierta probabilidad de bloqueo adicional debida a un comportamiento adverso del canal de propagación. Estas circunstancias se dan tanto en sistemas de asignación fija de canal (FCA) como en asignación dinámica de canal (DCA).

Esta probabilidad de bloqueo en sistemas FCA puede ser calculada forma rápida mediante una expresión aproximada, basada en el hecho de que la varianza de la potencia interferente es mucho menor que la varianza de la potencia deseada. En este caso se considera que la distribución de potencia interferente es una delta de Dirac centrada en la media. Esta aproximación ha sido estudiada y evaluada en [CAI], donde se demuestra una buena concordancia con un modelo analítico exacto y con resultados simulados.

La contribución desarrollada en este trabajo es la extensión de esta aproximación en sistemas DCA. Los sistemas de comunicaciones son dimensionados para trabajar correctamente durante la hora cargada, situación en la cual el tráfico cursado es máximo. Sin embargo, durante gran parte del tiempo no trabajan en estas condiciones, sino que el tráfico ofrecido es menor. En estas circunstancias los sistemas DCA distribuyen más uniformemente las células co-canal que los sistemas FCA y la hipótesis en que se basa la aproximación del cálculo de la probabilidad de bloqueo es mejor. 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 radio utilizando el estándar DECT. Las simulaciones se han realizado con cargas relativamente elevadas para poder obtener suficientes muestras en un tiempo razonable. En estas condiciones, los sistemas DCA no distribuyen los canales tan uniformemente como los FCA. Puede observarse como los resultados simulados se asemejan en gran medida al modelo analítico, si bien son ligeramente peores debido al efecto mencionado. Para sistemas con tráficos menores los resultados tenderían a aproximarse más.

8. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

8.1 CONCLUSIONES

La utilización del bucle de abonado vía radio presenta, en gran variedad de escenarios, múltiples ventajas respecto al tradicional bucle de abonado cableado. Puede ofrecer los mismos servicios a menor coste de infraestructura y de mantenimiento. Para su implementación existen diversos sistemas radio que cumplen las especificaciones requeridas. Después de analizarlos, se ha visto que para entornos suburbanos o urbanos, con densidades medias - altas de abonados, los sistemas de telefonía sin cordón son los más aptos. Entre ellos se ha escogido la tecnología más avanzada desarrollada en Europa que es el DECT. Uno de los puntos fuertes de la elección de un sistema celular es que permite movilidad a los usuarios. Así, una vez se ha instalado la infraestructura de la red de acceso, está permitiendo su utilización tanto para abonados estáticos utilizando el bucle de abonado vía radio, como para terminales móviles desplazándose por el vecindario.

Para la evaluación de ambos sistemas, RLL y CTM, se ha desarrollado un simulador software. Los resultados obtenidos están condicionados a varios parámetros críticos que no dependen del sistema DECT sino del entorno de funcionamiento. El primero es el modelo utilizado para predecir las pérdidas de propagación por distancia, se ha visto que la utilización de uno u otro modelo influye en los resultados finales. La consecuencia inmediata es que todos los resultados presentados en esta tesis dependen del modelo escogido, no obstante, las tendencias de comportamiento y mejoras proporcionadas por los mecanismos de control de interferencias son, hasta cierto punto, independientes del mismo. El segundo parámetro crítico es el modelo de atenuación por sombras utilizado. Existe amplio consenso en que la atenuación de señal en un punto sigue una distribución lognormal con media cero y cierta desviación típica. Sin embargo, no está tan claro la correlación que existe entre la atenuación en un punto de una señal recibida en una dirección u en otra. En el capítulo 6 se muestran los dos

extremos, un receptor tiene la misma atenuación para todos los transmisores o tiene atenuación diferente de todos ellos. Se ha supuesto que es más real el segundo caso por lo que ha sido el utilizado. El tercero es la consideración de los desvanecimientos multicamino. En nuestro caso se ha supuesto que pueden existir desvanecimientos multicamino y para compensarlos se ha añadido un margen adicional al umbral de relación señal a interferencia mínimo.

Otro factor que influye en los resultados absolutos aunque no en las tendencias de comportamiento es el número de estaciones base a situar sobre el área de simulación. Existen dos alternativas, zonas de cobertura limitadas en espacio (urbanizaciones o ciudades pequeñas) o bien modelar mediante un número determinado de estaciones base una superficie infinita. Para el caso de RLL se ha visto que a partir de aproximadamente 20 estaciones base co-canal ya se consigue simular un plano infinito. Para el caso de CTM se requieren incluso menos señales interferentes ya que las atenuaciones son mayores. Todos los casos presentados, exceptuando el escenario básico sin ningún tipo de mecanismo de control de interferencia, con 100 emplazamientos de estaciones base ya pueden aproximarse a un plano infinito.

En los sistemas de comunicaciones vía radio existen dos limitaciones básicas: los recursos disponibles en las estaciones base y las interferencias producidas por el mismo sistema. Cuando un sistema DECT se exporta de un entorno de interiores, para el que fue inicialmente diseñado, a una aplicación en exteriores su rendimiento baja en gran medida. La causa son las interferencias, en interiores existen multitud de elementos que impiden el paso a las interferencias (paredes, techos, muebles, etc.) mientras que en exteriores se propagan mucho más fácilmente. Por ello es necesario aplicar técnicas de control de interferencias. Para las configuraciones en que la limitación sea debida a la falta de recursos, la solución radica en instalar más transceptores en las estaciones base. Así con un solo transceptor cada estación base puede cursar 12 llamadas simultáneas, con 2 transceptores 24, etc.

En un sistema de RLL, la forma más inmediata de aumentar la capacidad de las estaciones base es instalar antenas directivas tanto en las estaciones base como en los terminales. Las antenas directivas de un mismo emplazamiento de estaciones base son las típicas, forman varios sectores y apuntan en direcciones separadas una determinada distancia angular. Los usuarios al ser estáticos conocen la posición de la mejor estación base y apuntan su antena directiva hacia ella. Las ganancias de capacidad logradas son realmente importantes, representando para algunas configuraciones un incremento de 10 veces el tráfico inicial.

La reducción del diagrama de radiación sólo es posible hasta cierto límite, a partir de él debemos buscar otros mecanismos para reducir el impacto de las interferencias. Un método ampliamente utilizado por otros sistemas celulares es el control de potencia. Se han estudiado dos algoritmos de control de potencia. El primero consiste únicamente en dividir el área de cobertura de una célula en dos zonas, cuando el terminal se encuentra en la zona interior los equipos radio transmiten una potencia

menor que cuando el terminal está en la zona exterior. A pesar de que la potencia transmitida total es inferior, este mecanismo resulta en ninguna ganancia de capacidad. El segundo algoritmo se basa en la medición de la calidad recibida por cada extremo de una conexión y la posterior transmisión de esta información al extremo opuesto. De esta forma cada transmisor puede ajustar la potencia transmitida para que el receptor tenga la calidad mínima necesaria para cursar la conexión. Para realizar las simulaciones se ha supuesto que el sistema es capaz de medir exactamente la relación señal a interferencia de cada enlace. Así, cada transmisor transmite suficiente potencia para superar la sensibilidad del receptor y para que la relación señal a interferencia supere también el umbral mínimo. La potencia transmitida nunca podrá superar el máximo permitido por el estándar (24 dBm). Normalmente, los controles de potencia basados en la relación señal a interferencia son difíciles de llevar a cabo, los resultados presentados representan la cota superior de las ganancias que se pueden conseguir si la medición de la relación C/I y el correspondiente control de potencia se pudieran llevar a cabo correctamente. Con este método las ganancias son significativas, se consigue un rango de incrementos que van desde el 34 % al 240 %, según si se utiliza control de potencia en el enlace de subida o en ambos, si las estaciones base están equipadas con receptores de sensibilidad -83 dBm o de -90 dBm y con 1 ó 2 transceptores.

El DECT permite a un terminal que en caso de no poder acceder a la mejor estación base, por falta de canales o porque los disponibles no tienen suficiente calidad, pueda escoger otra de alternativa. Cuando el usuario dispone de una antena omnidireccional, la potencia recibida de señal deseada sólo depende de la distancia a ambas estaciones base. En el caso del RLL, los terminales dispondrán de antenas directivas orientadas hacia la mejor estación base, en este caso el acceso a una nueva estación base comporta pérdidas adicionales de señal debidas a la no correcta orientación de la antena hacia la estación base alternativa. Esta circunstancia comporta que no se consiga ningún incremento de capacidad permitiendo el acceso a una segunda estación base. No obstante, resulta de fácil implementación una antena de usuario que pueda apuntar a la mejor estación base o a otra alternativa cuando sea necesario. Al conocer la posición de ambas estaciones base se puede disponer de una antena que pueda cambiar su haz de radiación cargando unos determinados coeficientes de desfase, o bien de dos antenas directivas que puedan conmutarse. 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 aproximadamente 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 basado en la relación C/I, en este caso el incremento puede llegar a representar más de un 400 % respecto al caso original sin control de potencia y acceso a una sola estación base.

El siguiente mecanismo evaluado para obtener una mayor capacidad del sistema es la posibilidad de que las estaciones base del sistema transmitan información sobre los mejores canales desde su punto de vista. En este caso, los terminales disponen de

medidas en ambos extremos de la conexión y pueden realizar una mejor y más rápida elección del canal a utilizar. Se ha visto que cuando mejores resultados proporciona este mecanismo es cuando el número de intentos de acceso en relación al número de canales disponibles es menor. Así, cuando el sistema dispone de 120 canales se consigue un incremento del orden del 50 %, mientras cuando se dispone de 36 canales el incremento es tan solo del 20 %. En ambos casos un terminal puede intentar el acceso a 10 canales antes de ver su conexión bloqueada o interrumpida.

El último mecanismo de control de interferencias estudiado es el uso de arrays adaptativos en las estaciones base, capaces de apuntar el diagrama de radiación de la antena a cada terminal, en cada tiempo de slot. La complejidad tecnológica es baja ya que la estación base puede disponer 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. Los resultados obtenidos muestran que el incremento de capacidad es considerable consiguiéndose en determinados casos más del doble de capacidad.

Llegados a este punto podemos decir que el primer objetivo de la tesis, la evaluación del DECT utilizado como sistema de bucle de abonado vía radio y evaluación de métodos de incremento de capacidad se ha cumplido satisfactoriamente. Según las previsiones de la ETSI las necesidades típicas de los sistemas de RLL serán del orden de 200 Erlangs / Km², para conseguirlos con la mayoría de mecanismos presentados, la separación de las estaciones base sería del orden de los 500 metros. Si se utilizan varios métodos simultáneamente podría aumentarse el rendimiento por estación base lo cual permitiría mayores separaciones entre estaciones base.

El siguiente punto estudiado es la viabilidad de un sistema CTM utilizando el DECT. Se ha simulado un área urbana, con una distribución de calles y edificios tipo Manhattan. El objetivo del estudio era analizar la influencia de la distribución de las estaciones base en la superficie a cubrir y la penalización por la velocidad de los móviles. Se ha visto es mejor situar las estaciones base en las calles que en las esquinas. La ventaja de la primera posición es que las estaciones base solamente reciben interferencias en visión directa de los terminales situados en la misma calle, mientras que cuando se sitúan en las esquinas reciben interferencia en visión directa de dos calles. La ventaja de la posición en los cruces de calles es que cuando un terminal gira una esquina tendrá que realizar traspasos en menos ocasiones y como consecuencia su probabilidad de interrupción disminuye.

La movilidad de los terminales resulta en un incremento de traspasos, tanto intracélula como intercélula. Este aumento de traspasos tiene como consecuencia una mayor probabilidad de interrupción y a su vez un empeoramiento de la calidad. Por ello, los terminales que circulan a más velocidad son aquellos que peor grado de servicio tienen. La disminución de la capacidad de tráfico para usuarios móviles depende de la velocidad de los mismos, pero es del orden de un 30 % para aquellos que circulan a una velocidad de 40 Km / h.

Como conclusión del estudio de este escenario podemos decir que todas las configuraciones evaluadas del DECT utilizado como CTM cumplen las previsiones de la ETSI para este servicio. Ello indica que las estaciones base podrían estar más separadas, siempre y cuando la potencia recibida fuera suficiente.

Para que el servicio de bucle de abonado vía radio tenga una amplia aceptación debe ser rentable en todo tipo de entornos. En áreas con altas densidades de usuarios se requieren estaciones base con radios de cobertura pequeños que puedan cursar grandes capacidades de tráfico. Sin embargo, existen otros entornos donde los requerimientos son opuestos. Son zonas rurales donde la densidad de tráfico es baja y para hacer rentables los equipos suelen utilizarse pocas estaciones base omnidireccionales, con grandes radios de cobertura. Sin embargo, estas configuraciones son poco eficientes y además el DECT no permite grandes radios de cobertura. El siguiente objetivo de la tesis era proponer y evaluar medios de cubrir eficientemente áreas con bajas densidades de usuarios. Los dos métodos evaluados son el uso de repetidores y de antenas distribuidas.

Uno de los principales parámetros de diseño de las antenas distribuidas es la forma en que se distribuyen los slots por los cuales pueden transmitir y recibir las diferentes antenas. La capacidad del sistema está estrechamente ligada al hecho de que el número de slots asignados a cada antena sea fijo o variable. En los dos casos el sistema está limitado por falta de recursos, pero si se permite compartir el número de canales entre las diferentes antenas, la capacidad es mayor que si se dividen los 12 canales en subgrupos y se asigna uno a cada antena.

La mejor forma de repartir los canales es permitiendo que cada antena utilice los que requiera, sin que se utilice un mismo slot en dos antenas o que el número de slots sobrepase el máximo permitido. En este caso, la capacidad obtenida por el grupo de antenas y controlador de canales es la máxima permitida por los 12 canales. Con éste método, aparte de ampliar la cobertura, también se ha conseguido aumentar la eficiencia de los canales.

Las estaciones repetidoras, aparte de utilizar más de un canal para una conexión, tienen el inconveniente que el enlace radio que une la estación base principal con la repetidora es el que más tráfico soporta y a la vez se encuentra en una de las peores posiciones de la célula. Se ha visto que si no se toman medidas para proporcionar una buena transmisión en dicho enlace la capacidad del sistema es mínima. Para compensar el hecho de que la estación repetidora esté en la frontera de la célula se ha supuesto que la estación repetidora dispone de una antena directiva apuntando permanentemente a la estación base principal. Además se considera que el citado enlace tiene una visibilidad perfecta, por lo que la atenuación por sombras es de 0 dB. Bajo estas se consigue un buen nivel de tráfico que está dentro de los requerimientos de la ETSI para entornos rurales con bajas densidades de tráfico.

El siguiente objetivo de la tesis era evaluar el comportamiento del DECT utilizado como RLL en entornos con distribución de tráfico no uniforme. Para ello se han situado áreas de alta densidad de tráfico (*hot spots*) en el área de simulación. Se han evaluado diferentes situaciones teniendo en cuenta: posición del *hot spot* respecto a la distribución de las estaciones base, tamaño del *hot spot* comparable al área de cobertura de una célula o mayor, uno o varios *hot spots* y usuarios accediendo a una o dos estaciones base con y sin reapuntamiento. La conclusión que se puede extraer de los resultados es que el DECT es un buen sistema para absorber concentraciones de tráfico aparecidas de forma inesperada. Su asignación dinámica de canales le permite acomodarse fácilmente a los cambios de tráfico ofrecido, sin la necesidad de realizar ningún tipo de modificación en la infraestructura del sistema. En estos casos los sistemas de asignación dinámica de canal (DCA) son claramente superiores a los sistemas de asignación fija de canal (FCA).

De la misma forma que el DECT se adapta automáticamente a fluctuaciones de tráfico también permite la coexistencia de varios sistemas en la misma zona. Estos sistemas pueden estar sincronizados o no. Es obvio que si los sistemas están mutuamente sincronizados su capacidad debe ser superior a si no lo están. El siguiente objetivo es evaluar las pérdidas que puede ocasionar tal desincronización en caso de que exista.

La desincronización entre dos sistemas repercute en dos puntos. El primero es que cada slot de un sistema se ve interferido por dos slots del otro sistema. Ello comporta que cada slot tenga dos niveles diferentes de interferencia espaciados en su tiempo de duración y por lo tanto, más probabilidad de que uno de ellos esté por debajo del umbral de calidad requerido. El segundo es que con dos sistemas sincronizados todos los terminales se ven interferidos por las estaciones base y éstas por los terminales. Cuando existe desincronización, en algunos slots los terminales se ven interferidos por terminales y las estaciones base por estaciones base.

En los resultados presentados se muestra como el primer efecto es mucho más negativo que el segundo. El hecho de que un slot se vea interferido por dos comporta unas pérdidas de capacidad que pueden variar desde el 16 % al 26 %. El segundo efecto no repercute en la calidad final del sistema, pero sí en sus parámetros internos y en el origen de los trasposos aunque el número total de ellos no se modifique. En sistemas sincronizados, prácticamente el total de los trasposos vienen dados por el enlace de bajada. En sistemas desincronizados un número entero de slots, se inician más trasposos en el canal de subida que en el de bajada, pero en partes similares.

Para finalizar con el estudio de la capacidad del DECT en un entorno de RLL se ha evaluado el efecto que produce la duración de las llamadas en el grado de servicio. La conclusión que se extrae de los resultados obtenidos es que las llamadas cortas tienen una mejor calidad que las largas. Siempre que exista una cierta probabilidad de interrupción, las llamadas más largas deberán realizar más trasposos por lo que la probabilidad de verse interrumpidas aumenta.

A continuación se ha pasado a evaluar otras características funcionales del sistema sin tener en consideración el grado de servicio del mismo. Se ha visto que el factor de sombras afecta a la hora de escoger la mejor estación base. Una parte importante de terminales no se conectan a la estación base más próxima debido a que la atenuación con distribución lognormal provoca que la estación de mayor potencia no sea la más cercana. También se ha visto que la calidad del enlace de bajada es mejor que la del de subida. El terminal es quien escoge el canal a utilizar y lo propone a la estación base, ésta acepta siempre que la relación señal a interferencia sea suficiente y aunque no sea su mejor canal. Ello provoca que la componente mayoritaria del grado de servicio sea debida al enlace de subida.

Al comparar la distribución de la relación C/I de dos sistemas coexistiendo en la misma zona cuando están sincronizados y cuando no lo están, se observa que en el último caso se pierden del orden de 4 dB respecto al primero.

Posteriormente, se ha comprobado que las llamadas que provocan más traspasos son aquellas que se encuentran más lejos de la estación base, y que existe mayor probabilidad de bloquear el establecimiento de un canal si se intenta desde un traspaso que si proviene de una nueva llamada.

Por último se ha presentado una expresión analítica aproximada de la probabilidad de *outage* para sistemas FCA que puede ser evaluada con relativa facilidad. Seguidamente se ha extendido su uso a sistemas DCA, asumiendo que la distribución de las células co-canal es uniforme sobre el área de simulación. De hecho para sistemas que no trabajan al máximo de su capacidad esta circunstancia es más exacta en los sistemas DCA que en los FCA. 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 radio utilizando el estándar DECT y se ha visto que realmente la aproximación se asemeja en gran medida al modelo analítico.

8.2 LINEAS FUTURAS

Entre las posibles líneas de continuación de este trabajo destacan las siguientes:

- Una de las cuestiones que más afectan a los resultados obtenidos es el modelo de pérdidas de propagación. Una cuestión a profundizar es el estudio del sistema con modelos más complejos, de varias pendientes respecto a la distancia entre el emisor y el receptor. Otra posibilidad es modelar las atenuaciones multicamino con distribuciones de Rayleigh o Rice en lugar del margen de protección en la relación C/I. Sin embargo, estos modelos tienen la desventaja que la simulación debe trabajar a nivel de bit, con lo que el tiempo de simulación se alarga enormemente.

- En la presente tesis se han evaluado los sistemas de RLL y CTM por separado. Un punto a considerar es la influencia que pueden ocasionarse dos sistemas de este tipo conviviendo en una misma área. En este caso las estaciones base del sistema de RLL se situarían en media por encima de los tejados y las del sistema CTM a más baja altura. Otra posibilidad es un solo sistema que ofrezca ambos servicios simultáneamente. Para obtener estos resultados deberían integrarse los dos simuladores y observar como reacciona cada sistema con las interferencias del otro.
- Uno de los puntos fuertes del DECT es que puede utilizarse tanto en aplicaciones de interiores como de exteriores. Si en un futuro llegan a coexistir de forma generalizada estos dos tipos de sistemas sería de utilidad el conocer la influencia que pueden provocarse mutuamente; sin embargo, el hecho de estar separados por las paredes de los edificios hace suponer que será casi despreciable.
- El DECT permite la utilización de canales con un ancho de banda superior a los 32 Kbps utilizando más de un slot. Otra línea futura es el estudio de la capacidad que tiene el sistema cuando se utilizan canales de varios slots, simétricos y asimétricos. Existen dos tipos de conexiones multislot, aquellas que utilizan dos slots consecutivos a la misma frecuencia (doble slot) o aquellas en que los slots pueden estar separados y utilizar diferentes frecuencias. Los primeros tienen la ventaja de que el tiempo de guarda entre ambos slots puede utilizarse para transmitir datos, pero tienen la desventaja de que los trasposos tienen una probabilidad de interrupción mayor. En el caso de tener conexiones asimétricas debe considerarse el hecho de que un terminal o estación base estará transmitiendo durante la media trama que en un principio no le correspondería. Así se tendrán estaciones base interfiriendo a estaciones base y terminales a terminales, como en el caso de dos sistemas desincronizados un número entero de slots.
- Uno de los principales problemas que presenta una red de RLL o CTM utilizando el DECT es la sincronización de las diferentes estaciones base del propio sistema. Por ello sería interesante la evaluación de las pérdidas de capacidad del sistema cuando sus estaciones base están totalmente desincronizadas entre sí.
- En Norte América existe una propuesta de PCS de un sistema de telefonía sin cordón PWT (*Personal Wireless Telecommunications*) basado en el DECT europeo y del cual difiere en pocos puntos. El simulador desarrollado para el estudio del DECT podría adaptarse sin demasiadas modificaciones para estudiar el comportamiento del PWT y realizar comparaciones entre los dos.
- Otros sistemas de telefonía sin cordón actualmente en el mercado son el PHS japonés y el PACS norte americano. Estos difieren en más aspectos del DECT pero debido a su amplia utilización también sería de interés poder conocer sus comportamientos adaptando el simulador disponible para el DECT.

- Existen también líneas futuras en el campo del cálculo analítico. Uno de los puntos sobre el que puede enfocarse la investigación es en el cálculo de la probabilidad de bloqueo a las segundas estaciones base cuando la llamada no es aceptada por la primera. En estos casos potencia recibida de la señal deseada es menor, con lo que la probabilidad de bloqueo aumenta.
- Otro punto sobre el que puede desarrollarse un estudio es en el cálculo analítico de la probabilidad de inicio de traspasos debidos a la aparición de llamadas co-canal. Ya se comentó con anterioridad que en el sistema de bucle de abonado vía radio, aunque los usuarios sean estáticos, deben realizarse traspasos intracélula originados por el establecimiento de llamadas en el mismo canal que otras ya establecidas.
- Aparte del servicio de conmutación de circuitos sería interesante comprobar como funcionaría el DECT en servicios de acceso en modo paquete con diferentes protocolos de acceso al medio. Existen propuestas de dar mediante el DECT servicios similares al GPRS (*General Paquet Radio Service*) del GSM.
- Uno de los inconvenientes que tiene el DECT para trabajar en acceso modo paquete es su largo tiempo de establecimiento. Para este tipo de acceso podrían buscarse mecanismos de establecimiento rápido de circuitos.
- Finalmente, considerando la posibilidad de trabajar en modo paquete, podría buscarse un modelo de canal que considerase el efecto de las interrupciones de llamadas, cambios súbitos de la relación C/I debido a la aparición de llamadas o por el desplazamiento de los terminales. Una vez obtenido el modelo debería encontrarse la probabilidad de error de paquete y como influye en el protocolo de transmisión de datos.

ANEXO A. ACRONIMOS UTILIZADOS EN EL TEXTO

ADPCM: Adaptive Differential Pulse Code Modulation

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

BER: Bit Error Ratio

C/I: relación señal a interferencia

CI: Common Interface

COST: Cooperation in Science and Technology

CRC: Cyclic Redundancy Check

CRFP: Cordless Radio Fixed Part

CS: Central System

CT2: Cordless Telephone - 2

CTM: Cordless Terminal Mobility

DAS: DECT Access Site

DCA: Dynamic Channel Allocation

DECT: Digital Enhanced Cordless Telecommunications

EB: Estación Base

ES: End System

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FCA: Fixed Channel Allocation

FP: Fixed Part

GAP: Generic Access Profile

GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying

GOS: Grade Of Service

GPRS: General Paquet Radio Service

GSM: Global System for Movile communications

IS-136: Interin Standard - 136

IS-95: Interin Standard - 95

ITU-R: International Telecommunications Union - Radiocommunications Standardization Sector

ITU-T: International Telecommunications Union - Telecommunications Standardization Sector

IWU: Interworking unit

LE: Local Exchange

LLME: Lower Layer Management Entity

LOS: Line Of Sight

MAC: Medium Access Control

MC: Multiple Carrier

MONET: Mobile Network

MPMP: Microwave Point-to-Multipoint

NLOS: No Line Of Sight

NMA: Network Management Agent

NMT: Nordic Mobile Telephone system

O&M : Operation and Maintenance

OSI: Open Systems Interconnection

PABX: Private Automatic Branch Exange

PACS: Personal Access Communications System

PCM: Pulse Code Modulation

PCS: Personal Communications System

PDC: Personal Digital Cellular

PHS: Personal Handyphone System

PP: Parte Portátil

PT: Portable Termination

PWT: Personal Wireless Telecommunications

QPSK: QuadriPhase - Shift Keying

RACE: Research on Advanced Communications for Europe

RDSI : Red Digital de Servicios Integrados

RDSI-BE: Red Digital de Servicios Integrados de Banda Estrecha

RFP: Radio Fixed Part

RLL: Radio Local Loop

RSSI: Received Signal Strength Indicator

SRC4: Strategic Review Committee on Public Networks

TDD: Time Division Duplex

TDMA: Time Division Multiple Access

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System

VDSL: Very high speed Digital Subscriber Line

WLAN: Wireless Local Area Network

WLL: Wireless Local Loop

WRS: Wireless Relay Stations

xDSL: x Digital Subscriber Line

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [ABU] M. A. Abumahlula, T. L. Doumi, J. G. Gardiner. "DECT - WLL performance in a rural environment". PIMRC'96. Octubre de 1996. Taipei, Taiwan.
- [ADV] "Advanced Cordless Communications". Advanced Cordless Communications Sample Issue. <http://www.telecoms.com/acc-02.htm>. Marzo de 1997.
- [AKA] Y. Akaiwa, H. Andoh, T. Kohama. "Autonomous decentralized inter-base-station synchronization for TDMA microcellular systems". VTC'91. Mayo de 1991. San Luís, USA.
- [AKE] D. Akeberg, F. Brouwer, P. H. G. van de Berg, J. Hager. "DECT technology for radio in the local loop". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.
- [ALM] M. Almgren, H. Andersson, K. Wallsted. "Power control in a cellular system". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.
- [AND] H. Andersson, M. Landing, A. Rydberg, T. Öberg, B. Olsson, P. Stahljäll, J. Zetterblad. "An adaptive antenna for de NMT 900 mobile telephony system". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.
- [ATD] Advance TDMA Mobile Acces project. "Propagation Models Issue 1". R2084/ESG/CC3/DE/P/012/b1. Ed. Georg Strasser. 14 de abril de 1993.
- [BAR] F. Barceló, J. Paradells. "Previsión de tráfico en redes de banda ancha corporativas a medio y largo plazo". Telecom I+D'96. Noviembre de 1996. Madrid, España.
- [BER] J. E. Berg, R. Bownds, F. Lotse. "Path loss and fading models for microcells at 900 MHz". VTC'92. Mayo de 1992. Denver, USA.

-
- [BERG] P. H. G. van de Berg, F. B. Brouwer. "The architecture and performance of a DECT-PCS implementation". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.
- [BON1] L. Bonzano , V. Palestini. "DECT performance in the wireless PBX application". ICC'93. Mayo de 1993. Ginebra, Suiza.
- [BON2] L. Bonzano, R. De Benedittis, V. Palestini, G. Rosina. "A new radio access strategy using a repeater in the DECT radio local loop application". ICUPC'94. Septiembre de 1994. San Diego, USA.
- [BOU] B. Bout, D. Sparreboom, F. Brower, R. Prasad. "A mathematical model for dynamic channel selection in conformity with the digital european cordless telecommunications standard". PIMRC'93. Septiembre de 1993. Yokohama, Japón.
- [BÖR] H. Börjeson, C. Bergljung, L. G. Olsson. "Outdoor microcell measurements at 1700 MHZ". VTC'92. Mayo de 1992. Denver, USA.
- [BUL] R. J. C. Bultitude, D. A. Hughes. "Propagation loss at 1.8 GHz on microcellular mobile radio channels". PIMRC'96. Octubre de 1996. Taipei, Taiwan.
- [CAI] C. Caini, G. Immovilli, M. L. Merani. "Outage probability in FDMA/TDMA mobile communication networks". European Transactions on Telecommunications, vol. 5, nº 1. Enero - Febrero de 1994.
- [CAL] G. Calhoun. "Wireless access and the local telephone network". Ed. Artech House. 1992.
- [CAS1] J. Casademont, J. Paradells, S. Sallent. "Radio Local Loop based on DECT. Enhancements to increase capacity". "The Local Loop: Access Technologies, Services, and Business Issues". Ed: International Engineering Consortium. 1997. ISBN 0-933217-34-X.
- [CAS2] J. Casademont, J. Paradells, S. Sallent. "Radio Local Loop based on DECT. Enhancements to increase capacity". ICUPC'96. Noviembre de 1996. Cambridge, USA.
- [CAS3] J. Casademont, J. Paradells, S. Sallent, J. Ferrer, J. Oriol. "Técnicas de incremento de capacidad para un bucle de abonado con el estándar DECT". Telecom I+D'96. Noviembre de 1996. Madrid, España.
- [CAS4] J. Casademont, J. Paradells. " Power control in the DECT radio local loop". ICUPC'97. Octubre de 1997. San Diego, USA.

- [CAS5] J. Casademont, J. Paradells, S. Sallent, J. Ferrer, J. Oriol. "Distributed antenna in the radio local loop based on DECT". VTC'97. Mayo de 1997. Phoenix, USA.
- [CAS6] J. Casademont, J. Paradells. "Urban CTM system using DECT". GLOBECOM'97. Noviembre de 1997. Phoenix, USA.
- [CAS7] J. Casademont, J. Paradells. "DECT capacity in an urban environment". PIMRC'97. Septiembre de 1997. Helsinki, Finlandia.
- [CAS8] J. Casademont, J. Paradells. "Desynchronization between coexisting radio local loop systems based on DECT". ICWPC'97. Diciembre de 1997. Bombay, India.
- [CHO] J. Choong, D. Everitt. "Outage analysis and spectral efficiency of indoor mobile radio systems". VTC'95. Julio de 1995. Chicago, USA.
- [CHOW] T. H. Chowdary. "Caught in a loop: WLL in India". Telecommunications. International edition. Septiembre de 1996.
- [CHU1] J. Chuang. "Performance issues and algorithms for dynamic channel assignment". IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 11, n° 6. Agosto de 1993.
- [CHU2] J. Chuang. "Performance limitations of TDD wireless personal communications with asynchronous radio ports". IEE Electronic Letters, vol. 28, n° 6, pag: 532 - 534. 12 de Marzo de 1992.
- [CHU3] J. Chuang. "Autonomous time synchronization among radio ports in wireless personal communications". IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 43, n° 1, pag: 27 - 32. Febrero de 1994.
- [CON] K. R. McConnell, D. Bodson, R. Schahorst. "FAX: digital facsimile, technology and applications". Ed. Artech House. 1989.
- [ERI] H. Eriksson, R. Bownds. "Performance of Dynamic Channel Allocation in the DECT System". VTC'91. Mayo de 1991. San Luís, USA.
- [ETR015] ETSI. ETR015: "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Reference document". Marzo de 1991.
- [ETR042] ETSI. ETR042: "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); A guide to DECT features that influence the traffic capacity and the maintenance of high radio link transmission quality, including the results of simulations". Julio de 1992.

-
- [ETR043] ETSI. ETR043: "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Common interface. Services and facilities requirements specification". Julio de 1992.
- [ETR139] ETSI. ETR 139. "Radio Equipment and Systems (RES); Radio in the Local Loop (RLL)". Noviembre de 1994.
- [ETR178] ETSI. ETR 178: "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); A high level guide to the DECT standardization". Octubre de 1995.
- [ETR246] ETSI. ETR 246. "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Application of DECT Wireless Relay Stations (WRS)".
- [ETR308] ETSI. ETR 308. "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Services, facilities and configurations for DECT in the local loop". Agosto 1996.
- [ETR310] ETSI. ETR 310: "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Traffic capacity and spectrum requirements for multi-system and multi-service DECT applications co-existing in a common frequency band". Agosto de 1996.
- [ETS175] ETSI. ETS 300 175 Partes de 1 a 8. "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Common Interface (CI)". Octubre de 1992.
- [ETS765] ETSI. DRAFT prETS 300 765-2. "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Radio in the Local Loop (RLL) Access Profile (RAP); Part 2: Advanced telephony services". Enero de 1997.
- [ETS824] ETSI. DRAFT prETS 300 824. "Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Cordless Terminal Mobility (CTM); CTM Access Profile (CAP)". Enero de 1997.
- [EVA] G. Evans, B. Joslin, L. Vinson, B. Foose. "The optimization and application of the W. C. Y. Lee propagation model in the 1900 MHz frequency band". VTC'97. Mayo de 1997. Phoenix, USA.
- [FOR1] U. Forssén, J. Karlsson, B. Johannisson, M. Almgren, F. Lotse, F. Kronstedt. "Adaptive antenna arrays for GSM900/DCS1800". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.

- [FOR2] U. Forssén, J. Karlsson, F. Kronestedt, M. Almgren, S. Anderson. "Antenna arrays for TDMA personal communication systems". ICUPC'95. Noviembre de 1995. Tokio, Japón.
- [FORD] D. N. Ford. "High-Bandwidth services over copper plant.". "The Local Loop: Access Technologies, Services, and Business Issues". Ed: International Engineering Consortium. 1997. ISBN 0-933217-34-X.
- [FRE] R. C. French. "The effect of fading and shadowing on channel reuse in mobile radio". IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 28, n° 3. Agosto de 1979.
- [FRO] M. Frodigh, J. Zander. "Joint power control in cellular radio systems". PIMRC'95. Septiembre de 1995. Toronto, Canadá.
- [GAR] V. K. Garg, E. L. Sneed. "Digital wireless local loop system". IEEE Communications Magazine, pags: 112 - 115. Octubre 1996.
- [GAR2] V. K. Garg, J. E. Wilkes. "Wireless and personal communications systems". Ed. Prentice Hall. 1996.
- [GRA] K. Grabowski, L. Habenhaus. "Traffic models for ISDN with integrated packet switching". Teletraffic science for new cost-effective systems, Networks and Services, ITC-12. Ed. M. Bonatti. Elsevier Science Publishers B. V. (Nord Holland). 1989.
- [GRAN] S. A. Grandhi, J. Zander, R. Yates. "Constrained power control". Wireless Personal Communications, vol. 1, pag: 257 - 270. 1995.
- [HAR] P. Harley. "Short distance attenuation measurements at 900 MHz and 1.8 GHz using low antenna heights for microcells". IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 7, n° 1. Enero de 1989.
- [HER] J. M. Hernando Rábanos. "Comunicaciones móviles". Ed. Centro de estudios Ramón Areces S. A. 1997. ISBN 84-8004-065-3.
- [HER2] J. M. Hernando Rábanos. "Transmisión por radio". Ed. Centro de estudios Ramón Areces, S. A. 1995.
- [HO] M. J. Ho, G. L. Stüber, M. D. Austin. "Performance of switched beam smart antennas for cellular radio systems". PIMRC'96. Octubre de 1996. Taipei, Taiwan.
- [HUI] J. M. Huidobro. "La radio en el bucle local". Radiorama. Abril de 1997.

-
- [ISH] K. I. Ishii, S. Yoshida. "Dynamic channel allocation algorithm with transmitter power control". VTC'94. Junio de 1994. Stockholm, Sweden.
- [JAG] J. Jager, H. Österberg. "DECT para radio en el bucle de abonado". Ericsson Review n° 3. 1995.
- [JAK] W. C. Jakes, Jr. "Microwave mobile communications". Ed. John Wiley & Sons, Inc. 1974.
- [JAV] A. Javed. "Wireless local loops: status and evolution". Wireless'96. Julio de 1996. Calgary, Canadá.
- [KEN] J. Kennedy, M. C. Sullivan. "Direction finding and smart antennas using software radio architectures". IEEE Communications Magazine. Mayo de 1995.
- [KOZ] S. Kozono, A. Taguchi. "Mobile propagation loss and delay spread characteristics with a low base station antenna on an urban road". IEEE transactions on vehicular technology, vol. 42, n° 1. Febrero de 1993.
- [LEE] W. C. Y. Lee. "Mobile communications engineering". New York; Ed. McGraw-Hill. 1982.
- [LEE2] W. C. Y. Lee. "Mobile communications design fundamentals". Second Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [LEE3] C. C. Lee, R. Steele. "Signal to interference calculations for modern TDMA cellular communication systems". IEE Proceedings on communications, vol. 142, n° 1. Febrero de 1995.
- [LIP] E. H. Lipper, M. P. Rumsewicz. "Traffic analysis of co-channel interference in TDMA personal communications systems: Theoretical framework". J. M. Holtzman, D. J. Goodman. "Wireless communications. Future directions." Ed. Kluwer Academic Publishers. 1993. ISBN 0-7923-9316-3.
- [LOP] E. López, P. Bartolomé, R. Burriel, A. González, M. A. González, G. Vallejo. "DAMA: plataforma de aplicaciones multimedia con acceso DECT". Telecom I+D'96. Noviembre de 1996. Madrid, España.
- [LOT] M. P. Lötter, P. van Rooyen. "CDMA and DECT: alternative wireless local loop technologies for developing countries". PIMRC'97. Septiembre de 1997. Helsinki, Finlandia.
- [MAC] G. MacNamee. "Reducing the cost of DECT coverage". Mobile Communications International. Mayo de 1996.

- [MAJ] M. Majeed, S. Tjuatja. "An improved propagation model for wireless communications". ICC'96. Junio de 1996. Dallas, USA.
- [MAN] D. Mansel, A. Müller, C. Plenge. "Hot spot trial for DECT as a WLL technology". PIMRC'97. Septiembre de 1997. Helsinki, Finlandia.
- [MAY] C. Mayoral, R. Lorenzo. "Servicios de movilidad global: ¿evolución o revolución?". Telecom I+D'96. Noviembre de 1996. Madrid, España.
- [MCC] S. McCann, A. P. Croft. "Digital european cordless telecommunications system blind slot algorithm evaluation results". GLOBECOM'90. Diciembre de 1990. San Diego, USA.
- [MEA] P. Meade. "A new one every 2.8 seconds". America's Network. http://www.americasnetwork.com/issues.031097_research.html. Marzo de 1997.
- [MON] MONET. "Signaling traffic requirements for UMTS". R2066/SESA/GA2/DS/P/054/b1. Issue 1.1. Enero de 1994.
- [MOP] Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente. "Cuadro nacional de atribución de frecuencias". Ed. Centro de publicaciones de la secretaría general técnica del ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente. 1993. ISBN 84-7433-945-6.
- [MUS] D. Musoni, S. Riguzzi, G. Rosina. "Performance evaluation of a DECT based Wireless PABX". VTC'92. Mayo de 1992. Denver, USA.
- [NOE] A. R. Noerpel. "WLL: Wireless local loop. Alternative technologies". PIMRC'97. Septiembre de 1997. Helsinki, Finlandia.
- [NOK] Nokia. "Fixed Networks: Solutions and products". <http://www.nokia.fi/products/networks/fixed/solutions.html>. Marzo de 1997.
- [NOW] D. Nowicki, J. Roumeliotis. "Smart antenna strategies". Mobile Communications International. Abril de 1995.
- [PAR] D. Parsons. "The mobile radio propagation channel". Ed. Pentech Press. 1992.
- [PARA] J. Paradells, A. Calveras, C. Carpintero, V. Casares. "DECT multibearer channels". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.

-
- [PAT] M. Pätzold, U. Killat, F. Laue. "A deterministic digital simulation model for Suzuki processes with application to a shadowed Rayleigh land mobile radio channel". IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 45, n° 2. Mayo de 1996.
- [PEÑ] J. de la Peña, J. Pedernal, M. Cepedano, F. Luciañez, J. Moreno. "Las experiencias DECT en Madrid". Telecom I+D'96. Noviembre de 1996. Madrid, España.
- [PET] M. Petty. "Manage access". Global Telephony. Octubre de 1996.
- [PHO] Phoenix Wireless Group. "Economic justification of wireless local loop". [Http://www.pwgi.com/WhitePapers/WilJust/WLLJUST.htm](http://www.pwgi.com/WhitePapers/WilJust/WLLJUST.htm). 1997.
- [PIT] M. V. Pitke. "Due to public demand". Communications International. Octubre de 1996.
- [PRA] R. Prasad, C. K. Chatterjee. "Overview on wireless in local loop". S. G. Glisic, P. A. Leppänen. "Wireless Communications. TDMA versus CDMA". Ed. Kluwer Academic Publishers. 1997.
- [RAC] RACE 2066. "Mobile Networks (MONET). Wireless local loop applications of UMTS". R2066/CSELT/RAS1/DS/P111/b1. Diciembre de 1995.
- [RAP] T. S. Rappaport. "Wireless communications". Ed. Prentice Hall. 1996.
- [REI] M. Reiss. "Radio: an alternative for the loop". Telcom report international 18 n° 2. 1995.
- [RIO] D. Ríos Insua, S. Ríos Insua, J. Martín. "Simulación. Métodos y aplicaciones". Ed. RA-MA. 1997.
- [RON] J. L. Roncero. "Planificación de redes públicas con tecnología DECT". TELECOM I+D'95. Noviembre de 1995. Madrid, España.
- [SAN] M. Sánchez, E. Aroca, J. Jiménez, J. Gavilán. "Estudio de capacidad del sistema DECT, en un entorno urbano". Telecom I+D'96. Noviembre de 1996. Madrid, España.
- [SOW1] K. W. Sowerby, A. G. Williamson. "Outage probabilities in mobile radio systems suffering cochannel interference". IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 10, n° 3. Abril de 1992.
- [SOW2] K. W. Sowerby, A. G. Williamson. "Outage probability calculations for mobile radio systems with multiple interferers". IEE Electronics letters, vol. 24, n° 17. Agosto de 1988.

- [SOW3] K. W. Sowerby, A. G. Williamson. "Outage probability calculations for multiple cochannel interferers in cellular mobile radio systems". IEE Proceedings, vol. 135, pt. F, n° 3. Junio de 1988.
- [TSO1] G. V. Tsoulos, M. A. Beach, S. C. Swales. "On the sensitivity of the capacity enhancement of a TDMA system with adaptive multibeam antennas". VTC'97. Mayo de 1997. Phoenix, USA.
- [TSO2] G. V. Tsoulos, M. A. Beach, S. C. Swales. "Application of adaptive antenna technology to third generation mixed cell radio architectures". VTC'94. Junio de 1994. Estocolmo, Suecia.
- [TUT] W. H. W. Tuttlebee. "Cordless telecommunications worldwide". Ed. Springer. 1997.
- [VAL] G. Valdivia, J. Jiménez, L. Carrasco. "El bucle radioeléctrico sin hilos". Mundo Electrónico. Octubre 1995.
- [WAN] L. Wang, C. Lea. "Incoherent estimation on co-channel interference probability for microcellular systems". IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 45, n° 1. Febrero de 1996.
- [WEL] M. C. Wells. "Increasing the capacity of GSM cellular radio using adaptive antennas". IEE Proceedings on communications, vol. 143, n° 5. Octubre de 1996.
- [WES] R. Westerveld, R. Prasad. "Rural communications in India using fixed cellular radio systems". IEEE Communications Magazine. Octubre de 1994.
- [WIL] A. G. Williamson, J. D. Parsons. "Outage probability in a mobile radio system subject to fading and shadowing". IEE Electronics letters, vol. 21, n° 14. Julio de 1985.
- [XIA] H. H. Xia, H. L. Bertoni, L. R. Maciel. "Radio propagation characteristics for line of sight microcellular and personal communications". IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 41, n° 10. Octubre de 1993.
- [YEH] Y. Yeh, S. C. Schwartz. "Outage probability in mobile telephony due to multiple log-normal interferers". IEEE Transactions on communications, vol. 32, n° 4. Abril de 1984.
- [YU1] C. C. Yu, D. Morton, C. Stumpf, R. G. White, J. E. Wilkes, D. Ulema. "Low-Tier wireless local loop radio systems. Part 1: Introduction". IEEE Communications Magazine. Marzo de 1997.

-
- [YU2] C. C. Yu, D. Morton, C. Stumpf, R. G. White, J. E. Wilkes, D. Ulema. "Low-Tier wireless local loop radio systems. Part 2: Comparison of systems". IEEE Communications Magazine. Marzo de 1997.
- [YUM] T. P. Yum, W. S. Wong. "Hot-spot traffic relief in cellular systems". IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 11, n° 6, pags: 934 - 940. Agosto de 1993.
- [ZAN] J. Zander. "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 41, n° 1. Febrero de 1992.
- [ZON] M. M. Zonoozi, P. Dassanayake. "Shadow fading in mobile radio channel". PIMRC'96. Octubre de 1996. Taipei, Taiwan.