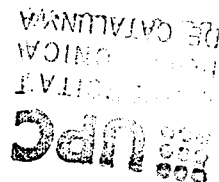


1400321166
T 98/126



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE
TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA

**Contribución a la caracterización de los sistemas
de comunicaciones móviles. Alternativas a la
mejora de la capacidad de un sistema.**

TESIS DOCTORAL

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

Autor: **Juan Luis Gorricho Moreno**

Director: **Josep Paradells Aspas**

Diciembre 1998

Capítulo 9

Sistemas con servicios de tasa variable

En este capítulo se busca, de dos formas diferentes, el aprovechamiento al máximo de la capacidad de transmisión que ofrece el sistema. Aunque ello implique el consiguiente riesgo que supone trabajar cerca de la saturación del sistema.

Por un lado se diseña un sistema que permita a todas las comunicaciones operar con la máxima relación señal a interferencia. Es decir, se impone la misma relación señal a interferencia para todos, pero ésta es variante, dependiendo del número de comunicaciones de cada momento, así como de la ubicación de los terminales. Existe en la literatura un estudio basado en la misma idea de partida escrito por Yates et al. [Yat97].

Por otro lado se define un sistema donde sea posible trabajar con velocidades de transmisión de datos diferentes. Es decir, suponiendo igual ancho de banda de radio frecuencia para todas las comunicaciones, se opera con diferentes ganancias de procesado. Cuanto mayor sea la velocidad de transmisión, menor será la ganancia de procesado, y por tanto, la comunicación estará menos protegida. Para igualar la calidad de las comunicaciones, independientemente de la velocidad de transmisión, las conexiones menos protegidas deberán trabajar con una relación señal a interferencia superior. De este modo, a diferencia del caso anterior, se establecen diferentes relaciones señal a interferencia umbral, con lo que se agrupan las conexiones en varias categorías según la velocidad de transferencia de la información.

9.1 Sistemas con SIR variable

El primer caso de estudio consiste en forzar a todas las comunicaciones a trabajar con la relación señal a interferencia máxima permitida. Se trata pues, de un estudio hipotético, porque en un caso real no se puede mantener todo un conjunto de conexiones con una calidad de servicio que está a expensas del número de comunicaciones de ese momento. Sin embargo, se ha antecedido este estudio al segundo caso, de diseño de un sistema con distintas velocidades de transmisión, porque la forma de operar del escenario actual indicará la filosofía de funcionamiento de éste último.

9.1.1 Descripción del escenario

La situación convencional, que ha sido objeto de exposición a lo largo de toda la memoria, es aquella para la cual se define una relación señal a interferencia umbral

que toda comunicación debe cumplir. Esto se consigue mediante la emisión de la mínima potencia necesaria, siempre dentro de los límites preestablecidos.

Como caso particular se tienen aquellas comunicaciones que operan con emisión de la mínima potencia. Su *SIR* supera el umbral, sin que por ello puedan reducir la potencia emitida. El resto de comunicaciones se ajustan al *SIR* umbral.

Ante esta situación de desigualdad, se plantea la posibilidad de que aquellas comunicaciones que se han situado en el *SIR* umbral, mejoren su *SIR* a costa de reducir la calidad de aquellas que emitían con potencia mínima. La intención es igualar el *SIR* de todas las comunicaciones, se sobreentiende a un nivel superior al *SIR* umbral original.

Considerando el análisis teórico visto en el capítulo 6, siempre y cuando se imponga un nuevo *SIR* umbral por debajo del inverso del autovalor de módulo máximo asociado al sistema, el mecanismo de control de potencia funcionará correctamente.

En relación con el control de potencia, lo que se pretende hacer es abrir el abanico de potencias emitidas dentro del margen establecido entre P_{min} y P_{max} . Aquellas conexiones mantenidas con P_{min} continuarán con este nivel de emisión, y el resto aumentará su potencia para poder alcanzar ese *SIR* umbral superior que se intenta imponer.

9.1.2 Capacidad del sistema

En principio se es desconocedor de los elementos de la matriz que describe el sistema. Por tanto, no se puede calcular "a priori" los autovalores de la matriz, para así deducir cuál es el *SIR* umbral máximo alcanzable por el sistema.

Si además, para el escenario de estudio, se van añadiendo gradualmente nuevas comunicaciones, esto significa que el sistema se va modificando, con la inclusión por cada comunicación de una nueva fila-columna sobre la matriz original, lo cual obligaría en cada caso a recalcular los nuevos autovalores.

Para evitar todos estos problemas nos vamos a ayudar del indicio de desbordamiento de un sistema que se dedujo en el capítulo anterior. Según este indicio, se debe controlar el *SIR* que mantienen aquellas comunicaciones que trabajan con P_{min} . De manera que el *SIR* impuesto no obligue a que éstas emitan con una potencia superior a P_{min} .

9.1.3 Algoritmo de simulación

El algoritmo de simulación diseñado para conseguir el máximo *SIR* umbral en cada momento es el siguiente:

Las primeras comunicaciones pretenden establecerse con un *SIR* mínimo. Y para alcanzar éste, ponen en funcionamiento el mecanismo de control de potencia. Tras el régimen transitorio, alguna de las comunicaciones emite con P_{min} . Para éstas últimas se observa el *SIR* que han conseguido y se apunta el mayor de todos ellos. Este *SIR* será el objetivo a alcanzar por el resto de comunicaciones.

Se modifica el *SIR* umbral para todas las comunicaciones, con lo que el mecanismo de control de potencia vuelve a activarse. A medida que se emite con más potencia, el *SIR* de aquella comunicación que emitía con P_{min} se degrada y por tanto se tiene que rebajar el *SIR* umbral pretendido.

En sucesivas iteraciones, el *SIR* umbral se va rebajando, mientras el *SIR* de todas las comunicaciones va aumentando. Hasta que al final se igualan. Es en este momento cuando se alcanza el punto de equilibrio. Que a su vez coincide con el máximo *SIR* umbral alcanzable.

Si posteriormente se van añadiendo nuevas comunicaciones, el *SIR* umbral se irá degradando. Como se ha comentado con anterioridad, si se añaden más comunicaciones, se está introduciendo más interferencia al sistema, y por tanto, el *SIR* asociado a la comunicación que emite con P_{min} , que en definitiva es quien impone el *SIR* umbral, se irá reduciendo.

En cualquier caso, con este método el sistema está próximo al desbordamiento. Para evitar cualquier situación crítica, el *SIR* umbral que se impone a las comunicaciones no es exactamente el *SIR* con el que opera la conexión con P_{min} . En su lugar, se habilita un margen de *SIR* válido unos dB por debajo del *SIR* de P_{min} . Es más, al utilizar el algoritmo iterativo por pasos en el control de potencia, se deben considerar las imprecisiones del ajuste fino que se derivan del mismo y que podrían provocar el desbordamiento del sistema.

9.1.4 Resultados de simulación

A continuación se presentan una serie de gráficas resultado de la simulación del escenario descrito en secciones anteriores. En primer lugar, en la figura 9.1 se representa la evolución de la relación señal a interferencia promedio, expresada en forma lineal, en función del número creciente de comunicaciones establecidas en la celda central. Se puede apreciar como la relación señal a interferencia decae a medida que aumenta el número de comunicaciones. Este decaimiento es inversamente proporcional al número de comunicaciones. En la figura 9.2, con una representación logarítmica se justifica el mencionado comportamiento.

El comportamiento irregular para valores muy pequeños del número de comunicaciones pierde sentido, ya que el promediado se ha hecho sobre todos los

ejercicios de simulación, con lo que se promedian valores reales, distintos de cero, cuando se recogen una o dos comunicaciones sobre la celda central, con valores nulos cuando no se da ninguna comunicación sobre la celda.

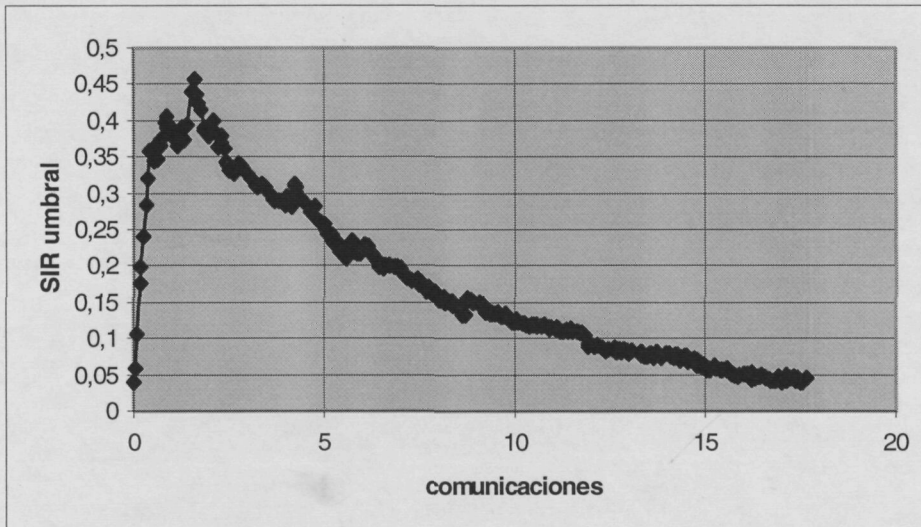


Figura 9.1. SIR umbral en función del número de comunicaciones.

En la figura 9.2 se representa la relación señal a interferencia media en forma logarítmica, se aprecia como dicha relación señal a interferencia va decayendo hasta alcanzar los $-14dB$, umbral mínimo impuesto sobre la simulación. Esto a su vez, deja entrever la zona donde comienzan a quedar terminales fuera de cobertura.

Como se había comentado para la figura anterior, al expresar la relación señal a interferencia en forma logarítmica se observa la dependencia lineal con el número de comunicaciones establecido.

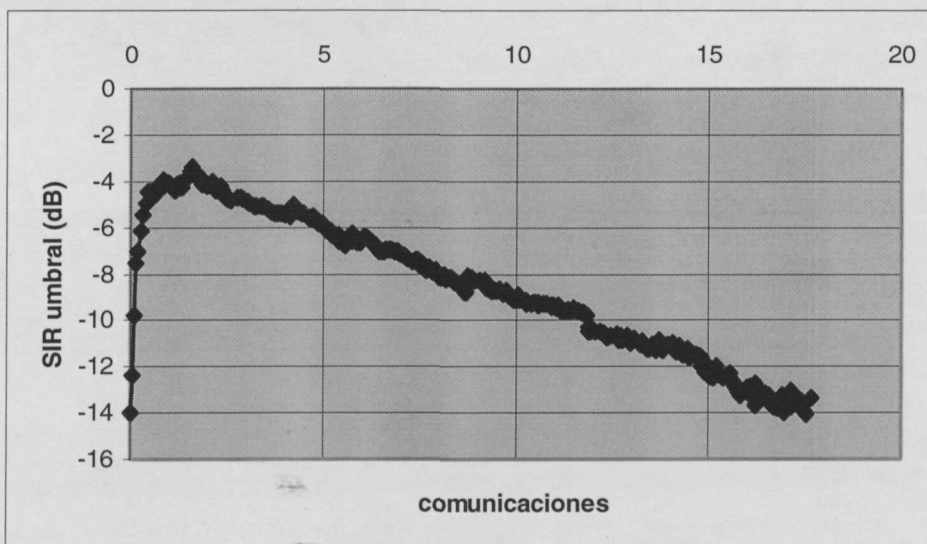


Figura 9.2. SIR umbral en función del número de comunicaciones.

En la figura 9.3 se representa el número medio de terminales que quedan fuera de cobertura en función del número de comunicaciones que se pretenden establecer. Los resultados obtenidos son coherentes con las simulaciones hechas en el capítulo 5, en aquella ocasión el SIR umbral de -14 dB era constante para todas las comunicaciones. En este caso, a medida que aumenta el número de comunicaciones, el SIR de referencia se va aproximando a los -14 dB , y cuando lo alcanza, se obtiene una capacidad para el sistema similar a la que se obtuvo en los ejercicios de simulación del capítulo 5, valores de aproximadamente 18 comunicaciones por celda, para una cobertura del 95%. Quizás ligeramente inferior a lo que se dió en el capítulo 5, diferencia atribuible al algoritmo de control de potencia por pasos utilizado en esta ocasión.

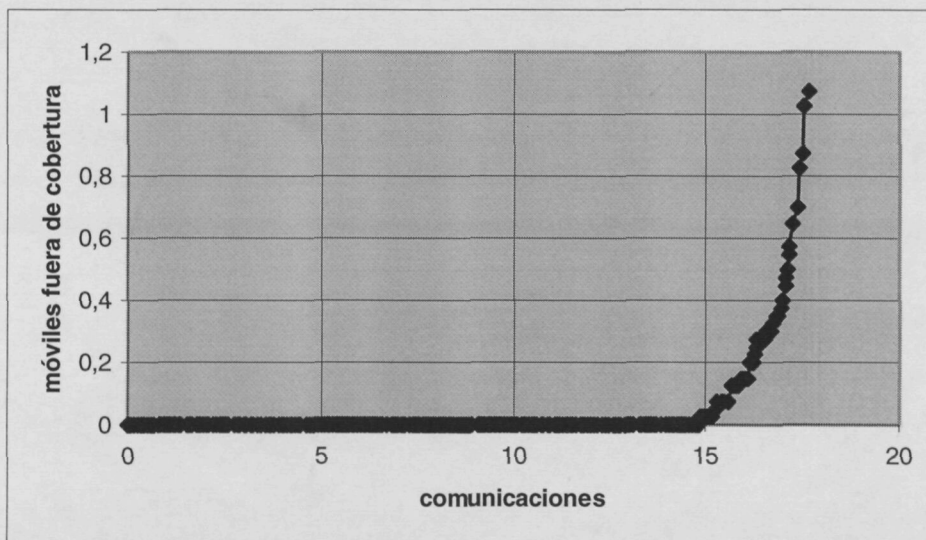


Figura 9.3. Móviles fuera de cobertura en función del número de comunicaciones.

En la figura 9.4 se representa la capacidad del sistema para la celda central. Capacidad medida, a través del segundo teorema de Shannon, mediante la acumulación de la capacidad individual de cada una de las comunicaciones establecidas dentro de la celda central. Es decir, la expresión utilizada ha sido:

$$C_T = \sum_{i=1}^M \log_2(1 + SIR_i)$$

Siendo M el número de comunicaciones establecidas en la celda central, y SIR_i la relación señal a interferencia con que opera cada una de ellas.

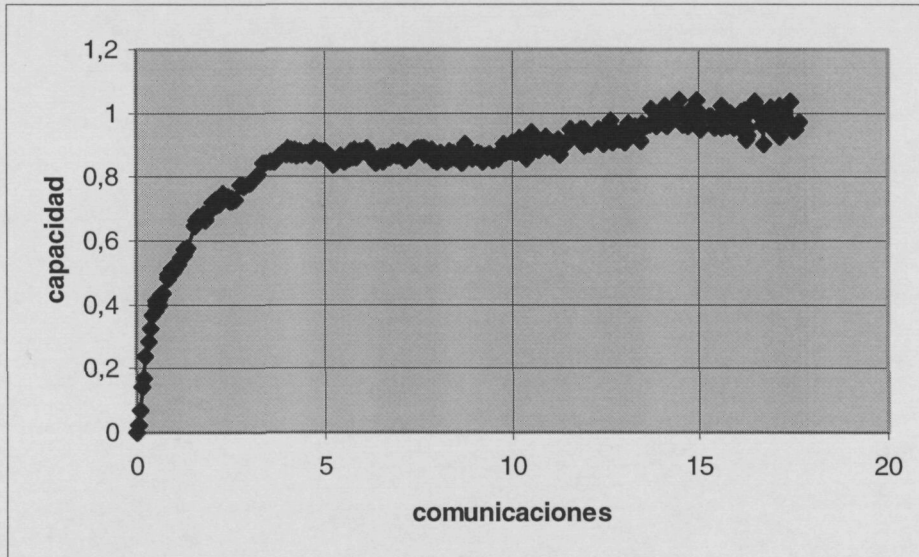


Figura 9.4. Capacidad del sistema en función del número de comunicaciones.

9.2 Sistemas con diferentes velocidades de transmisión

Una alternativa a la forma de operar descrita en el punto 9.1, consiste en no imponer el mismo *SIR* umbral para todas las comunicaciones. Ello da pie a poder trabajar con distintas velocidades de transmisión de datos.

Distintas velocidades de transmisión para el mismo ancho de banda en radio frecuencia implica utilizar diferentes ganancias de procesado. Para los futuros sistemas de tercera generación se habla de velocidades de transferencia de información con pasos de incremento de 100 bps [TR101], aunque esto actualmente parece algo difícilmente implementable. Como caso práctico se tiene el sistema IS-95, con una ganancia de procesado mínima de 128 y un ancho de banda del canal de radio frecuencia de $\Delta w = 1,2288 MHz$. Esto da lugar a una velocidad de transmisión de:

- $R_b = 1,2288 \cdot 10^6 / 128 = 9600 bps$

Otras velocidades posibles son:

- $R_b = 4800 bps \Rightarrow \text{Ganancia de Procesado} = 256$
- $R_b = 2400 bps \Rightarrow \text{Ganancia de Procesado} = 512$

También existe la posibilidad de conservar la ganancia de procesado y transmitir la mitad o la cuarta parte del tiempo.

Valores intermedios de ganancia de procesado entre 128, 256 y 512, darían velocidades de transmisión también intermedias. La ganancia de procesado se puede interpretar como la relación entre el tiempo de bit y el tiempo de chip, con lo cual, al variar ésta, se está modificando el tiempo de integración, tiempo de bit, en el receptor.

En nuestro caso se analizará un escenario con un número discreto de velocidades de transmisión.

9.2.1 Criterios de selección de la velocidad de transmisión

Se pueden definir varios criterios para seleccionar la velocidad de transmisión. Lo más normal sería que cada nueva comunicación eligiese aleatoriamente la velocidad con la que quiere transmitir. Nosotros vamos a tomar un criterio diferente, más práctico para poder observar la evolución del sistema a medida que aumentan las comunicaciones.

En principio, cuando haya pocas conexiones, todas se establecerán con la velocidad más alta, porque el sistema lo permite. Posteriormente, a medida que aumenten las conexiones se buscará la forma de repartir las velocidades para que el sistema siga siendo estable.

9.2.2 Algoritmo de simulación

El algoritmo de simulación diseñado para conseguir la máxima velocidad de transmisión en el conjunto de todas las comunicaciones en cada momento, es el siguiente:

En primer lugar se definen tres velocidades de transmisión distintas a través de sus correspondientes relaciones señal a interferencia umbral:

- $SIR = -8dB$
- $SIR = -11dB$
- $SIR = -14dB$

Como se utiliza el mecanismo iterativo por pasos de control de potencia, en realidad se definen tres márgenes en los cuales la relación señal a interferencia es válida:

- $-8dB < SIR < -5dB$
- $-11dB < SIR < -8dB$
- $-14dB < SIR < -11dB$

Al comienzo, con pocas comunicaciones, todas se establecen dentro del margen del SIR más alto. De entre ellas, existirá alguna con una potencia de emisión igual a P_{min} . Esta comunicación será la que indique si el sistema está próximo al desbordamiento. Mientras no sea así las nuevas incorporaciones se harán con el mayor SIR umbral.

Cuando se detecta que el SIR de P_{min} se va a igualar con el mayor SIR umbral se debe rebajar el SIR umbral ante la nueva entrada de comunicaciones. Para ello se

necesita un criterio que indique cómo repartir las velocidades de transmisión para que el sistema continúe siendo estable.

Análisis teórico

En el apartado 9.1 el criterio utilizado para evitar el desbordamiento del sistema consistía en ir rebajando el *SIR* umbral impuesto a todo el sistema. En esta ocasión se opera con tres *SIR* umbral discretos. Cuando el sistema está próximo a la saturación, se desconoce si la incorporación de una nueva comunicación con un *SIR* umbral inferior al de las comunicaciones ya establecidas será suficiente para salvaguardar la estabilidad. Para poder predecir lo que pueda suceder, vamos a desarrollar un breve análisis teórico.

La capacidad de transmisión del sistema en su conjunto se puede medir como el sumatorio de las velocidades de transmisión asociadas a cada comunicación:

$$C_T = \sum_{i=1}^{M_T} C_i$$

En el ejemplo de simulación, inicialmente todas las conexiones se establecen a la misma velocidad de transmisión:

$$C_T = M_T \cdot C_i = M_T \cdot \Delta w \cdot \log_2(1 + SIR)$$

Donde, se ha relacionado la velocidad de transmisión con el cociente señal a interferencia a través del segundo teorema de Shannon. La relación no deja de ser una aproximación. Aunque para el tipo de sistema de transmisión que se está tratando, con señales de espectro ensanchando, resultado de multiplicar la señal de información por señales pseudo-aleatorias, y operando con relaciones señal a interferencia negativas, hacen que esta relación sea más cierta, a pesar de que el canal de transmisión no es un canal Gaussiano, sino un canal radio-móvil, con todas sus consecuencias.

Para los valores de relación señal a interferencia que se están tratando se cumple:

$$SIR \ll 1 \Rightarrow \ln(1 + SIR) \cong SIR$$

Por tanto, la capacidad total se expresa como:

$$C_T = M_T \cdot \Delta w \cdot \log_2(1 + SIR) = M_T \cdot \Delta w \cdot \frac{1}{\ln 2} \cdot \ln(1 + SIR) \cong M_T \cdot \Delta w \cdot \frac{1}{\ln 2} \cdot SIR$$

Como el ancho de banda de transmisión y el $\ln 2$ son dos factores constantes en la expresión anterior los vamos a eliminar, quedando:

$$C_T \propto M_T \cdot SIR$$

Recuperando las expresiones que se obtuvieron en el punto 5.6.2, relacionando el SIR de las comunicaciones con el número de las mismas, se tiene:

$$SIR(M) = \frac{1}{(1+f) \cdot M} \quad (9.1)$$

Donde aquí, M es el número de comunicaciones por celda, no el número total. Entonces, suponiendo una distribución de las conexiones uniforme, se tiene:

$$C_T \propto M_T \cdot SIR = M_T \cdot \frac{1}{(1+f) \cdot M_T / N} = \frac{N}{(1+f)} = cte$$

Donde N es el número de celdas del sistema. Por tanto, se concluye que la capacidad de transmisión del sistema en su conjunto es constante.

La expresión (9.1) es válida si se impone el mismo SIR a todas las comunicaciones, y a través de ésta se concluye que la capacidad del sistema es constante. El ejercicio que se está desarrollando ahora, es tal que, se opera con tres SIR diferentes, por tanto no se sabe si en estas circunstancias es aplicable la condición de capacidad total constante. Supongamos que sí y veamos si se puede deducir algún criterio que salvaguarde la estabilidad del sistema al ir introduciendo nuevas comunicaciones.

Supongamos se tienen definidos los SIR umbrales: $SIR_1 > SIR_2 > SIR_3$. Si todas las conexiones se establecen con SIR_1 se tiene:

$$M_{max_1} \cdot SIR_1 = N / (1+f)$$

Para un número de comunicaciones superior a M_{max_1} , no todas podrán establecerse con SIR_1 . En todo caso, siendo la capacidad constante se tiene:

$$M_1 \cdot SIR_1 + M_2 \cdot SIR_2 \leq M_{max_1} \cdot SIR_1$$

Supongamos que los umbrales SIR_1 y SIR_2 están relacionados como sigue:

$$SIR_2 = SIR_1 / 2$$

Entonces la desigualdad anterior se simplifica en:

$$M_1 + M_2 \cdot \frac{1}{2} \leq M_{max_1}$$

Por tanto, si:

$$M_2 = 0 \Rightarrow M_1 = M_{max_1}$$

Y a partir de M_{max_1} , por cada nueva comunicación que entra, dos se deben rebajar al umbral SIR_2 , para mantener la estabilidad del sistema. Respecto a las dos comunicaciones que rebajan su SIR hay varias posibilidades:

- La nueva comunicación y otra ya establecida rebajan su umbral.

- Las dos comunicaciones peor situadas, es decir, aquellas que están más próximas a transmitir con potencia máxima, rebajan su umbral.

De cualquier modo la segunda opción maximizará el número de comunicaciones, ya que se rebajan en velocidad las dos conexiones peor dispuestas.

Siguiendo este método, llegará un momento en que todas las comunicaciones se rebajarán a SIR_2 . A partir de entonces se repetirá el proceso rebajando las comunicaciones a SIR_3 .

9.2.3 Resultados de simulación

A continuación se presentan las figuras 9.5 y 9.6 como resultado de la simulación del escenario descrito en el punto 9.2.

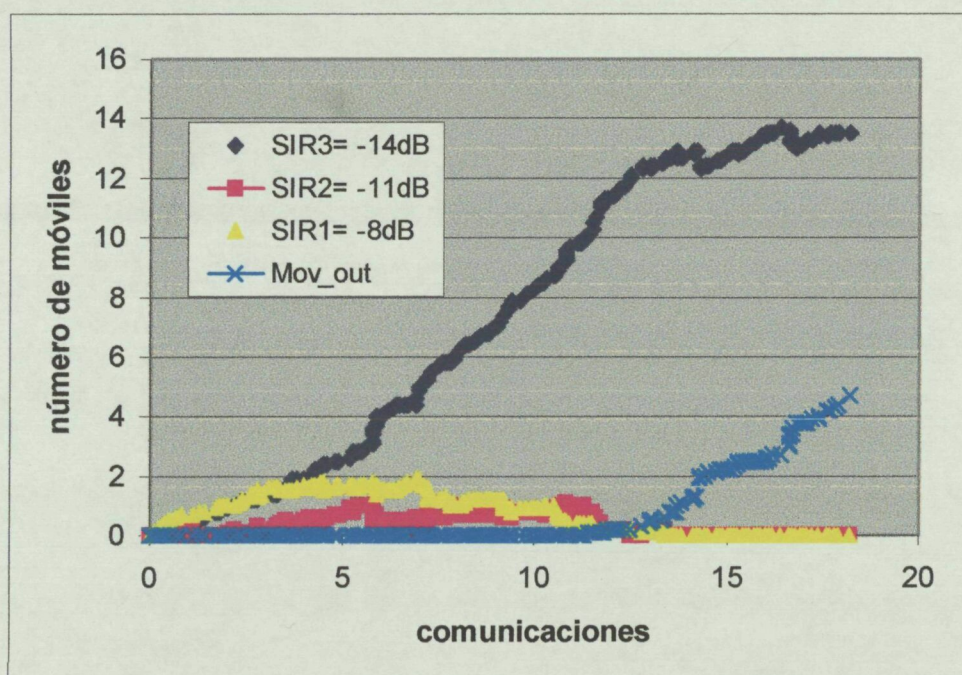


Figura 9.5. Distribución de las conexiones por velocidades de transmisión.

En la figura 9.5 se observa la distribución de las comunicaciones en número entre los diferentes umbrales de relación señal a interferencia impuestos. Se puede apreciar, con el incremento de las conexiones, la rápida redistribución de las comunicaciones hacia el umbral de relación señal a interferencia que requiere operar con la velocidad de transmisión más reducida. Además se aprecia la dificultad en controlar los terminales que quedan fuera de cobertura.

La explicación del citado comportamiento puede estar en la utilización de unos umbrales de relación señal a interferente muy dispares, así un SIR máximo $6dB$ por encima del mínimo implica que una comunicación establecida con ese SIR consume el equivalente a 4 comunicaciones con el SIR mínimo. Y teniendo en cuenta que con el

SIR mínimo se tendrá a lo sumo 18 comunicaciones por celda, esto implica que las combinaciones en número de comunicaciones con las tres velocidades son reducidas. Ahora bien, esto en ningún caso justifica el mal comportamiento del sistema en cuanto a terminales que quedan fuera de cobertura.

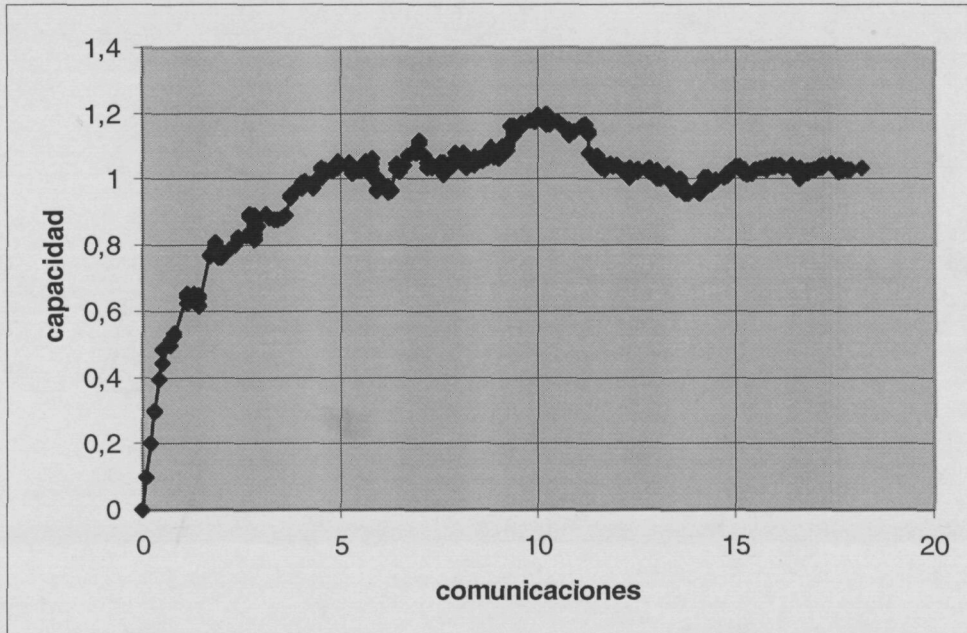


Figura 9.6. Capacidad del sistema en función del número de comunicaciones.

En la figura 9.6 se representa la capacidad resultante para la celda central. En comparación con la figura 9.4, donde se tiene la capacidad para la celda central del estudio anterior, se aprecia que en el caso de trabajar con distintas velocidades de transmisión la capacidad resultante es superior, en la figura 9.6 los valores se mueven entre una capacidad de 1 y 1,2, mientras que en la figura 9.4 éstos van entre 0,8 y 1. La explicación reside en que para el caso de operar con distintas velocidades, aquellos terminales móviles mejor situados son a su vez los que trabajan con el *SIR* umbral más alto, rentabilizando más la capacidad de su enlace. En cambio, para el estudio anterior, se premia el conseguir el mismo *SIR* umbral para todas las comunicaciones, lo cual va en beneficio de los terminales peor situados, pero en perjuicio de los mejor situados, y en su conjunto esto reduce la capacidad del sistema.

A la vista de este resultado, se estaría contradiciendo la premisa de capacidad constante del sistema, independientemente de la distribución de velocidades de transmisión entre las comunicaciones. Sin embargo, el error cuantificado entre la capacidad promedio de ambos casos de estudio no supera el 10%, pudiendo considerar la hipótesis aproximadamente válida.

Capítulo 10

Conclusiones

Tal y como se expresó al comienzo de la redacción de esta memoria, el objetivo de la presente Tesis consistía en la evaluación de la acción combinada de los mecanismos de control de potencia y traspaso de llamada para un sistema móvil de acceso múltiple por división en código.

El hilo conductor del desarrollo de la Tesis ha quedado perfectamente reflejado en el orden de exposición de los sucesivos capítulos que constituyen esta memoria. En primer lugar, dentro del capítulo 5, se procedió a la simulación del mecanismo de control de potencia. Por un lado se recoge la metodología extraída de diferentes publicaciones hechas por Viterbi [Gil91], [Vit93a], [Vit93b], [Vit94], y a continuación se presenta otro método de simulación más acorde con la realidad del funcionamiento práctico de dicho mecanismo [Zan92a], [Zan92b], [Fos93], en el cual se contabilizan los resultados de una acción combinada de los mecanismos de control de potencia en bucle abierto y en bucle cerrado. Como se comentó en el apartado 6.3.4 ambas metodologías proporcionan los mismos resultados, siempre que se produzca una distribución uniforme de las comunicaciones sobre el área de servicio, en cuyo caso, para un escenario que únicamente tiene en consideración las pérdidas por propagación y los desvanecimientos lentos, la componente en bucle cerrado del mecanismo de control de potencia se hace innecesaria.

A continuación se procedió a la implementación de las distintas modalidades de traspaso de llamada. De un principio, en línea con otros estudios [Gil91], [Vit93a], [Vit94], sólo se consideraron las alternativas de “hard handover” y “soft handover”, con selección de estación base por proximidad geográfica en el primer caso y con combinación selectiva en función de la señal piloto recibida en el segundo, sin tener presente ningún tipo de histéresis de reelección de celda para ambos casos. Con los resultados obtenidos se corroboró las mejoras sustanciales en capacidad del sistema, del mecanismo “soft handover” frente al “hard handover”, en línea con los citados artículos.

Posteriormente, constatamos la precariedad de simular el traspaso de llamada convencional, “hard handover”, mediante la selección de estación base únicamente por proximidad geográfica. Así pues, se introdujo el concepto de histéresis de reelección de celda en analogía con el mecanismo utilizado por los sistemas de segunda generación FDMA/TDMA. De modo que en aproximación al problema la

selección de estación base se hace por proximidad geográfica, siempre y cuando la diferencia en nivel de señal piloto recibida de otra estación base no sea superior a un umbral de histéresis. Al mismo tiempo, se añadió sobre el mecanismo de "soft handover" los umbrales de histéresis de definición del grupo activo de las estaciones base asociadas a una comunicación [Gor96]. Con esto último se pretendía evaluar el consumo extra de recursos que supone la utilización de la técnica de "soft handover" respecto al "hard handover".

Se constata nuevamente los beneficios del "soft handover" frente al "hard handover" cuando se toman valores prácticos de histéresis de reselección de celda en un caso, y de definición del grupo activo de estaciones base en el otro. Sin embargo, las diferencias, de 14 a 18 comunicaciones por celda, no son tan acusadas como las que se habían obtenido inicialmente.

Para el caso de utilizar "soft handover" con histéresis de 6dB, el número de comunicaciones abiertas en cada estación base resulta ser de 27, cuando el número real de comunicaciones por celda es de 18. Lo cual supone una ocupación extra de recursos del 50% para conseguir un incremento de la capacidad respecto a "hard handover" del 28%. Análisis hecho únicamente sobre el enlace ascendente. Todos los resultados de simulación recogidos en el capítulo 5 son producto de la evaluación del enlace ascendente. Esto es así, debido a la influencia recibida por la bibliografía consultada, según la cual, el enlace ascendente era quien limitaba la capacidad de un sistema CDMA. Posteriormente, dentro del capítulo 7, nosotros constatamos las dificultades que se presentan sobre el enlace descendente cuando se dan distribuciones no uniformes.

El concepto de macrodiversidad, resulta ser, cuando menos, equívoco en su tratamiento por diferentes autores [Vit95], [Han96], [Yat95]. En la presente memoria, la macrodiversidad se expresa como un caso extremo de la técnica de "soft handover", que resultaría de la aplicación de un margen de histéresis infinito. Lo cual da lugar a un grupo activo de estaciones base formado siempre por un número fijo, a determinar, de elementos. Por tanto, el "soft handover" no existiría como tal, ya que éste se sobreentiende como un proceso transitorio, con principio y fin, y sin embargo, en este caso, como el número de estaciones base participantes en la comunicación siempre es el mismo, no existe el traspaso de llamada, simplemente se van conmutando las estaciones base que constituyen el grupo activo. Esto en la práctica supone, por ejemplo, si se define el grupo activo formado por tres estaciones base, una ocupación de recursos triplicada para cada comunicación. La ventaja en cuanto a capacidad del sistema se vió en la tabla 5.8, un número máximo de 21 comunicaciones por celda. Lo cual supone un incremento del 50% respecto al método "hard handover". A costa de

una ocupación extra del 200%. Nuevamente, teniendo en consideración únicamente el enlace ascendente.

Por último, dentro del capítulo 5, se nos ocurrió probar una forma distinta de combinación de las señales que sabíamos es utilizada con frecuencia como mecanismo de combinación de señales en microdiversidad, la combinación de máximo ratio. Aún sabiendo de las limitaciones prácticas que ello conlleva, al tratarse de señales recogidas en distintas estaciones base, quisimos cuantificar el incremento de capacidad que podía producir, al menos como cota teórica. Más tarde supimos que esta modalidad de combinación de las señales también fue objeto de estudio por parte de Hanly, lo cual dió lugar a la publicación [Han96]. La sorpresa nuestra fue observar que la capacidad en número de comunicaciones por celda se aproximaba en gran medida a la capacidad de una celda aislada, límite teórico de cualquier sistema celular. Para nuestro escenario de estudio, con un *SIR* umbral de -14 dB, el límite teórico resultaba ser de 26 comunicaciones.

Los resultados obtenidos con un escenario de 19 celdas y combinación de máximo ratio de la señal procedente de tres estaciones base, dió lugar a una capacidad por celda de 25 comunicaciones. Como se trataba de un caso de estudio incompleto, es decir, existía una limitación en el número de estaciones base utilizadas en la combinación de las señales, optamos por simular un sistemas más simple, únicamente con tres estaciones base, pero donde la combinación de las señales sería completa. Para este nuevo escenario de estudio comprobamos que la capacidad resultaba ser de 26 comunicaciones por celda, con lo cual habíamos obtenido el máximo absoluto. Máximo absoluto teniendo presente las premisas de simulación del escenario considerado, es decir, donde la señal interferente resulta de la suma de las potencias individuales recibidas del resto de comunicaciones. Si se introduce, por ejemplo, algún mecanismo suplementario de cancelación de interferencia, pongamos por caso, de la interferencia interna, es decir, de la interferencia provocada por otras comunicaciones pertenecientes a la misma estación base, entonces el máximo absoluto de 26 comunicaciones por celda deja de tener sentido.

A continuación se procedió de forma similar a como se hizo en "soft handover" con combinación selectiva, se introducen unos márgenes de histéresis para limitar la ocupación de recursos en estaciones base. Para un valor de histéresis razonable, 6 dB, la capacidad alcanza las 23 comunicaciones por celda, con una ocupación de recursos extra porcentualmente similar al "soft handover" de combinación selectiva, del 45% aproximadamente.

Para concluir el capítulo 5, se transcribe en el punto 5.6 el artículo que fue publicado en el Communications Letters [Gor98], en el cual se procede a demostrar

analíticamente, acompañando los resultados verificados por simulación, la capacidad resultante para un sistema que utilice la técnica de “soft handover” con combinación de máximo ratio. En el mencionado artículo, a través de una hipótesis simplificadora, de suposición de igual interferencia en toda estación base, se llega a la misma conclusión que en su día se presentó en [Han96]. Una demostración mucho más simple e intuitiva y el acompañamiento de los resultados contrastados obtenidos por simulación con una combinación de señales limitada a tres estaciones base fueron los motivos básicos que propiciaron la aceptación del artículo en la mencionada revista.

El segundo método de simulación del control de potencia utilizado en el capítulo 5, por su carácter iterativo, suscitó las consiguientes dudas relativas a la estabilidad del mismo. Lo cual fue motivo del posterior estudio resumido en el capítulo 6. En este sentido, buscamos entre la bibliografía posibles estudios relativos a la estabilidad del control de potencia para un sistema celular. Y así encontramos básicamente las publicaciones hechas por Zander [Zan92a], [Zan92b], considerando un sistema celular FDMA. En este sentido, el trabajo consistió en adaptar el estudio analítico para un sistema CDMA, con todas sus particularidades. Ello nos llevó a la constatación de que el método iterativo que nosotros planteamos inicialmente de forma intuitiva se correspondía con un método iterativo distribuido entre todos los terminales móviles para la resolución del sistema de ecuaciones equivalente, cuyas incógnitas son precisamente las potencias de emisión. Y donde además, la restricción de convergencia del algoritmo iterativo adopta un significado físico a través del umbral de calidad que se impone a todas las comunicaciones.

Dicha restricción de convergencia, expresada como una relación señal a interferencia umbral alcanzable, depende, si se utiliza una combinación selectiva, tanto para el enlace ascendente, como para el enlace descendente, de la ubicación física de todos los terminales dentro del área de servicio. Lo que es lo mismo que decir que el umbral alcanzable es variante, con los problemas que ello conlleva. Para los sistemas de tercera generación, se prevé, como ya se comentó en el capítulo 1, mecanismos que hagan posible la modificación de la tasa de transmisión de las conexiones en función del entorno radio. Nosotros en el capítulo 8, desarrollamos un algoritmo que hace posible en cada momento aprovechar al máximo la capacidad que ofrece el entorno, a través de un procedimiento que de forma iterativa encuentra el umbral de relación señal a interferencia alcanzable, sin provocar el desbordamiento del mecanismo de control de potencia.

Ahora bien, como aportación novedosa dentro del capítulo 6, aparte de aplicar la metodología de Zander sobre un sistema CDMA, tenemos el desarrollo hecho utilizando como técnica de combinación de señales, la técnica de combinación de

máximo ratio. Con la constatación, al menos para el caso elemental que pudo ser resuelto, de que para el enlace ascendente el umbral del *SIR* alcanzable tiene una cota inferior, que será superada en función de la ubicación física de los terminales sobre el terreno.

Por otro lado, en el punto 5.6.3 ya fue deducida esta cota inferior, cuando se hizo un estudio analítico genérico de la utilización de la combinación de máximo ratio, considerando un número indeterminado de estaciones base y terminales móviles, pero con la suposición de uniformidad en la distribución de los terminales y a su vez, asumiendo llegada de igual interferencia a toda estación base. En aquella ocasión la expresión resultante fue:

$$\frac{1}{M - 1/N} \leq SIR \leq \frac{1}{M - 1} \quad (10.1)$$

Donde M es el número de comunicaciones por celda y N es el número de celdas que constituye el sistema. Relación válida siempre y cuando la combinación de máximo ratio se extienda a todas las celdas del sistema.

Fue en la resolución del caso elemental hecha en el punto 6.5.4, para la cual no se impone ninguna restricción respecto a la uniformidad de la distribución de los terminales móviles, ni tampoco respecto a la potencia interferente recibida en cada estación base, donde comprobamos que nuevamente se aplicaba la cota inferior deducida en 5.6.3. Lo cual nos hizo pensar que la expresión (10.1) era de aplicación más extensa que la resultante de las limitaciones impuestas de partida. Fue entonces cuando, por la notoriedad del resultado obtenido, decidimos indagar para ver si éste ya había sido publicado con anterioridad, y finalmente dimos con el artículo de Hanly [Han96].

Por otro lado, en el punto 6.4, a través de un ejemplo sencillo, se demuestra para el enlace descendente la ineficiencia de la técnica de combinación de máximo ratio, por el inconveniente que implica la carga extra de interferencia que supone su utilización en este caso. En este punto de desarrollo de la Tesis, dedicamos un tiempo a probar diferentes algoritmos para repartir la potencia a emitir desde las diferentes estaciones base, para posteriormente ser recogidas por el terminal móvil y realizar la correspondiente combinación de máximo ratio. En ningún caso encontramos un comportamiento mejor al obtenido con combinación selectiva.

En el capítulo 7 se procede a evaluar el comportamiento de un sistema CDMA para una distribución no uniforme de los terminales. En esta ocasión el estudio se realiza únicamente considerando el mecanismo de "soft handover" con combinación selectiva. Con combinación de máximo ratio el estudio pierde sentido, porque no

existe una distribución de las comunicaciones entre las estaciones base como tal, ya que el combinador aprovecha las señales procedentes de todas las estaciones base que constituyen el grupo activo, y por tanto el control de potencia se realiza en base a la señal obtenida a la salida del combinador. Es por ello que no hay que decidir (distribuir) la estación base que comanda el control de potencia.

En primer lugar, a través de un estudio analítico simplificado se demuestra que el criterio de selección de estación base por *SIR* minimiza la potencia de emisión por parte de los terminales móviles para el enlace ascendente. Posteriormente, mediante simulación, se corroboran los resultados obtenidos analíticamente, y a su vez, al poder considerar escenarios de estudio más elaborados, con varias estaciones base y numerosos terminales móviles, se comprueba que éste criterio de selección de estación base da lugar a una redistribución de las comunicaciones entre las estaciones base prácticamente uniforme. Se habla de distribución de las comunicaciones cuando el grupo activo de una comunicación lo forman varias estaciones base, en realidad nos estamos refiriendo al mecanismo seguido, en este caso de selección por *SIR*, para la elección de la estación base que controla la potencia de emisión. Este resultado no contradice la forma de operar definida en el estándar IS-95, únicamente manifiesta el resultado práctico de redistribución de las comunicaciones entre las estaciones base que asumen el control de potencia, y pone de manifiesto la carencia que supone pretender simular la técnica de “soft handover” mediante la elección de estación base en función de la señal piloto recibida como se ha hecho en algunas publicaciones [Gil91], [Vit95].

Por otro lado, el correspondiente estudio analítico del enlace descendente, vuelve a confirmar que la distribución uniforme de las comunicaciones entre las estaciones base maximiza la capacidad del sistema, sin embargo, constatamos que no existe un criterio objetivo para poder llevar a cabo la elección de la estación base que emitirá la potencia hacia el terminal móvil, a diferencia de lo que sucede para el enlace ascendente.

Ante la falta de un criterio de distribución de las comunicaciones para el enlace descendente, optamos por seguir la distribución marcada por el enlace ascendente. Con esta metodología se procedió a la simulación de un escenario más completo, y la constatación fue que el enlace descendente presenta un incremento de la capacidad similar al del enlace ascendente.

Así pues, en el punto 7.2 se procede a la simulación de una distribución no uniforme de las comunicaciones sobre el escenario de 19 celdas. Para ello se considera, por una parte, una distribución uniforme entre las 19 celdas de 18 comunicaciones por celda, teniendo presente que en el capítulo 5 se dedujo una

capacidad máxima, para combinación selectiva y distribución uniforme, de 21 comunicaciones por celda sobre el enlace ascendente. Con lo cual, contamos con un margen de absorción de tráfico de 3 comunicaciones por celda. Por otra parte, para simular la carga no uniforme, se añade una carga de tráfico creciente sobre la celda central.

Como resultado de simulación, para el enlace ascendente, se obtiene con el criterio de selección de estación base por *SIR*, una capacidad máxima para la celda central de 31 comunicaciones. Tal y como se comentó en el punto 7.2.1, esto se hace posible gracias a la redistribución de las comunicaciones entre todas las estaciones base, de modo que el exceso de comunicaciones 31-18, es a repartir entre la estación base de la celda central y las seis estaciones base que tiene a su alrededor, lo cual en ningún caso supera las 3 comunicaciones extra por estación base comentadas en el párrafo anterior.

Éste último comentario, suscita el interrogante de porqué no ha sido mayor el número máximo permitido de comunicaciones sobre la celda central. La explicación está en la limitación del margen del control de potencia a 60 dB. La conexión de un terminal móvil a la estación base de una celda vecina, simplemente no se puede hacer porque la potencia máxima de emisión es insuficiente, no porque la capacidad del sistema en su conjunto no permita establecer más comunicaciones. Es por ello que, para los sistemas CDMA, el emplazamiento de las estaciones base debería ser tal que en condiciones normales de carga, los terminales móviles que circulan en los límites de su celda, deberían operar holgadamente dentro del margen dinámico del control de potencia, lo cual hará posible la absorción de picos de tráfico transitorios en cualquiera de las celdas, al poder ir las estaciones base de celdas vecinas al rescate de las comunicaciones.

Para el enlace descendente, en primer lugar se evalúa un escenario con carga uniforme de las comunicaciones, obteniéndose una capacidad de 17 comunicaciones por celda para selección de la estación base emisora según la señal piloto recibida en el terminal móvil. Y una capacidad de 18 comunicaciones por celda si la distribución de las conexiones entre las estaciones base se hace uniformemente. A continuación se procede a la simulación de una carga no uniforme para la celda central. Se aplica la distribución de móviles no uniforme con 17 comunicaciones por celda más la carga extra de la celda central. Utilizando como criterio de distribución de los terminales entre estaciones base, el obtenido de la simulación previa del enlace ascendente, se obtiene una capacidad máxima de 30 comunicaciones sobre la celda central, muy similar al resultado obtenido para el enlace ascendente. Finalmente, se procede a evaluar el mecanismo de "soft handover" con combinación de máximo ratio en el

terminal móvil, lo cual supone la emisión simultánea desde más de una estación base hacia el terminal móvil, se utilizan distintos valores de histéresis de definición del grupo activo de estaciones base que emiten hacia un mismo móvil. Para una histéresis de $6dB$ y distribución uniforme de los móviles se obtiene una capacidad de 14 comunicaciones por celda aproximadamente. En contra posición, utilizando lo que se podría denominar "hard handover" con histéresis de reelección de celda nula, lo cual deja entrever la idealidad del escenario, la capacidad máxima habíamos comentado que era de 18 comunicaciones por celda.

En el capítulo 8 se procede a la identificación de los indicios que pueden llevar al desbordamiento del mecanismo de control de potencia. Como ya se dedujo en el capítulo 6, el desbordamiento del sistema se producirá si se exige una relación señal a interferencia umbral por encima de las posibilidades del sistema.

En este capítulo, con un análisis detallado del comportamiento del mecanismo de control de potencia por pasos, a través de la introducción gradual de las comunicaciones sobre el sistema, se observa la dependencia entre la estabilidad del sistema y la relación señal a interferencia de aquella comunicación mejor dispuesta, es decir, aquella que requiere la emisión de menos potencia.

A medida que se van introduciendo más comunicaciones, la relación señal a interferencia de la comunicación que emite con potencia mínima se va degradando, aunque siempre está por encima del umbral exigido al resto de comunicaciones. Es en el momento en que el SIR de esta comunicación alcanza el SIR umbral, cuando a continuación, al incluir una nueva comunicación, se produce el desbordamiento de todo el sistema.

Todo ello lleva a pensar que el control de la relación señal a interferencia de la comunicación que emite con menos potencia podrá ser utilizado como criterio hábil para alterar la relación señal a interferencia del resto de comunicaciones, tal y como se ha expuesto en el capítulo 9.

En el capítulo 9 se procede a realizar dos estudios diferenciados. Por un lado, alterar la relación señal a interferencia umbral impuesta a todas las comunicaciones para maximizar en cada momento la capacidad de transmisión de información del conjunto de las conexiones, con la premisa de conseguir la misma calidad de servicio para todos. Y en segundo lugar, definir un sistema que agrupe las comunicaciones según diferentes velocidades de transmisión, salvaguardando la estabilidad del algoritmo de control de potencia.

Para el primer caso de estudio se retoma el criterio de estabilidad deducido en el capítulo 8. De este modo, mediante la supervisión de la relación señal a interferencia

del terminal que emite con menos potencia en cada estación base, se aplica un algoritmo iterativo de alteración de la relación señal a interferencia umbral que conduce a conseguir la misma calidad de servicio por parte de todas las comunicaciones de cada estación base. Lo cual se traduce en la imposición de la relación señal a interferencia máxima alcanzable antes de que se produzca el desbordamiento del control de potencia. A su vez, el propio algoritmo iterativo es autoadaptable a la introducción gradual de nuevas comunicaciones, con la consiguiente rebaja del umbral impuesto.

De la simulación del escenario descrito en el párrafo anterior se obtienen diferentes gráficas, de las cuales se destaca la degradación de la relación señal a interferencia umbral alcanzable a medida que aumenta el número de comunicaciones por celda. Siendo esta degradación inversamente proporcional al número de comunicaciones. Lo cual viene a confirmar la dependencia entre el *SIR* umbral y el número de comunicaciones por celda planteado en el capítulo 5 a través de la relación:

$$SIR(M) = \frac{1}{(1+f) \cdot M}$$

Siendo *M* el número de comunicaciones por celda, y *f* el parámetro que da cuenta de la relación entre la interferencia externa y la interferencia interna provocadas sobre una comunicación. Esta dependencia fue lo que motivó la suposición de que la capacidad de transferencia de información asociada al sistema podía considerarse constante, lo cual condujo al análisis teórico hecho para el segundo caso de estudio para poder decidir cómo se alteran las velocidades de transmisión a medida que se incrementa el número de comunicaciones.

En el segundo caso de estudio se plantean tres velocidades de transmisión posibles. El criterio a seguir para garantizar la estabilidad del sistema sigue siendo el mismo que el utilizado en el estudio anterior. Mientras que la alteración de las velocidades de transmisión parte del supuesto que la capacidad de todo el sistema es constante, tal y como se comenta en el párrafo anterior.

Como resultados de simulación se presenta la distribución de las velocidades de transmisión entre las distintas comunicaciones. Para el caso de estudio planteado los resultados son poco alentadores, ya que con el incremento de comunicantes, rápidamente se produce una redistribución dominada por las transmisiones a velocidad mínima, además se aprecia la dificultad en controlar los terminales que quedan fuera de cobertura.

La explicación del citado comportamiento puede estar en la utilización de unos umbrales de relación señal a interferente muy dispares, así un *SIR* máximo 6dB por

encima del mínimo implica que una comunicación establecida con ese *SIR* consume el equivalente a 4 comunicaciones con el *SIR* mínimo. Y teniendo en cuenta que con el *SIR* mínimo se tendrá a lo sumo 18 comunicaciones por celda, esto implica que las combinaciones en número de comunicaciones con las tres velocidades son reducidas. Ahora bien, esto en ningún caso justifica el mal comportamiento del sistema en cuanto a terminales que quedan fuera de cobertura.

Capítulo 11

Epílogo

Para este último capítulo de la memoria se presenta una breve exposición tomando ciertos resultados característicos obtenidos en capítulos anteriores, en esta ocasión se plantea un análisis desde un punto de vista genérico sobre la capacidad del enlace ascendente para un sistema CDMA.

Recuperando el estudio analítico hecho en el punto 5.6, nos encontramos con la expresión (5.1) que daba cuenta de la capacidad para un sistema que implementa el mecanismo “soft handover” con combinación selectiva, expresión según la cual:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{(1+f) \cdot (M-1)} \geq \frac{S}{I} \Big|_{\text{threshold}} \quad (11.1)$$

De donde, conocido el SIR umbral se puede obtener M , número máximo de comunicaciones por celda. La expresión (11.1) tiene una aplicación bastante amplia, prueba de ello son los diferentes casos de estudio que se han ido tratando en el capítulo 5, los cuales se resumían en la deducción del parámetro f correspondiente. Los ejemplos de “soft handover” con y sin histéresis, con selección de estación base por nivel de señal piloto o siguiendo el criterio del SIR , todos ellos daban lugar a un valor del parámetro f diferente, y en consecuencia a una capacidad también diferente.

Por otro lado, los escenarios ideales de celda aislada y “soft handover” con combinación de máximo ratio extendido a todas las celdas se pueden considerar un caso más de la expresión (11.1) con $f = 0$. Cuando la combinación de máximo ratio se limita a tres estaciones base se puede deducir un valor equivalente del parámetro f distinto de cero.

Por tanto, de manera genérica, para evaluar la capacidad del sistema contamos con la expresión (11.1). Si se consigue implementar en la práctica un mecanismo de combinación de máximo ratio, éste tendrá una capacidad con una cota teórica que se daría para $f = 0$, en cuyo caso se tiene:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{(M-1)}$$

Por tanto, la mejora respecto a la combinación selectiva será:

$$(1+f)/1$$

Para un valor de $f = 0,58$ con combinación selectiva e histéresis de 6dB, la mejora relativa máxima será de 1,58.

Otra posibilidad frente a la utilización de la técnica de combinación de máximo ratio es la utilización de la cancelación de interferencia o de la recepción multiusuario. Recuperando las palabras de A. J. Viterbi en su libro: "CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication" [Vit95], cito textualmente del punto 6.9: "For a single-cell multiple access system, assuming unfaded transmission for each user over a common additive white Gaussian noise channel, information theory can be used to demonstrate that interference from same-cell users can be completely eliminated by a process of successive cancelation of interfering users ...", a continuación se comentan las dificultades prácticas que supone la cancelación de interferencia, sin embargo, el autor continúa su exposición diciendo: "We will not consider specific interference cancellation techniques for the reverse link, ... Instead, we establish only some upper bounds on the maximum improvement of interference cancellation in a cellular system. ... Then if perfect interference cancellation were possible (which would require the aid of a "genie"), the interference density would be reduced from $(1+f) \cdot I_0$ to $f \cdot I_0$, ... this upper bound on interference cancellation gain for the reverse link cellular system, $(1+f)/f$, is the same as ... for example, if $f = 0,6$, the improvement factor is 2,67."

Si por extensión se utilizase la cancelación de interferencia a la salida del combinador de máximo ratio la ganancia sería la siguiente: supongamos que la combinación de máximo ratio se limita a tres estaciones base, como se representa en la figura 11.1.

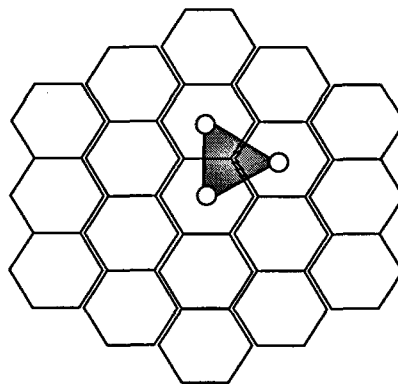


Figura 11.1.

En línea con el punto 5.6.3, para la potencia recibida en el combinador de cada móvil se tiene:

$$P_{rec} = P_{rec_1} + P_{rec_2} + P_{rec_3} = 1$$

Mientras que la interferencia total recibida en el combinador es:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = M_{comb} - 1 + I_{ext}$$

Donde, M_{comb} son todos los móviles dependientes del mismo combinador. Por tanto, la interferencia recibida en cada estación base, suponiendo un sistema homogéneo, será:

$$I_x = I/3 = (M_{comb} - 1 + I_{ext})/3$$

Con lo que, la relación señal a interferencia a la salida del combinador según (5.4) será:

$$\frac{S}{I} \approx \frac{1}{I_x} = \frac{1}{\frac{M_{comb} - 1}{3} + \frac{I_{ext}}{3}} = \frac{1}{\frac{M}{6} - \frac{1}{3} + \frac{I_{ext}}{3}} \quad (11.2)$$

Donde, se ha tenido en cuenta que el número de comunicaciones controladas por combinador es la mitad del número de comunicaciones por celda, como se aprecia del área sombreada en la figura 11.1 que coincide con la mitad del área de una celda.

Si la combinación de señales se hubiese extendido a todas las celdas, la expresión (11.2) se hubiera reducido a la expresión (5.5):

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\frac{M}{6} - \frac{1}{3} + \frac{I_{ext}}{3}} = \frac{1}{M - \frac{1}{3}}$$

Con lo que:

$$\frac{I_{ext}}{3} = \frac{5}{6} \cdot M$$

Por tanto, con cancelación de interferencia a la salida del combinador se tiene:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\frac{I_{ext}}{3} - \frac{1}{3}} = \frac{1}{\frac{5}{6} \cdot M - \frac{1}{3}}$$

Que de modo aproximado será:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\frac{5}{6} \cdot M - 1}$$

Por tanto, para este caso de estudio la cancelación de interferencia no supone una mejora sustancial.

Si observamos la figura 11.1 apreciamos que la interferencia que recibe cualquier estación base en relación con el combinador posteriormente utilizado tiene

una componente de interferencia interna que representa aproximadamente 1/6 del total y otra componente de interferencia externa que será 5/6 del total, lo cual hace que la cancelación de interferencia interna no suponga una gran mejora. Para evitar esta situación se deberían sustituir las antenas omnidireccionales de cada estación base por antenas sectoriales de 60°, con lo cual la interferencia externa prácticamente desaparece, en tal caso la cancelación de interferencia interna a la salida del combinador daría lugar a un incremento sustancial de la capacidad del sistema de aproximadamente $(1 + f)/f_{equiv} \approx 1,6/0,1 = 16$ veces. Ahora bien, si difícil es de implementar la cancelación de interferencia con combinación selectiva, más aún lo será con combinación de máximo ratio.

A pesar de los resultados obtenidos, en mi opinión el potencial de los sistemas CDMA se encuentra en la sectorización de las estaciones base con utilización de combinación selectiva, con ello automáticamente se multiplica la capacidad por el número de sectores por celda, con la ventaja adicional de poder utilizar el "soft-softer handover" entre sectores de una misma celda, siendo factible la combinación de máximo ratio en el enlace de subida. El incremento máximo de capacidad con cancelación de interferencia, 2,67, o con combinación de máximo ratio, 1,58, no compensa la complejidad tecnológica que suponen frente a la facilidad de implementación de antenas sectoriales. En este sentido, inclusive las denominadas antenas inteligentes con seguimiento del terminal se presentan excesivamente complejas para los sistemas celulares. En cualquier caso, el tiempo lo dirá.

11.1 Líneas futuras

Como cierre de esta memoria resumimos aquellos puntos que han quedado incompletos, los cuales se pueden considerar como posibles líneas de continuación del presente trabajo.

En el capítulo 5 se expusieron diferentes formas de combinar el control de potencia y el traspaso de llamada. La conclusión fue que la técnica de "soft handover" siempre daba resultados superiores al "hard handover", en este sentido la variante a considerar con "soft handover" recae sobre el elemento que comanda el control de potencia, cuando la conexión se mantiene con una única estación base la solución es obvia. Las distintas posibilidades para escoger el controlador de la potencia emitida desde el terminal móvil en "soft handover" se concretan en:

- Estación base de la que el móvil recibe mayor señal piloto.
- Estación base que recibe mejor relación señal a interferencia.
- Elemento combinador si se utiliza combinación de máximo ratio.

De estas tres posibilidades se ha obtenido la capacidad teórica máxima para el último caso y la mínima para el primero. Resta por comprobar si en la práctica esto será así. Es más, de las tres posibilidades, para la tercera se supuso una combinación de máximo ratio ideal, es por ello que habría que ver los resultados que se pueden llegar a obtener con su implementación práctica, así como la sensibilidad del funcionamiento del sistema a la realización de un control de potencia a la salida del combinador, debido al retardo sobre el mecanismo de control de potencia en bucle cerrado que comporta.

En relación con la implementación práctica de la combinación de máximo ratio en macrodiversidad ya comienzan a verse algunos trabajos expuestos en distintos congresos [Pap95], [Has97], aunque se trata de una línea de investigación todavía por explotar. Los mencionados estudios no han considerado la sensibilidad del control de potencia respecto al retardo.

Otro de los aspectos que ha quedado incompleto en la presente exposición es la cuantificación de la posible mejora de la capacidad del enlace descendente en relación con el grado de ortogonalidad entre señal útil y señal interferente procedentes de la misma estación base. En el capítulo 7, como conclusión del mismo se comentó que debido a la diferente operatoria de funcionamiento de los enlaces de subida y de bajada, el enlace de subida tenía una capacidad asociada superior. En la práctica para el enlace ascendente las señales llegadas a la estación base no están sincronizadas entre sí, debido a las diferencias en los caminos recorridos desde los distintos terminales móviles hasta la estación base, cosa que no sucede en el enlace

descendente para la señal útil y señal interferente procedente de la misma estación base, no así con el resto de interferentes de otras estaciones base.

Sería interesante retomar los ejercicios de simulación presentados en el capítulo 7 aplicando de forma parametrizada distintos grados de ortogonalidad entre la señal útil y la señal interferente, para así observar la capacidad del enlace resultante. Es de esperar que dicha capacidad aumente sustancialmente debido a que para la mayoría de ubicaciones del terminal móvil sobre el área de servicio, la interferencia de su propia estación base resulta dominante. Esta sería otra de las características que distingue los sistemas CDMA sobre los FDMA/TDMA, producto de la cancelación de interferencia intrínseca a su forma de operar.

No puedo dejar de comentar en este apartado de líneas futuras todo el trabajo que se está haciendo y que bien seguro será motivo de comentario durante los años venideros en relación con la cancelación de interferencia y la detección multiusuario, tanto para sistemas asíncronos como para sistemas síncronos. Desde que en 1986 Sergio Verdú [Ver86] sentase las bases de estos dos mecanismos para incrementar la capacidad del sistema, se han escrito numerosos artículos al respecto. Desde entonces han pasado más de diez años y por el momento parece ser que la tecnología actual no es lo suficientemente rápida como para su implementación práctica. Las recomendaciones a las especificaciones de los sistemas de tercera generación recogen la posibilidad de su utilización [TR101], sin embargo se incluyen como una posibilidad que todavía está a expensas de su demostración práctica. Se tratan de técnicas que auguran unos aumentos espectaculares sobre la capacidad del sistema, sin embargo, tampoco debe estar tan claro cuando se han adoptado posturas a favor y en contra de su viabilidad. Bien es cierto que cuando en sus inicios se propuso la técnica de acceso CDMA para los sistemas de telefonía móvil celular también fue sobre valorada por algunos y despreciada por otros. Hoy día tras su implementación práctica a través del sistema IS-95 se ha constatado que su capacidad es superior a los sistemas analógicos y sistemas digitales TDMA, pero en ningún caso se ha obtenido un incremento de la capacidad de hasta veinte veces la capacidad de los sistemas analógicos como se creía inicialmente. Teniendo presente las características particulares de los canales de comunicación radio-móviles, con rápidas variaciones temporales, podría suceder algo parecido con las técnicas de cancelación de interferencia, en el sentido de obtener resultados prácticos bastante por debajo de lo esperado teóricamente, sin embargo esto es algo que con el tiempo se verá.

Cambiando de tema, en el capítulo 9 se contempla el estudio de la implementación de servicios de tasa variable. En éste se desarrolla un caso de estudio

utilizando tres velocidades de transmisión y una metodología de selección simplificada de las comunicaciones que alteran sus velocidades de transmisión. Sería interesante analizar un sistema más complejo con mayor número de velocidades de transmisión y donde realmente se estudiaran diferentes criterios para la distribución de las velocidades de transmisión entre todos los comunicantes, así como la implementación de algún mecanismo de admisión que asegure la calidad de las comunicaciones ya establecidas dentro de unos márgenes. Otro campo donde aparece una problemática semejante se da para las redes ATM [Kya95] con multiplexado de las comunicaciones sobre la capacidad de transmisión de los enlaces, aunque con el agravante en los sistemas celulares del necesario funcionamiento correcto del mecanismo de control de potencia, lo cual se traduce en la incertidumbre de desconocer si la inclusión de una nueva comunicación puede producir la saturación de todo el sistema. Además, otra particularidad de los sistemas celulares, que también fue objeto de comentario en el capítulo 9, es la dependencia entre la ubicación del terminal respecto a su estación base de contacto y su capacidad para transmitir información. En este sentido, aparecen comunicaciones privilegiadas respecto a otras, de modo que se podría rentabilizar la capacidad del sistema en su conjunto permitiendo que las mejores conexiones transmitiesen a más velocidad, nuevamente aparece la necesidad de incorporar algún mecanismo que arbitre las posibles situaciones de desigualdad.

Por otro lado, dentro del ámbito de las propuestas para el sistema de tercera generación con interfaz radio W-CDMA existen dos posturas diferenciadas [Oja98]. Por una parte se tiene la propuesta conjunta europea y japonesa y por otra la propuesta americana. La esencia de funcionamiento de los sistemas es la misma en ambos casos, las diferencias podemos considerarlas de matiz en muchos aspectos, sin embargo no sería de despreciar el estudio de las repercusiones que ellas conllevan. En este sentido sería interesante aprovechar todas las herramientas de simulación desarrolladas en el presente trabajo con objeto de particularizarlas para las dos grandes propuestas de sistema W-CDMA y así poder cuantificar las diferencias.

Finalmente, es de imaginar que si los sistemas de tercera generación adoptan definitivamente un interfaz radio Wideband-CDMA, surgirán multitud de problemas por resolver fruto de su puesta en marcha.

Capítulo 12

Bibliografía

E. Dahlman, B. Gudmundson, M. Nilsson and J. Sköld. "UMTS/IMT-2000 Based on Wideband CDMA". IEEE Comm. Magazine, Vol. 36, No. 9, Sept. 1998, pp. 70-80.

Kamilo Feher. "Wireless Digital Communications. Modulation and Spread Spectrum Applications". Prentice Hall Digital and Wireless Communications Series. 1995.

G. J. Foschini, Z. Miljanic. "A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence". IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 4, Nov. 1993, pp. 641-46.

Geraniotis, E.A., and Pursley, M.B., "Error Probabilities for Slow Frequency-Hopped Spread Spectrum Multiple-Access Communications Over Fading Channels", IEEE Trans. on Communications, Vol. 30, No. 5, May 1982, pp. 996-1009.

Gilhausen, K.S., Jacobs, I.M., Padovani, R., Viterbi, A.J., Weaver, L.A., and Wheatley, C.E. "On the Capacity of a Cellular CDMA System,". IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.40, No. 2, May 1991, pp. 303-12.

J.L. Gorricho, J. Paradells. "Evaluation of the Soft Handover Benefits on a CDMA system". ICUP'96. 1996, pp. 305-09.

J.L. Gorricho, A. Rojas, J. Paradells. "Interference diversity, resultant SIR margins for CDMA versus TDMA systems". Wireless'97, Jul. 1997, pp. 379-82.

J.L. Gorricho, J. Paradells, A. Rojas. "Power Control at the Combiner Output to Maximize the Uplink Capacity on a Cellular Spread Spectrum System". IEEE Communications Letters, Vol. 2, No. 10, Oct. 1998, pp. 273-75.

Z. J. Haas, C. P. Li, "Macrodiversity Technique for Improvement in BER in Wireless Systems", Electronic Letters, Vol. 33, No. 7, March 1997, pp. 556-57.

S.V. Hanly. "An Algorithm for Combined Cell-Site Selection and Power Control to Maximize Cellular Spread Spectrum Capacity". IEEE Journal on Selec. Areas in Comm. Vol.13, No.7, Sept. 1995, pp. 1332-40.

S.V. Hanly, "Capacity and Power Control in Spread Spectrum Macrodiversity Radio Networks", IEEE Trans. on Communic., vol 44, No 2, Feb. 1996, pp. 247-56.

IS95 Standard, "Mobile station-base station compatibility standard for dual-mode wide-band spread spectrum cellular systems".

W. C. Jakes. "Microwave Mobile Communications". IEEE Press. New York, Wiley & Sons, 1974.

R. Kohno, R. Meidan, L.B. Milstein. "Spread Spectrum Access Methods for Wireless Communications". IEEE Communications Magazine. Jan. 1995, pp. 58-67.

Othmar Kyas, "ATM Networks", International Thomson Publishing, 1995.

Arthur H.M. Ross. "Optimum Bandwidth for CDMA". Adapted from a presentation by Klein S. Gilhausen at the International Conference on Personal, Mobile Radio, and Spread Spectrum Communications. Beijing, China, October 12-14, 1994.

Seiichi Sampei. "Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications". Feher/Prentice Hall Wireless and Digital Communications Series. 1997.

Raymond Steele. "Mobile Radio Communications". IEEE Press. Pentech Press. 1992.

TR (Technical Report) 101 146 V3.0.0 (1997-12) UMTS 30.06 version 3.0.0. ETSI, 1997.

S. Verdú, "Minimum Probability of error for Asynchronous Gaussian Channels", IEEE Trans. on Information Theory, IT-32, Jan. 1986, pp. 85-96.

S. Verdú, "The Capacity Region of the Symbol-Asynchronous Gaussian Multiple-Access Channel". IEEE Trans. on Information Theory, vol. 35, No. 4. July 1989, pp. 733-51.

S. Verdú, "Optimum multiuser asymptotic efficiency", IEEE Trans. on Comm., COM-34, Sept. 1996, pp. 890-897.

Andrew J. Viterbi. "Spread Spectrum Communications-Myths and Realities". IEEE Commun. Mag., vol. 17, no. 3, May 1979, pp. 11-18.

A. J. Viterbi. "Very Low Rate Convolutional Codes for Maximum Theoretical Performance of Spread Spectrum Multiple-Access Channels". IEEE JSAC. Vol. 8, No. 4, May 1990, pp. 641-49.

A. M. Viterbi, A.J. Viterbi. "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System". IEEE Journal on Selected Areas in Comm. Vol. 11, No. 6, August 1993, pp. 892-99.

A. Viterbi, J. Viterbi, E. Zehavi. "Performance of Power-Controlled Wideband Terrestrial Digital Communication". IEEE Trans. on Comm. Vol. 41, No. 4, 1993, pp.559-69.

A. Viterbi, J. Viterbi, K.S. Gilhausen, E. Zehavi. "Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increases Reverse Link Capacity". IEEE JSAC. Vol. 12, No. 8, Oct. 1994, pp. 1281-87.

Andrew J. Viterbi. "CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication". Addison-Wesley Wireless Communications Series. 1995.

D. Wong, T. Joon Lim, "Soft Handoffs in CDMA Mobile Systems", IEEE Personal Communications, Vol. 4, No. 6, Dec. 1997, pp. 6-17.

A. D. Wyner. "Shannon-Theoretic Approach to a Gaussian Cellular Multiple-Access Channel". IEEE Trans. on Information Theory, vol. 40, No. 6, Nov. 1994, pp. 1713-27.

R. D. Yates. "A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13, No. 7, Sep. 1995, pp. 1341-47.

R. D. Yates, S. Gupta, C. Rose, S. Sohn, "Soft Dropping Power Control", IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings, May 1997, pp. 1694-98.

J. Zander. "Performance of Optimum Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems". IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 41, No. 1, February 1992, pp. 57-62.

J. Zander. "Distributed Cochannel Interference Control in Cellular Radio Systems". IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 41, No. 3, August 1992, pp. 305-11.