

## 5 Capítulo 5. DQRAP/CDMA EN ENTORNO CELULAR

### 5.1 Introducción

Los sistemas de comunicaciones móviles tienen una estructura celular. En los capítulos previos se ha estudiado el comportamiento de un sistema de comunicaciones móviles basado en el protocolo de acceso DQRAP/CDMA. Por tanto, y de cara a completar el estudio de los diferentes aspectos del protocolo, en el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos del análisis de un sistema celular que utiliza como estrategia de acceso dicho protocolo. Se ha hecho especial hincapié en la observación de los elementos específicos de un sistema CDMA que pueden resultar beneficiados por las características propias del mecanismo de acceso. En particular, se pretende demostrar que puede alcanzarse una mejora del rendimiento del sistema gracias a la estimación de la carga de tráfico que se obtiene de la información de control que genera el protocolo para cada una de las células.

Uno de los elementos fundamentales de un sistema celular es el mecanismo de traspaso o *handover*. Este mecanismo es especialmente importante cuando las transmisiones se realizan en modo paquete. En este caso, el concepto de traspaso es diferente al utilizado en las transmisiones en modo circuito. Un traspaso en una comunicación en modo paquete implica una decisión sobre hacia qué estación base se envían cada uno de los paquetes de información. Los criterios para que un terminal móvil transmita sus paquetes hacia una u otra estación base pueden ser objeto de investigación. En general, utilizar la información que ofrece el protocolo de acceso para tomar esta decisión puede aportar mejoras significativas en el rendimiento general del sistema. En este sentido, en este capítulo se presentan y estudian nuevas propuestas de gestión de los mecanismos de traspaso que se basan en el aprovechamiento de esta información.

Por otro lado, y de cara a validar estas propuestas en entornos genéricos, se han estudiado una serie de escenarios diversos con parámetros de sistema que puedan resultar relevantes. Los estudios se basan en simulaciones por ordenador. En una situación multicelular, sin embargo, el tipo de parámetros que entran en juego son sustancialmente diferentes del caso unicelular.

En el punto 5.2 se presentan todos los elementos del sistema que han sido tenidos en cuenta en el estudio realizado, junto con la definición de los parámetros más importantes analizados para verificar su influencia en el sistema. En el punto 5.3 se detallan los valores utilizados de estos parámetros en las simulaciones realizadas. Estos valores describen el escenario concreto de trabajo utilizado en el estudio. Por su parte, en el punto 5.4 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones, así como la descripción de las nuevas propuestas de gestión realizadas y la comparativa de resultados. Finalmente, el punto 5.5 presenta las conclusiones del estudio realizado del entorno celular.

### 5.2 Marco de trabajo

En este punto se va a introducir la definición de los parámetros del sistema que han sido utilizados en el estudio del protocolo de acceso. Debido a la complejidad inherente de un sistema celular, se ha procurado simplificar al máximo el modelo del sistema. Para ello se han emulado del modo más simple posible todos los elementos que no influyen de manera relevante en el estudio, tanto en lo referente al protocolo de acceso como en los mecanismos de traspaso y control de potencia.

### 5.2.1 Tipo de células

Se distinguen tres tipos de células según su tamaño:

- *Macrocelulas*: Se consideran en esta categoría las células cuyo radio está entre unos cientos de metros y unos pocos kilómetros. Dentro de este tipo de células existen también categorías según el tipo de entorno que hay en ellas. Básicamente se suelen considerar los siguientes entornos:
  - *Rural*: Ausencia de edificios o presencia de pocos edificios de pequeña altura.
  - *Urbana (ciudad pequeña)*: Ciudades pequeñas o con edificios de poca altura.
- *Microcelulas*: Células cuyo radio está entre unas decenas y unos cientos de metros. Dentro de este tipo de células también se distinguen categorías según el entorno:
  - *Urbana (ciudad pequeña)*: Ciudades pequeñas o con edificios de poca altura.
  - *Urbana (ciudad grande)*: Ciudades con edificios de gran altura. Normalmente suele corresponder con el centro de las grandes ciudades.
- *Picocelulas*: Células cuyo radio es de unas decenas de metros. Suelen considerarse este tipo de células en entornos de interiores, tanto de edificios de viviendas como de negocios.

Existen en la literatura múltiples modelos de propagación para cada uno de los tipos de células. Estos modelos permiten estimar el valor y la estadística de la pérdidas que introduce el canal de transmisión. En el punto 5.3.1 se detallan las características del modelo concreto que ha sido utilizado en las simulaciones.

### 5.2.2 Modelo de propagación

Las estaciones base de un sistema de comunicaciones móviles transmiten un canal piloto en la célula a la que dan servicio. La potencia transmitida en este canal piloto es conocida a priori por los usuarios. Cada usuario pueden medir la potencia que recibe de este piloto y estimar las pérdidas de propagación del canal. Con este valor puede ajustar adecuadamente su potencia de transmisión.

El modelo de propagación del canal radio permite emular de un modo estadístico las pérdidas de propagación presentes en un cierto escenario. La atenuación presente en el canal de un sistema de comunicaciones móviles se descompone en dos partes:

- *Atenuación lenta o shadowing*: producida por los grandes obstáculos presentes entre la estación base y el móvil. Genera variaciones lentas de las pérdidas de propagación que pueden compensarse con un control de potencia en lazo abierto. El modelo más comúnmente aplicado para esta atenuación es la llamada estadística lognormal. Esto es, se considera que las pérdidas de propagación son una variable aleatoria gaussiana en unidades logarítmicas. Por otro lado, su valor medio depende de la localización del móvil. Además, entre dos posiciones cercanas existe una cierta correlación entre los valores de la atenuación presentes [64]. Esta correlación se expresa en términos de una función que condiciona los valores aleatorios que deben generarse en el modelo. En el punto 5.3.1 se detalla la función de correlación utilizada en las simulaciones.

- Atenuación rápida: producida por la suma de las contribuciones de los diferentes caminos de propagación de la señal. Para poder ser compensada es necesario utilizar un control de potencia en lazo cerrado. Suelen aplicarse modelos estadísticos del tipo Rayleigh o Rice para modelar el comportamiento de esta atenuación.

Cabe destacar que los modelos de propagación probabilísticos para el cálculo de la atenuación del canal tienen en cuenta parámetros físicos tanto de la estación base como de los móviles. Estos parámetros incluyen la altura de las antenas, el tipo de las mismas, etc.

### 5.2.3 Control de potencia

Tal y como se ha descrito en el capítulo 2, existen dos técnicas de control de potencia para las transmisiones de información en un sistema de comunicaciones móviles. Normalmente, se utiliza un control de potencia en lazo abierto para las transmisiones de corta duración, ya sea porque son paquetes breves o porque son peticiones de recursos de transmisión. Por otro lado, se utiliza el control de potencia en lazo cerrado en aquellas transmisiones de mayor duración en las que puede establecerse un canal de dedicado de control en sentido descendente. Este control de potencia es capaz de compensar incluso las variaciones rápidas de los desvanecimientos del canal.

Respecto a este control de potencia, en los sistemas con acceso CDMA existe un problema adicional de especial importancia para su correcto funcionamiento. Es la elección de la potencia media de transmisión con la que cada móvil debe transmitir sus paquetes. Para la elección de este valor es posible utilizar varios tipos de algoritmos de decisión:

- A partir de la medida de la potencia recibida del canal piloto proveniente de la estación base, cada móvil puede estimar las pérdidas de propagación del canal de propagación. Con este valor ajusta su potencia transmitida de modo que la potencia recibida por la base sea un valor predeterminado fijo e igual para todos los móviles.
- El móvil obtiene, por un canal de control, una información adicional de la estación base sobre la potencia total interferente que recibe la misma en cada instante de tiempo. En base a este valor, cada móvil ajusta su potencia de transmisión de modo que la relación señal a interferente de su señal, a la entrada del receptor de la estación base, tenga un cierto valor determinado. Este mecanismo hace que la potencia recibida por cada estación base de los móviles no tenga por qué ser la misma para diferentes células. A este valor de potencia de recepción se le denomina  $E_b/N_0$  objetivo o  $E_b/N_0$  *target*.

El segundo de los criterios permite mantener la calidad de las transmisiones de todos usuarios con independencia de la carga de tráfico o del nivel de interferencias que haya en cada una de las células. Este segundo mecanismo es el utilizado en las simulaciones.

### 5.2.4 Modelo de movilidad de los usuarios

En principio, cualquier modelo empírico o estadístico de movimiento de los usuarios es válido para verificar el funcionamiento del sistema de comunicaciones. Existen modelos predictivos del movimiento de los usuarios en función de las características del terreno en el que se mueven. En principio, y por simplicidad, se considerará que las células son un terreno liso, plano y sin limitación de movimiento. Se establece únicamente como restricción al movimiento una distancia mínima entre los móviles y la base.

En el punto 5.3.3 se describe el modelo de movilidad que ha sido utilizado en las simulaciones del sistema celular estudiado.

### 5.2.5 Algoritmo de decisión para los trasposos

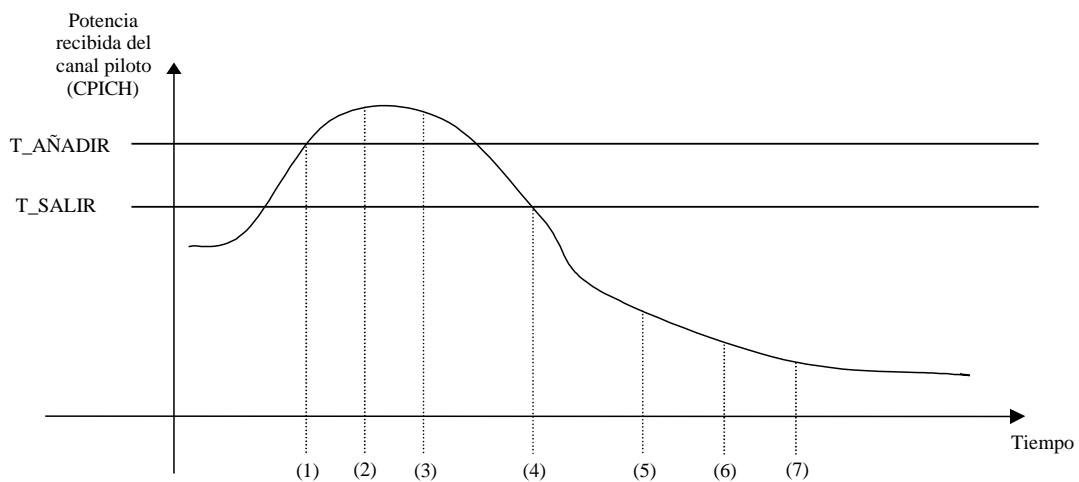
Existen diferentes posibilidades para implementar el algoritmo encargado de tomar las decisiones sobre a qué estación base deben transmitirse los paquetes de información en un sistema con acceso CDMA. En este punto vamos a describir las dos técnicas que están estandarizadas y que son utilizadas, respectivamente, en el sistema cdmaOne (IS-95) y en UTRA. Ambos algoritmos están descritos para transmisiones continuas (en modo circuito) y utilizan para su funcionamiento la medida de los móviles sobre la potencia recibida del canal piloto.

La siguiente terminología será utilizada en la descripción de los algoritmos de *handover*:

- *Active set*: Se denomina con este nombre al conjunto de estaciones base que pueden mantener conexión con un cierto usuario. Por tanto, cada usuario tendrá su propio *active set*. Cualquiera de las estaciones base del *active set* puede ser el destino de las transmisiones del usuario. El número máximo de estaciones base en *active set* está limitado a un cierto valor decidido en el diseño del sistema.
- *Candidate set*: Es el conjunto de estaciones base que no pertenecen al *active set* pero de las que el móvil recibe suficiente potencia del canal piloto como para que pudiesen ser añadidas al *active set*.
- *Monitored set*: Es el conjunto de estaciones base de las que el móvil realiza medidas sobre la potencia recibida, pero de las que se recibe demasiada poca potencia como para poder establecer contacto o ser incluidas en el *candidate set*.
- *Primary base*: Estación base a la que se transmite la información. Es la base que está sirviendo al usuario y le da cobertura.

#### 5.2.5.1 Algoritmo de IS-95

El funcionamiento de algoritmo de *handover* utilizado en IS-95 se muestra gráficamente en la Figura 116. Se basa en la definición un cierto umbral fijo para la potencia recibida del canal piloto. Cuando la potencia recibida de la *primary base* desciende por debajo del umbral, el sistema decide efectuar un *handover* y transferir la comunicación a otra estación base, es decir, cambiar la *primary base*. Sin embargo, puede surgir un problema a causa de que en algunas localizaciones la potencia recibida del piloto sea en general débil, con lo que el umbral debe estar en un nivel bajo, mientras que en otras la potencia general del piloto puede ser fuerte, con lo que el umbral debe estar en valores superiores. Para evitar este problema se han propuesto algunos algoritmos para adaptar dinámicamente este umbral [47].



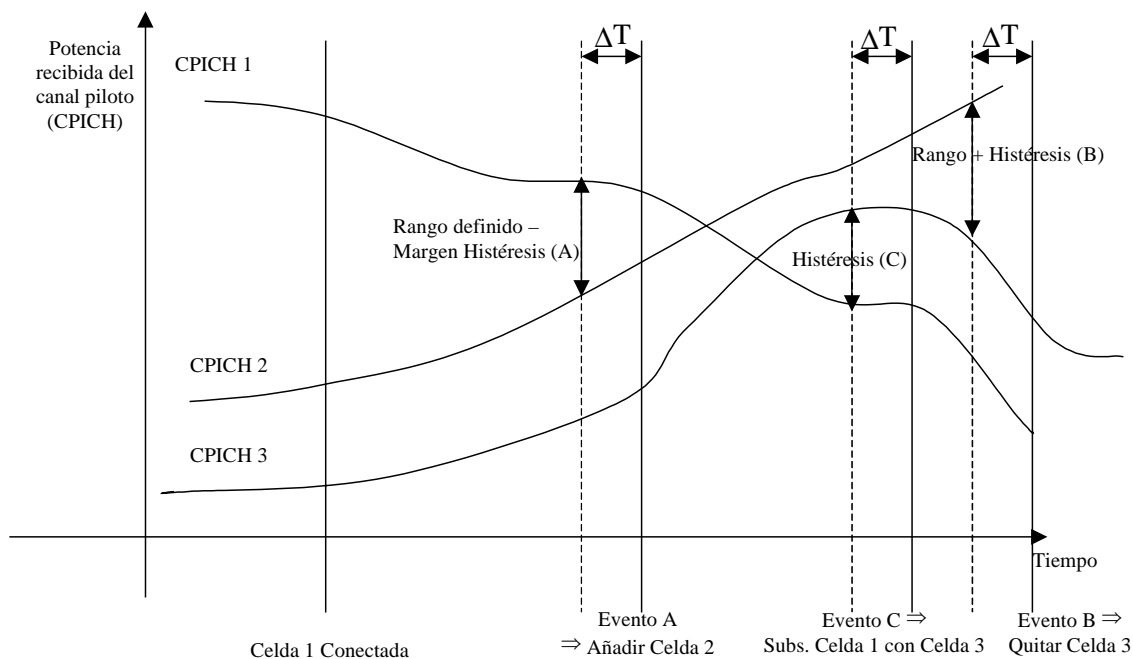
**Figura 116. Mecanismo de *handover* en IS-95**

Para ilustrar el mecanismo de actualización del *active set* en IS-95 vamos a utilizar el ejemplo correspondiente al mostrado en la Figura 116. En él se producen los siguientes eventos:

- (1) La potencia recibida del canal piloto sobrepasa un cierto umbral  $T_{AÑADIR}$ . El móvil envía un mensaje a la estación base de la que recibe el piloto para solicitar incluirla en su *active set*.
- (2) La estación base envía un mensaje de aceptación.
- (3) El móvil incluye a la base en su *active set* y envía un mensaje de verificación.
- (4) La potencia del piloto cae por debajo de un cierto umbral  $T_{SALIR}$ . El móvil inicializa un temporizador decreciente de control.
- (5) El temporizador llega a cero. El móvil envía un mensaje de aviso de desconexión.
- (6) La estación base envía un mensaje de confirmación.
- (7) El móvil elimina a la estación base de su *active set*.

### 5.2.5.2 Algoritmo de UTRA

El algoritmo para la realización de los *handovers* en UTRA utiliza un umbral de potencia relativo y variable. El valor de potencia que marca el inicio del proceso de *handover* viene marcado por la potencia del canal piloto más fuerte que recibe el móvil. Respecto a este valor se define un cierto rango de potencia, más un margen de histéresis, que marca qué estaciones base están fuera o dentro del *active set*. La Figura 117 muestra un ejemplo en el que se describen los mecanismos asociados a la actualización del *active set*.



**Figura 117. Algoritmo de *handover* en UTRA**

En el ejemplo suceden los siguientes eventos, que ilustran el modo de funcionamiento del mecanismo de gestión de los trasposos:

- *Evento A*: Si la potencia del piloto recibida de una célula (en el ejemplo la célula 2) es mayor que la máxima potencia recibida de todas las células (en el ejemplo la de la célula 1) menos el rango de *handover* definido y teniendo en cuenta la histéresis, la célula pasa a incluirse en el *active set* y puede ser candidata a recibir los paquetes del usuario. Para que se realice esta acción, esta potencia recibida debe permanecer por encima del umbral durante un cierto tiempo, representado por  $\Delta T$ .
- *Evento B*: Si la potencia del piloto recibida de una célula (en el ejemplo la célula 3) es menor que la máxima potencia recibida de un piloto (en el ejemplo la de la célula 2) menos el rango de *handover* definido y teniendo en cuenta la histéresis, la célula es retirada del *active set* y deja de ser candidata a recibir los paquetes del usuario. Para que se realice esta acción, esta potencia recibida debe permanecer por debajo del umbral durante un cierto tiempo, representado por  $\Delta T$ .
- *Evento C*: Si el *active set* está lleno y la potencia recibida de uno de los pilotos de una base que está en él cae por debajo de un cierto margen de histéresis, se sustituye en el *active set* esta base por la nueva de la que se recibe mayor potencia. En el ejemplo de la figura se ha supuesto que el máximo número de estaciones base en el *active set* es 2, por tanto, cuando se produce este evento, se sustituye la estación base 3 por la 1 en el *active set*.

El mayor beneficio que aporta este mecanismo respecto al de IS-95 estriba en que la definición de un umbral relativo simplifica la parametrización del sistema. En particular, elimina la necesidad de adaptar los umbrales de decisión al entorno concreto de cada una de las células de operación.

### 5.3 Simulaciones

Una vez descritos los elementos esenciales del sistema celular que van a ser objeto de estudio, vamos a describir los valores de cada uno de ellos que han sido utilizados en las simulaciones realizadas.

#### 5.3.1 Tipo de células y modelo de propagación

Como escenario representativo se han utilizado 23 células urbanas con un radio de 750 metros repartidas uniformemente por un territorio de 36 Km<sup>2</sup> (6 Km x 6 Km). La Figura 118 muestra un diagrama con la ubicación de las estaciones base. La célula marcada con el número 7 es la célula central, utilizada para el cálculo de todas las estadísticas. Puede observarse que el sistema consiste en dos coronas interferentes alrededor de la célula central, más unas estaciones base en los extremos para completar la cobertura.

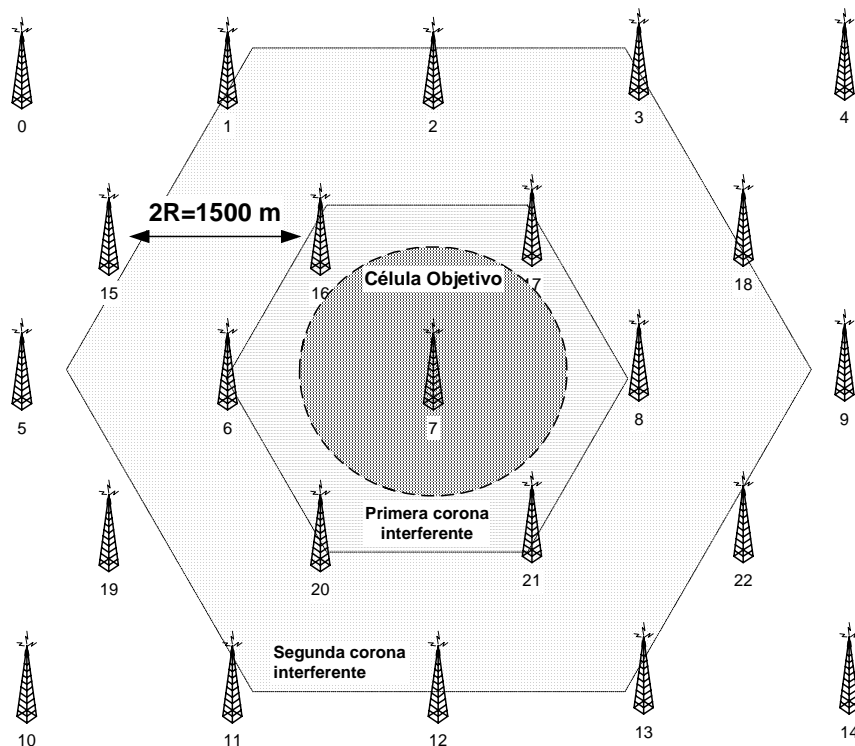


Figura 118. Entorno celular de simulación

El modelo de propagación utilizado es el correspondiente al de las especificaciones descritas en el documento TR 25.942 2.1.3 (Release 1999) del 3GPP. Las pérdidas medias vienen dadas por la fórmula:

$$L = 40(1 - 4 \cdot 10^{-3} D_{hb}) \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(D_{hb}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{ dB} \quad (5.1)$$

donde:

- $R$  es la distancia entre la estación base y el móvil, medida en metros
- $f$  es la frecuencia portadora, en MHz.

- $D_{hb}$  es la altura de la antena de la estación base, medida en metros, sobre la altura media de los edificios.

A esta atenuación media, medida en dB, se le ha añadido una cierta atenuación lenta o *shadowing*. Esta atenuación es una variable aleatoria lognormal con desviación típica de valor 10 dB y media nula. Para generar esta variable aleatoria se debe tener en cuenta que entre dos posiciones diferentes del móvil separadas una cierta distancia  $x_m$  metros, los valores de la variable aleatoria no son independientes, sino que existe una cierta correlación entre ellos.

Supondremos que la función de correlación normalizada de la atenuación presente en dos puntos que distan  $x_m$  metros sigue la expresión [66]:

$$R(x_m) = e^{-\frac{\ln 2}{d_{cor}} x_m} \quad (5.2)$$

donde  $d_{cor}$  es un parámetro llamado distancia de correlación que depende del tipo de terreno presente. Con este valor, el *shadowing* aleatorio añadido a la atenuación media en un punto, que llamaremos  $F(n)$ , depende de la atenuación del punto anterior situado a  $x_m$  metros, que llamaremos  $F(n-1)$  según la expresión, en dB:

$$F(n) = e^{-\frac{\ln 2}{d_{cor}} x_m} F(n-1) + b(n) \quad (dB) \quad (5.3)$$

donde  $b(n)$  es una variable aleatoria gaussiana de media nula y varianza igual a  $B$ . Por su parte  $B$  es:

$$B = \left( 1 - 2^{-\left(\frac{2x_m}{d_{cor}}\right)} \right) \sigma^2 \quad (5.4)$$

donde  $\sigma$  es la desviación típica del *shadowing*.

### 5.3.2 Control de potencia

Se ha considerado un control de potencia en lazo cerrado ideal para la transmisión de los paquetes de datos. Este control de potencia compensa tanto los desvanecimientos lentos como los desvanecimientos rápidos del canal. Por tanto, se ha utilizado la hipótesis gaussiana para la evaluación de las interferencias.

Por otro lado, se han considerado las variaciones lentas de la atenuación que introduce el canal radio según el modelo presentado en el punto anterior. En base a este valor, y para la escoger la potencia media con la que cada usuario transmite sus paquetes, se ha utilizado el siguiente criterio:

- En base a la estimación de las interferencias recibidas por la base en el slot de tiempo anterior, cada móvil calcular su potencia de transmisión de manera que la relación señal útil a interferente a la entrada del receptor de la estación base tenga un cierto valor constante. Este valor es el llamado  $E_b/N_0$  objetivo o *target*. En particular, se fijado un valor de la relación  $E_b/N_0$  objetivo igual a 3'1 dB.



A la hora de evaluar la probabilidad de error en el bit se ha considerado que el sistema utiliza una cierta codificación de canal cuya ganancia es de 7 dB.

### 5.3.3 Modelo de movilidad de los usuarios

Se ha considerado que todos los móviles se mueven con un vector velocidad cuyo módulo es constante y cuya dirección cambia cada cierto tiempo con una probabilidad dada dentro de un ángulo determinado. Este modelo está basado en el que podemos encontrar en [67].

En particular, se ha considerado que cada 70 ms existe una probabilidad igual a 0'4 de que cada móvil cambie su dirección en un rango de  $\pm 45^\circ$ .

Por otro lado, en cuanto al valor del módulo de la velocidad, se han considerado dos situaciones diferentes:

- Todos los móviles tienen el mismo módulo del vector velocidad. Este valor ha sido fijado en 5'5 m/s en todas las simulaciones.
- Cada móvil tiene un vector velocidad cuyo módulo es aleatorio, uniformemente distribuido entre 1 y 10 m/s.

En todos los casos, las direcciones iniciales del movimiento de cada móvil son una variable aleatoria uniforme entre 0 y  $2\pi$  radianes.

Inicialmente todos los móviles se sitúan uniformemente distribuidos por todas las células del sistema. Por otro lado, cuando los móviles se mueven fuera de los límites de las células del sistema considerado, se cambia automáticamente su dirección para que regresen hacia las células de estudio. Este mecanismo simula la entrada y salida normal de móviles en un sistema real.

### 5.3.4 Algoritmo de decisión para los trasposos

Se han utilizado dos técnicas diferentes para la decisión de los trasposos (*handovers*). Una de ellas es la técnica utilizada en UMTS, según se especifica en el punto 5.2.5.2, donde el criterio depende únicamente de las potencias recibidas de los canales piloto de las diferentes estaciones base. Por otro lado, se ha seguido un nuevo criterio que utiliza la información que ofrece el protocolo DQRAP/CDMA. Con este criterio, la decisión de realizar un trasposo depende de la carga de tráfico específica de las células implicadas en el mismo. Los dos algoritmos se describen como sigue:

- *Modo potencia*: Se realiza un *handover* cuando la estación base a la que se están transmitiendo los paquetes (*primary base*) debe salir del *active set*. La nueva *primary base* pasa a ser, de entre las estaciones base que permanecen en el *active set*, aquella de la que se recibe más potencia del canal piloto.
- *Modo DQRAP/CDMA*: Se realiza un *handover* cuando la estación base a la que se están transmitiendo los paquetes (*primary base*) debe salir del *active set*. La nueva *primary base* pasa a ser, de entre las estaciones base que permanecen en el *active set*, aquella que tiene un valor de TQ más pequeño (ver 3.3). Esto favorece que el tráfico se dirija en primer lugar a las bases con menor carga de tráfico. Este criterio utiliza una información específica del protocolo de acceso al medio y por tanto supone una

nueva aportación que debe estudiarse. En el punto 5.4.2 se muestran los resultados comparativos entre las dos técnicas.

Respecto al *active set*, se ha definido que el número máximo de estaciones base en él para cada móvil sea de 7. Por su parte, también se ha definido que el tiempo de actualización del *active set* para cada móvil sea de 100 ms [49].

Finalmente, cabe reseñar que en [48] se especifica que los traspasos de tipo *soft* sólo serán aplicados en las transmisiones realizadas por canal dedicado, nunca por canal común en modo paquete. Puesto que en el sistema objeto de estudio las transmisiones se realizan de este modo, no se ha utilizado la técnica de *soft handover* ni se ha tenido en cuenta la ganancia que podría obtenerse de la macrodiversidad.

### 5.3.5 Resumen de los parámetros utilizados

Se muestran a continuación los valores de los parámetros que se han utilizado en las simulaciones, clasificados por categorías. Siempre que no se especifican valores diferentes para ellos, son los valores utilizados en la obtención de las curvas del punto 5.4. Todos estos valores han sido escogidos en base a los utilizados en las simulaciones realizadas en el 3GPP para UTRA y cuyas especificaciones se detallan en el documento TR 25.942 2.1.3 (*Release* 1999).

#### 5.3.5.1 Parámetros generales del sistema

- Duración de sistema de cada simulación: 20 min.
- Número de usuarios móviles en el sistema: 500
- Tiempo de trama (tiempo de transmisión de un paquete): 10 ms.
- Número de células: 23
- Radio de las células: 750 m.
- Frecuencia portadora: 1920 MHz
- Figura de ruido de los equipos receptores: 5 dB.

#### 5.3.5.2 Parámetros de propagación

- Modelo de propagación: Modelo macrocelular del documento TR 25.942 2.1.3 (*Release* 1999) del 3GPP [49] (ver punto 5.3.1).
- Desviación estándar del *shadowing* lognormal: 10 dB
- Distancia de correlación entre valores del *shadowing* (ver 5.2.2): 20 m.

#### 5.3.5.3 Parámetros del control de potencia

- Mecanismo de control de potencia para la transmisión de paquetes: Control de potencia en lazo cerrado ideal.

- $E_b/N_0$  objetivo para la transmisión de los paquetes de datos: 3'1 dB
- Ganancia de codificación: 7 dB

#### 5.3.5.4 Parámetros del mecanismo de traspaso (handovers)

- Rango de potencia para efectuar los *handovers* (ver Figura 117) : 4 dB
- Margen de histéresis para los traspasos: 2 dB
- Tiempo entre actualizaciones del *active set*: 100 ms
- Número máximo de bases en el *active set*: 7

#### 5.3.5.5 Parámetros de las estaciones base

- Altura de las antenas: 30 m.
- Ganancia de las antenas: 11 dB
- Tipo de antenas: Omnidireccionales
- Potencia máxima de transmisión: 43 dBm

#### 5.3.5.6 Parámetros de los móviles

- Altura antena: 1'5 m.
- Ganancia antena: 0 dB
- Potencia máxima de transmisión: 33 dBm
- Distancia mínima móvil-base: 15 m.
- Velocidad de movimiento: 5'5 m/s
- Tiempo entre verificaciones de cambio de dirección: 70 ms.
- Probabilidad de cambio de dirección: 0'4
- Rango de variación del ángulo cuando se cambia la dirección:  $\pm 45^\circ$
- Tráfico generado: Generación de mensajes con llegadas de Poisson y longitud exponencial de media 6000 bits.

#### 5.3.5.7 Parámetros DQRAP/CDMA (capa física)

- Número máximo de transmisiones simultáneas por célula: 17
- Ganancia de procesado: 64
- Tamaño de los paquetes de datos: 600 bits

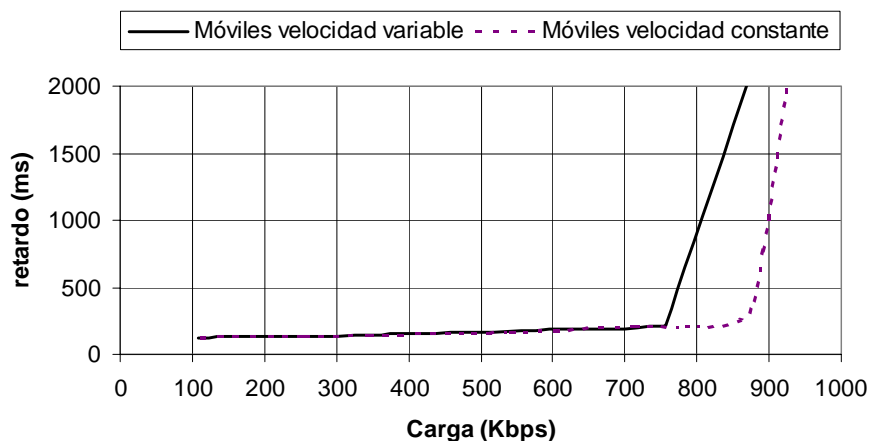
- Número de minislots de control por slot de datos: 3
- Longitud de la secuencia de petición de acceso: 256 chips
- Receptor de peticiones de acceso:
  - Número de filtros adaptados: 16
  - Probabilidad de falsa alarma de diseño para los filtros adaptados:  $10^{-3}$
  - Número de peticiones simultáneas de diseño: 10

## 5.4 Resultados

En este punto vamos a mostrar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para validar el funcionamiento del protocolo DQRAP/CDMA en un entorno celular.

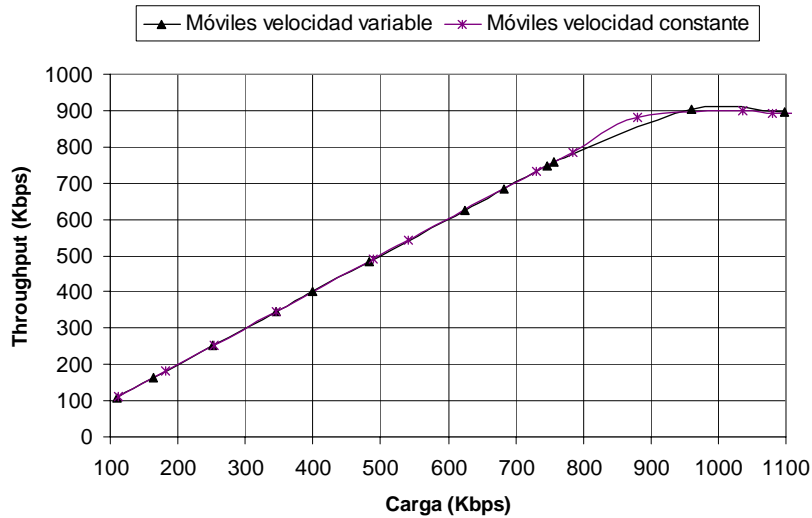
### 5.4.1 Sistema estándar (según 5.3)

En primer lugar, y de cara a mostrar que se mantienen las buenas prestaciones del sistema cuando se utiliza el protocolo de acceso DQRAP/CDMA en el nuevo entorno de trabajo, la Figura 119 muestra el retardo medio de los paquetes cuando el sistema tiene los parámetros descritos en el punto 5.3.5. Se muestran dos curvas, una ha sido obtenida con todos los usuarios del sistema moviéndose con la misma velocidad constante de 5'5 m/s, mientras que el otro se ha obtenido con móviles cuya velocidad está uniformemente distribuida entre 1 y 10 m/s. Se observa que la máxima carga de tráfico que puede soportar el sistema es del mismo orden de la que se podía soportar en el caso del sistema descrito en los capítulos 3 y 4.



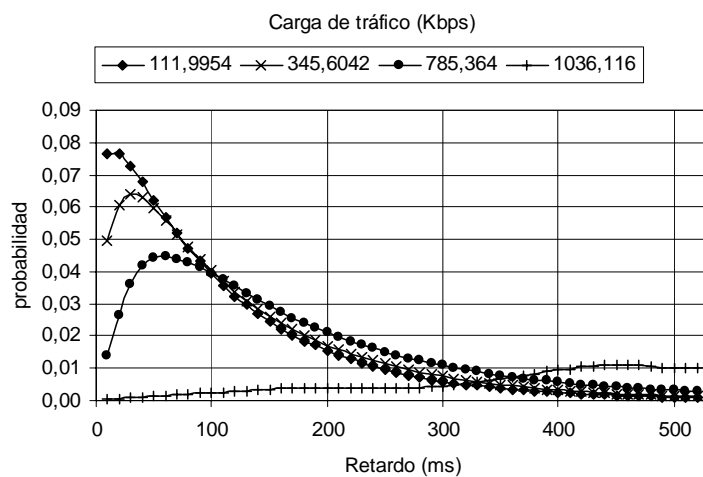
**Figura 119. Retardo de paquetes en entorno celular**

Se observa por otro lado que la mayor dispersión de las velocidades de los usuarios redonda en una pequeña reducción de la máxima carga de tráfico soportada. Sin embargo, la Figura 120 muestra que el *throughput* que se alcanza en ambos casos es totalmente equivalente, lo que viene a corroborar que el sistema sigue manteniendo las propiedades de equilibrio del protocolo DQRAP/CDMA.



**Figura 120. Throughput en entorno celular**

Es posible comprobar que los valores promedio del retardo de los paquetes se corresponden también con valores acotados de su desviación típica. En concreto, la Figura 121 muestra las curvas de las funciones densidad de probabilidad del retardo para distintos valores de carga de tráfico a la entrada, indicados en la leyenda.



**Figura 121. Función densidad de probabilidad del retardo de paquetes en entorno celular**

Otro punto de vista interesante para observar el comportamiento en retardo del sistema es a través de la función de distribución del retardo, que indica la probabilidad de que cada paquete sea correctamente enviado en menos de un cierto tiempo, marcado por el eje de abscisas. La Figura 122 muestra las curvas correspondientes a los mismos valores de carga de tráfico de la Figura 121.

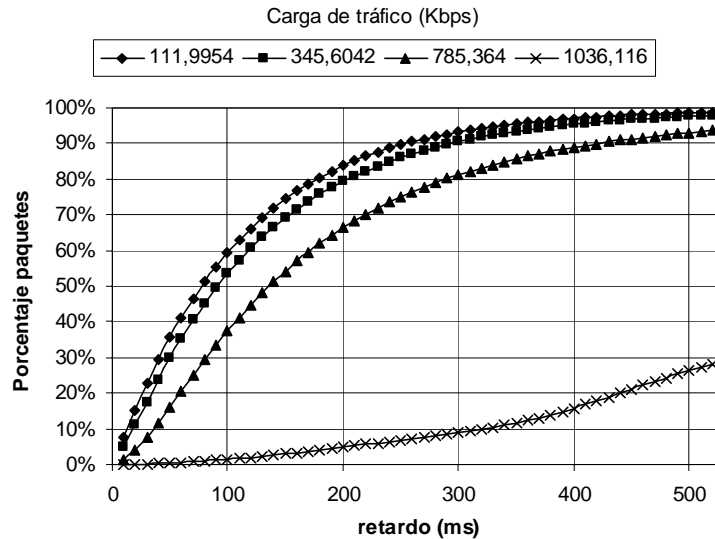


Figura 122. Función de distribución del retardo de los paquetes en entorno celular

Podemos observar que cuando la carga supera la capacidad de transmisión del canal (en la figura para una carga de 1036 Kbps), el retardo deja de tener un valor acotado y no se entregan los paquetes en un intervalo definido. Sin embargo, vemos que cuando la carga de tráfico ofrecido es de 112 Kbps, el 90% de los paquetes son enviados con un retardo inferior a 260 ms.

#### 5.4.2 Comparación de mecanismos de *handover*

En este punto se muestran los resultados comparativos de retardo y *throughput* obtenidos haciendo uso de los dos mecanismos de actualización del *active set* descritos en el punto 5.2.5. Llamaremos a estos modos, respectivamente, IS-95 (5.2.5.1) y UMTS (5.2.5.2). Corresponden a los diferentes criterios de establecimiento del umbral de potencia para la inclusión o no de una estación base en el *active set*. La Figura 123 y la Figura 124 muestran, respectivamente las curvas correspondientes al retardo y al *throughput* total del sistema.

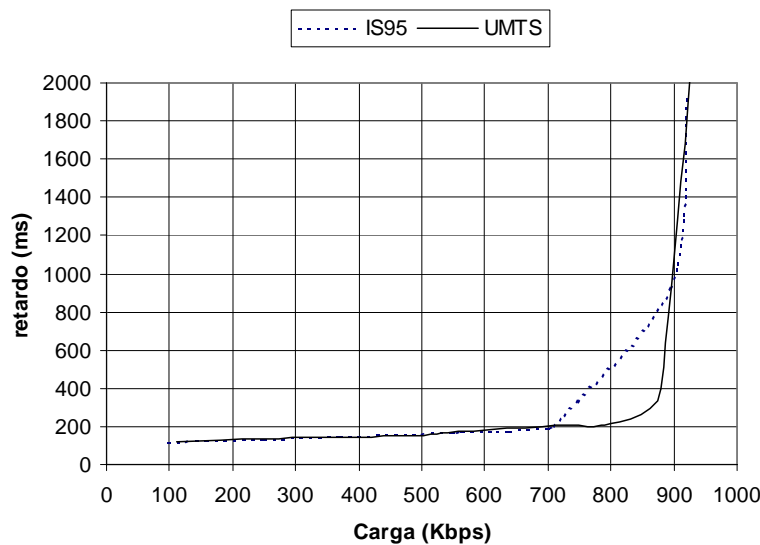


Figura 123. Comparativa de retardo de mecanismos de selección del umbral de *handover*.

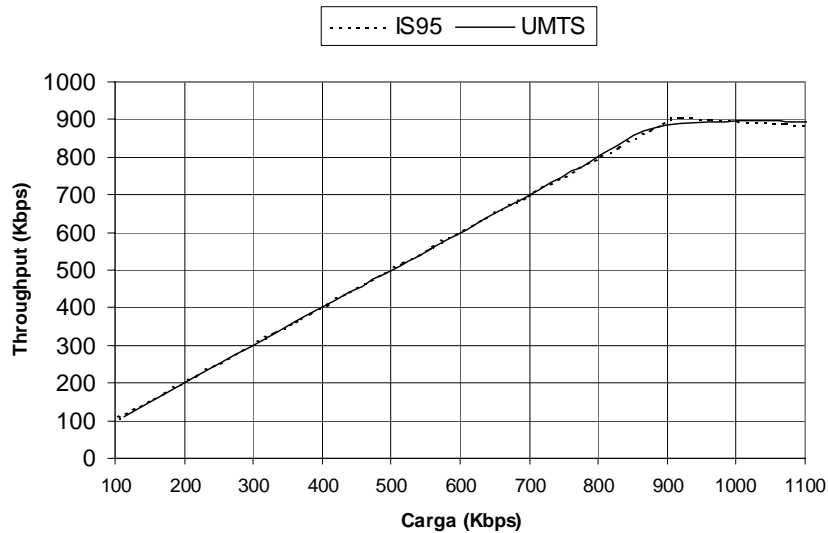


Figura 124. Comparativa de *throughput* de mecanismos de selección del umbral de *handover*.

Podemos observar que ambos mecanismos presentan una respuesta tanto en retardo como en *throughput* prácticamente idéntica. Sin embargo, es posible encontrar una diferencia sustancial en uno de los parámetros importantes del comportamiento del sistema. La Figura 125 muestra la potencia media transmitida en cada paquete transmitido, comparándolo para ambos escenarios. Observamos que el criterio del umbral fijo (IS-95) obliga a utilizar una potencia de transmisión unos 20 dB mayor que en el caso de usar el mecanismo de umbral relativo (UMTS). El uso de esta segunda técnica redundará por tanto en un ahorro sustancial de energía.

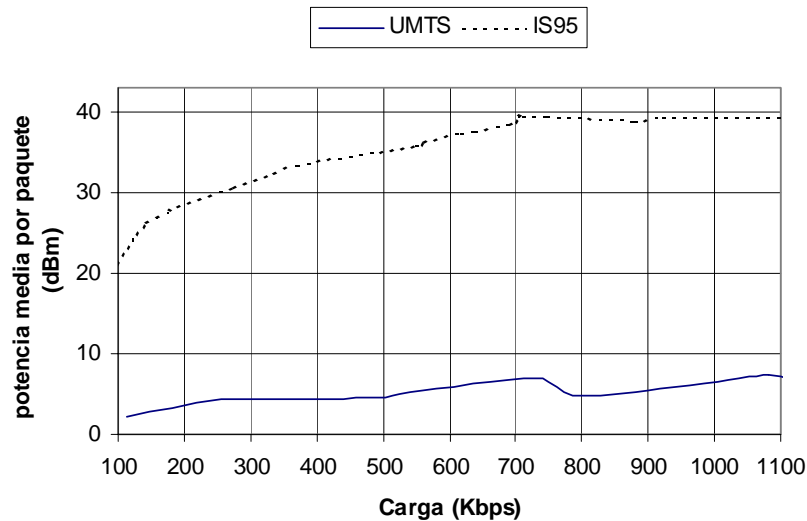


Figura 125. Comparativa de potencia media transmitida por paquete (dBm)

Seguidamente pasamos a comparar los dos mecanismos descritos en el punto 5.3.4 para la elección de la *primary base*. La Figura 126 y la Figura 127 muestran el retardo y el *throughput* correspondientes a escenarios donde se utilizan ambas técnicas. Se han denotado por *Potencia* y *TQ*, que indican respectivamente que se escoge la *primary base* según si la base elegida es de la que se recibe la máxima potencia o si es la que tiene un valor más pequeño de *TQ* en su célula. El mecanismo de actualización del *active set* es del tipo UMTS.

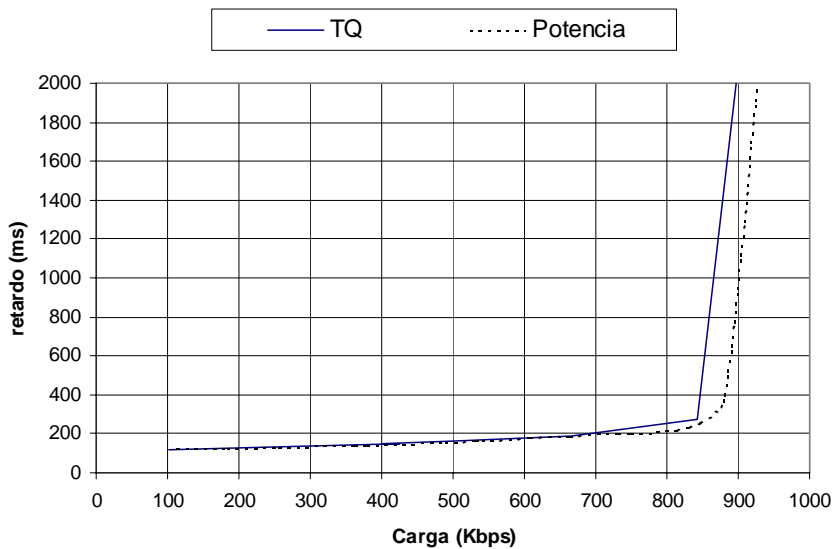


Figura 126. Comparativa del retardo para diferentes criterios de elección de *primary base*

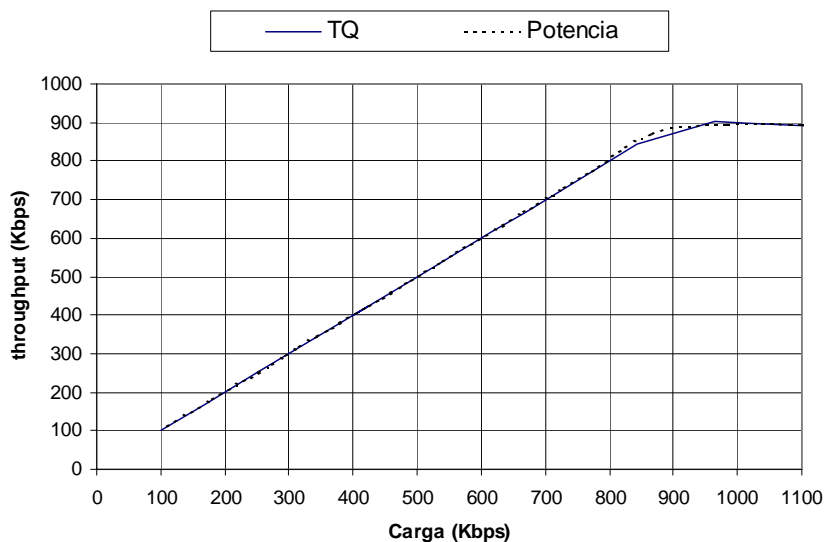


Figura 127. Comparativa de *throughput* para diferentes criterios de elección de *primary base*

Puede observarse que las diferencias entre ambas opciones son prácticamente irrelevantes. Incluso podemos observar que el comportamiento en retardo de la opción *TQ* es ligeramente menos favorable que la opción de utilizar el criterio de máxima potencia recibida. La causa de este comportamiento es el elevado número de estaciones base que pueden pertenecer al *active set*. Este número está fijado a 7 y puede ocurrir que, en el caso de seleccionar como *primary base* la que tiene el valor de *TQ* más bajo, la base escogida sea una cuyas condiciones de propagación son muy desfavorables. Para evitar este efecto es conveniente reducir el tamaño máximo del *active set*, de manera que el conjunto de las estaciones bases que pueden ser seleccionadas se restrinja únicamente a las que tienen las mejores condiciones de cobertura para cada usuario.

En este sentido, en el siguiente punto se muestran los resultados obtenidos al variar el número máximo de estaciones base en el *active set*. Estos resultados demuestran que reduciendo este valor es posible aprovechar de manera eficiente la información del protocolo MAC para mejorar el comportamiento en retardo del sistema.



### 5.4.3 Variación del tamaño del *active set*

Se han realizado simulaciones variando el tamaño máximo del *active set* de cada usuario, es decir, el número máximo de estaciones base que pueden tenerse en consideración a la hora de decidir hacia cuál de ellas se transmiten los paquetes de datos. En particular, se pretende demostrar que limitar a valores pequeños este parámetro redundante en una mejora del comportamiento en retardo del sistema. La Figura 128 muestra las curvas de retardo comparadas para los dos criterios de elección de *primary base* cuando el número máximo de estaciones base en el *active set* se limita a 3. La Figura 129 muestra el comportamiento del *throughput* en la misma situación.

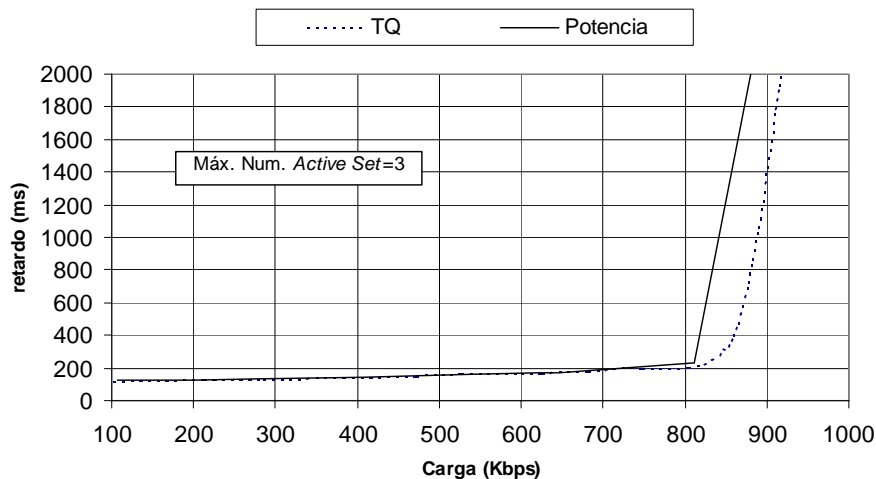


Figura 128. Comparación de criterios de selección de *primary base* con *active set* pequeño.

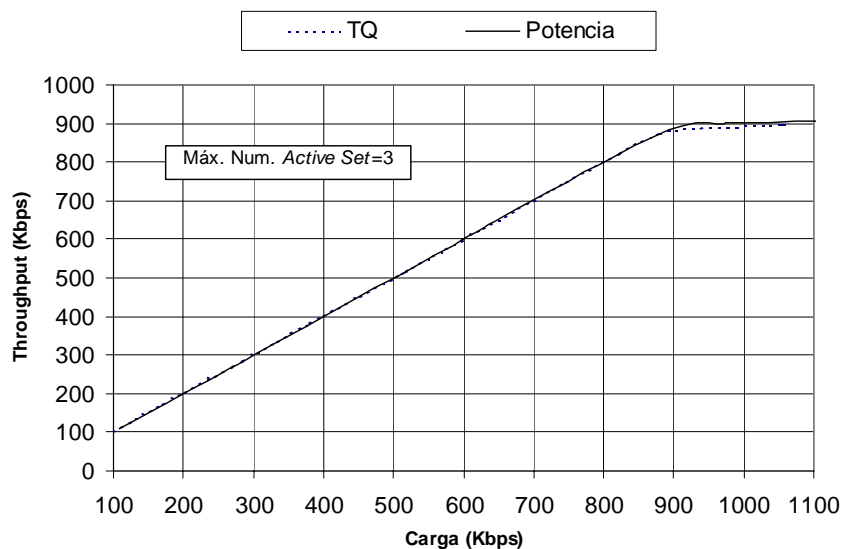


Figura 129. Comparación de *Throughput* con criterios de selección *primary base* y *active set* pequeño

Podemos observar que las curvas han intercambiado las tendencias. Ahora la curva que presenta un mejor comportamiento es la correspondiente al criterio *TQ* para selección de la *primary base*. Se comprueba por tanto que puede obtenerse una mejoría del uso de la información del tráfico de las células proporcionada por el protocolo de acceso. Al reducir el tamaño del *active set*, el criterio de elección de base tiene en cuenta tanto la potencia recibida como el tráfico. Un menor número estaciones base en el *active set* reduce la posibilidad de

conectarse a una que tenga un canal de propagación desfavorable, con lo que se obtiene una mejora efectiva.

Se observa también que tanto el retardo para cargas bajas como el comportamiento del *throughput* son prácticamente equivalentes en ambos casos.

#### 5.4.4 Concentración de tráfico

En todas las simulaciones realizadas hasta este punto se ha considerado que los usuarios se distribuyen de manera uniforme por las diferentes células del sistema. En los sistemas reales puede darse el caso de que en una cierta zona geográfica se encuentre una concentración especialmente elevada de usuarios activos. Esta situación provoca una asimetría en la carga de tráfico de las diferentes células del sistema. En este escenario, cabe analizar el sistema desde dos puntos de vista diferentes:

- Los usuarios se concentran en la célula objeto de estudio, provocando un aumento del tráfico ofrecido muy superior al existente en las células vecinas.
- Los usuarios se concentran en una célula que es vecina a la que resulta objeto de estudio. En este caso tenemos un aumento del nivel de interferencia que viene de las otras células y puede también provocarse un aumento del tráfico en la célula propia a causa de que algunos usuarios de la célula ‘sobrecargada’ transmitan sus paquetes hacia las estaciones base menos cargadas.

Se han realizado simulaciones donde se ha considerado que un 10% de los usuarios se mueven únicamente por una de las células del sistema. La Figura 130 muestra la respuesta del retardo medio de los paquetes cuando esta concentración de usuarios se da en la célula objeto de estudio (la célula central).

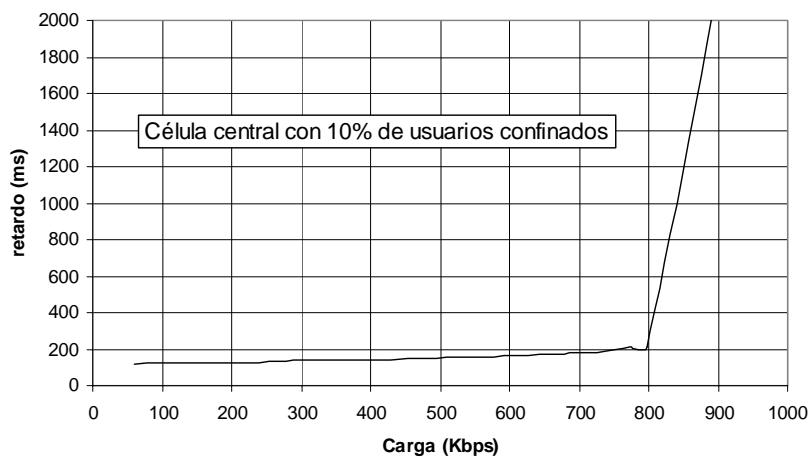


Figura 130. Retardo con un 10% de usuarios confinados en la célula central

Podemos observar que se mantiene el comportamiento del retardo. Únicamente cabe destacar que se observa que el codo a partir del cual el retardo deja de estar acotado se sitúa para una carga de entrada ligeramente más pequeña. Es interesante reseñar también que esta carga total de entrada se obtiene cuando los usuarios generan individualmente una carga menor que en las situaciones donde no hay concentración de tráfico. Es decir, puesto que hay más usuarios

en promedio en la célula central, la misma carga total de tráfico se obtiene con una menor carga por usuario.

Complementariamente, se ha simulado la situación donde el 10% de los usuarios se mueven únicamente por una célula vecina (de la primera corona interferente) a la célula objetivo. La Figura 131 muestra los resultados obtenidos para el retardo medio de los paquetes. Comprobamos de nuevo que el comportamiento es totalmente análogo al que presenta el sistema en otras situaciones. El mayor nivel de interferencia de la célula vecina provoca que la máxima carga soportada por el sistema sea de un valor inferior al caso de tráfico homogéneamente repartido.

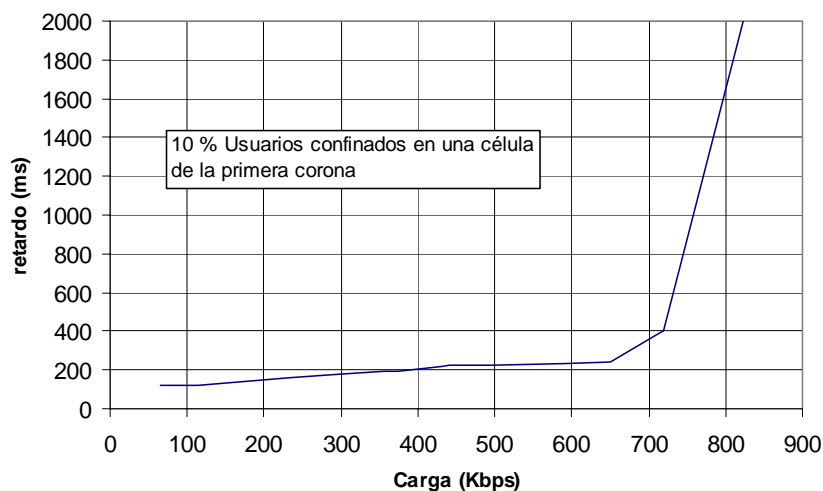


Figura 131. Retardo de paquetes con concentración de tráfico en una célula vecina

## 5.5 Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado el rendimiento de un sistema de comunicaciones móviles celulares basado en el protocolo MAC DQRAP/CDMA. Se ha verificado que se mantienen todas las buenas características del protocolo en este entorno de operación. Además, se han introducido nuevas propuestas para algunos mecanismos del sistema que aprovechan la información de control propia del protocolo de acceso. En particular, las nuevas propuestas de algoritmos de decisión de los traspasos permiten aprovechar las características del protocolo MAC para mejorar la eficiencia global del sistema. En este sentido, el protocolo DQRAP/CDMA ofrece información sobre la carga de tráfico de cada célula. Esta información es la que permite mejorar los mecanismos de gestión de los recursos radio para obtener una mejora en el rendimiento. Esta mejora ha sido mostrada por las simulaciones realizadas en escenarios representativos.

Se ha verificado por tanto que el protocolo de acceso DQRAP/CDMA resulta ser un buen candidato para ser utilizado en los futuros sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, teniendo en cuenta las características del entorno celular en el que deberá operar.

