

### 3. SISTEMAS CDMA

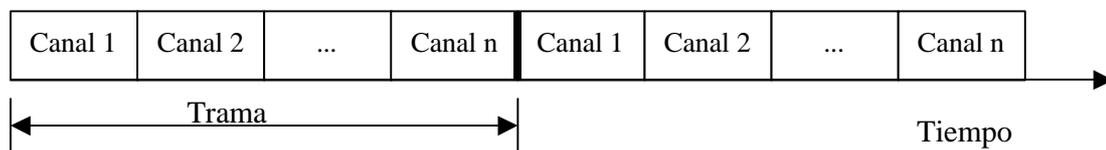
#### 3.1. TÉCNICAS DE ESPECTRO ENSANCHADO

Los esquemas de acceso múltiple son usados para permitir que varios usuarios puedan usar el canal de radio simultáneamente. En todo sistema de radio el ancho de banda siempre es limitado. Para sistemas de telefonía móvil el ancho de banda oscila del orden de las decenas de MHz, el cual es dividido por la mitad para proporcionar los enlaces ascendentes y descendentes. El compartimiento del espectro asignado es necesario para poder tener un número de usuarios aceptable. FDMA, TDMA y CDMA son los tres métodos más extendidos de compartición del ancho de banda disponible para proporcionar múltiples usuarios en sistemas de radio móvil. Existen muchas extensiones, y técnicas híbridas de estos métodos, tal como OFDM, un híbrido de TDMA y FDMA. Sin embargo, una compresión de estos métodos es necesario para el entendimiento de cualquier derivación que se haga de estos.

En Frequency Division Multiple Access (FDMA) el ancho de banda total del sistema está dividido en canales de frecuencia asignados a los usuarios, de manera que en cada porción del espectro sólo transmite un usuario.

En el acceso múltiple por división en frecuencia, el ancho de banda disponible es dividido en un número de canales de ancho pequeño. Cada usuario es localizado en una única frecuencia en la cual se transmite y de recibe. Durante una comunicación ningún otro usuario puede usar la misma banda de frecuencia. Cada usuario tiene asignado una canal para la comunicación ascendente (desde el móvil hacia la estación base) y otro para la descendente (desde la estación base hacia el móvil). La señal transmitida en cada uno de los sentidos es continua permitiendo con este sistema la transmisión de señales analógicas. Los canales en este sistema generalmente tienen un ancho de 30 kHz ya que cada canal solo soporta un usuario. FDMA es usado en la primera división que se efectúa en el reparto de anchos de bandas grandes, y es usado en la mayoría de los sistemas multicanales. En Time Division Multiple Access (TDMA) cada canal de frecuencia está dividido en time slots y se asigna a cada usuario uno de ellos, de manera que en cada intervalo temporal sólo transmite un usuario.

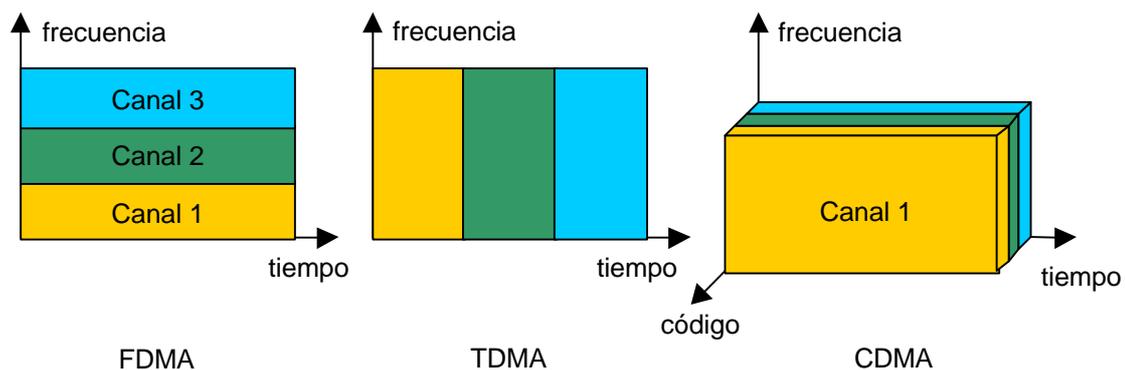
El acceso múltiple por división en el tiempo divide el espectro disponible en múltiples ranuras de tiempo, cediendo a cada usuario una ranura (slot) de tiempo en la cual puede transmitir o recibir. La siguiente figura muestra como las ranuras de tiempo son proporcionadas a los usuarios:



Los sistemas TDMA transmiten los datos en forma de ráfagas, de tal forma que la transmisión de cada canal no es continua. Los datos de entrada que van a ser transmitidos son ubicados en una trama y son transmitidos a una elevada tasa en forma de ráfaga durante la ranura de tiempo asignada al usuario. TDMA no puede enviar señales analógicas, ya que para enviar la señal es necesario introducirla previamente en un buffer. TDMA por el contrario puede sufrir, como ya hemos visto efectos multicamino, cuando la tasa de transmisión es elevada.

TDMA es normalmente usada junto con FDMA para subdividir el total de ancho de banda disponible en varios canales. Esto se hace para reducir el número de usuarios por canal permitiendo usar una tasa de datos más baja. Cada canal basado en FDMA, es posteriormente subdividido usando TDMA, de tal forma que varios usuarios pueden transmitir en un canal. Este tipo de técnica de transmisión es usada en la mayoría de los sistemas de telefonía móvil de segunda generación. Para GSM, el ancho de banda total es de MHz el cual es dividido en 125 porciones usando FDMA, obteniendo canales de 200 kHz. Estos canales son subdivididos a su vez usando TDMA de tal forma que en 200 kHz podemos tener de 8 a 16 usuarios.

En Code división múltiple Access (CDMA) se consigue el acceso múltiple asignando a cada usuario un código pseudo-casual para codificar la señal portadora de información. El receptor, conociendo el código del usuario, es capaz de decodificar la señal recibida y recuperar la señal de información. Esto es posible porque las correlaciones cruzadas entre el código del usuario deseado y los códigos de los demás usuarios son pequeñas en comparación con la autocorrelación de cada código. Puesto que se escogen secuencias de código cuyo ancho de banda es mucho más grande del ancho de banda de las señales portadoras de información, el proceso de codificación ensancha el espectro de la señal y es por lo tanto conocido como modulación de espectro ensanchado. Por esto la secuencias de código tienen también el nombre de códigos de ensanchamiento.



Generalmente TDMA y CDMA suelen utilizar FDMA para dividir la banda de frecuencia disponible en porciones más pequeñas que son sucesivamente divididas por tiempo o código.

### 3.2. CLASIFICACIÓN DE ESQUEMAS CDMA

En esquemas de acceso múltiple de tipo CDMA es el ensanchamiento del espectro el que proporciona la capacidad para el acceso múltiple, por lo tanto es importante conocer las técnicas necesarias para generar señales de espectro ensanchado y las propiedades de éstas. Las técnicas de modulación de espectro ensanchado satisfacen dos criterios:

- El ancho de banda de transmisión debe ser mucho más grande que el ancho de banda de información.
- El ancho de banda en radio frecuencia resultante de la modulación es independiente de la información transmitida.

El cociente entre la tasa de bit utilizada para ensanchar la señal de información  $W$  y el de información  $R$  se denomina ganancia de procesamiento  $G_p$  del sistema de espectro ensanchado,

$$G_p = \frac{W}{R}$$

El receptor genera de forma sincrónica una réplica del código de ensanchamiento y calcula la correlación entre la señal recibida y la réplica para recuperar la señal portadora de información originaria. Esto implica que el receptor necesita conocer el código utilizado para modular la señal.

Existen diferentes técnicas de modulación para generar señales de espectro ensanchado. Las principales son las siguientes:

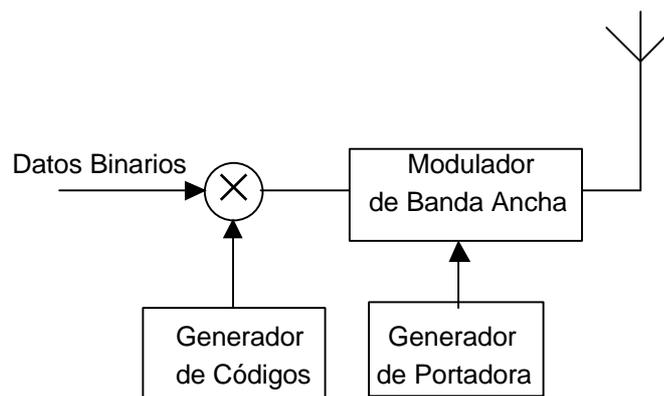
- Secuencia directa (Direct Sequence): la señal portadora de información es multiplicada directamente por un código de ensanchamiento de alta tasa binaria.
- Salto de frecuencia (Frequency Hopping): la frecuencia de la portadora a la que se transmite la señal es cambiada velozmente de acuerdo con el código.
- Salto de tiempo (Time Hopping): la señal portadora de información se transmite de manera discontinua en ráfagas cortas cuyo instante temporal de comienzo depende del código spread.
- Modulación híbrida (Hybrid Modulation): cualquier esquema que combine varios de los anteriores mecanismos de modulación.

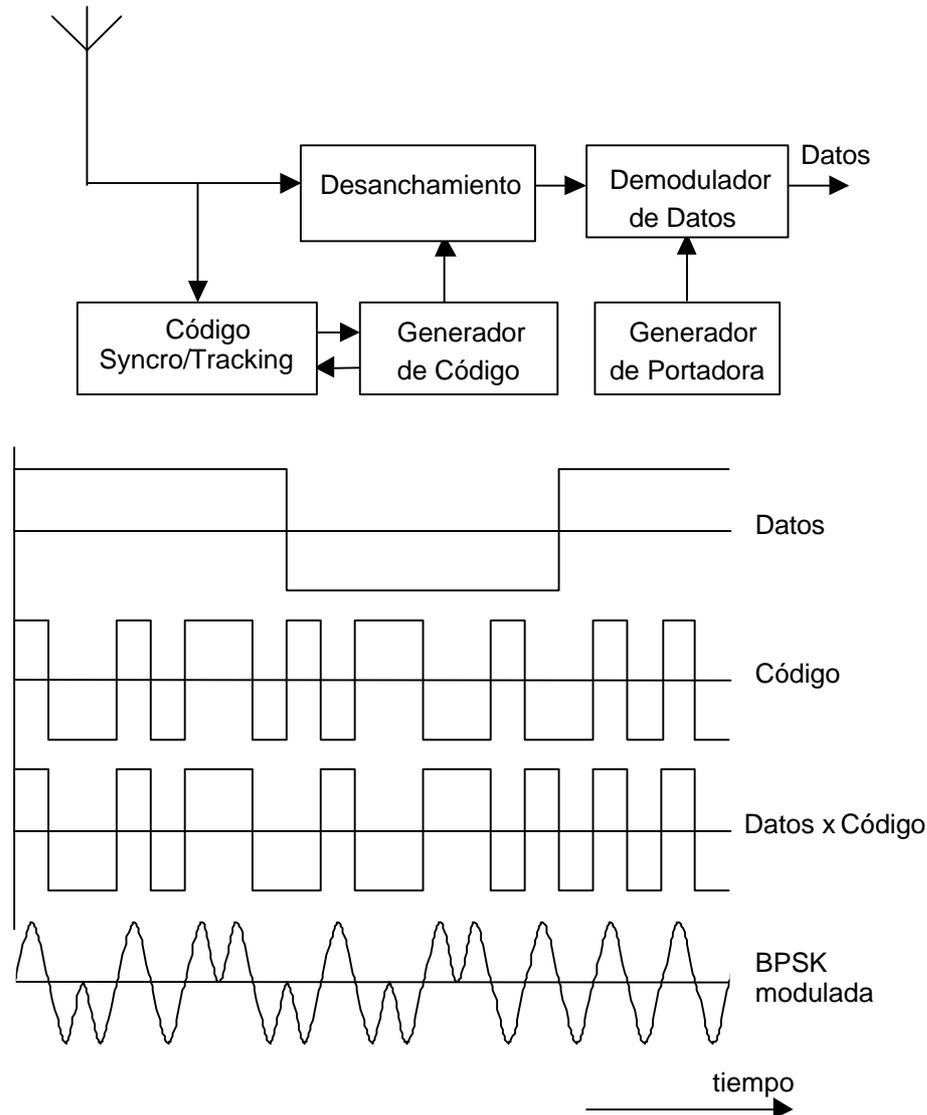
Vamos a abordar el primer tipo de modulación, por ser este el que se ha considerado en las recomendaciones que definen el sistema UMTS.

### 3.2.1. CDMA de secuencia directa (DS-SS-CDMA)

En DS-SS-CDMA la señal portadora de información es modulada directamente por una señal código digital, o sea discreta en el tiempo y discreta en valor. Esta señal consiste en una secuencia de bits de código llamados chips que pueden tomar el valor de +1 o -1. Para obtener el ensanchamiento del espectro deseado la tasa binaria de la señal código, llamada chip rate, debe ser mucho mayor de la tasa binaria de la señal de información.

Las figuras ilustran el esquema de bloques simplificado para un transmisor con modulación de código de tipo BSK (Binary Phase Shift Keying), junto con las señales generadas y el esquema de bloques simplificado del receptor.

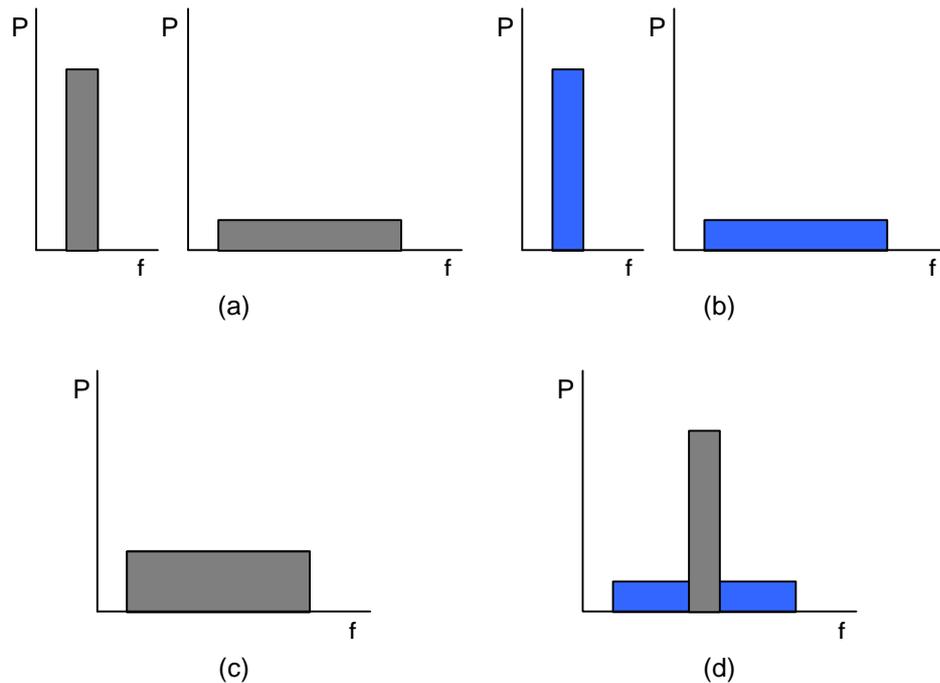




En este ejemplo se transmiten 8 chips por cada símbolo de información, lo cual implica un processing gain igual a 8. Cabe destacar que el receptor, además de conocer el código utilizado en transmisión, necesita lograr que el código de la señal recibida y la réplica generada localmente estén sincronizadas durante todo el proceso de recepción.

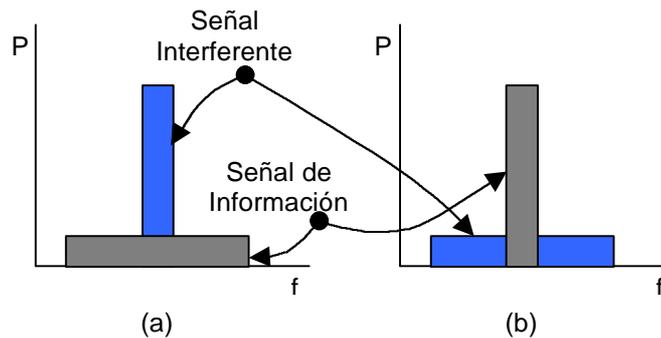
Entre las propiedades de las señales de espectro ensanchado en el caso de DS-SS destacan las siguientes:

- **Capacidad para el acceso múltiple:** si varios usuarios transmiten simultáneamente señales de espectro ensanchado, el receptor puede distinguir entre ellos con tal de que cada uno utilice un código diferente de los demás. Si las correlaciones entre el código de cada usuario y los códigos de los demás son suficientemente pequeñas, el receptor puede realizar el proceso de despreading. Esto consiste en calcular la correlación de la señal recibida con la señal código de un determinado usuario, de manera que la señal de banda ancha de éste vuelve a ser la señal portadora de información de banda estrecha mientras que las señales de los demás usuarios siguen ocupando todo el ancho de banda de transmisión. Así dentro del ancho de banda de información la potencia del usuario deseado será mayor que la potencia de interferencia de las demás señales (a condición de que no haya demasiados interferentes). Este proceso es ilustrado en la figura siguiente en el caso de dos usuarios.



Después de haberse ensanchado las señales del primer usuario (a) y del segundo (b), ambas se transmiten juntas (c). El receptor, calculando la correlación cruzada de la señal recibida con el código del primer usuario es capaz de recuperar la señal portadora de información de éste y la señal del segundo usuario constituye una señal de interferencia de banda ancha cuya potencia en la banda de información resulta reducida por un factor igual al processing gain.

- Protección contra la interferencia multicamino (multipath fading): las señales de código poseen una función de autocorrelación que toma valores muy pequeños fuera del intervalo  $[-T_c, T_c]$ , siendo  $T_c$  la duración del chip. Esto significa que si llegan al receptor versiones de la señal por diferentes caminos (con diferentes fases, amplitudes y retardos), si los retardos relativos entre las señales  $\Delta t$  son tales que  $\Delta t > T_c$ , entonces el receptor es capaz de resolverlas y reconstruir la señal transmitida.
- Seguridad: la señal transmitida puede ser recuperada sólo si se conoce el código utilizado en transmisión.
- Inmunidad a la interferencia: si en el ancho de banda de transmisión se encuentra una señal de interferencia de banda estrecha, calculando la correlación cruzada entre ésta y una señal código se distribuye la potencia de la señal interferente en todo el ancho de banda de transmisión reduciendo la potencia de interferencia en el ancho de banda de información. La figura ilustra el caso de una señal con una interferente.



El proceso de despread permite distribuir la potencia de la señal interferente de banda estrecha (a) sobre todo el ancho de banda de transmisión (b) de forma que la potencia de interferencia dentro el ancho de banda de información resulta reducida por un factor igual al processing gain.

- Inmunidad al jamming: la propiedad anterior resulta válida también en el caso de interferencia producida intencionalmente (jamming).
- Baja probabilidad de interceptación: la señal a secuencia directa, ya que utiliza siempre todo el ancho de banda de transmisión, tendrá una densidad muy baja de potencia por unidad de ancho de banda. Esto hace muy difícil la detección de las señales DS-SS.

Además de las propiedades mencionadas, el DS-SS presenta una serie de ventajas específicas:

- La generación de la señal a transmitir es muy sencilla, pudiendo ser una sencilla multiplicación.
- Es posible la demodulación coherente de la señal de banda ancha.
- No es necesaria la sincronización entre usuarios.

Sin embargo, el esquema DS-SS resulta afectado por algunas limitaciones o inconvenientes:

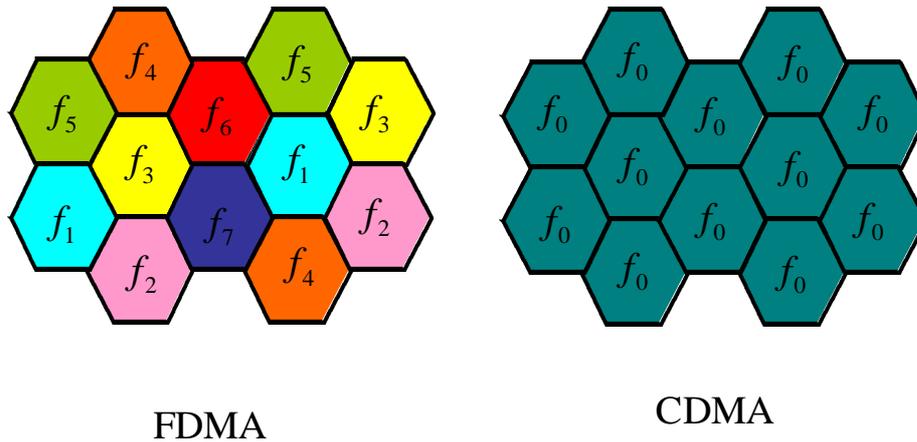
- Para la recepción correcta, es necesario adquirir y mantener la sincronización entre la señal código generada localmente y la señal recibida, manteniendo además el error por debajo del tiempo de chip. Además de resultar complejo en la práctica, esto limita prácticamente el ancho de banda máximo a 10-20 MHz.
- La potencia recibida desde usuarios cercanos a la estación base es mucho más grande que la potencia recibida desde usuarios lejanos. Como cada usuario transmite en todo el ancho de banda, un usuario cercano a la estación base creará una gran cantidad de interferencia perjudicando a los usuarios lejanos, haciendo la recepción de estos imposible. Este problema, conocido como near-far effect (efecto cercano-lejano) se puede solucionar aplicando un algoritmo de control de potencia al uplink así que idealmente todos los usuarios sean recibidos por la estación base con la misma potencia media. Dicho algoritmo, siendo de difícil realización práctica (debido a retardos en la realimentación, errores de medidas, etc.) resulta ser un elemento crítico en el diseño de un sistema DS-SS.

Procediendo de las consideraciones anteriores, resultan claras dos características fundamentales de los sistemas DS-SS:

- Capacidad limitada por interferencia auto generada: debido a la naturaleza del esquema de modulación, todas las señales moduladas comparten el mismo medio de transmisión en tiempo y en frecuencia. Desde el punto de vista de cada una de ellas, las demás constituyen interferencia, generada por el sistema, reducida por el processing gain. En la práctica, en caso de elevada carga de tráfico, la capacidad de cada celda resulta limitada por esta interferencia auto

generada y no por otros factores como el ruido. Así un sistema DS-CDMA resulta ser limitado por interferencia..

- Factor de reuso de frecuencia igual a 1: siendo el sistema limitado por interferencia autogenerada, y siendo en línea teórica inmune a otro tipo de interferencia, cada celda puede utilizar todo el ancho de banda disponible, ya que la naturaleza del esquema de modulación hace que las celdas vecinas no influyan en el buen funcionamiento del sistema. Entonces, la planificación frecuencial resulta innecesaria. La figura siguiente ejemplifica este principio.

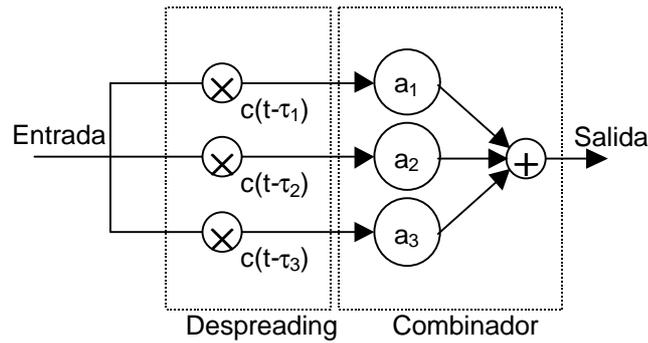


Desde el punto de vista del diseño y la realización de un sistema DS-CDMA, es necesario examinar diversos elementos de sistema y cómo éstos afectan las prestaciones generales.

#### 3.2.1.1.Receptor RAKE.

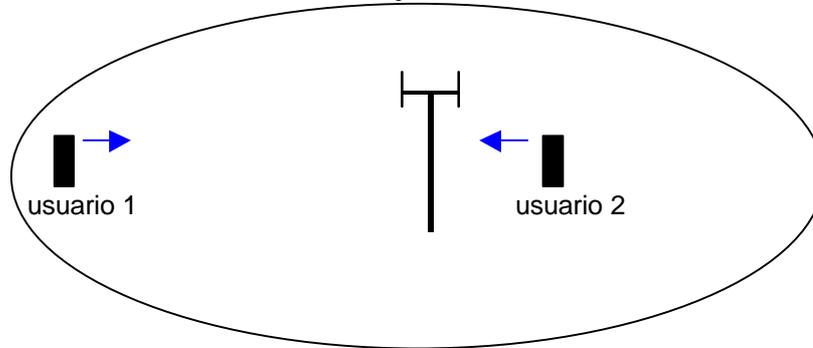
Las señales de espectro ensanchado con secuencia directa son muy adecuadas a canales de transmisión multicamino. En caso de que la señal transmitida sufra reflexiones múltiples debidas a obstáculos presentes en el camino de propagación, pueden llegar al receptor diferentes copias de la señal transmitida con diferentes retardos (dispersión multicamino, multipath fading). Sin embargo, el receptor es capaz de distinguir estas copias gracias a las propiedades de la autocorrelación de las secuencias de código. En concreto, desde el punto de vista de cada copia de la señal transmitida, cualquier otra copia con un retraso relativo mayor del tiempo de chip será tratada como interferencia y entonces suprimida por el proceso de despreading.

No obstante, las componentes múltiples recibidas se pueden combinar con un tipo de receptor llamado receptor RAKE. Este receptor consiste en un conjunto de correladores, uno por cada componente multicamino recibida. Cada correlador utiliza para el despreading una secuencia código alineada temporalmente con el retardo de la relativa componente. Sucesivamente se pueden combinar las señales obtenidas del despreading y obtener una señal recibida más fiel a la señal transmitida. Ya que cada componente sufre un desvanecimiento independientemente de las demás, este receptor beneficia de la llamada ganancia por diversidad. La figura ilustra un esquema de principio del receptor RAKE.



### 3.2.1.2. Control de Potencia

El control de potencia es esencial para el correcto funcionamiento de un sistema DS-CDMA. Como apuntado anteriormente, al compartir los usuarios el mismo ancho de banda es necesario controlar con precisión la potencia de cada uno de ellos para que no interfiera innecesariamente con los demás. Particularmente significativo es, en uplink, el problema conocido como efecto cercano-lejano (near-far effect).



En el ejemplo de la figura los dos usuarios transmiten con la misma potencia, de forma que el usuario 1 es recibido por la estación base con una potencia menor que la potencia con la que es recibido el usuario 2, debido a las mayores pérdidas de propagación (mayor distancia de la estación base) de 1 con respecto a 2. Si por ejemplo la estación base recibe los usuarios 1 y 2 con potencias  $p_2 = 10 p_1$ , entonces (considerando despreciable el ruido térmico)

$$\left(\frac{S}{N}\right)_1 = \frac{1}{10} \quad \left(\frac{S}{N}\right)_2 = 10$$

Si además suponemos que el  $S/N$  objetivo debe ser igual a  $1/10$ , entonces el usuario 1 se encontraría en condiciones límite y el sistema estaría en su máxima capacidad, ya que un nuevo usuario reduciría el  $S/N$  del usuario 1 debajo del nivel objetivo echándole fuera de la celda.

Por estas razones es necesario implementar un algoritmo de control de potencia para superar el problema cercano-lejano y maximizar la capacidad. Esto consiste idealmente en hacer que la potencia de transmisión de cada usuario sea tal que la estación base reciba las señales de todos los usuarios con la misma potencia. En el ejemplo, con un objetivo de  $S/N$  igual a  $1/10$  y control de potencia ideal se pueden soportar hasta 11 usuarios.

Existen dos técnicas de implementación para el algoritmo de control de potencia. El algoritmo más sencillo consiste en utilizar un esquema de bucle abierto (open loop) que deja al móvil el control de la potencia a transmitir. Esencialmente el móvil estima las pérdidas de propagación en downlink a partir de la potencia nominal transmitida por la estación base y la potencia recibida, y ajusta la potencia a transmitir en uplink de

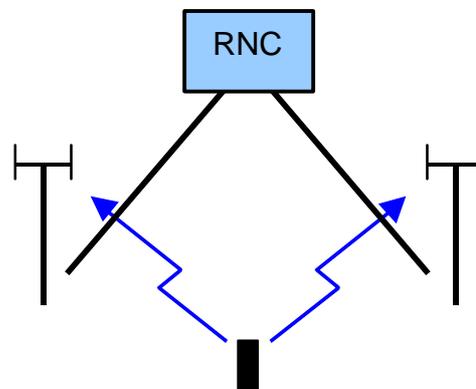
acuerdo con dichas predicciones. Asimismo existe un esquema más complejo y eficiente de tipo a bucle cerrado (closed loop) que involucra tanto la estación base como la estación móvil. Este algoritmo se basa en ajustar la potencia de transmisión para que el Frame Error Rate (FER) percibido por la estación base se mantenga próximo al valor requerido.

Se nota que en downlink idealmente no es necesario ningún tipo de control de potencia, ya que la estación base transmite todas las señales coherentemente en la misma banda, de manera que el móvil las recibe con la misma potencia, sin efectos de tipo cercano-lejano. En la práctica se implementa algún tipo de control de potencia también en downlink, sin requisitos muy estrictos, para minimizar la potencia total transmitida.

### 3.2.1.3. Handover

En un sistema de comunicaciones móviles de tipo celular, cuando un usuario se mueve del área de cobertura de una estación base a otra es necesario un proceso de traspaso (handover) del enlace de comunicación entre las dos estaciones base.

Siendo el factor de reutilización de frecuencia igual a 1 en CDMA, celdas vecinas utilizan las mismas frecuencias, o sea todo el ancho de banda disponible. Para reducir la interferencia generada por un móvil en las celdas vecinas se utiliza un mecanismo denominado soft handover. Éste permite que un móvil esté conectado a dos o más estaciones base simultáneamente. En uplink las dos estaciones base reciben la señal de la estación móvil, la decodifican y envían las dos copias decodificadas al RNC (Radio Network Controller), que escoge la de mayor calidad. En downlink el móvil se encarga de combinar las señales de las dos estaciones base tratándolas como componentes multicamino de la misma señal y combinándolas con su receptor RAKE.



Un móvil entra en estado de soft handover cuando la intensidad de la señal de una celda vecina a la celda actual supera cierto umbral pero es aún menor de la intensidad de señal de la celda actual. El soft handover, además de reducir la interferencia en las celdas vecinas, permite mejorar las prestaciones mediante ganancia por diversidad, llamada en este caso macro diversidad.

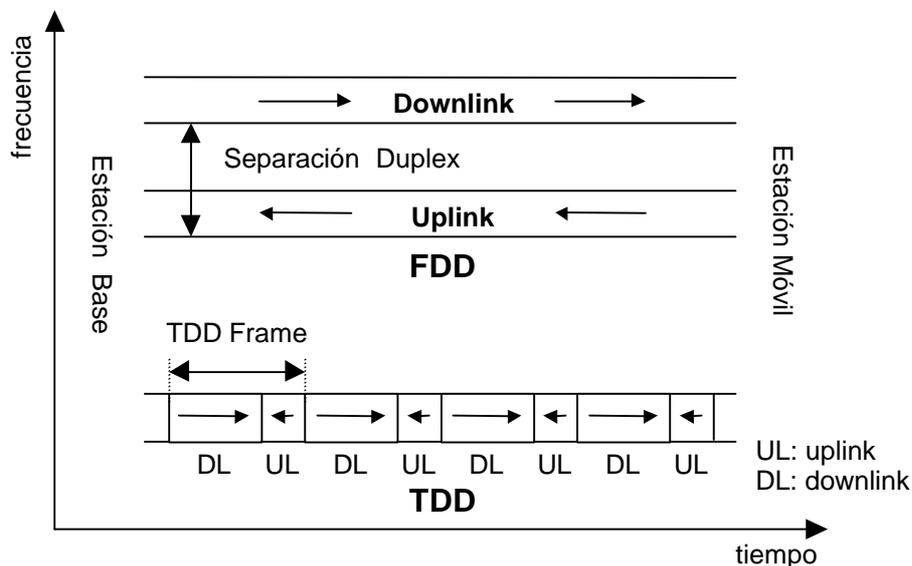
En caso de que las dos estaciones base constituyan dos sectores de una misma celda, el procedimiento se denomina softer handover y la recombinación en uplink tiene lugar en la misma estación base.

Además de los mecanismos de traspaso citados existe el hard handover correspondiente al traspaso entre diferentes frecuencias. El hard handover puede resultar necesario en caso de que el ancho de banda esté dividido en múltiples portadoras, por ejemplo para implementar una estructura de celdas de tipo jerárquico, o para permitir el traspaso entre un sistema de tercera generación y su antecesor de segunda generación y garantizar la llamada compatibilidad hacia atrás.

### 3.2.2. Duplex: FDD y TDD

Un sistema de comunicación se califica como dúplex si permite la transmisión de señales entre los dos extremos en ambos sentidos al mismo tiempo. En los sistemas móviles, típicamente el dúplex se realiza dividiendo el ancho de banda en dos porciones simétricas y reservando una porción para el uplink y otra para el downlink. Esta solución se denomina Frequency división Duplex (FDD, dúplex por división de frecuencia) y conceptualmente consiste en un esquema FDMA para multiplexar las señales de uplink y downlink. Esta es la elección de el estándar GSM. Típicamente las dos subbandas de uplink y downlink no son adyacentes sino separadas por una distancia en frecuencia llamada separación dúplex.

Asimismo, es posible realizar un esquema de dúplex basado en TDMA. Esto se realiza con una estructura de tramas temporales (TDD frames), cada una dividida en Time Slots, y utilizando unos de estos para el uplink y los demás para el downlink. Este mecanismo se denomina Time división Duplex (TDD, dúplex por división de tiempo). La figura esquematiza las diferencias fundamentales entre FDD y TDD.



FDD es, históricamente, el método utilizado para dúplex en sistemas de comunicación. Con respecto a esta solución, el TDD presenta varias peculiaridades:

- El TDD permite utilizar de forma adecuada porciones no pareadas del espectro, donde sería imposible identificar dos porciones separadas para uplink y downlink con esquema FDD
- Variando el número de Time Slots asignados al uplink o al downlink se puede realizar enlaces de tipo asimétrico, que permiten más flexibilidad en la repartición de capacidad entre downlink y uplink (por ejemplo conexiones a Internet).
- Al compartir uplink y downlink el mismo canal físico, basándose en la señal recibida el terminal puede estimar también los parámetros del canal en uplink y entonces un simple algoritmo de control de potencia de tipo bucle abierto garantiza prestaciones adecuadas también en uplink.
- La estructura de tramas temporales genera interferencia electromagnética, en forma de impulsos, que puede determinar problemas de compatibilidad electromagnética. Para que estas perturbaciones no afecten el altavoz y resulten audibles, es necesario utilizar una trama de duración máxima  $T_F = 10$  ms, que en

la práctica limita la máxima velocidad de los usuarios a valores alrededor de 10 Km/h (con frecuencia de portadora de  $f = 2$  GHz)

En situaciones practicas puede ser viable el uso de TDD en hot spots, o sea en zonas de elevada demanda de tráfico, sin que las celdas TDD sean adyacentes entre sí. De esta forma se elimina la necesidad de sincronismo entre celdas vecinas y se ofrece la flexibilidad de capacidad típica del TDD en las zonas donde es realmente útil. Además el TDD es limitado a usuarios estáticos o de baja movilidad. Todo esto hace del TDD el esquema ideal para pico celdas aisladas, destinadas a usuarios estáticos o de baja movilidad con una elevada demanda de tráfico, dentro de un entorno de tipo FDD que garantice la cobertura continua del territorio.

### 3.2.3. Capacidad

En la literatura existen varios modelos de capacidad de un sistema CDMA. Sin embargo, uno de los modelos más sencillos se basa en estimar la capacidad basándose en el nivel de interferencia generada por los usuarios en la banda. La capacidad efectiva depende en realidad de muchos otros factores como la demodulación de receptor, la precisión del algoritmo de control de potencia, y la potencia de interferencia real introducida por otros usuarios en la misma celda y en las celdas vecinas.

#### 3.2.3.1. Celda aislada, un usuario

En cualquier esquema de modulación de tipo digital, la métrica fundamental para evaluar las prestaciones ofrecidas es la relación ente la energía por bit y la densidad espectral de potencia de ruido,  $E_b/N_0$ . Siendo el caso de una señal binaria y de ruido térmico, resulta que:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N/W} = \left( \frac{S}{N} \right) \cdot G_p$$

con  $S$  potencia media de la señal moduladora,  $T$  tiempo de bit,  $R = 1/T$  bit rate de información,  $N = N_t W$  la potencia de ruido total,  $N_t$  la densidad espectral de ruido térmico y  $W$  el ancho de banda de transmisión. La ecuación anterior constituye una relación fundamental en CDMA ya que relaciona el cociente  $E_b/N_0$  con la relación señal ruido de la señal recibida  $S/N$  y el processing gain  $G_p$ , y resulta ser válida también en casos generales.

#### 3.2.3.2. Celda aislada, multiusuario

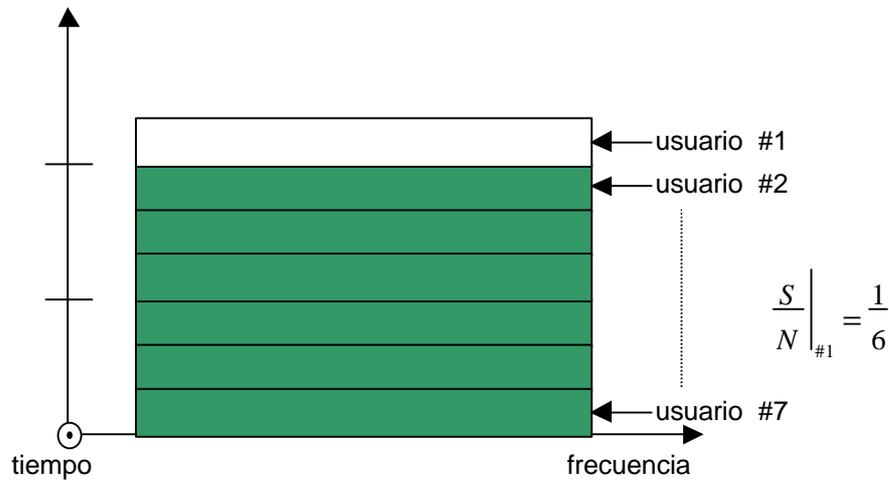
Siendo el uplink el enlace que típicamente limita la capacidad total del sistema, es interesante proceder a un análisis más detallado de éste. En este caso se deberá considerar que  $N_0 = N_t + I_{intra}$ , siendo  $I_{intra}$  la interferencia intra-celda, generada por los demás usuarios situado dentro de la celda y que contribuye a incrementar la componente de ruido térmico.

Asumiendo control de potencia ideal, o sea que la estación base reciba todas las estaciones móviles con la misma potencia  $S$ , y suponiendo para todos el mismo bit rate de información  $R$ , la relación señal ruido para un usuario se puede escribir como:

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{WN_t + (M-1)S} = \frac{1}{M-1 + \frac{WN_t}{S}}$$

donde  $M$  es el numero total de usuarios en la banda. Este resultado es coherente con la hipótesis de sistema limitado por interferencia, que implica que la potencia total de

interferencia en la banda sea igual a la suma total de la potencias de usuario. La figura ilustra estos conceptos en el caso de 7 usuarios sin ruido térmico.



simplificando la última ecuación resulta:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1 + \frac{WN_t}{S}} \cdot \frac{W}{R} \xrightarrow{S \gg WN_t} \frac{1}{M-1} \cdot \frac{W}{R}$$

donde  $M$  es el número total de usuarios en la banda y la segunda expresión es válida en la hipótesis de  $WN_t$  despreciable con respecto a  $S$ .

Resolviendo para el número de usuarios:

$$M = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_0}$$

### 3.2.3.3. Entorno multicelda

Este resultado tiene validez en el caso ideal de celda aislada, ya que ha sido obtenida implícitamente bajo esta hipótesis. Considerando una celda  $C$  rodeada por otras celdas, las señales de los usuarios de éstas se propagarán también dentro de  $C$  y serán recibidas por la estación base de  $C$  en forma de interferencia adicional a la interferencia intra-celda  $I_{intra}$ . Entonces,  $C$  será cargada por la interferencia inter-celda  $I_{inter}$  procedente de los usuarios de las celdas vecinas. Debido a las mayores pérdidas de propagación que las señales sufren para llegar a  $C$  desde las celdas vecinas, suponiendo una distribución de tráfico uniforme se puede suponer que esta interferencia inter-celda sea una fracción  $f$  (fractional loading factor) de la interferencia intra-celda. Así podemos obtener:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{(M-1)(1+f)} \cdot \frac{W}{R}$$

Resolviendo para el número de usuarios  $M$ , en el caso de  $M$  grande ( $M-1 \approx M$ ),

$$M_{pole} \cong \frac{W/R}{E_b/N_0} \cdot \frac{1}{1+f} = \frac{1}{(S/N)(1+f)}$$

En este caso  $M$  se denomina pole capacity y representa la máxima capacidad teórica de la celda, o sea el máximo número de usuarios que pueden estar simultáneamente conectados bajo las hipótesis consideradas.

Con esto podemos sacar varias conclusiones acerca de la capacidad en un sistema DS-CDMA:

- La capacidad, o sea el número  $M$  de usuarios simultáneos, es directamente proporcional a la ganancia de procesamiento  $G_p$  del sistema
- El valor de  $E_b/N_0$  se fija de manera que el enlace pueda garantizar un bit error rate aceptable.
- La capacidad es inversamente proporcional al  $E_b/N_0$  requerido, de forma que cuanto más bajo el  $E_b/N_0$  mínimo, tanto más alta la capacidad
- Es posible incrementar la capacidad si se reduce la carga procedente de usuarios de celdas vecinas.

#### 3.2.3.4. Factor de Carga

Todas las ecuaciones anteriores suponen un control de potencia ideal. Sin embargo, en la práctica la potencia de transmisión  $S$  de los móviles resulta limitada por la máxima potencia del transmisor. Entonces, al aumentar el número de usuarios, debido al efecto cercano-lejano y al mecanismo de control de potencia utilizado para eliminar éste, los usuarios más lejanos de la estación base, o sea al borde de la celda, recibirán el comando de transmitir con una potencia superior a su potencia máxima. Entonces, no pudiendo cumplir con los comandos de control de potencia, el  $E_b/N_0$  bajará a niveles inaceptables y se cortará la conexión. Esto equivale a una reducción del rango de celda efectivo, y es conocido en literatura como fenómeno de cell breathing.

Para comprender mejor la relación existente entre capacidad y cobertura es conveniente modificar la ecuación  $\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{(M-1)(1+f)} \cdot \frac{W}{R}$ , en el caso de  $M$  grande ( $M-1 \approx M$ ):

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{(1+f)M + \frac{WN_t}{S}} \cdot \frac{W}{R}$$

$$\frac{\frac{E_b}{N_0}}{\frac{W}{R}} = \frac{1}{(1+f)M + \frac{WN_t}{RE_b}}$$

El primer miembro de la ecuación corresponde a la relación señal ruido. En el segundo miembro el factor

$$q = \frac{RE_b}{WN_t} = \frac{S}{WN_t}$$

equivale a la potencia recibida por la estación base de un usuario dado,  $RE_b$ , normalizada con respecto a la potencia de ruido térmico total,  $WN_t$ . Substituyendo y despejando con respecto a  $q$

$$\frac{S}{N} = \frac{q}{qM(1+f)+1}$$

$$q = \frac{S/N}{1 - M(1+f)(S/N)}$$

El término

$$\mathbf{h} = M(1+f)(S/N)$$

constituye el llamado factor de carga del sistema ya que reúne todos los factores que generan interferencia en el sistema. Utilizando la definición de pole capacity se deduce que

$$\mathbf{h} = M(1+f)(S/N) = \frac{M}{M_{pole}}$$

así que  $\mathbf{h}$  es simplemente el número de usuarios normalizado con respecto al número máximo de usuarios, que entonces corresponde a  $\mathbf{h}=1$ .

Sustituyendo  $\mathbf{h}$ , finalmente se obtiene

$$q = \frac{S/N}{1-\mathbf{h}}$$

Desde el punto de vista físico,  $q$  describe el comportamiento del sistema al aumentar el factor de carga  $\mathbf{h}$ . Cuando  $\mathbf{h}=0$  (celda sin carga), correspondiente al caso de celda aislada con un usuario, se obtiene  $q=S/N$ , o sea vale la ecuación  $\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N/W} = \left(\frac{S}{N}\right) \cdot G_p$ . Cuando  $\mathbf{h} \rightarrow 1$  (celda con carga máxima),  $q \rightarrow \infty$ . Esto significa que el terminal móvil debería transmitir con potencia infinita para garantizar el valor de  $E_b/N_0$  necesario. De otra manera, Al subir  $\mathbf{h}$  el algoritmo de control de potencia llega a ordenar a los móviles transmitir con sus máximas potencias hasta que los usuarios más lejanos no pueden transmitir con la potencia necesaria para que la estación base los reciba con el  $S/N$  necesario y pierden la conexión (cell breathing).

En sistemas reales no es aconsejable alcanzar un número de usuarios conectados a una celda próximos a la pole capacity. Las razones a la base de esta limitación están en la inestabilidad que se genera en el sistema, debida al algoritmo de control de potencia y las limitaciones en potencia de los móviles. Entonces, en la práctica se fija un valor de  $\mathbf{h}$  máximo para alcanzar la máxima capacidad compatible con la estabilidad del sistema. Típicos valores empíricos de compromiso entre estabilidad y capacidad caen en el intervalo [0,6 0,7]. Fijado el  $\mathbf{h}$  máximo, los protocolos de gestión de los recursos radio se encargan de mantener el valor de  $\mathbf{h}$  por debajo del máximo, denegando el acceso de un nuevo usuario (control de acceso) o volviendo a negociar la calidad de servicio de los usuarios ya servidos (control de congestión).

### 3.2.3.5. Extensión al caso multiservicio

El caso multiservicio, con aplicaciones de usuario con diferentes bit rate, resulta de difícil tratamiento matemático. En la práctica se utilizan herramientas software de planificación que calculan capacidad y cobertura a partir de las fuentes de interferencia, o sea de los usuarios, y calculando con un modelo numérico el valor de interferencia generada y capacidad y cobertura correspondientes.

A nivel de principio cualquier análisis procederá de una expresión generalizada del factor de carga que tenga en cuenta las contribuciones de interferencia de los diferentes servicios, del tipo

$$\mathbf{h} = (1+f) \sum_s M_s (S/N)_s$$

donde cada servicio  $s$  contribuye a la interferencia según el número de usuarios (canales) activos  $M_s$  y la relación señal ruido  $(S/N)_s$  apropiada para el servicio.

### 3.2.4. Balance de Enlace

En el cálculo del balance de enlace de un sistema DS-CDMA con el objetivo de obtener una estimación del radio de celda, destacan algunos elementos peculiares que difieren del caso DCS-1800. En detalle cabe destacar las siguientes diferencias:

- Potencia media por canal: en DS-CDMA la potencia media corresponde a la máxima, ya que no hay Time Slots que limiten la actividad del transmisor a la octava parte del tiempo
- Relación  $E_b/N_0$ : este valor depende del tipo de servicio considerado y de toda la cadena de transmisión de manera que se obtienen valores estimados de esta relación a través de simulaciones numéricas
- Sensibilidad del receptor: en este caso la mínima señal a la entrada del receptor que garantiza el  $E_b/N_0$  objetivo se expresa como

$$P_{RX,min} = kT + NF + 10\log(R) + E_b/N_0$$

donde  $R$  es el bit rate de información y  $NF$  el factor de ruido del receptor

- Margen de interferencia: en DS-CDMA la interferencia es generada por el sistema mismo. En downlink este valor es constante, ya que las señales se transmiten coherentemente; en uplink el margen a incluir por interferencia depende del factor de carga del sistema  $h$  según la expresión

$$IM = 10\log\left(\frac{1}{1-h}\right)$$

- Ganancia por macrodiversidad: este factor es debido al mecanismo de soft handover de DS-CDMA y se incluye en el balance.
- Margen de control de potencia: necesario para que el algoritmo de control de potencia pueda todavía controlar la potencia de transmisión del móvil cuando éste se encuentra al borde de la celda para poder compensar el desvanecimiento rápido de Raileigh.

Entonces el balance de enlace resulta depender de factores variables típicos del esquema de modulación, en especial modo el bit rate de información y el  $E_b/N_0$  objetivo (ambos dependientes del tipo de servicio) y el factor de carga del sistema. La tabla es un ejemplo de cálculo para  $h=0.7$  y 3 servicios, voz (13 Kbps), datos de media velocidad a conmutación de circuitos (Low Constraint Delay data, LCD 144 Kbps) y datos de elevada velocidad a conmutación de paquetes (Unconstrained Delay Data, UDD 384 Kbps), junto con el balance de enlace para DCS-1800 para permitir una comparación. El escenario considerado es un escenario de tipo interior de vehículo, con velocidad máxima de 120 Km/h y entorno típico de carreteras.

Parámetros	Unidad	Voz		LCD (circuitos)		UDD (paquetes)		GSM 1800	
Bit rate usuario	Kbps	13		144		384		13	
Ancho de banda portadora	kHz	5000		5000		5000		200	
Dirección del enlace	-	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up
Pot. Máx. por TCH	dBm	20,62	21	17,30	21	24,92	24	39,00	30
Pérdidas Tx (cables, conectores)	dBm	2	0	2	0	2	0	2	0
Ganancia de Antena Tx	dBi	18	0	18	0	18	0	18	0
EIRP para canal de tráfico	dBm	36,62	21	33,30	21	40,92	24	55,00	30
Ganancia por diversidad de antena	dB	0	0	0	0	0	0	0	4
Ganancia de antena Rx	dBi	0	18	0	18	0	18	0	18
Pérdidas Rx (cables, conectores)	dB	0	2	0	2	0	2	0	2
Factor de ruido receptor	dB	5	5	5	5	5	5	10	5
Densidad espectral ruido térmico	dB/Hz	-174	-174	-174	-174	-174	-174	-174	-174
Bit rate	dBHz	41,14	41,14	51,58	51,58	55,84	55,84	53,00	53,00
Eb/No objetivo	dB	8,65	6,8	5,6	2,3	5,6	2,45	11	11
Margen de realización	dB	1	1	1	1	1	1	0	0
Sensibilidad del receptor	dB	-118,21	-120,06	-110,82	-114,12	-106,56	-109,71	-100,00	-105,00
Carga del sistema	%	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7	NA	NA
Margen de interferencia	dB	3	5,23	3	10,00	3	5,23	0	0
Margen de control de potencia	dB	2	2	2	2	2	2	0	0
Ganancia de macrodiversidad	dB	5	5	5	5	0	0	0	0
Body Loss	dB	3	3	1	1	1	1	3	3
Log Normal Fading Marging	dB	4	4	4	4	4	4	4	4
Pérdidas de penetración (vehículo)	dB	8	8	8	8	8	8	8	8
Pérdidas máximas de propagación	dB	139,83	139,83	131,12	131,12	129,48	129,48	140,00	140,00