

A large, bold, black letter 'M' is positioned on the left side of the page. It is set against a dark, textured rectangular background that has a grainy, stippled appearance. The letter itself is solid black and has a classic serif font style.

# Multiplexación CDMA para Comunicaciones Móviles

---

Juan ■ Guillermo ■ Lalinde ■ P.

**L**os sistemas móviles celulares, como su nombre lo indica, permiten a un usuario recibir y realizar llamadas telefónicas sin necesidad de estar conectado físicamente a la red telefónica convencional. La transmisión de la información se realiza vía radio y puede ser analógica o digital. Dichos sistemas están compuestos por un conjunto de estaciones, también denominadas celdas, de poca cobertura. En cada estación hay un receptor y un transmisor de baja potencia. Las estaciones, además de estar conectadas entre sí, están conectadas a un centro de conmutación inteligente que se encarga de transferir las llamadas entre celdas. El abonado utiliza un equipo de radio móvil, denominado teléfono celular, que

---

Juan Guillermo Lalinde P. Profesor del departamento de Informática y Sistema, Universidad EAFIT.

le permite comunicarse con una de las estaciones.

La división en celdas permite utilizar mejor el recurso más limitado: El espectro electromagnético. En un sistema de comunicaciones vía radio, los usuarios compiten por las frecuencias disponibles. Es por esto que uno de los principales problemas que tiene que resolver un sistema de comunicaciones móviles es sincronizar el acceso simultáneo de usuarios al mismo tiempo. La solución al problema del acceso múltiple tiene grandes implicaciones desde el punto de vista económico pues limita el número de usuarios que pueden utilizar el sistema y por lo tanto, las utilidades que se obtienen.

En sistemas de radio móviles celulares el problema del acceso múltiple se puede resolver utilizando varios esquemas de acceso múltiple: Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA - **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess), por división de tiempo (TDMA - **T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) y por división de código (CDMA - **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess). La selección del esquema de acceso múltiple se hace básicamente buscando ampliar la capacidad del sistema celular, y ésto se debe al hecho de que las comunicaciones vía radio se están popularizando y el espectro electromagnético disponible es limitado. Los esquemas de acceso múltiple buscan primordialmente permitir que varios usuarios del sistema celular tengan acceso simultáneamente al canal de comunicaciones. La capacidad de un esquema de acceso múltiple se mide en número de usuarios que pueden compartir

En un sistema de comunicaciones vía radio, los usuarios compiten por las frecuencias disponibles. Es por esto que uno de los principales problemas que tiene que resolver un sistema de comunicaciones móviles es sincronizar el acceso simultáneo de usuarios al mismo tiempo.

simultáneamente un canal con un ancho de banda fijo. Como es obvio, es preferible un esquema de acceso que permita más usuarios pues se hace un uso más eficiente del espectro.

En teoría, si se tiene un canal con un ancho de banda  $x$  que se quiere compartir entre diferentes usuarios que requieren cada uno un ancho de banda  $b$ , se pueden obtener  $x/b$  usuarios simultáneamente en el canal, independiente del esquema de acceso múltiple que se utilice. En la práctica esto no es cierto. Los usuarios requieren un ancho de banda  $b$  determinado, pero también requieren que la comunicación tenga una calidad mínima la

cual va a estar determinada por la relación señal/ruido que se pueda obtener. Para obtener la calidad adecuada tenemos que recurrir a separar los canales (FDMA) o a establecer mecanismos de sincronización que

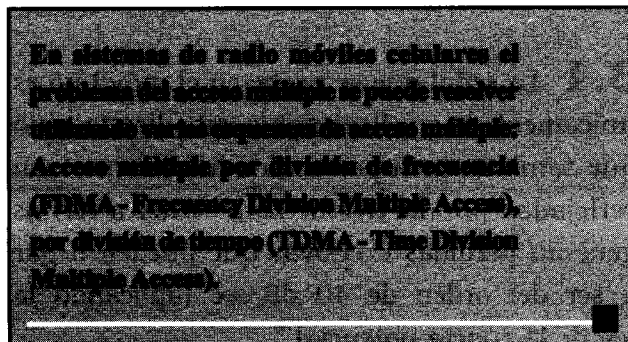
garanticen la calidad de la comunicación (TDMA).

## 1. ELEMENTOS CLAVES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA CELULAR

1. **Interferencia cocanal:** Es la interferencia producida por células cercanas que están reutilizando las mismas frecuencias para la comunicación. La distancia mínima entre dos celdas depende de un factor de reducción de interferencia cocanal, que es diferente para cada sistema, y del radio de las celdas.
2. **Handoffs:** Es una característica única de los sistemas celulares que consiste en que si un móvil cruza de una célula a otra en medio de una conversación, ésta no debe afectarse

por este hecho. Minimizar los **handoffs** y garantizar que los que se den sean exitosos es una tarea muy importante para los diseñadores de sistemas celulares.

3. **Gestión de frecuencias:** Tomando como base la distancia mínima entre células, se puede obtener el número de células  $K$  que van a conformar un grupo. El número total de canales que se tienen disponibles se divide por  $K$  para obtener el número de canales disponibles por células. La gestión de frecuencias consiste en definir la forma como se van a agrupar las células y como se van a distribuir los canales disponibles entre ellas.
4. **Asignación de frecuencias:** Es el proceso mediante el cual se le asigna una frecuencia específica, de las disponibles en una célula, a una llamada. Se asignan diferentes frecuencias a diferentes llamadas.
5. **Control de potencia:** Se debe hacer en ambas direcciones. De la base al móvil, se hace con el fin de minimizar la interferencia que genera la base sobre las células vecinas. Del móvil a la base se realiza con el fin de evitar que los móviles que están cerca de la base generen una señal tan potente que impida a la base recibir información de los móviles lejanos.
6. **Incremento de la capacidad:** Se puede realizar mediante la sectorización utilizando antenas direccionales, o reduciendo el tamaño de la célula.



## 2. ESQUEMAS DE ACCESO MÚLTIPLE

Aunque no son todos los esquemas posibles, en la telefonía celular se utilizan FDMA, TDMA y CDMA. Vale la pena notar que en el concepto mismo de la telefonía celular hay implícito un esquema de acceso múltiple por división de espacio (SDMA - **Space Division Multiple Access**), que consiste en dividir el espacio en unidades independientes (en telefonía celular las llamamos células) cada una de ellas con una antena (estación base) encargada de atender todas las comunicaciones en su área de cobertura.

### 2.1 FDMA

Consiste en dividir un canal con un ancho de banda específico en varios canales virtuales con un ancho de banda menor. Se asigna a cada uno de éstos una frecuencia específica, la cual debe estar dentro del rango de frecuencias que constituyen el canal total. En este esquema, a cada comunicación se le asigna un canal virtual particular. El móvil y la base deben filtrar la información recibida de tal manera que sólo escuchen la conversación que están llevando a cabo. Este esquema de acceso es muy común. De hecho se utiliza en todos los sistemas para dividir el espectro de frecuencias en dos canales: Un canal que lleva información de la base al móvil y que se llama **forward-link**, y un canal que lleva información del móvil a la base y que es el **reverse-link**.

El esquema de acceso múltiple FDMA es el único que puede ser utilizado en telefonía celular analógica, aunque ésta no es su única aplicación. También puede ser utilizado para telefonía celular digital.

## 2.2 TDMA

Consiste en dividir un canal con ancho de banda determinado en ranuras de tiempo, de manera que los canales virtuales se crean asignando a cada comunicación una ranura de tiempo. Si se tiene, por ejemplo, un canal de 30 Khz y lo dividimos en tres ranuras de tiempo, podemos enviar información de tres comunicaciones que utilicen cada una 10 Khz. La primera comunicación utilizaría siempre la primera ranura, la segunda comunicación la segunda y así sucesivamente. Por el canal de comunicaciones se transmiten en secuencia la primera ranura, la segunda, la tercera, de nuevo la primera, la segunda, etc.

El esquema de acceso múltiple TDMA sólo puede ser utilizado en telefonía celular digital. Requiere que se implementen mecanismos de sincronización, especialmente en el enlace móvil-base, para garantizar que cada móvil está transmitiendo durante el tiempo que le corresponde y que no va a interferir con los otros móviles que están utilizando otras ranuras. En el enlace base-móvil la sincronización se requiere para garantizar que cada móvil esté procesando únicamente la información que va dirigida hacia él.

Normalmente se aplica en conjunto con el FDMA. Se utiliza FDMA para dividir el canal físico en varios canales lógicos, y cada canal lógico se multiplexa utilizando TDMA.

## 2.3 CDMA

En este esquema de acceso múltiple, los diferentes usuarios transmiten al mismo tiempo utilizando la misma frecuencia. Las

distintas comunicaciones son diferenciadas al codificar la información de acuerdo con una clave particular. El emisor, antes de enviar la información, divide cada **bit** en varias unidades llamadas **chips** y codifica el **bit** antes de enviarlo. Esta técnica se denomina secuencia directa y es una de las técnicas de espectro ensanchado. Dado que el objetivo de este trabajo es presentar el CDMA, más adelante se entrará en más detalles sobre su funcionamiento.

Vale la pena notar que mientras que los esquemas de acceso múltiple FDMA y TDMA tienen una capacidad limitada por el ancho de banda disponible y el ancho de banda de cada uno de los canales múltiples deseados, en el caso del CDMA no existe este limitante. En el CDMA, como se verá más adelante, se pueden adicionar nuevos usuarios teniendo presente que el precio que se paga es la pérdida de calidad en la comunicación.

## 3. PROPAGACIÓN DE ONDAS DE BANDA ESTRECHA

La señal es transmitida de una base a un móvil y se propaga sobre un terreno con una configuración particular. Las características del terreno afectan la forma como se propaga la onda. Como la antena de un móvil está muy cerca de la tierra, se producen tres efectos principales:

**3.1** La señal que se recibe en el móvil no es únicamente la que llega por la ruta directa, sino que también incluye señales fuertes que son reflejadas por la tierra. Estas rutas alternas generan pérdidas excesivas que pueden llegar a ser del orden de 40 dB/sec (aplicando la ley de la cuarta potencia).

**3.2** Cuando la antena de la unidad móvil está a muy poca altura, las estructuras construidas por el hombre que la rodean generan desvanecimientos multiruta en la señal recibida, llamados desvanecimiento **Rayleigh**. Dichos desvanecimientos causan ráfagas de errores en la comunicación.

**3.3** Hay un efecto debido a que la transmisión se hace en un medio que es dispersivo en el tiempo. Esto quiere decir que no sólo se reciben símbolos, sino que adicionalmente se reciben muchos ecos de éstos. Estos retardos de tiempo producen la interferencia entre símbolos (**ISI - InterSymbol Interference**). Para evitar dicha interferencia se debe mantener una velocidad de transmisión que sea inferior al inverso del retardo, o equipar el móvil con equalizadores que permitan reducirla.

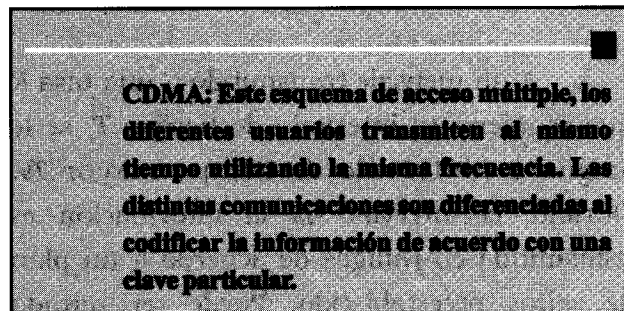
#### **4. PROPAGACIÓN DE ONDAS DE BANDA ANCHA**

La principal diferencia con la propagación de ondas en banda estrecha radica en el hecho de que el ancho de banda es mucho mayor y ésto va a producir un comportamiento diferente.

**4.1** Las pérdidas en la ruta de propagación son aproximadamente las mismas que en banda estrecha, siempre y cuando se cumpla la condición de que el ancho de banda no sea mayor que la mitad de la frecuencia de la portadora, lo cual es cierto en la mayoría de los casos.

**4.2** Para el desvanecimiento multiruta, se cumple que a mayor ancho de banda, menor es el desvanecimiento producido.

**4.3** En cuanto a los retardos, como éstos son específicos para el tipo de ambiente en el cual se esté realizando la comunicación, se cumple que las señales de banda ancha proporcionan mayor ganancia en diversidad en las áreas urbanas que en las áreas suburbanas.



#### **5. TÉCNICAS DE ENSANCHADO EN MODULACIÓN**

Estas técnicas tienen su origen en los sistemas militares y buscan evitar que la señal pueda ser interferida. En términos generales existen dos técnicas básicas: Ensanchado de espectro (**spread spectrum**) y ensanchado de tiempo (**time hopping**).

##### **5.1 TÉCNICAS DE ENSANCHADO DE ESPECTRO**

- **Secuencia Directa (Direct Sequence):** Cada **bit** de información se representa por una secuencia grande de **bits** codificadores llamados **chips**. Si se tiene una señal de 10 Khz y cada **bit** es codificado por 100 **chips**, el ancho de banda necesario para la transmisión de los **chips** es de 1 Mhz.
- **Salto de Frecuencia (Frequency Hopping):** Se asignan  $N$  canales a la comunicación y se va saltando entre las diferentes frecuencias

de acuerdo con un patrón de saltos predeterminado. Si tenemos una señal de 10 Khz y deseamos 100 canales, el ancho de banda necesario para transmitir la señal es de 1 Mhz.

## 5.2 TÉCNICAS DE ENSANCHADO DE TIEMPO

A un mensaje transmitido a una tasa  $R$  que requiere un intervalo de tiempo  $T$ , se le asigna un intervalo de tiempo mayor  $T_s$ . Durante el intervalo  $T_s$  la información es transmitida en ráfagas de acuerdo a un plan de saltos preestablecido. Puede ser mirado como el equivalente de los saltos de frecuencia pero realizado sobre ranuras de tiempo en vez de frecuencias.

## 6. CDMA - CODE DIVISION MÚLTIPLE ACCESS

CDMA proviene de utilizar las técnicas de espectro ensanchado, en particular secuencia directa. La idea general del proceso es muy simple: Dada una señal digital que se desea transmitir, se aplica la técnica de secuencia directa para obtener una señal digital con un ancho de banda mayor. Dicha señal es transmitida y el receptor recupera la señal original mediante el uso de un correlacionador y la misma clave que se utilizó para la transmisión. Los códigos que se usan, sobre todo en aplicaciones militares son códigos pseudoruido, los cuales deben tener, entre otras, las siguientes propiedades:

- **Balance:** Deben tener aproximadamente el mismo número de ceros y de unos

- **Sucesiones:** Al analizar las veces que aparecen ceros (unos) consecutivos, se debe tener aproximadamente  $\frac{1}{2}$  de secuencias de longitud 1,  $\frac{1}{4}$  de secuencias de longitud 2 y  $\frac{1}{8}$  de secuencias de longitud 3.
- Debe tener una correlación baja.

Es fácil apreciar que la razón de ser de estas características para los códigos es buscar que la señal sea lo más parecida posible a un ruido para quien no posea el código. Además, en el proceso de ensanchamiento se adiciona redundancia a la señal, de manera que es mucho más resistente a las interferencias. Esto nos permite condiciones óptimas para aplicaciones militares.

## 6.1 CAPACIDAD

La capacidad de un sistema se refiere a la cantidad de usuarios que pueden compartir simultáneamente el recurso físico del que se dispone (ancho de banda) manteniendo un nivel de calidad adecuado. En el caso de una comunicación que utiliza el esquema de acceso múltiple CDMA, se tiene que la interferencia en la comunicación proviene de dos fuentes diferentes: Una interna y una externa.

La interferencia externa proviene de las células que son vecinas y que están utilizando las mismas frecuencias. La interferencia interna proviene de las transmisiones que realizan los demás usuarios y que se están haciendo por el mismo canal, al mismo tiempo, con códigos diferentes.

A diferencia de los esquemas FDMA y TDMA que tienen una capacidad limitada, en el

CDMA la capacidad está limitada únicamente por la calidad de la comunicación que se desea prestar. Como todos los usuarios comparten la misma frecuencia al mismo tiempo, lo que ocurre es que al adicionar usuarios nuevos se produce más interferencia. Una pregunta lógica es: ¿Qué se puede hacer para reducir la interferencia, tanto interna como externa? Lo primero es aprovechar las características de las conversaciones telefónicas. Lo segundo es tratar de realizar gestión de potencia.

Las conversaciones telefónicas humanas se caracterizan porque el ciclo de actividad de la voz humana es del orden del 35% al 40%. Si los equipos transmisores detectan períodos de silencio y durante estos disminuyen la transmisión o simplemente no transmiten, se disminuye la interferencia interna del orden del 60% al 65%. CDMA es la única tecnología que saca provecho de este fenómeno.

En cuanto a la gestión de potencia hay que hacerla en ambos sentidos. Se debe regular la potencia que se está transmitiendo de la base al móvil para tratar de disminuir la interferencia externa. Igualmente, hay que regular la potencia que se está transmitiendo del móvil a la base. Esto se hace con el fin de que un móvil que esté muy cerca de la base no presente una señal tan potente que interfiera demasiado con la señal proveniente de equipos remotos. Dicho en otras palabras, la potencia de transmisión del móvil se debe gestionar de manera tal que en la base todos los móviles se reciban con igual intensidad. Esto trae como ventaja adicional mayor economía en la alimentación de los equipos móviles y una mayor duración de las baterías.

Un estudio comparativo entre la capacidad real (canales/célula) que ofrecen el TDMA, FDMA y CDMA muestra que con CDMA se obtiene capacidad veinte veces mayor que la de FDMA y cuatro veces mayor que la de TDMA.

## 6.2 VENTAJAS

1. Aprovecha la naturaleza de las conversaciones humanas para proporcionar mayor capacidad.
2. No requiere de un ecualizador. Basta con el correlacionador.
3. Sólo se requiere un radio por célula.
4. Como todas las células utilizan las mismas frecuencias, no hay necesidad de hacer cambio de frecuencias en el **handoff (hard handoff)**. Sólo hay que hacer cambio de códigos.
5. No se requieren los **bits** de guarda que hay entre las ranuras en TDMA.
6. Al sectorizar, por lo menos en teoría, se obtiene un incremento de la capacidad.
7. Menos desvanecimientos.
8. La transición es más fácil. En CDMA se utiliza un ancho de banda de 1.25 Mhz, el cual es equivalente al 10% del ancho de banda asignado a las compañías celulares, por lo que se puede hacer una transición lenta y adecuada.
9. Mayor capacidad.
10. No se requiere gestión ni asignación de frecuencias.
11. El efecto de adicionar un usuario extra sobre la calidad se distribuye entre todos los usuarios.
12. Puede coexistir con sistemas análogos.

**TABLA No. 1**  
**FUNCIONES DE CANALIZACIÓN**

PARÁMETRO	FUNCIÓN	NOTAS
Frecuencia	Divide el espectro en varias asignación de frecuencia de 1.23 Mhz.	Los enlaces <b>forward-link</b> y <b>reverse-link</b> están separados 45 Mhz.
Códigos Walsh	Separa los canales <b>forward-link</b> de los diversos usuarios en una misma célula.	Se asigna en la base. El código 0 es para el canal piloto, mientras que el 32 es para sincronización.
Código Largo	Separa los canales <b>reverse-link</b> de los diversos usuarios de una misma célula.	Depende del tiempo y de la identificación del usuario. Esta compuesto por una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS) de 43 <b>bit</b> y una máscara específica del usuario.
Códigos Cortos (también llamados secuencias en ensanche I y Q).	Separa diferentes celdas o sectores de celdas.	Los códigos I y Q son diferentes pero están basados en PRBS de 15 <b>bits</b> . Ambos códigos se repiten a intervalos pero de 27.667 ms. Las estaciones base se diferencian por los desplazamientos de tiempo de las secuencias cortas.

## 7. ESTÁNDAR PARA CELULARES DIGITALES CON CDMA (IS95)

El estándar IS95 ha sido definido por la TIA (Telecommunications Industry Association) de Estados Unidos, y es compatible con el plan de frecuencias existente en los Estados Unidos para la telefonía celular análoga. Las bandas especificadas son 824 Mhz - 849 Mhz para **reverse-link** y 869 Mhz - 894 Mhz para **forward-link**. Los canales están separados por 45 Mhz. La velocidad máxima de usuario es de 9.6 Kb/s, y se ensancha a un canal de 1.2288 Mchip/s. El proceso en ensanche es diferente para cada enlace. En el **forward-link** los datos son codificados con un código

convolucional (1/2), mezclados (**interleaved**), y se ensanchan con una secuencia de 64 **bits** (funciones de Walsh). A cada móvil se le asigna una secuencia diferente. Se proporciona, además, un canal piloto (código) para que cada móvil pueda determinar cómo actuar con respecto a la base. Este canal tiene mayor potencia que todos los demás y proporciona una base coherente que usan los móviles para demodular el tráfico. También proporciona una referencia de tiempo para la correlación del código.

En el **reverse-link** se utiliza otro esquema pues los datos pueden llegar a la base por caminos muy diferentes. Los datos son codificados con



un código convolucional (1/3). Después de mezclados, cada bloque de 6 **bits** se usa como un índice para identificar un código de Walsh. Finalmente se ensancha la señal utilizando códigos que son específicos del usuario y de la base.

El control de potencia se lleva a cabo en pasos de 1 dB, y puede ser de dos maneras: Una es tomar como referencia la potencia recibida de la estación base. La otra es recibir instrucciones de la base sobre el ajuste que se debe llevar a cabo.

Finalmente, vale la pena anotar que la señal que se transmite se modula utilizando la técnica QPSK filtrado de la base al móvil y QPSK filtrado con un desplazamiento del móvil a la base. En la **Tabla No. 1** se describen las funciones de canalización.

## **DESARROLLO DE UNA LLAMADA**

Cuando se enciende un móvil, éste conoce la frecuencia asignada para el servicio CDMA en el área local. Se sintoniza en dicha frecuencia y busca la señal piloto. Puede encontrar varias señales piloto provenientes de diferentes estaciones base, pero éstas pueden ser diferenciadas porque tienen diferentes desplazamientos de tiempo. El móvil selecciona la señal piloto más potente y establece referencias de tiempo y frecuencia a partir de ella.

Una vez realizado este proceso de selección de la base, el móvil comienza a demodular con el código Walsh 32 que corresponde al canal de sincronización. El canal de sincronización

contiene el valor futuro del registro de desplazamiento de código largo (42 **bits**). El móvil carga dicho valor en su registro y queda sincronizado con el tiempo de la estación base.

Adicionalmente se requiere que el móvil se registre en la base; de esta manera, ésta sabe que el móvil está disponible para recibir llamadas y cual es su ubicación. Cuando un móvil pasa de una zona a otra y no hay una llamada en curso, realiza un proceso de **idle state handoff**.

Cuando el usuario realiza una llamada, el móvil intenta contactar la estación base con un acceso de prueba. El código largo que se utiliza está basado en los parámetros de la celda. Si ocurre una colisión el móvil no recibe respuesta y espera un tiempo aleatorio antes de intentar de nuevo. Al establecer contacto con la estación base, esta le asigna un canal de tráfico mediante un código Walsh. A partir de este momento el móvil cambia el código largo por uno basado en su número de serie. El código Walsh se utiliza en el **forward-link**, mientras que el código largo se utiliza en el **reverse-link**.

Cuando un móvil comunicado con una base detecta otra señal piloto suficientemente potente, solicita un proceso de **soft handoff**. Al móvil se le asigna otro código de Walsh y otra temporización piloto. El móvil debe estar en capacidad de recibir ambas señales y combinarlas. Cuando la señal de la base original haya disminuido lo suficiente, el móvil solicita el fin del **soft handoff**.

Al finalizar una llamada, los canales se liberan. Cuando el móvil se apaga genera una señal registro de apagado que se envía a la base para indicar que ya no está disponible para llamadas.

## **CONCLUSIONES**

CDMA, como esquema de acceso múltiple, permite aumentar el número de usuarios que acceden simultáneamente al sistema, especialmente por ser el único sistema que aprovecha realmente las propiedades estadísticas de la voz. Sin embargo, debido a que todos los usuarios transmiten al mismo tiempo, requiere una sincronización muy precisa.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Whipple, David P. The CDMA Standard. Applied Microwave & Wireless, Winter 1994, pp.24-39.

Lee, William C. Overview of Cellular CDMA. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 40, No. 2, May 1991, pp. 291-302.

Gilhousen, Kelin S. et al. On the Capacity of a Cellular CDMA System. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 40, No. 2, May 1991, pp. 303-311.

Jung, Peter et al. Advantages of CDMA and Spread Spectrum Techniques over FDMA and TDMA in Cellular Mobile Radio Applications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 42, No. 3, August 1993, pp. 357-364.

Gudmondson, Björn et al. A comparison of CDMA and TDMA Systems. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Society 42nd VTS Conference, Vol. 2, 1992, pp. 732-735.

CDMA. Digital Cellular Standard (IS95). Wireless Systems and Standards. Lesson 10, pp. 316-320.

Llana, Andres. Wireless Communication: Technologies and Applications. Computer Technology Research Corp. October 1994.

Documentos obtenidos en Internet.