

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**



**INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE UN SISTEMA CELULAR
JERÁRQUICO CDMA POR LA ASIGNACIÓN A CELDAS BASADA EN
LA MOVILIDAD DE LOS USUARIOS**

TESIS

**Para Optar el Grado de Maestro en Ciencias
Mención: Telecomunicaciones**

PRESENTADO POR

FERNANDO TAGLE CARBAJAL

LIMA – PERÚ

2001

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE UN SISTEMA CELULAR
JERÁRQUICO CDMA POR LA ASIGNACIÓN A CELDAS BASADA EN LA
MOVILIDAD DE LOS USUARIOS

TESIS

Para Optar el Grado de Maestro en Ciencias
Mención: Telecomunicaciones

PRESENTADO POR

FERNANDO TAGLE CARBAJAL

LIMA – PERÚ

2001

Abstracto

En sistemas celulares, el número de canales es un parámetro limitado, por lo tanto el incremento de usuarios puede satisfacerse reduciendo la potencia de transmisión y el área de cobertura de las celdas. Sin embargo, el número de handoffs se incrementa y también la administración de tráfico. Estructuras de celdas jerárquicas (microceldas distribuidas dentro de macroceldas) permiten un buen balance entre el uso eficiente de canales disponibles mientras simultáneamente mantienen reducido el número de handoffs.

La presente investigación comprende no sólo el estudio y análisis de la ingeniería en sistemas celulares jerárquicos microcelda/macrocelda sino también la respectiva asignación de usuarios basada en su movilidad; para luego aplicar dicha asignación en sistemas celulares jerárquicos CDMA. Así, considerando el estudio anterior y las características de diseño de un sistema CDMA, se implementa un modelo, que luego de ser simulado en MATLAB es finalmente comparado con diseños equivalentes de otros sistemas.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INCREMENT OF CAPACITY OF A HIERARQUICAL CDMA CELLULAR
SYSTEM FOR CELL ASSIGNMENT BASED ON USERS MOBILITY

THESIS

REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER IN SCIENCE

FIELD: TELECOMMUNICATIONS

BY

FERNANDO TAGLE CARBAJAL

LIMA – PERÚ

2001

Abstract

In cellular systems, the number of channels is a limited parameter; therefore, users increase can be satisfied decreasing the transmit power and shrinking the cell coverage area. However, both, the number of handoffs and the offered traffic load grow. Hierarchical cell clustering (microcells overlaid with umbrella macrocells) shows good balance between the efficient use of idle channels while it simultaneously minimizes the handoff processing load.

This investigation embrace not only the study and analysis of parameters involved in the engineering of heterogeneous microcells/macrocells cellular systems, but also the respective channel assignment based on users mobility (high mobility users should be assigned to macrocells, while low mobility users should be assigned to microcells). Then, this cell selection procedure is applied to a hierarchical CDMA cellular system. Thus, considering the previous study and the design characteristics of a CDMA Network, a model is implemented, next it is simulated with MATLAB, and finally it is compared to equivalent designs of different systems.

CONTENIDO

PROLOGO	6
1 INTRODUCCION	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Formulación de la hipótesis	9
1.3 Descripción de la metodología de investigación	9
1.3.1 Documentación	9
1.3.2 Análisis y diseño	10
1.3.3 Simulación	10
1.3.4 Observaciones y conclusiones	10
2 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA CDMA	11
2.1 Introducción	11
2.1.1 Características del sistema CDMA	12
2.2 Términos del sistema CDMA	13
2.3 Especificaciones de frecuencia y canal	16
2.4 Límites de potencia de salida y control	19
2.5 Características de modulación	22
2.5.1 Canal Adelante CDMA	22
2.5.1.1 Codificador Convolutacional y Circuito de Repetición	27
2.5.1.2 Entremezclador por bloques (<i>block interleaver</i>)	28
2.5.1.3 Secuencia PN larga	28
2.5.1.4 Mezclador de datos (<i>data scrambler</i>)	29
2.5.1.5 Subcanal de control de Potencia	29
2.5.1.6 Cobertura Ortogonal	31
2.5.1.7 Modulación en Cuadratura	32
2.5.2 Canal Reversa CDMA	34
2.5.2.1 Codificador convolutacional y Repetición de símbolos	38
2.5.2.2 Entremezclador por bloques (<i>block interleaver</i>)	38
2.5.2.3 Modulación ortogonal	38
2.5.2.4 Transmisión a Velocidad de datos Variable	39

2.5.2.5	Dispersión por Secuencia Directa	41
2.5.2.6	Modulación en cuadratura	42
2.5.2.7	Canal de Acceso y Canal de Tráfico Reversa	42
2.6	Detección de mal función	45
2.7	Proceso de llamada	45
2.7.1	Estado de Inicialización de la estación móvil	47
2.7.2	Estado de Desocupado de la estación móvil	48
2.7.3	Estado de Acceso al Sistema	50
2.7.4	Estado de Control de la estación móvil en el Canal de Tráfico	50
2.8	Procedimientos de Handoff	51
2.8.1	Tipos de Handoff	51
2.8.2	Grupos Pilotos (<i>Pilot Sets</i>)	51
2.8.3	Requisitos de Piloto	52
2.8.4	Soft Handoff	53
3	INGENIERIA DE MICROCELDA EN SISTEMAS CELULARES CDMA	57
3.1	Introducción	57
3.1.1	Tipos de microceldas	58
3.1.2	Microceldas en el sistema CDMA	58
3.2	El Control de Potencia y el Límite de Celda	59
3.2.1	Control de potencia del enlace de reversa—la ecuación del control de potencia	59
3.2.2	Soft handoff y definición del límite de celda	62
3.2.3	El Control Piloto y la Condición de Handoff	63
3.3	Agrupamiento (<i>clustering</i>) Heterogéneo de Celdas	65
3.3.1	Parámetros que gobiernan el tamaño de la celda	65
3.3.2	Tamaño de la antena e inclinación del haz (<i>Beam Tilt</i>)	67
3.3.3	Directividad de la celda	68
3.3.4	Desensitización	69
3.4	Agrupamiento (<i>clustering</i>) de macroceldas – microceldas	71
3.4.1	Jerarquía Macrocelda – microcelda	71
3.4.1.1	Capacidad en Jerarquía Macrocelda – microcelda	71
3.4.2	Capacidad de una microcelda “ <i>Hot Spot</i> ” y de la Macrocelda	74
3.4.3	Capacidad de un agrupamiento (<i>cluster</i>) de microceldas	75

4 ANÁLISIS Y DISEÑO	77
4.1 Filosofía de diseño de un sistema celular CDMA	77
4.2 Elementos clave en el diseño de un sistema CDMA	77
4.2.1 Relación entre C/I y FER	78
4.3 Escenario de celdas uniformes	79
4.3.1 Para el enlace adelante	79
4.3.2 Para el enlace reversa	81
4.3.3 Diseño de un sistema CDMA	83
4.4 Determinación del umbral de movilidad	84
5 SIMULACIÓN	88
5.1 Modelos de simulación	88
5.2 Diagramas de flujo	92
5.3 Implementación de los modelos de simulación	95
5.3.1 Generación aleatoria de llegada de llamadas	95
5.3.2 Generación aleatoria de velocidad del móvil	95
5.3.3 Asignación de llamada a macrocelda o microcelda	96
5.3.4 Generación aleatoria del tiempo de ocupación de las llamadas	96
5.3.5 Almacenamiento del tráfico generado	98
5.3.6 Generación de llegada de llamadas de handoff	98
5.3.7 Liberación de canales ocupados en la macrocelda o microcelda	99
5.3.8 Cálculo de la probabilidad de Bloqueo	100
5.4 Análisis de los resultados de la simulación	100
6 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	109
6.1 Observaciones	109
6.2 Conclusiones	112

APENDICES

A ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA CELDA	A-1
A.1 Modelo de movilidad	A-1
A.2 Tiempos de permanencia en la celda	A-2

A.2.1	Tiempo de permanencia en la celda donde se inició la llamada	A-3
A.2.2	Tiempo de permanencia en una celda arbitraria	A-4
<u>B SELECCIÓN DE MICROCELDA–MACROCELDA</u>		A-8
B.1	Técnica de Promedio Exponencial	A-8
<u>C ESCENARIO DE CELDAS NO UNIFORMES</u>		A-11
C.1	Potencia de transmisión en los canales de enlace adelante	A-11
C.2	Potencia de transmisión en los canales de enlace reversa	A-13
<u>D COMPARACIÓN CON OTRAS TECNICAS</u>		A-16
D.1	Técnica de Tiempo Residual y técnica de <i>Offset</i> del Nivel de Potencia	A-16
<u>E PROGRAMAS EN MATLAB</u>		A-19
E.1	Simulación de Asignación de usuarios en un Sistema Jerárquico CDMA	A-19
E.2	Tasa de llegada de llamadas (Distribución Exponencial Negativa)	A-25
E.3	Tasa de Servicio (Tiempo de ocupación del canal)	A-25
<u>F ECUACIONES</u>		A-26
F.1	Velocidad media de los móviles en la microcelda	A-26
F.2	Valores óptimos de la velocidad umbral V_0	A-27
F.3	Función Densidad $f_X(x)$ y Función Distribución $F_X(x)$	A-28
BIBLIOGRAFÍA		A-30

PRÓLOGO

En los sistemas celulares, el número de canales es un parámetro limitado, por lo tanto el incremento de usuarios puede satisfacerse reduciendo la potencia de transmisión y el área de cobertura de las celdas. Sin embargo, el número de handoffs se incrementa y también la administración de carga. Estructuras de celdas jerárquicas (microceldas distribuidas dentro de macroceldas) permiten no solo el uso eficiente de canales disponibles, sino también mantienen reducido el número de handoffs.

Por otro lado, la asignación de usuarios basada en la movilidad de los usuarios implica que los móviles de movimiento rápido sean asignados a macroceldas, y usuarios de movimiento lento sean asignados a microceldas. Así, la presente investigación requiere por tanto del estudio y análisis de la ingeniería en sistemas celulares jerárquicos microcelda/macrocelada; y de la respectiva asignación de usuarios basada en su movilidad; para luego aplicar dicha asignación en sistemas celulares jerárquicos CDMA, y finalmente probar un modelo a través de una simulación.

La presente tesis se divide en 6 capítulos. El capítulo 1 comprende la Introducción, donde se plantea el problema, se presenta la formulación de la hipótesis y se describe la metodología de investigación.

El capítulo 2 presenta las características del sistema celular CDMA, donde además de definir los términos del sistema, se describen las características de modulación tanto del Canal Adelante como del Canal Reversa. Así mismo, este capítulo comprende el proceso de llamada y los procedimientos de handoff.

El capítulo 3 a su vez describe las características de la ingeniería de microceldas en sistemas celulares CDMA, mencionando los tipos de microceldas, y también el control de potencia necesario, el agrupamiento o *clustering* heterogéneo de celdas, y el agrupamiento de macroceldas – microceldas

El capítulo 4 proporciona los elementos clave en el diseño de un sistema CDMA, el escenario en el caso de celdas uniformes y la determinación del umbral de velocidad V_0 , necesario en la asignación de usuarios a celdas en base a su movilidad.

El capítulo 5 comprende la simulación realizada, describiendo primero el modelo utilizado. Este capítulo incluye tanto la implementación de los modelos respectivos con la descripción de las características propias del programa, como los diagramas de flujo y el análisis de los resultados de la simulación.

El capítulo 6 presenta no solo las comparaciones con otros estudios, sino también las ventajas y limitaciones de la simulación realizada. De igual manera, se indican las posibles mejoras que podrían realizarse al proyecto y las respectivas conclusiones.

Los apéndices A, y B presentan los análisis realizados por autores citados en las referencias bibliográficas. Debido a que la simulación realizada abarca la distribución uniforme de celdas, el apéndice C comprende el escenario de celdas no uniformes a manera de información para aquellos interesados en realizar una simulación que abarque este escenario. Para apreciar el desempeño de la técnica del Promedio Exponencial (apéndice B), el apéndice D incluye una comparación con otras técnicas utilizando un modelo de similares características. El apéndice E proporciona los programas de MATLAB utilizados en la simulación, y a su vez el apéndice F describe la solución de las ecuaciones de velocidad media de los móviles en la microcelda y los valores óptimos de la velocidad umbral V_0 .

Sin la ayuda y el aliento de muchas personas, el desarrollo de esta investigación no habría sido posible. Quisiera agradecer al Ing. Aurelio Morales M.Sc., asesor de la presente tesis, por su paciente revisión y por sus valiosas sugerencias. De igual manera, mi agradecimiento a la Sección de Postgrado de la FIEE-UNI, por el apoyo brindado a través del laboratorio y biblioteca.

Finalmente, quisiera agradecer a mis padres, Rafael y Augusta por su infinita confianza, colaboración, y ánimo en la realización de mis estudios de maestría, y de manera especial, agradezco sinceramente a mi hermano Gustavo por su enorme ayuda y contribución en la conclusión del presente trabajo.

Fernando Tagle C.

1 INTRODUCCION.

1.1 Planteamiento del problema.

Debido a que el número de canales es un parámetro limitado para sistemas celulares tales como FDMA, TDMA ó CDMA, el incremento de demanda de los usuarios puede ser satisfecho solo disminuyendo la potencia de transmisión y el área de cobertura de las celdas. Esto sin embargo, incrementa el número de handoffs y la correspondiente administración de carga. Estructuras de celdas jerárquicas; es decir, microceldas distribuidas dentro de macroceldas, muestran un buen balance entre el uso eficiente de canales disponibles mientras simultáneamente mantienen reducido el número de handoffs. La asignación de usuarios ya sea a microceldas o macroceldas se realiza en base a diferentes criterios. La asignación basada en la movilidad de los usuarios implica que los móviles de movimiento rápido sean asignados a celdas de mayor cobertura (macroceldas), y usuarios estacionarios o de movimiento lento sean colocados bajo la administración de microceldas; las cuales son usadas en áreas de mayor tráfico.

La presente investigación está enfocada a estudiar la ingeniería en sistemas celulares jerárquicos microcelda/macrocela; junto con la respectiva asignación de usuarios basada en su movilidad, y aplicar dicha asignación en sistemas celulares jerárquicos CDMA.

La cantidad de canales por portadora de CDMA depende de la fórmula de capacidad la cual esta determinada por el nivel de ruido generado por otros usuarios, además de la energía propia (Energía de los Chips en dBm) de la modulación del usuario que este usando un código pseudo aleatorio en particular. Normalmente esta cantidad debería ser alrededor de 15 usuarios por portadora. El tipo de vocoder de 13 Kbps o 8 Kbps no influye directamente en la formula de capacidad; al usar vocoder de 13Kbps, la cantidad de información es mayor, esto provoca mayor ruido de ambiente, el cual finalmente se distribuye hacia todos los usuarios. (Debido a que la frecuencia es la misma para todos, al final todo se traduce en densidad espectral de ruido distribuido en todo el ancho de banda). Los mecanismos de control de potencia no reducirán la energía de la transmisión en el caso del vocoder de 13 Kbps, como si lo pueden hacer en el caso del vocoder de 8Kbps donde hay menos información transmitida,

por tanto los mecanismos de reducción de potencia permiten mayor reducción de energía en estos casos.

En la derivación de la fórmula de capacidad de CDMA puede calcularse cuantos usuarios puede soportar una portadora:

$$\text{Número de Usuarios} - 1 = \frac{W/R}{E_b/I_0} \quad (1.1)$$

Donde:

W = Ancho de Banda de la Portadora (1.25Mhz).

R = Velocidad de transmisión de datos luego del repetidor de símbolos.

E_b = Energía de Bit.

I_0 = Densidad Espectral de Ruido en dBm/Hz.

1.2 Formulación de la hipótesis.

En el sistema celular CDMA existen macroceldas, dado que existe una distancia mínima que debe ser respetada entre celdas, para evitar el *overlapping* entre portadoras. Esto supone mayor flexibilidad de TDMA respecto al CDMA, puesto que aquella puede hacer uso de microceldas. Sin embargo, es posible implementar un sistema celular jerárquico microcelda/macrocelda con CDMA; junto con la respectiva asignación de usuarios, ya sea a una macrocelda o a una microcelda, basada en la movilidad de los mismos.

El trabajo de investigación esta basado en buscar el diseño que permita incrementar la capacidad de un sistema celular CDMA utilizando un sistema celular jerárquico microcelda/macrocelda con asignación de usuarios basada en su movilidad, simular el mismo, y compararlo con diseños equivalentes de otros sistemas (FDMA, TDMA).

1.3 Descripción de la metodología de investigación.

La presente tesis está basada principalmente en el desarrollo de las siguientes etapas de investigación:

1.3.1 Documentación

Realizar el estudio de las características del sistema celular CDMA, así como el estudio de la ingeniería en sistemas celulares jerárquicos microcelda/macrocelda CDMA; y también estudiar la asignación de usuarios a microceldas ó macroceldas basada en su movilidad.

1.3.2 Análisis y diseño

Realizar el análisis y el diseño que no solo permita incrementar la capacidad de administrar elevado tráfico, si no también mantener reducido el número de handoffs en las comunicaciones, lo que proporcionará una mejor calidad de servicio (QoS).

1.3.3 Simulación

Simular el diseño a través de representaciones gráficas (probabilidad de bloqueo, grado de servicio, entre otras), utilizando MatLab como herramienta de simulación.

1.3.4 Observaciones y conclusiones

Interpretar los resultados obtenidos, compararlos con diseños equivalentes de otros sistemas (FDMA, TDMA) y obtener las conclusiones.

2 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA CDMA.

2.1 Introducción.

El sistema celular digital basado en CDMA (*Code Division Multiple Access*) que proporciona un incremento de capacidad ha sido estandarizado como IS-95 (*Interim Standard 95*) por la TIA (*Telecommunications Industry Association*) de los Estados Unidos. El sistema IS-95 está diseñado para ser compatible con la existente banda de frecuencias del sistema celular analógico (AMPS), de tal forma que estaciones base y móviles pueden ser fabricados para operar en modo dual. La producción piloto de teléfonos duales CDMA/AMPS la realizó Qualcomm en 1994.

IS-95 permite a cada usuario dentro de una celda a usar el mismo canal de radio, y a usuarios en celdas adyacentes a usar también el mismo canal de radio, ya que este es un sistema CDMA de espectro disperso de secuencia directa. CDMA elimina completamente la necesidad de un planeamiento de frecuencias dentro de un mercado.

En sistemas CDMA, la señal del mensaje de ancho de banda angosto, es multiplicada por una señal de gran ancho de banda llamada la *señal dispersadora*. La señal ensanchadora es una secuencia de código pseudo-ruido que tiene una velocidad de chip¹ la cual es en orden de magnitud mucho mayor que la velocidad de datos del mensaje. Todos los usuarios en sistemas CDMA, usan la misma frecuencia portadora y pueden transmitir simultáneamente. Cada usuario tiene su propia palabra de código pseudoaleatoria la cual es aproximadamente ortogonal a todas las otras palabras de código. El receptor realiza una operación de correlación en el tiempo para detectar específicamente la palabra de código deseada. Todas las otras palabras de código aparecen como ruido debido a la falta de correlación. Para la detección de la señal del mensaje, el receptor necesita conocer la palabra de código usada por el transmisor. Cada usuario opera independientemente sin conocimiento de los otros usuarios. En CDMA, la potencia de múltiples usuarios en un receptor determina el piso de ruido después de la decorrelación. Si la potencia de cada usuario dentro de la celda no es controlada

¹ La función Walsh tiene una velocidad fija de 1,2288Mcps. Por ejemplo, para una velocidad de datos de 9600bps con razón de código 1/2, se tiene una velocidad de modulación de símbolo de 19,2ksps, que el canal *forward* toma y dispersa en un código Walsh 64-bit. Así, $64 \cdot 19200 = 1,2288\text{Mcps}$, que es la velocidad de chip pseudo ruido [Lee95].

de tal forma que no aparecen iguales en el receptor de la estación base, ocurre el problema *near-far*. Para combatir el problema *near-far*, el control de potencia es usado en las implementaciones CDMA. El control de potencia es proporcionado por cada estación base en un sistema celular y asegura que cada móvil dentro del área de cobertura de la estación base proporcione el mismo nivel de señal al receptor de la estación base.

2.1.1 Características del sistema CDMA

Las características de CDMA incluyen [Rap96]:

- Muchos usuarios del sistema CDMA comparten la misma frecuencia, y para realizar la transmisión de radio móvil *full dúplex* pueden utilizar FDD (*Frequency Division Duplex*) ó TDD (*Time Division Dúplex*).
- A diferencia de TDMA (*Time Division Multiple Access*) ó FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), CDMA no tiene un límite fijo de capacidad. Al incrementarse el número de usuarios en un sistema celular CDMA, el piso de ruido se eleva en forma lineal. Por tanto en CDMA no existe un límite absoluto del número de usuarios. Así, el desempeño del sistema:
 - Se degrada poco a poco para todos los usuarios a medida que el número de usuarios se incrementa.
 - Mejora a medida que el número de usuarios decrece.
- El desvanecimiento por multitrayectoria puede ser sustancialmente reducido porque la señal es dispersada sobre un espectro ancho. Si el ancho de banda del espectro disperso es mayor que el ancho de banda de coherencia del canal, la diversidad de frecuencia inherente reducirá los efectos de desvanecimiento de menor escala.
- Las velocidades del canal de datos son muy altas en sistemas CDMA. En consecuencia, la duración de símbolo (chip) es muy corta y usualmente mucho menor que el retardo del canal disperso. Puesto que secuencias PN (*Pseudo-Noise*) tienen pequeña autocorrelación, Un receptor RAKE puede ser usado para mejorar la recepción recolectando versiones retrasadas en tiempo de la señal requerida.
- Debido a que CDMA usa celdas co-canal, CDMA puede usar diversidad espacial macroscópica para proporcionar soft-handoff. Soft-handoff es realizado por la MSC (*Mobile Switching Center*), la cual puede simultáneamente monitorear a un usuario

particular desde una o más estaciones base. La MSC puede escoger la mejor versión para la señal en cualquier momento sin conmutar frecuencias.

Self-jamming es un problema en sistemas CDMA. *Self-jamming* surge del hecho de que las secuencias dispersas de diferentes usuarios no son exactamente ortogonales, por tanto en el proceso inverso a la dispersión de un código PN particular, debido a la transmisión de otros usuarios en el sistema, aparecen contribuciones no-cero para la estática de decisión del receptor de un usuario deseado.

2.2 Términos del sistema CDMA.

- 1) Grupo Activo (*active set*): Grupo de pilotos asociados con los Canales CDMA conteniendo Canales de Tráfico Adelante (*forward*) asignados a una estación móvil particular (MS).
- 2) Número de canal CDMA: Un número de 11 bits correspondiendo al centro de la asignación de frecuencia CDMA.
- 3) Canal de código: Un subcanal del canal adelante CDMA. Un canal adelante CDMA contiene 64 canales de código. Algunos canales de código son asignados a diferentes canales lógicos.
Canal de código cero: Canal piloto.
Canales de código 1 hasta 7: Cualquiera, canales de *paging* o canales de tráfico.
Canal de código 32: Un canal de sincronización o un canal de tráfico.
Los canales de código restantes son canales de tráfico.
- 4) Símbolo de código: La salida de un codificador corrector de error.
- 5) *Dim-and-Burst*: Un marco (*frame*) en el cual el tráfico primario es multiplexado ya sea con tráfico secundario o con tráfico de señal. Es equivalente a la función *blank-and-burst* en AMPS.
- 6) Canal adelante CDMA: Contiene uno o más canales de código.
- 7) Marco (*frame*): Un intervalo de tiempo básico en el sistema. Para el canal de acceso, canal de *paging*, y canal de tráfico, un marco es de 20 ms. Para un canal de sincronización, un marco es de 26.666 ms.

- 8) Marco offset: Una alteración de tiempo de marcos del canal de tráfico del tiempo del sistema en múltiplos enteros de 1.25 ms. El máximo marco offset es de 18.75 ms.
- 9) GPS (*Global Position System*): Sistema utilizado para proporcionar ubicación e información de tiempo al sistema CDMA.
- 10) Handoff (HO): El acto de transferir la comunicación con una estación móvil de una estación base a otra.
- 11) *Hard* HO: Ocurre cuando (1) La estación móvil es transferida entre grupos activos disjuntos, (2) la asignación de frecuencia CDMA cambia, (3) el marco offset cambia, y (4) la estación móvil es dirigida de un canal de tráfico CDMA a un canal de voz analógico.
- 12) *Soft* HO: HO de una celda CDMA a otra celda CDMA en la misma frecuencia CDMA.
- 13) HO desocupado: Ocurre cuando el canal de *paging* es transferido de una estación base (BS) a otra.
- 14) Arquitectura de capas: Un método de organización de protocolos de comunicación. Una capa es definida en términos de su protocolo de comunicación a una capa similar.
 - Capa 1: Capa física, presenta un marco por la subcapa múltiplex y lo transforma en una forma de onda en el aire.
 - Capa 2: Provee la correcta transmisión y recepción de mensajes de señalización.
 - Capa 3: Provee el control del sistema telefónico celular. Los mensajes de señalización se originan y terminan en la capa 3.
- 15) Código largo: Una secuencia PN (*pseudonoise*) con periodo $2^{42}-1$.
- 16) Símbolo de modulación: La salida del modulador de datos antes de la dispersión. Hay 64 símbolos de modulación en el canal de tráfico reversa, es usada modulación ortogonal 64-ario, y seis símbolos de código son asociados con un símbolo de modulación. En el canal de tráfico adelante, cada símbolo de código (la velocidad de datos es de 9600 bps) o cada símbolo de código repetido (la velocidad de datos es menor que 9600 bps) es 1 símbolo de modulación.
 - Reversa: 6 símbolos de código → 1 símbolo de modulación.
 - Adelante: 1 símbolo de código = 1 símbolo de modulación.
- 17) Opción múltiplex: La habilidad de una subcapa múltiplex y capas inferiores ajustadas para proporcionar capacidades especiales. Una opción múltiplex define el formato de marco y las reglas de decisión de velocidad.

- 18) Subcapa múltiple: Una de las capas conceptuales del sistema que multiplexa y demultiplexa tráfico primario, tráfico secundario, y tráfico de señalización.
- 19) Modo no ranurado: Un modo de operación de una estación móvil en el cual la estación móvil continuamente monitorea el canal de *paging*.
- 20) Datos de tráfico nulo: Un marco de dieciséis 1's seguidos por ocho 0's enviados a la velocidad de 1200 bps. Los datos de canal de tráfico nulo sirven para mantener la conectividad entre la estación móvil y la estación base cuando el servicio no está activo y ningún mensaje de señalización está siendo enviado.
- 21) Canal de *paging*: Un canal de código en un canal de tráfico adelante CDMA usado para la transmisión de (1) información de control y (2) perifoneo desde la estación base a la estación móvil. La ranura del canal de *paging* tiene un intervalo de 200 ms.
- 22) Bit de control de potencia: Un bit, enviado en todos los intervalos de 1.25 ms en el canal de tráfico adelante a la estación móvil, que incrementa o disminuye su potencia de transmisión.
- 23) Canal primario CDMA: Una frecuencia preasignada usada por la estación móvil para adquisición inicial.
- 24) Canal de *paging* primario: El canal de código por defecto (canal de código 1) asignado para *paging*.
- 25) Tráfico primario: El flujo de tráfico principal entre la estación móvil y la estación base en el canal de tráfico.
- 26) Canal de tráfico reversa: Usado para transportar tráfico de usuario y señalización de una estación móvil a una o más estaciones base.
- 27) Datos secretos compartidos (*Shared secret data* SSD): Un patrón de 128 bits guardados en la estación móvil.
SSD es una concatenación de dos sub-grupos (*subsets*) de 64 bits.
SSD-A es usado para soportar la autenticación.
SSD-B sirve como una de las entradas para generar la máscara de encriptación y el código largo privado.
- 28) Canal secundario CDMA: Una frecuencia preasignada (una o dos) usada por la estación móvil para adquisición inicial.

- 29) Tráfico secundario: Un flujo de tráfico adicional llevado entre la estación móvil y la estación base en el canal de tráfico.
- 30) Modo ranurado: Un modo de operación de la estación móvil en el cual la estación móvil monitorea solamente ranuras seleccionadas en el canal de *paging*.
- 31) Canal de sincronización: Canal de código 32 en el canal adelante CDMA el cual transporta el mensaje de sincronización a la estación móvil.
- 32) Canal piloto: Una señal de secuencia directa (DS) no modulada transmitida continuamente por cada estación base CDMA. El canal piloto permite a una estación móvil adquirir la temporización del canal adelante CDMA, proporciona una referencia de fase para demodulación coherente, y proporciona un medio para comparación de intensidad de señal entre estaciones base y así determinar cuando realizar el handoff.
- 33) Tiempo de sistema: La referencia de tiempo usada por el sistema. El tiempo de sistema es sincronizado al tiempo de coordinación de tiempo universal (*universal time coordination UTC*) y utiliza el mismo origen de tiempo como tiempo GPS. Todas las estaciones base utilizan el mismo tiempo de sistema. Las estaciones móviles utilizan el mismo tiempo de sistema, compensadas por el retardo de propagación desde la estación base a la estación móvil.
- 34) Referencia de tiempo: Una referencia establecida por la estación móvil que está sincronizada con el componente de multitrayecto de arribo más temprano el cual es usado para la demodulación. La referencia de tiempo establece el tiempo de transmisión y la ubicación de cero en el espacio PN.
- 35) Chip Walsh: El menor componente identificable de una función Walsh 64. En el canal adelante CDMA, un chip es igual a $1/1.2288$ MHz o 813.802 ns. En el reversa CDMA, un chip es igual a $4/1.2288$ MHz o 3255 ns.

2.3 Especificaciones de frecuencia y canal

Para facilitar la transición de AMPS a CDMA, cada canal IS-95 ocupa 1.25 MHz de espectro en cada enlace de un sentido, o 10% del espectro celular disponible para un proveedor de celular (recordemos que el sistema celular dispone de 25 MHz y cada proveedor de servicio recibe la mitad del espectro o 12.5 MHz). En la práctica, las portadoras AMPS deben proveer

una banda de guarda de 270 kHz (típicamente 9 canales AMPS) en cada lado del espectro dedicado para IS-95.

A diferencia de otros estándares de sistemas celulares, la velocidad de datos de usuario (pero no la velocidad chip del canal) cambia en tiempo real, dependiendo de la actividad de voz y de los requisitos de la red. También IS-95 utiliza diferente modulación y técnica de dispersión para los enlaces adelante y reversa. En el enlace adelante, la estación base transmite simultáneamente los datos de usuario para todos los móviles en la celda usando una secuencia de dispersión diferente para cada móvil. Un código piloto es también transmitido simultáneamente a un nivel de potencia mayor, permitiendo así a todos los móviles a usar detección coherente de portadora mientras estiman las condiciones del canal. En el enlace reversa, todos los móviles responden en una manera asíncrona y tienen idealmente un nivel constante de señal debido al control de potencia aplicado por la estación base.

El estándar IS-95 está especificado para operación de enlace reversa en la banda de 824 - 849 MHz y 869 - 894 MHz para en enlace adelante. Un par de canales adelante y reversa está separado por 45 MHz. Muchos usuarios comparten un canal común para la transmisión. La máxima velocidad de datos de usuario es 9.6 kb/s. Los datos de usuario en IS-95 son dispersos a una velocidad de 1.2288 Mchip/s (un factor total de dispersión de 128) usando una combinación de técnicas. El proceso de dispersión es distinto para los enlaces adelante y reversa. En el enlace adelante, la secuencia de datos de usuario es codificada usando una un código convolucional de velocidad $\frac{1}{2}$, entremezclado (*interleaved*), y disperso por una de sesenticuatro secuencias dispersoras ortogonales (funciones Walsh). Cada móvil en una celda dada está asignada a una secuencia dispersora diferente, proporcionando separación perfecta entre las señales de diferentes usuarios, por lo menos para el caso donde no existe multitrayectoria. Para reducir la interferencia entre móviles que usan la misma secuencia dispersora en celdas diferentes, y para proporcionar las características espectrales de banda ancha deseadas (no todas las funciones Walsh producen un espectro de potencia de banda ancha), todas las señales en una celda particular son mezcladas o revueltas (*scrambled*) usando una secuencia pseudo-aleatoria de longitud 2^{15} chips.

La ortogonalidad entre todos los usuarios del canal adelante dentro de una celda es preservada porque sus señales son mezcladas o revueltas en forma síncrona. Un canal piloto (código) es proporcionado en el enlace delante de tal forma que cada abonado dentro de la celda puede

determinar y reaccionar a las características del canal mientras emplea detección coherente. El canal piloto es transmitido a una potencia mayor que los canales de usuario.

En el enlace reversa, una estrategia diferente de dispersión es usada puesto que cada señal recibida arriba a la estación base a través de un trayecto de propagación diferente. La secuencia de datos de usuario del canal reversa es primero codificada convolucionalmente con un código de velocidad 1/3. Después del entremezclado, cada bloque de seis símbolos codificados es mapeado a una de las 64 funciones Walsh ortogonales, proporcionando señalización ortogonal 64-aria. Una cuarta dispersión final, dando una velocidad de 1.2288 Mcchip/s, es alcanzada dispersando la secuencia resultante de 307.2 kchip/s por códigos específicos de usuario y de estación base con periodos de $2^{42}-1$ chips y 2^{15} chips, respectivamente. La velocidad de codificación de 1/3 y el mapeo sobre las funciones Walsh resultan en una mayor tolerancia para la interferencia que aquella que podría ser realizada por códigos de dispersión de repetición tradicional. Esta robustez adicional es importante en el enlace reversa, debido a la detección no-coherente y a la interferencia en celda recibida en la estación base.

Otro elemento esencial del enlace reversa es el firme control de cada potencia de transmisión de abonado, para evitar el problema de “*near-far*” que resulta de diferentes potencias recibidas de los usuarios. Una combinación de lazo abierto y rápido control de potencia de lazo cerrado es usada para ajustar la potencia de transmisión de cada abonado dentro de la celda de tal forma que la estación base recibe a cada usuario con la misma potencia. Los comandos para el control de potencia de lazo cerrado son enviados a una velocidad de 800 b/s, y estos bits son colados en los marcos de voz. Sin un rápido control de potencia, los rápidos cambios de potencia debido al desvanecimiento degradarían el desempeño de todos los usuarios en el sistema.

Tanto en la estación base como en el abonado, los receptores RAKE son usados para resolver y combinar componentes multitrayecto, de manera que se reduce el grado de desvanecimiento. Un receptor RAKE aprovecha los retardos de tiempo de multitrayectoria en un canal y combina las replicas retrasadas de la señal transmitida para mejorar la calidad del enlace. En IS-95, un receptor RAKE de tres trayectos es usado en la estación base. La arquitectura IS-95 también proporciona diversidad de estación base durante *soft* handoffs, ya que un móvil que está realizando una transición entre celdas mantiene enlaces con ambas estaciones base durante la transición. El receptor móvil combina las señales de las dos

estaciones base en la misma manera como si combinara señales asociadas con diferentes componentes multitrayecto.

2.4 Límites de potencia de salida y control.

Potencia de Salida. La potencia media de salida de la estación móvil será menor a -50 dBm/1.23 MHz (-111 dBm/Hz) para todas las frecuencias dentro de ± 615 kHz de la frecuencia central.

Potencia de Salida de Compuerta (*gated output power*). La estación móvil transmitirá a niveles nominales controlados durante periodos de compuerta (*gated-on periods*). Una potencia de salida típica en un periodo de compuerta es mostrada en la figura 2.1. El piso de ruido del transmisor debe ser menor que -60 dBm/1.23 MHz.

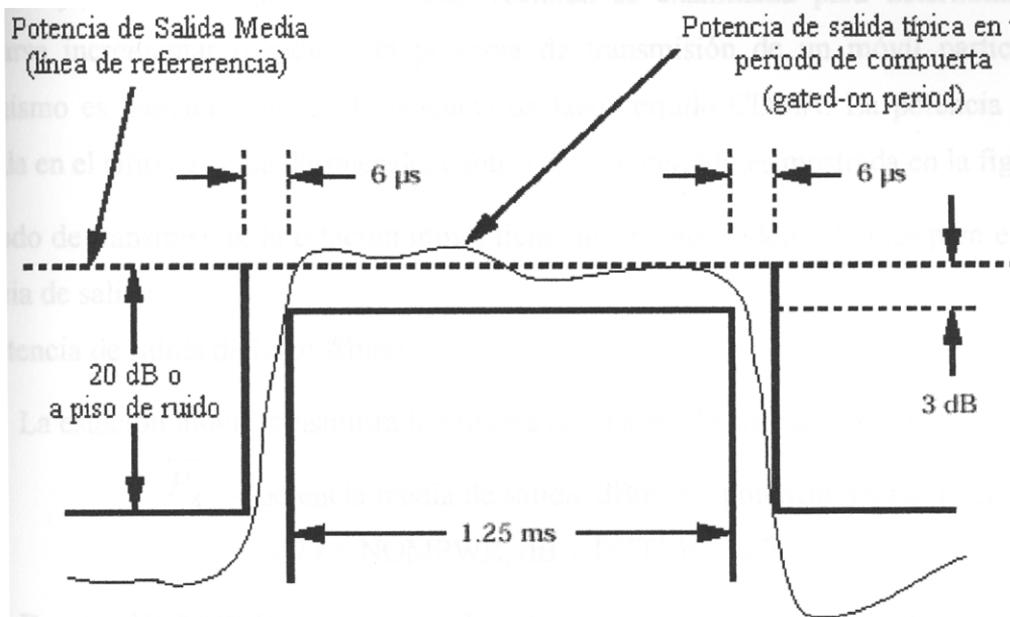


Fig. 2.1. Máscara de Transmisión (grupo único de control de potencia de compuerta).

Potencia de Salida Controlada. Implementar el control de potencia para la transmisión del enlace de reversa CDMA es una obligación en el sistema celular CDMA, como requisito para eliminar la interferencia *near-far*. Si todos los transmisores móviles dentro del área de

cobertura de un sitio de celda están controlado, entonces la potencia total de señal recibida en el sitio de celda desde todos los móviles será igual a la potencia nominal recibida tantas veces el número de móviles.

Control de Potencia de Lazo Abierto del Enlace de Reversa CDMA. La estación móvil recibe una señal del enlace Adelante afectada por desvanecimientos del tipo log-normal y Rayleigh, como se muestra en la figura 2.2.a. La pérdida de trayecto promedio (*average path loss*) es obtenida tal como se muestra en la figura. Si las partes finales de transmisión y de recepción están compartiendo el mismo canal de frecuencia, entonces como se muestra en la figura 2.2.b, revirtiendo la intensidad de la señal recibida (indicada como la potencia de transmisión sin filtro amortiguador - *smoothing filter*), se eliminaría la variación de potencia en el sitio de celda. Debido a que CDMA utiliza canales dúplex, el desvanecimiento Rayleigh en el Canal Adelante y en el Canal Reversa no son los mismos. Por lo tanto, la potencia de transmisión promedio deseada es enviada de retorno en el Canal Reversa.

En el sitio de celda, la información disponible del valor instantáneo versus el valor esperado del FER (*frame error rate*) de la señal recibida es examinada para determinar si debe ordenarse incrementar o reducir la potencia de transmisión de un móvil particular. Este mecanismo es llamado control de potencia de lazo cerrado CDMA. La potencia del móvil recibida en el sitio de celda después del control de lazo cerrado es mostrada en la figura 2.2.c.

En modo de transmisión, la estación móvil tiene dos medios independientes para el ajuste de potencia de salida:

1. Potencia de salida de Lazo Abierto

- La estación móvil transmitirá la primera prueba en el canal de acceso:

$$\overline{P}_A = \text{potencia media de salida, dBm} = - \text{potencia media de entrada, dBm} \\ - 73 + \text{NOMPWR, dB} + \text{INITPWR, dB}$$

Donde: NOMPWR = corrección de potencia recibida en la estación base.

INITPWR = ajuste de la potencia recibida menos que la potencia de señal requerida.

Cuando INITPWR = 0, $\overline{P}_A = \pm 6$ dB.

- Para transmisión inicial en el Canal Reversa,

$$\overline{P}_I = \text{potencia media de salida, dBm} = \overline{P}_A + \text{la suma de todas las} \\ \text{correcciones de la prueba de acceso, dB}$$

- Para Canal de Tráfico Reversa normal,

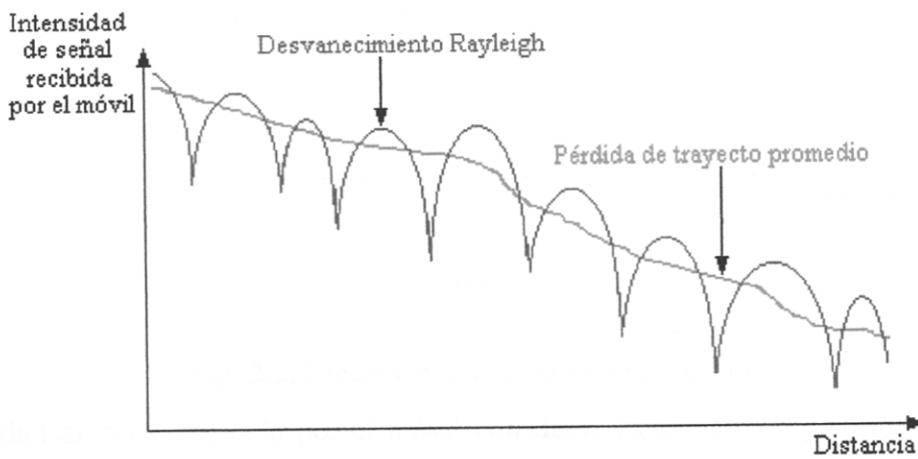
$$\overline{P_R} = \text{potencia media de salida, dBm} = \overline{P_I} + \text{la suma de todas las correcciones del control de potencia de lazo cerrado, dB}$$

- Por ejemplo, sin alguna corrección o ajuste,

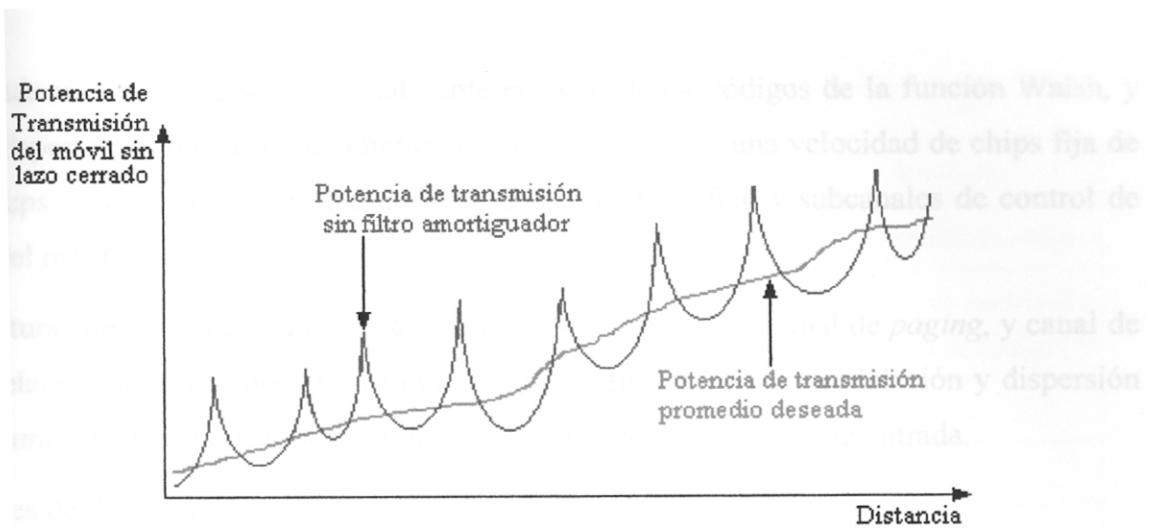
$$\begin{aligned} \text{Potencia media de salida} &= - \text{potencia media de entrada} - 73 \\ &= -(-90 \text{ dBm}) - 73 \\ &= +17 \text{ dBm} \end{aligned}$$

2. Potencia de salida de Lazo Cerrado (incluidos ambos, la estación móvil y la estación base)

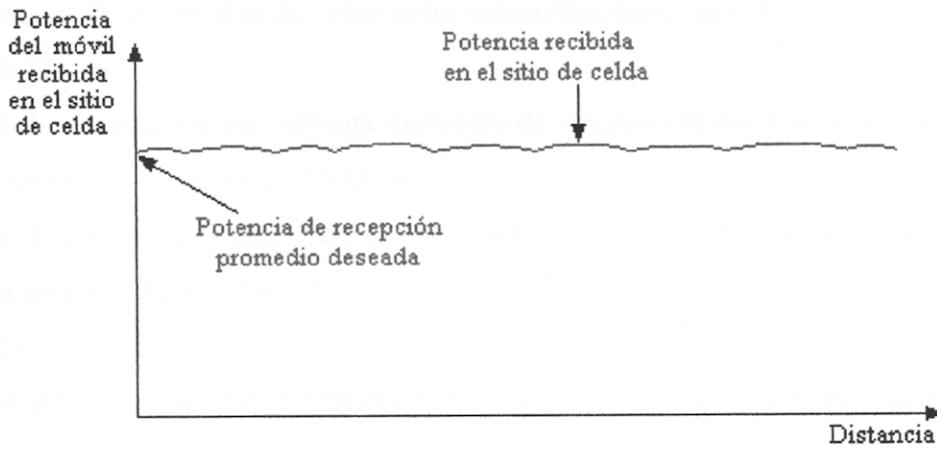
La estación móvil ajustará su nivel medio de potencia de salida en respuesta a cada bit de control de potencia válido recibido en el Canal de Tráfico Adelante. El cambio en potencia media de salida por bit de control de potencia único será 1 dB nominal, dentro de ± 0.5 dB del cambio nominal.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.2. Mecanismo de control de potencia.

(a) Intensidad de señal recibida por el móvil con desvanecimientos log-normal y Rayleigh; (b) Potencia de transmisión sin control de lazo cerrado y sin filtrado no lineal; (c) potencia del móvil recibida en el sitio de celda.

2.5 Características de modulación.

2.5.1 Canal Adelante CDMA.

El canal adelante CDMA consiste de los siguientes canales código: un canal piloto, un canal de sincronización, siete canales de *paging* (perifoneo), y sesentitrés canales de tráfico adelante

[Li93]. Cada uno es disperso ortogonalmente por uno de 64 códigos de la función Walsh, y luego es disperso por un par en cuadratura de secuencias PN a una velocidad de chips fija de 1.2288 Mcps. Cada canal de tráfico consiste de datos de tráfico y subcanales de control de potencia del móvil.

Las estructuras de datos del canal piloto, canal de sincronización, canal de *paging*, y canal de tráfico adelante son mostrados en la figura 2.3. Existen dos partes, modulación y dispersión en cuadratura. En la parte de modulación, la velocidad de datos está en la entrada.

Velocidades de datos a la entrada:

El canal piloto envía todos 0s a una velocidad de 19.2 kbps. El canal piloto permite a una estación móvil adquirir temporización para el Canal Adelante CDMA, provee una referencia de fase para demodulación coherente, y provee a cada móvil medios de comparación de intensidad de señal entre estaciones base para determinar cuando realizar un handoff.

El canal de sincronización propaga mensajes de sincronización a las estaciones móviles y opera a una velocidad fija de 1200 bps.

El canal de *paging* es usado para enviar información de control y mensajes de perifoneo desde la estación base a los móviles y soporta la velocidad de datos fija a 9600, 4800, y 2400 bps.

El canal de tráfico adelante soporta velocidades de datos de usuario variables a 9600, 4800, 2400, y 1200 bps.

El proceso de modulación del canal de tráfico adelante es descrito en la figura 2.3 [EIA90]. Los datos en el canal de tráfico adelante son agrupados en marcos de 20 ms. Los datos de usuario son primero codificados convolucionalmente y luego formateados y entremezclados (*interleaved*) para ajustarse a la velocidad de datos de usuario real, la cual puede variar. Luego la señal es dispersa con un código Walsh y una secuencia PN larga a una velocidad de 1.2288 Mcps. los parámetros de modulación (codificación y repetición) del canal de sincronización, del canal de *paging*, y del canal de tráfico adelante se muestran en las tablas 2.1, 2.2, y 2.3 respectivamente.

Parámetro	Velocidad de Datos 1200 bps	Unidades
Velocidad de Código	1/2	bits/símbolos de código
Repetición de código	2	símbolos de modulación / símbolos de código (*)
Velocidad de Símbolo de Modulación	4800	sps
Chips PN/Símbolo de modulación	256	-
Chips PN / bit	1024	-
Velocidad de Chip PN	1.2288	Mcps

*) Cada repetición de un símbolo de código es un símbolo de modulación.

Tabla 2.1 Parámetros de Modulación del Canal de Sincronización.

Parámetro	Velocidad de Datos (bps)			Unidades
	9600	4800	2400	
Velocidad de Código	1/2	1/2	1/2	bits/símbolos de código
Repetición de código	1	2	4	símbolos de modulación / símbolos de código (*)
Velocidad de Símbolo de Modulación	19200	19200	19200	sps
Chips PN/Símbolo de modulación	64	64	64	-
Chips PN / bit	128	256	512	-
Velocidad de Chip PN	1.2288	1.2288	1.2288	Mcps

*) Cada repetición de un símbolo de código es un símbolo de modulación.

Tabla 2.2 Parámetros de Modulación del Canal de *Paging*.

Parámetro	Velocidad de Datos (bps)				Unidades
	9600	4800	2400	1200	
Velocidad de Código	1/2	1/2	1/2	1/2	bits/símbolos de código
Repetición de código	1	2	4	8	símbolos de modulación / símbolos de código (*)
Velocidad de Símbolo de Modulación	19200	19200	19200	19200	sps
Chips PN/Símbolo de modulación	64	64	64	64	-
Chips PN / bit	128	256	512	1024	-
Velocidad de Chip PN	1.2288	1.2288	1.2288	1.2288	Mcps

(*) Cada repetición de un símbolo de código es un símbolo de modulación.

Tabla 2.3 Parámetros de Modulación del Canal de Tráfico Adelante.

La velocidad de datos de voz aplicada al transmisor es variable sobre el rango de 1200 bps a 9600 bps.

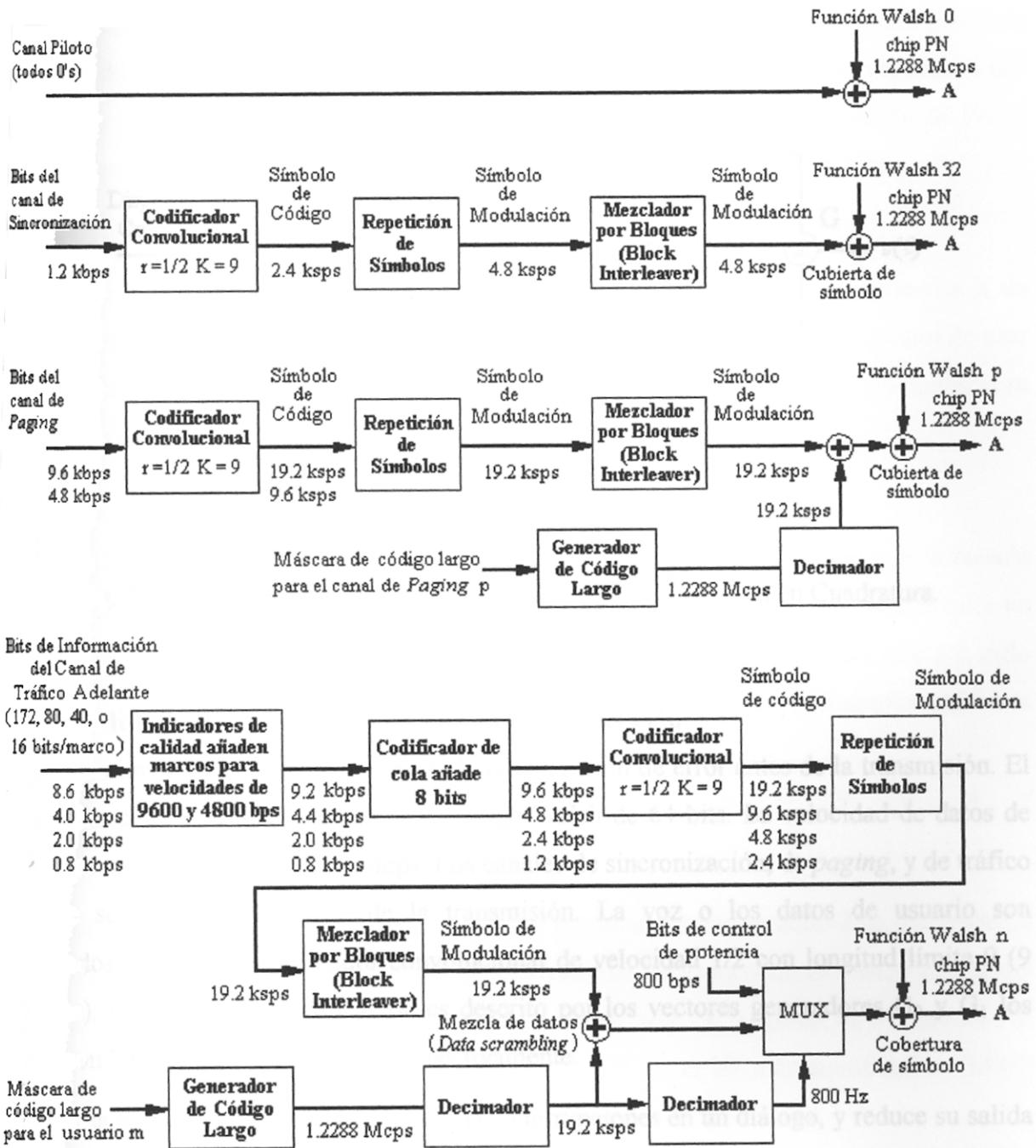


Fig. 2.3. Estructura del Canal Adelante CDMA. (a) Modulación; donde A indica hacia la Dispersión en cuadratura.

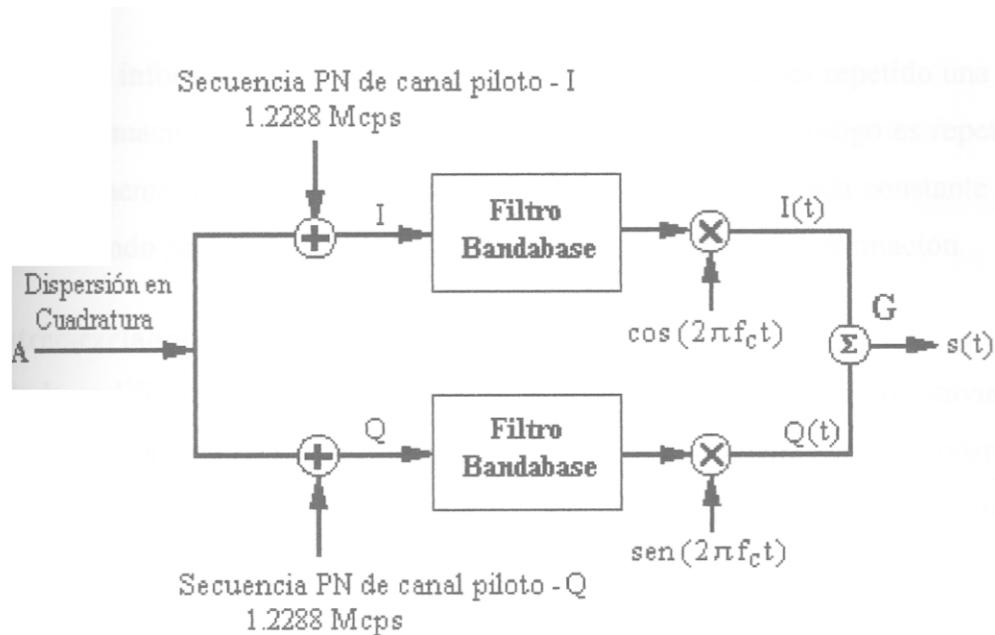


Fig. 2.3. Estructura del Canal Adelante CDMA. (b) Dispersión en Cuadratura.

2.5.1.1 Codificador Convolutivo y Circuito de Repetición

La modulación del canal piloto no ha usado la corrección de error antes de la transmisión. El canal toma cada bit y lo dispersa en un código Walsh de 64 bits. La velocidad de datos de 19.2 kbps se convierte en 1.2288 Mcps. Los canales de sincronización, de *paging*, y de tráfico adelante son codificados antes de la transmisión. La voz o los datos de usuario son codificados usando un codificador convolutivo de velocidad 1/2 con longitud límite 9 (9 registros). El proceso de codificación es descrito por los vectores generadores G_0 y G_1 los cuales son 753 (octal) y 561 (octal), respectivamente.

El codificador de voz explota las pausas y las interrupciones en un diálogo, y reduce su salida de 9600 bps a 1200 bps durante periodos de silencio. Para mantener una velocidad de símbolo en bandabase constante de 19.2 kbps, cuando quiera que la velocidad de usuario es menor a 9600 bps, cada símbolo del codificador convolutivo es repetido antes del entremezclado por bloques. Para los canales de *paging* y de tráfico adelante, la repetición depende de la velocidad de datos de cada canal. Una velocidad de datos baja necesita más repeticiones para alcanzar la velocidad de símbolo de modulación de 19.2 ksps. Para el canal de sincronización, cada símbolo codificado es repetido dos veces y la velocidad de símbolo de modulación es 4800 sps. Los datos de 4800 sps son modulados con el código W32 de la función Walsh el cual ha sido multiplicado por 4. En otras palabras, cada símbolo llega a ser $4 \times 64 = 256$ cps.

Si la velocidad de información es 4800 bps, cada símbolo de código es repetido una vez. Si la velocidad de información es 2400 bps o 1200 bps, cada símbolo de código es repetido 3 o 7 veces, respectivamente. La repetición resulta en una velocidad codificada constante de 19200 símbolos por segundo para todas las posibles velocidades de datos de información.

2.5.1.2 Entremezclador por bloques (*block interleaver*)

Después de la codificación convolucional y la repetición, los símbolos son enviados a un entremezclador por bloques de 20ms, el cual es un arreglo de 24 por 16. El propósito de usar entremezclado por bloques es el tratar de evitar errores de estallido (*burst errors*) mientras se envían datos a través de un ambiente de desvanecimiento multitrayecto.

2.5.1.3 Secuencia PN larga

En el canal adelante, la operación de dispersión por secuencia directa es usada para la mezcla de datos (*data scrambling*). La secuencia PN larga es asignada únicamente a cada usuario en un código largo periódico con periodo $2^{42} - 1$ chips. (Esto corresponde a repetir uno por siglo aproximadamente). El código largo es especificado por la característica polinómica siguiente [TIA93]:

$$p(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$$

Cada chip PN del código largo es generado por el producto interno modulo-2 de una máscara de 42 bits y el vector de estado de 42 bits del generador de secuencia. El estado inicial del generador se define cuando la salida del generador se hace '1' seguido de 41 salidas '0' consecutivas, con la máscara binaria consistente de '1' en el bit más significativo (MSB) seguido de 41 '0's.

Dos tipos de máscara son usados en el generador de código largo: una máscara pública para el número electrónico serial de la estación móvil (ESN) y una máscara privada para el número de identificación de la estación móvil (MIN). Todas las llamadas CDMA son iniciadas usando la máscara pública. La transición a la máscara privada es realizada después de que la autenticación es desarrollada. El código largo público está especificado como sigue: de M_{41} a M_{32} es fijado a 1100011000, y de M_{31} a M_0 es fijado a una permutación de los bits ESN de la estación móvil. La permutación está especificada como sigue [TIA93]:

$$ESN = (E_{31}, E_{30}, E_{29}, E_{28}, E_{27}, \dots, E_3, E_2, E_1, E_0)$$

ESN permutado = (E0, E31, E22, E13, E4, E26, E17, E8, E30, E21, E12, E3, E25, E16, E7, E29, E20, E11, E2, E24, E15, E6, E28, E19, E10, E1, E23, E14, E5, E27, E18, E9)

La máscara privada de código largo está especificada de tal forma que M41 y M40 son fijados a '01', y de M39 a M0 son fijados por un procedimiento privado. La figura 2.4 ilustra el formato de máscara de código largo.

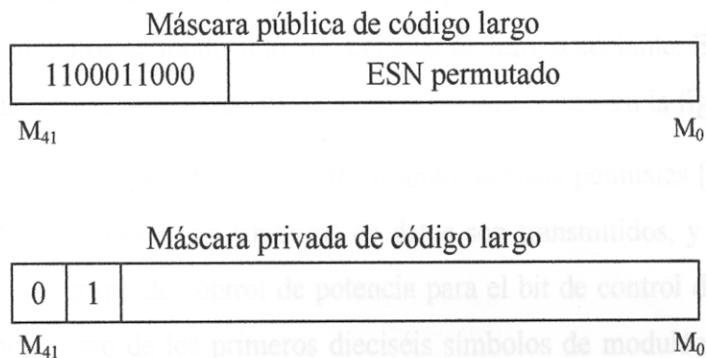


Fig. 2.4. Formato de máscara de código largo para IS-95.

2.5.1.4 Mezclador de datos (*data scrambler*)

la mezcla de datos es realizada luego del mezclador por bloques (*block interleaver*). La secuencia PN de 1.2288 MHz es aplicada a un decimador, el cual mantiene solamente el primer chip fuera de cada 64 chips PN consecutivos. La velocidad de símbolo del decimador es 19.2 kbps. La mezcla de datos es realizada por adición módulo-2 de la salida del mezclador con el valor binario del chip de código largo PN ($2^{42}-1$) (la salida de símbolos del decimador); la máscara de código largo es para privacidad. También, la velocidad de datos de código largo después de pasar a través de dos decimadores es reducida a 800 Hz, la cual es usada para el control de temporización (*timing control*) del multiplexor (MUX), tal como se muestra en la figura 2.3a.

2.5.1.5 Subcanal de control de Potencia

Para minimizar el BER promedio para cada usuario, IS-95 esfuerza para que cada usuario provea el mismo nivel de potencia en el receptor de la estación base. El receptor del Canal de Tráfico Reversa de la estación base estima y responde a la intensidad de la señal (en realidad, intensidad de la señal e interferencia) para una estación móvil en particular. Debido a que ambos, la intensidad de la señal y la interferencia están variando continuamente,

actualizaciones de control de potencia son enviados por la estación base cada 1.25 ms. (un bit cada 1.25 ms, es decir 800 bps). Comandos de control de potencia son enviados a cada unidad de abonado en el subcanal de control adelante el cual instruye al móvil a elevar o bajar su potencia de transmisión en pasos de 1 dB. Si la señal recibida es baja, un '0' es transmitido en el subcanal de control de potencia, así, instruyendo a la estación móvil a incrementar su nivel de potencia de salida medio. Si la potencia del móvil es alta, un '1' es transmitido para indicar que la estación móvil debería decrementar su nivel de potencia. El bit de control de potencia corresponde a dos símbolos de modulación en el canal de tráfico adelante. Bits de control de potencia son insertados luego de la mezcla de datos como se muestra en la figura 2.5.

Los bits de control de potencia son transmitidos usando técnicas puntuales [TIA93]. Durante un periodo de 1.25 ms, veinticuatro símbolos de datos son transmitidos, y IS-95 especifica dieciséis posiciones de grupo de control de potencia para el bit de control de potencia. Cada posición corresponde a uno de los primeros dieciséis símbolos de modulación. Veinticuatro bits del decimador de código largo son usados para la mezcla de datos en un periodo de 1.25 ms. Solamente los últimos 4 bits de los 24 bits son usados para determinar la posición del bit de control de potencia. La figura 2.5 indica la aleatorización de la posición del bit de control de potencia. El canal de tráfico reversa envía un bit con 6 símbolos Walsh en 1.25 ms. La estación base mide la intensidad de la señal, convierte la intensidad de la señal medida a un bit de control de potencia, y transmite un número binario de 4 bits (niveles 0 a 15) al mezclar (*scrambling*) los bits 23, 22, 21 y 20. En el ejemplo mostrado en la figura 2.5, los últimos 4 bits (23, 22, 21, y 20) son '1011' (11 decimal), y en consecuencia, el bit de control de potencia empieza en la posición once dentro de 1.25 ms de la séptima ranura.

la mezcla de datos en el enlace
adelante es disperso con una de
Walsh. La función Walsh con
datos son completamente
los usuarios en el
es asignado a un
lo que es igual a

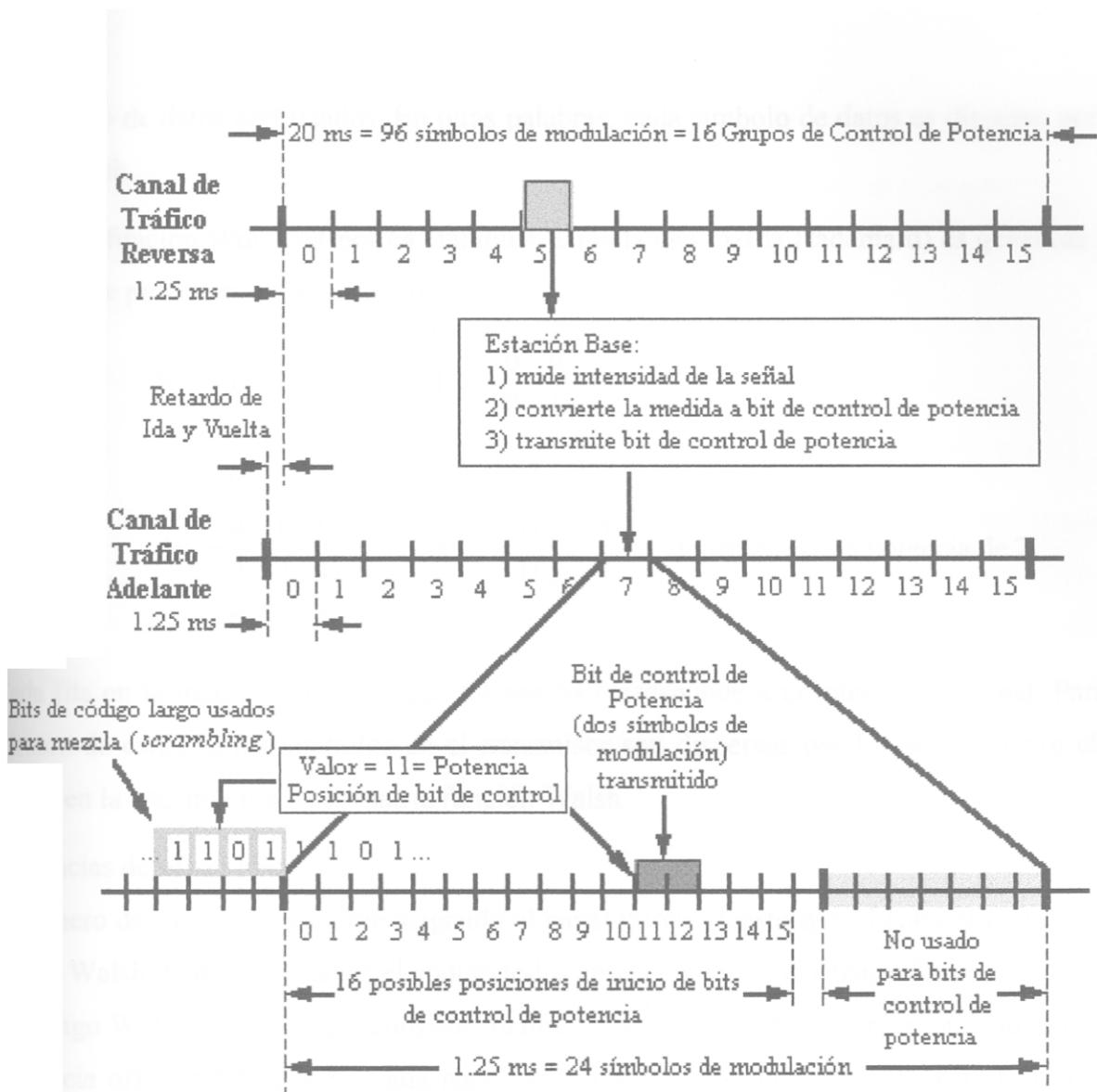


Fig. 2.5. Aleatorización de las posiciones del bit de control de potencia en un Canal de Tráfico Adelante IS-95.

2.5.1.6 Cobertura Ortogonal

La cobertura ortogonal es realizada a continuación de la mezcla de datos en el enlace adelante. Cada canal de tráfico transmitido en el canal CDMA adelante es disperso con una de las 64 funciones Walsh a una velocidad de chip fija de 1.2288 Mcps. La función Walsh consta de sesenticuatro secuencias binarias, cada una de longitud 64, las cuales son completamente ortogonales entre sí y proporcionan canalización ortogonal para todos los usuarios en el enlace adelante. Un usuario que es disperso usando una función Walsh n es asignado a un número de canal n ($n=0$ a 63). La secuencia Walsh se repite cada 52.083 μ s, lo que es igual a

un símbolo de datos codificados. En otras palabras, cada símbolo de datos es disperso por 64 chips Walsh.

La matriz función Walsh 64 por 64 (también llamada una matriz Hadamard) es generada por el siguiente procedimiento recursivo:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= 0 & H_2 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 & & & \\
 & & & \\
 H_4 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} & H_{2N} &= \begin{pmatrix} H_N & H_N \\ H_N & -H_N \end{pmatrix}, \text{ donde } N \text{ es una potencia de } 2.
 \end{aligned}$$

Cada fila en la matriz función Walsh 64 por 64 corresponde a un número de canal. Para el número de canal n , los símbolos en el transmisor son dispersos por los sesenticuatro chips Walsh en la n -ésima fila de la matriz función Walsh.

Secuencias de offset PN:

El número de canal 0 es siempre asignado al canal piloto. Puesto que el canal 0 representa al código Walsh 0 (W_0), el cual es el código todos ceros, entonces, el canal piloto no es más que un código Walsh “vacío” y así consiste solamente del código PN dispersor en cuadratura. La secuencia offset piloto PN es usada para identificar cada estación base. El offset de tiempo debe ser revisado dentro de un sistema celular CDMA.

El canal de sincronización es una señal codificada, dispersa, y modulada. El canal de sincronización utiliza la misma secuencia offset piloto PN que el canal piloto para una estación base dada. El canal de sincronización es vital para el sistema IS-95 y es asignado al canal número 32. Si están presentes canales de *paging*, ellos son asignados a los números menores de código de canales. Todos los canales restantes están disponibles para canales de tráfico adelante.

2.5.1.7 Modulación en Cuadratura.

Después de la cobertura ortogonal, los símbolos son dispersos en cuadratura como se muestra en la figura 2.3. Una secuencia dispersora binaria corta, con un periodo de $2^{15} - 1$ chips, es usada para fácil adquisición y sincronización en cada receptor móvil, y es usada para la modulación. Esta secuencia dispersora corta es llamada la secuencia PN piloto, y está basada en los siguientes polinomios característicos:

$P_I(x) = x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1$ para la modulación en fase (I), y

$P_Q(x) = x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$ para la modulación en cuadratura (Q).

Basado en los polinomios característicos, las secuencias PN piloto $i(n)$ y $q(n)$ son generadas por las siguientes recursiones lineales:

$$i(n) = i(n-15) \oplus i(n-10) \oplus i(n-8) \oplus i(n-7) \oplus i(n-6) \oplus i(n-2) \text{ y,}$$

$$q(n) = q(n-15) \oplus q(n-13) \oplus q(n-11) \oplus q(n-10) \oplus q(n-9) \oplus q(n-5) \oplus q(n-4) \oplus q(n-3)$$

donde los códigos PN en fase y en cuadratura son usados respectivamente, y \oplus representa adición módulo-2. Un '0' es insertado en cada secuencia después de la sucesión contigua de catorce '0's para generar secuencias PN pilotos de longitud 2^{15} . El estado inicial de ambas secuencias PN pilotos I y Q está definido como el estado en el cual la salida del generador de secuencia PN piloto es la primera salida '1' seguida de catorce salidas '0's consecutivas. Las velocidades de chips para las secuencias PN pilotos son de 1.2288 Mcps. Las salidas binarias I y Q de la dispersión en cuadratura son mapeadas dentro de fase de acuerdo a la tabla 2.4.

I	Q	Fase
0	0	$\pi/4$
1	0	$3\pi/4$
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$-\pi/4$

Tabla 2.4 Mapeo I y Q del Canal Adelante CDMA.

El proceso de demodulación de la estación móvil realizará operaciones complementarias al proceso de modulación de la estación base. La estación móvil proveerá un mínimo de cuatro elementos de procesamiento. Tres de ellos son capaces de rastrear y demodular componentes multitrayecto del canal adelante CDM. Por lo menos un elemento será un elemento buscador capaz de examinar y estimar la intensidad de la señal en cada secuencia offset piloto PN. La intensidad de señal del piloto es usada para seleccionar la estación base deseada durante el estado de desocupado o de inicialización. También, la intensidad de señal del piloto es usada

por la estación móvil para determinar cuando el handoff será solicitado y que estación base es candidata. La información acerca de handoff será enviada por la estación base vía la señalización del canal de tráfico reversa. La opción múltiple es la misma en ambos, el canal de tráfico adelante y el canal de tráfico reversa.

2.5.2 Canal Reversa CDMA.

Los canales reversa CDMA están constituidos de canales de acceso (AC) y canales de tráfico reversa (RTC). Debido a que la estación móvil no establece un tiempo del sistema como la estación base, la señal del canal reversa recibida en la estación base no puede usar detección coherente. Así, las características de modulación del canal adelante y del canal reversa son diferentes. Ambos comparten la misma asignación de frecuencia, y cada canal de tráfico/acceso es identificado por un código largo de usuario distinto. El canal de acceso es usado por el móvil para iniciar la comunicación con la estación base y para responder a mensajes del canal de *paging*. El canal de acceso es un canal de acceso aleatorio con cada usuario de canal únicamente identificado por sus códigos largos. El canal reversa CDMA puede contener un máximo de 32 ACs por canal de *paging* soportado. Mientras que el RTC opera a velocidad de datos variable, el AC trabaja a velocidad de datos fijas de 4800 bps.

El proceso de modulación del canal de tráfico reversa es mostrado en la figura 2.6. Los datos de usuario en el canal reversa son agrupados dentro de marcos de 20ms. Todos los datos transmitidos en el canal reversa son convolucionalmente codificados, entremezclados por bloques (*block interleaved*), modulados por una modulación ortogonal 64-ario, y dispersados antes de la transmisión. La tabla 2.5 muestra los parámetros de modulación para el canal de tráfico reversa, y la tabla 2.6 los parámetros de modulación para el canal de acceso [EIA92]. La voz o la velocidad de datos del usuario en el canal reversa puede ser enviado a 9600, 4800, 2400, o 1200 bps tal como se muestra en el punto A de la figura 2.6. La velocidad real de transmisión es fijada a 28800 símbolos de código por segundo. Esto resulta en una velocidad fija de chip Walsh de 307200 chips por segundo. Cada chip Walsh es disperso por cuatro chips PN. La velocidad de la secuencia de dispersión PN es fijada a 1.2288 millones de chips por segundo.

Parámetro	Velocidad de Datos (bps)				Unidades
	9600	4800	2400	1200	
Velocidad de Código	1/3	1/3	1/3	1/3	bits/símbolos de código
Ciclo válido de Tx.	100.0	50.0	25.0	12.5	%
Velocidad de Datos Codificados (Velocidad de Símbolos de código)	28800	28800	28800	28800	sps
Bits por Símbolo Walsh (Modulación)	6	6	6	6	símbolos de código / símbolos de modulación
Velocidad de Símbolo Walsh (Velocidad de Símbolo de Modulación)	4800	4800	4800	4800	sps
Velocidad de Chips Walsh	307.2	307.2	307.2	307.2	kcps
Duración de Símbolo Walsh (Duración de Símbolo de Modulación)	208.33	208.33	208.33	208.33	μs
Chips PN/Símbolo de Código	42.67	42.67	42.67	42.67	-
Chips PN/Símbolo Walsh (de Modulación)	256	256	256	256	-
Chips PN/Chips Walsh	4	4	4	4	-
Velocidad de Chip PN	1.2288	1.2288	1.2288	1.2288	Mcps

Tabla 2.5 Parámetros de Modulación del Canal de Tráfico Reversa.

Parámetro	Velocidad de datos 4800 bps	Unidades
Velocidad de Código	1/3	bits/símbolos de código
Repetición de símbolo de código	2	símbolos/símbolo de código
Ciclo válido de Tx.	100.0	%
Velocidad de Datos Codificados (Velocidad de Símbolos de código)	28800	sps
Bits por Símbolo Walsh (Modulación)	6	símbolos de código / símbolos de modulación
Velocidad de Símbolo Walsh (Velocidad de Símbolo de Modulación)	4800	sps
Velocidad de Chips Walsh	307.2	kcps
Duración de Símbolo Walsh (Duración de Símbolo de Modulación)	208.33	μ s
Chips PN/Símbolo de Código	42.67	-
Chips PN/Símbolo Walsh (de Modulación)	256	-
Chips PN/Chips Walsh	4	-
Velocidad de Chip PN	1.2288	Mcps

Tabla 2.6 Parámetros de Modulación del Canal de Acceso.

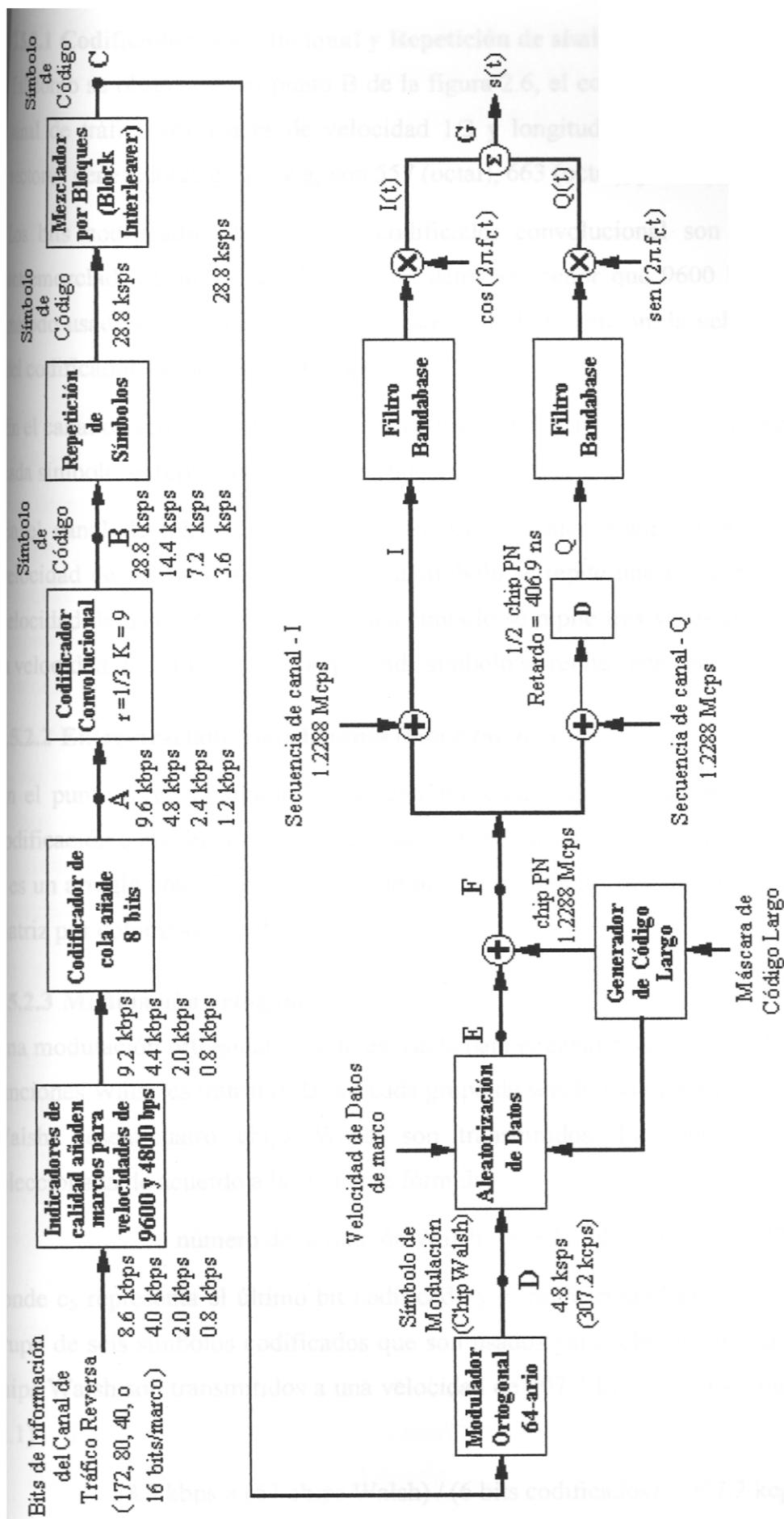


Fig. 2.6. Proceso de modulación del Canal Reversa CDMA.

2.5.2.1 Codificador convolucional y Repetición de símbolos

Tal como se observa en el punto B de la figura 2.6, el codificador convolucional usado en el canal de tráfico reversa es de velocidad 1/3 y longitud limite 9 ($K=9$ registros). Los tres vectores generadores g_0 , g_1 , y g_2 son 557 (octal), 663 (octal), y 771 (octal) respectivamente.

Los bits codificados después del codificador convolucional son repetidos antes de ser entremezclados cuando la velocidad de datos es menor que 9600 bps. Esto es idéntico al método usado en el canal adelante. Después de la repetición, la velocidad de símbolo fuera del codificador es fijada a 28800 bps.

En el canal de acceso, cada símbolo de código tiene una velocidad fija de datos de 4800 bps, y cada símbolo se repite una vez consecutivamente.

En el canal de tráfico reversa, la velocidad de datos completa es de 9600 bps. Para la velocidad de datos de 4800 kbps, cada símbolo se repite una vez consecutivamente. Para la velocidad de datos de 2400 kbps, cada símbolo se repite tres veces consecutivamente, y para la velocidad de datos de 1200 kbps, cada símbolo se repite siete veces consecutivamente.

2.5.2.2 Entremezclador por bloques (*block interleaver*)

En el punto C de la figura 2.6, el entremezclado por bloques es realizado después de la codificación convolucional y de la repetición. El entremezclador por bloques extiende 20 ms, y es un arreglo con 32 filas y 18 columnas. Los símbolos de código son escritos dentro de la matriz por columnas y leídos por filas.

2.5.2.3 Modulación ortogonal

Una modulación ortogonal 64-ario es usada para el canal reversa CDMA. Una de 64 posibles funciones Walsh es transmitida por cada grupo de seis bits codificados. Dentro de una función Walsh, sesenticuatro chips Walsh son transmitidos. La función Walsh particular es seleccionada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{número de la función Walsh} = c_0 + 2c_1 + 4c_2 + 8c_3 + 16c_4 + 32c_5$$

donde c_5 representa el último bit codificado y c_0 representa el primer bit codificado de cada grupo de seis símbolos codificados que son usados para seleccionar una función Walsh. Los chips Walsh son transmitidos a una velocidad de 307.2 kcps como se muestra en la ecuación (2.1)

$$28.8 \text{ kbps} \times (64 \text{ chips Walsh}) / (6 \text{ bits codificados}) = 307.2 \text{ kcps} \quad (2.1)$$

Nótese que las funciones Walsh son usadas con diferentes propósitos en los canales adelante y reversa. En el canal adelante, las funciones Walsh son usadas para dispersar y así denotar un canal de usuario particular, mientras que en el canal reversa, las funciones Walsh son usadas para modulación de datos.

continúa en cuatro

2.5.2.4 Transmisión a Velocidad de datos Variable

Datos de velocidad variable son enviados en el canal reversa CDMA. La repetición de símbolos de código introduce redundancia cuando la velocidad de datos es menor a 9600 bps. La aleatorización de datos es usada para transmitir ciertos bits mientras se apaga el transmisor durante otros tiempos. Cuando la velocidad de datos es 9600 bps, todos los bits de salida entremezclados son transmitidos. Cuando la velocidad de datos es 4800 bps, la mitad de los bits de salida entremezclados son transmitidos, y la unidad móvil no transmite 50 % del tiempo, y así en adelante (ver tabla 2.5). La figura 2.7 ilustra el proceso bajo diferentes velocidades de datos [EIA92]. Los datos en cada marco de 20 ms son divididos en dieciséis grupos de control de potencia, cada uno con periodo 1.25 ms. Algunos grupos de control de potencia son enviados, mientras que otros no son enviados. La aleatorización de datos asegura que cada símbolo de código repetido es transmitido exactamente una vez. Durante el proceso de no envío, la estación móvil reduce su EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) por lo menos 20 dB con respecto a la potencia del periodo enviado más reciente, o al piso de ruido del transmisor, cualquiera fuera mayor. Esto reduce la interferencia a otras estaciones móviles operando en el mismo canal reversa CDMA.

En el punto E de la figura 2.6, la aleatorización de datos genera un patrón de enmascaramiento de “0s” y “1s” que aleatoriamente enmascara los datos redundantes generados por el proceso de repetición de código. La velocidad de datos del marco y un bloque de 14 bits tomados del código largo determinan el patrón de enmascaramiento. Los últimos 14 bits del código largo usados para dispersar en el penúltimo grupo de control de potencia del marco anterior son usados para determinar la máscara aleatoria para el envío. Estos 14 bits son denotados como:

$$b_0b_1b_2b_3b_4b_5b_6b_7b_8b_9b_{10}b_{11}b_{12}b_{13}$$

donde b_0 representa el primer bits, y b_{13} representa el último bit. El algoritmo de aleatorización de datos es como sigue:

- Si la velocidad de datos del usuario es 9600 bps, la transmisión ocurre en todos los dieciséis grupos de control de potencia.

- Si la velocidad de datos del usuario es 4800 bps, la transmisión ocurre en ocho grupos de control de potencia dados como:

$$b_0, 2 + b_1, 4 + b_2, 6 + b_3, 8 + b_4, 10 + b_5, 12 + b_6, 14 + b_7$$

- Si la velocidad de datos del usuario es 2400 bps, la transmisión ocurre en cuatro grupos de control de potencia numerados:

- 1) b_0 si $b_8 = 0$, o $2 + b_1$ si $b_8 = 1$
- 2) $4 + b_2$ si $b_9 = 0$, o $6 + b_3$ si $b_9 = 1$
- 3) $8 + b_4$ si $b_{10} = 0$, o $10 + b_5$ si $b_{10} = 1$
- 4) $12 + b_6$ si $b_{11} = 0$, o $14 + b_7$ si $b_{11} = 1$

- Si la velocidad de datos del usuario es 1200 bps, la transmisión ocurre en dos grupos de control de potencia numerados:

- 1) b_0 si $(b_8 = 0 \text{ y } b_{12} = 0)$, o $2 + b_1$ si $(b_8 = 1 \text{ y } b_{12} = 0)$, o $4 + b_2$ si $(b_9 = 0 \text{ y } b_{12} = 1)$, o $6 + b_3$ si $(b_9 = 1 \text{ y } b_{12} = 1)$
- 2) $8 + b_4$ si $(b_{10} = 0 \text{ y } b_{13} = 0)$, o $10 + b_5$ si $(b_{10} = 1 \text{ y } b_{13} = 0)$, o $12 + b_6$ si $(b_{11} = 0 \text{ y } b_{13} = 1)$, o $14 + b_7$ si $(b_{11} = 1 \text{ y } b_{13} = 1)$.

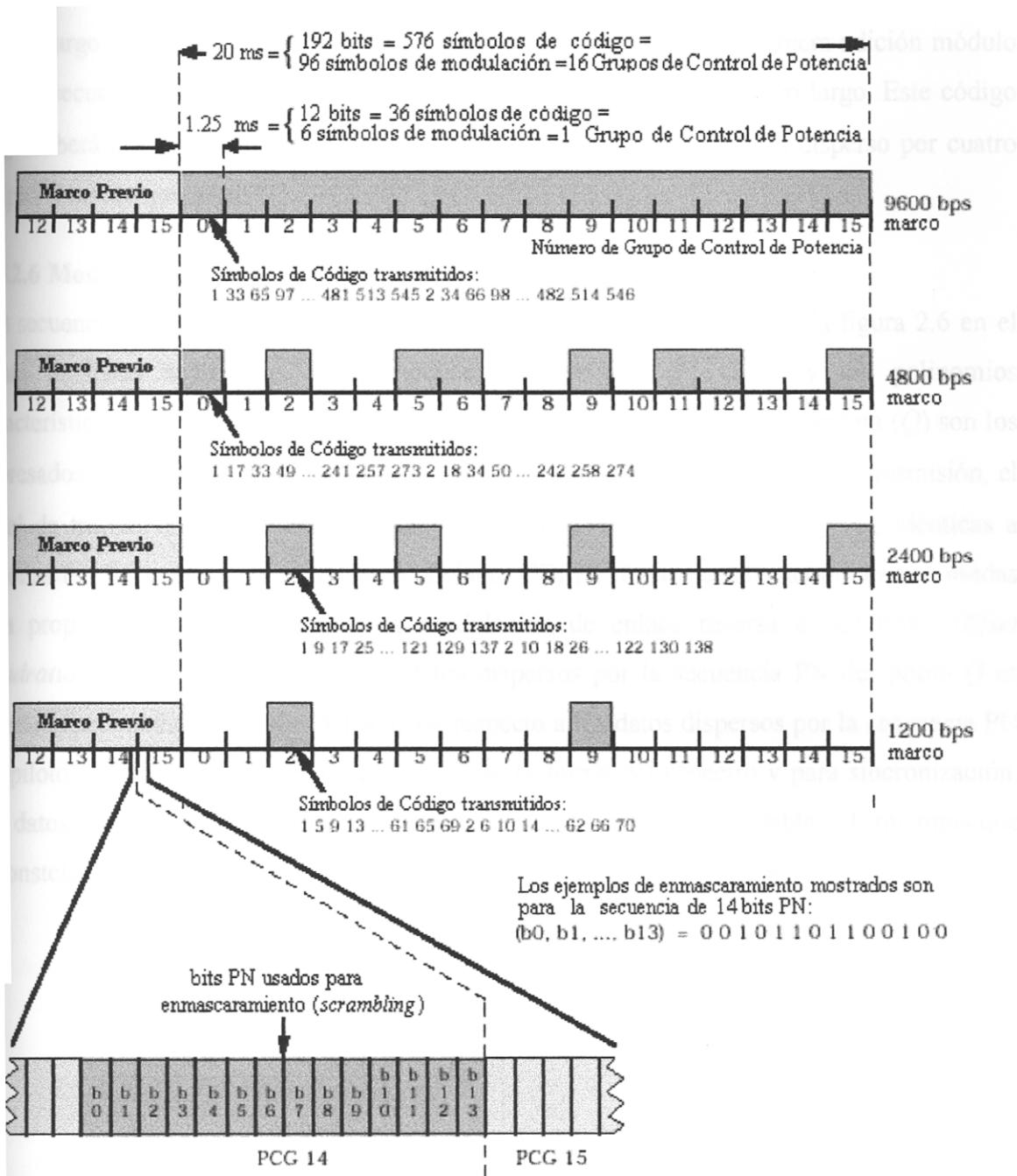


Fig. 2.7. Ejemplo de transmisión a velocidad de datos variable del Canal Reversa CDMA.

2.5.2.5 Dispersión por Secuencia Directa

En el punto F de la figura 2.6, previa a la transmisión, el canal de tráfico reversa y el canal de acceso son dispersos por la secuencia directa PN de código largo la cual opera a una velocidad de 1.2288 Mcps. El código largo es generado como se describió en la sección 2.4.1.3 para el canal adelante. Para el canal de tráfico reversa, esta operación de dispersión involucra adición módulo 2 de la secuencia de salida de la aleatorización de datos y del

código largo. Para el canal de acceso, esta operación de dispersión involucra adición módulo 2 de la secuencia de salida del modulador ortogonal 64-ario y del código largo. Este código largo deberá ser periódico con periodo $2^{42}-1$ chips. Cada chip Walsh es disperso por cuatro chips PN de código largo.

2.5.2.6 Modulación en cuadratura

Las secuencias usadas para la dispersión en cuadratura son mostradas en la figura 2.6 en el punto F. Estas secuencias son periódicas con periodo 2^{15} chips, y los polinomios característicos para la modulación en fase (I) y para la modulación en cuadratura (Q) son los expresados en la sección 2.4.1.7, los cuales son de periodo $2^{15}-1$. Previo a la transmisión, el canal de tráfico reversa es disperso por secuencias PN de canal piloto I y Q , idénticas a aquellas usadas en el proceso de canal adelante CDMA. Estas secuencias piloto son usadas para propósito de sincronización. La modulación de enlace reversa es OQPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*). Los datos dispersos por la secuencia PN del piloto Q es retardada por medio chip (406.901 ns) con respecto a los datos dispersos por la secuencia PN del piloto I . Este retardo es usado para mejorar la forma del espectro y para sincronización. Los datos binarios I y Q son mapeados dentro de fase de acuerdo a la tabla 2.4, mientras que la constelación de las señales y la transición de fase se muestran en la figura 2.8.

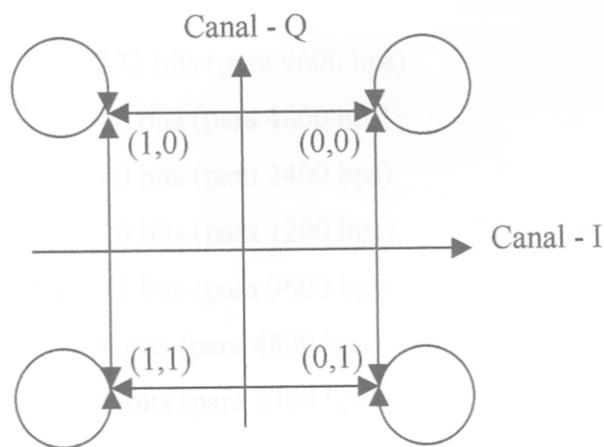


Fig. 2.8. Constelación de las señales y transición de fase del Canal Reverso CDMA.

2.5.2.7 Canal de Acceso y Canal de Tráfico Reversa

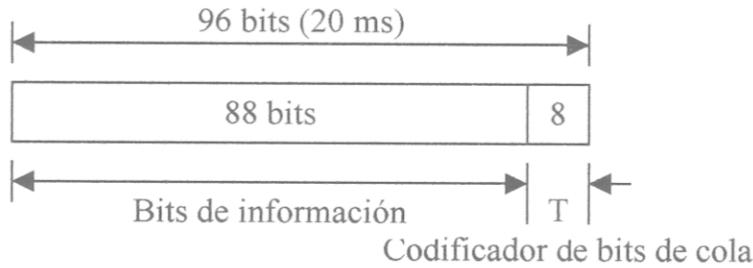
Canal de Acceso

Alineación de tiempo: Un marco de canal de acceso comenzará solamente cuando el tiempo del sistema sea un múltiplo entero de 20 ms.

Velocidad de modulación: una velocidad fija de 4800 bps.

El canal reversa CDMA puede contener hasta 32 números de canales de acceso, 0 a 31, por canal de *paging* soportado (figura 2.9a). Cada canal de acceso es asociado con un único canal de *paging* en el correspondiente canal adelante CDMA (figura 2.9b).

Estructura del marco:

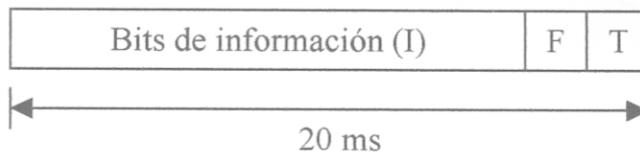


Canal de Tráfico Reversa

Velocidad de datos variable de 9600, 4800, 2400, o 1200 bps.

Todos los marcos tienen una duración de 20 ms.

Estructura del marco:



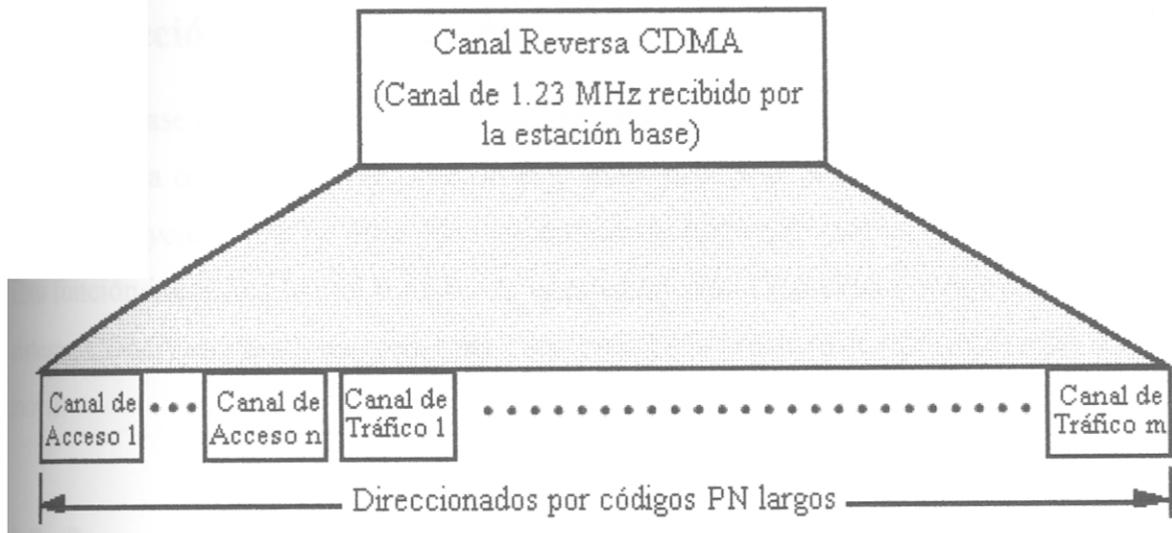
Bits de información (I):

- 172 bits (para 9600 bps)
- 80 bits (para 4800 bps)
- 40 bits (para 2400 bps)
- 16 bits (para 1200 bps)

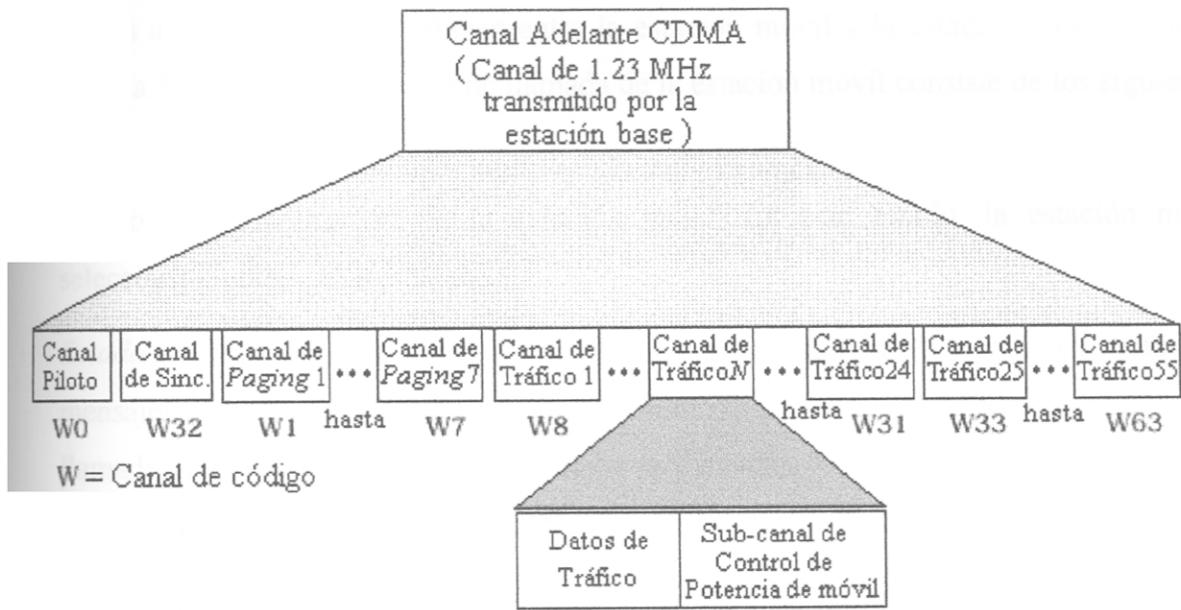
Indicador de calidad de marco (F):

- 12 bits (para 9600 bps)
- 8 bits (para 4800 bps)
- 0 bits (para 2400 bps)
- 0 bits (para 1200 bps)

Bits de cola (T): 8 bits para todas las velocidades de datos.



(a)



(b)

Fig. 2.9. Estructura del canal CDMA. (a) Ejemplo de Canal Reversa CDMA recibido en una estación base; (b) ejemplo de un Canal Adelante CDMA transmitido por una estación base.

La referencia de tiempo será establecida en la estación móvil. El tiempo de ocurrencia del componente multirrayecto de arribo más reciente es usado para la demodulación. La referencia de tiempo del canal de tráfico adelante es usada para el tiempo de transmisión del canal de tráfico reversa. La referencia de tiempo del canal de *paging* es usada para el tiempo de transmisión del canal de acceso.

2.6 Detección de mal función.

La estación base detecta la mal función de una estación móvil preguntando a la estación móvil responder a la orden de cerrar (*lock order*), orden de cerrar hasta el ciclo de potencia (*lock until power-cycled order*) y orden de mantenimiento requerido (*maintenance required order*). Esta función identifica la mal función de la estación móvil y previene a ésta de contaminar al sistema CDMA enviando una señal para desconectar la potencia de transmisión de la estación móvil.

2.7 Proceso de llamada.

Esta sección describe el proceso de llamada de la estación móvil. Contiene frecuentes referencias a los mensajes que fluyen entre la estación móvil y la estación base. Como se ilustra en la figura 2.10, el proceso de llamada de la estación móvil consiste de los siguientes estados:

- *Estado de Inicialización de la estación móvil:* En este estado, la estación móvil selecciona y adquiere un sistema.
- *Estado de Desocupado de la estación móvil:* En este estado, la estación móvil monitorea mensajes en el Canal de *Paging*. La estación móvil puede recibir mensajes, recibir una llamada entrante (la estación móvil recibe la llamada), iniciar una llamada (la estación móvil origina la llamada), registrarse, o iniciar una transmisión de mensaje.
- *Estado de Acceso al Sistema:* En este estado, la estación móvil envía mensajes a la estación base en el Canal de Acceso y recibe mensajes de la estación base en el Canal de *Paging*.
- *Estado de Control de la estación móvil en el Canal de Tráfico:* En este estado, la estación móvil se comunica con la estación base usando los canales de Tráfico Adelante y Reversa.

Después de que la estación móvil es encendida, ingresará al sub-estado de Determinación de Sistema del estado de Inicialización de la estación móvil con una indicación de encendido.

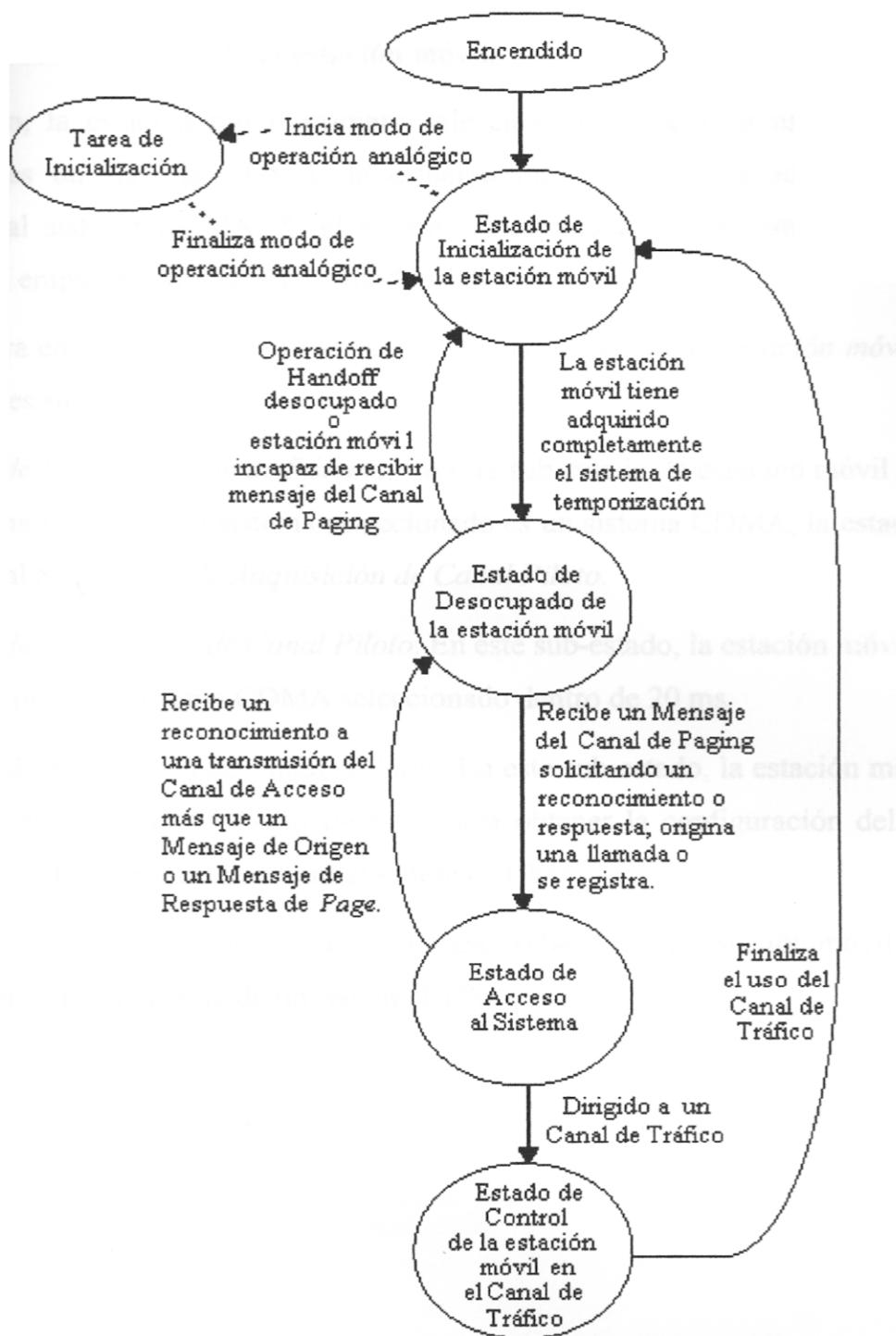


Fig. 2.10. Estados del proceso de llamada de la estación móvil.

(nota: no todas las transiciones de estados son mostradas).

2.7.1 Estado de Inicialización de la estación móvil.

En este estado, la estación móvil primero selecciona un sistema a usar. Si el sistema seleccionado es un sistema CDMA, la estación móvil procede a adquirir y luego a sincronizarse al sistema CDMA. Si el sistema seleccionado es un sistema analógico, la estación móvil empieza la operación en modo analógico.

Como se ilustra en la figura 2.11, el *Estado de Inicialización de la estación móvil* consiste de los siguientes sub-estados:

- *Sub-estado de Determinación de Sistema:* En este sub-estado, la estación móvil selecciona que sistema utilizar. si el sistema seleccionado es un sistema CDMA, la estación móvil ingresará al *Sub-estado de Adquisición de Canal Piloto*.
- *Sub-estado de Adquisición de Canal Piloto:* En este sub-estado, la estación móvil adquiere el Canal Piloto del sistema CDMA seleccionado dentro de 20 ms.
- *Sub-estado de Adquisición de Canal de Sinc.:* En este sub-estado, la estación móvil recibe y procesa el *Mensaje del Canal de Sinc.* para obtener la configuración del sistema e información de temporización para el sistema CDMA.
- *Sub-estado de Cambio de Temporización:* En este sub-estado, la estación móvil sincroniza su temporización a aquella de un sistema CDMA.

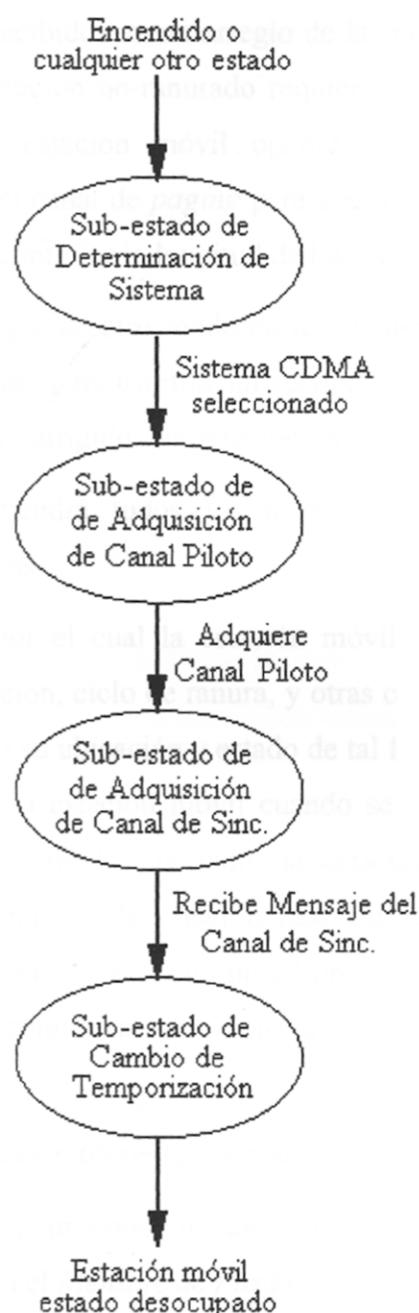


Fig. 2.11. Estado de Inicialización de la estación móvil.
(nota: no todas las transiciones de estados son mostradas).

2.7.2 Estado de Desocupado de la estación móvil.

- La estación móvil realizará procedimientos de monitoreo del Canal de *Paging*. El Canal de *Paging* es dividido en ranuras (*slots*) de 200 ms llamadas *Paging Channel slots*. Mensajes de control y *paging* para una estación móvil operando en el modo no-ranurado

(*nonslotted*) pueden ser recibidos en un arreglo de las ranuras del canal de *paging*. Por lo tanto, el modo de operación no-ranurado requiere que la estación móvil monitoree todas las ranuras. Una estación móvil operado en el modo ranurado (*slotted*) generalmente monitorea el canal de *paging* para una o dos ranuras por ciclo de ranura. La estación móvil puede controlar la longitud de los ciclos de ranura.

- A menos que se especifique de otro modo en los requisitos para procesar un mensaje específico, la estación móvil transmitirá un reconocimiento en respuesta a cualquier mensaje recibido que fuera dirigido a la estación móvil.
- La estación móvil mantendrá todos los temporizadores de registro o matrícula (*registration timers*) activos.

Registrarse es el proceso por el cual la estación móvil notifica a la estación base su ubicación, estado, identificación, ciclo de ranura, y otras características. La estación móvil informa a la estación base de su ubicación y estado de tal forma que la estación base pueda eficientemente perifonear a la estación móvil cuando se establece una llamada hacia el móvil. Para operación en el modo ranurado, la estación móvil provee el parámetro CICLO_RANURA de manera que la estación base puede determinar que ranuras está monitoreando la estación móvil. La estación móvil provee la marca de clase de estación y número de revisión de protocolo de tal forma que la estación base sabe las capacidades de la estación móvil.

El sistema CDMA soporta nueve diferentes formas de registrarse:

Los registros autónomos, que son condicionados en parte por el estado de *roaming* y por los indicadores contenidos en el *Mensaje de Parámetros del Sistema*, son:

1. *Power-up registration*. La estación móvil se registra cuando es encendida, conmuta de usar el sistema de servicio alterno, o conmuta de usar el sistema analógico.
2. *Power-down registration*. La estación móvil se registra cuando es apagada si previamente se registró en el sistema de servicio corriente.
3. *Timer-based registration*. La estación móvil se registra cuando un temporizador expira.
4. *Distance-based registration*. La estación móvil se registra cuando la distancia entre la estación base actual y la estación base en la cual por última vez se registró excede un umbral.

5. *Zone-based registration*. La estación móvil se registra cuando ésta ingresa a una nueva zona.

Registros bajo diferentes solicitudes:

6. *Parameter-change registration*. La estación móvil se registra cuando algunos de sus parámetros almacenados cambian.
7. *Ordered registration*. La estación móvil se registra cuando la estación base se lo solicita.
8. *Implicit registration*. Cuando una estación móvil envía exitosamente un mensaje de origen o un mensaje de respuesta a perifoneo (*page*), la estación base puede inferir la ubicación de la estación móvil, causando un registro implícito.
9. *Traffic channel registration*. En cuanto la estación base tenga información de registro de una estación móvil que ha sido asignada a un canal de tráfico, la estación base puede notificar a la estación móvil que esta registrada.

2.7.3 Estado de Acceso al Sistema.

La estación móvil envía mensajes a la estación base en el Canal de Acceso y recibe mensajes desde la estación base en el Canal de *Paging*. El proceso entero de enviar un mensaje y recibir reconocimiento de ese mensaje es llamado un Intento de Acceso (*Access Attempt*). Cada transmisión en el Intento de Acceso es llamada una Prueba de Acceso (*Access Probe*). La estación móvil transmite el mismo mensaje en cada Prueba de Acceso en un Intento de Acceso. Cada Prueba de Acceso consiste de un Preámbulo de Acceso al Canal y de una Cápsula de Mensaje de Acceso al Canal. Hay dos tipos de mensajes enviados en el Canal de Acceso: Un Mensaje de Respuesta y un Mensaje de Solicitud. El Intento de Acceso termina después de que un reconocimiento es recibido.

2.7.4 Estado de Control de la estación móvil en el Canal de Tráfico.

La estación móvil se comunica con la estación base usando los Canales de Tráfico Adelante y Reversa.

Existen cinco funciones:

1. La estación móvil verifica que puede recibir el Canal de Tráfico Adelante y comienza a transmitir en el Canal de Tráfico Reversa.
2. La estación móvil espera por una orden en una alerta con Mensaje de Información.
3. La estación móvil espera por el usuario para responder la llamada.

4. La aplicación de opciones de servicio primario de la estación móvil intercambia paquetes de tráfico primario con la estación base.
5. La estación móvil desconecta la llamada.

2.8 Procedimientos de Handoff.

2.8.1 Tipos de Handoff

La estación móvil soporta los siguientes procedimientos de Handoff:

- a) **Soft Handoff:** Handoff en el cual una nueva estación base inicia comunicación con la estación móvil sin interrumpir la comunicación con la antigua estación base. La estación base² puede dirigir a la estación móvil a realizar un soft handoff solamente cuando todos los Canales de Tráfico Adelante (*forward*) asignados a la estación móvil tienen idéntica asignación de frecuencias y marcos de offset (*frame offsets*). Soft Handoff proporciona diversidad de trayecto para los Canales de Tráfico Adelante (*forward*) y para los Canales de Tráfico Reversa (*reverse*) en los límites entre estaciones base.
- b) **Hard Handoff de CDMA a CDMA:** Handoff en el cual la estación base dirige a la estación móvil a una transición entre grupos disjuntos de estaciones base, diferente asignación de frecuencias, o diferentes marcos de offset (*frame offsets*).
- c) **Handoff de CDMA a Analógico:** Handoff en el cual la estación base dirige a la estación móvil de un Canal de Tráfico Adelante (*forward*) a un canal de voz analógico.
- d) **Softer Handoff:** Handoffs entre sectores dentro de una celda.

2.8.2 Grupos Pilotos (*Pilot Sets*)

La información obtenida del canal piloto es usada para el handoff. Un piloto está asociado con los Canales de Tráfico Adelante en el mismo Canal CDMA Adelante. Un canal piloto está identificado por una secuencia offset piloto (*pilot sequence offset*). Cada canal piloto es asignado a una estación base particular. Todos los pilotos en un grupo piloto tienen la misma asignación de frecuencias CDMA.

La estación móvil busca pilotos en la presente asignación de frecuencias CDMA para detectar la presencia de Canales CDMA y medir sus intensidades. Cuando la estación móvil detecta un piloto de suficiente intensidad que no está asociado con alguno de los Canales de Tráfico

² Aquí, el término estación base puede implicar múltiples celdas o sectores.

Adelante asignado a ella, la estación móvil envía un Mensaje de Medida de Intensidad de Piloto (*Pilot Strength Measurement Message*) a la estación base. Así, la estación base puede luego asignar un Canal de Tráfico Adelante asociado con aquel piloto a la estación móvil para realizar un handoff.

El piloto busca parámetros, y las condiciones para la transmisión del Mensaje de Medida de Intensidad de Piloto son expresadas en términos de los siguientes grupos de canales pilotos que una estación móvil puede obtener:

a) Grupo Activo: Los pilotos asociados con los Canales de Tráfico Adelante asignados a la estación móvil.

El Grupo Activo contiene los pilotos asociados con los Canales de Tráfico Adelante asignados a la estación móvil. Inicialmente la estación base informa a la estación móvil de los contenidos del Grupo Activo usando el Mensaje de Asignación de Canal (*Channel Assignment Message*); subsecuentes cambios a los contenidos del Grupo Activo son proporcionados usando el Mensaje de Dirección de Handoff Extendido (*Extended Handoff Direction Message*) o el Mensaje de Dirección de Handoff (*Handoff Direction Message*).

b) Grupo Candidato: Los pilotos que no están en el Grupo Activo pero son recibidos por la estación móvil con suficiente intensidad para indicar que los Canales de Tráfico Adelante podrán ser exitosamente demodulados.

c) Grupo Vecino: Los pilotos que no están en el Grupo Activo ni en el Grupo Candidato y son probablemente candidatos para handoff.

d) Grupo Restante: El conjunto de todos los posibles pilotos en el sistema actual en la asignación de frecuencias CDMA actual, excluyendo los pilotos en los tres grupos anteriores.

2.8.3 Requisitos de Piloto

Para cada uno de los grupos pilotos mencionados anteriormente, la estación base establece la ventana de búsqueda³ (rango de offsets PN) en la cual se encuentra la estación móvil para buscar componentes multitrayecto útiles (es decir, componentes multitrayecto que la estación móvil puede usar para la demodulación del Canal de Tráfico Adelante asociado) de los pilotos en el grupo.

³ El criterio de búsqueda está definido en el IS-98 "Recommended Minimum Performance Standards for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular Mobile Stations."

La estación móvil ayuda a la estación base en el proceso de handoff midiendo y reportando la intensidad de los pilotos recibidos.

La estación móvil mantendrá un *handoff drop timer* para cada piloto en el Grupo Activo y en el Grupo Candidato. Cuando el nivel de intensidad de señal está por debajo de TDROP (también llamado T-DROP), T-TDROP es colocado a cero; es decir, el *timer* expira dentro de 100 ms. Hay 15 T-TDROP valores, el valor más alto de T-TDROP es 319 s. Cuando la estación móvil recibe un nivel de intensidad de señal desde la celda vecina excediendo un nivel dado TADD en decibelios, el soft handoff se inicia. Cuando la estación móvil recibe un nivel de intensidad de señal de la celda hogar debajo de TDROP, el soft handoff termina. La acción de handoff podría tomar lugar después de que el nivel recibido desde la celda hogar está por debajo de TDROP. Si el tiempo entre TADD y TDROP es muy corto, el tiempo T-TDROP tiene que ser más largo. También, en ciertas circunstancias, es preferible reducir las caídas de llamada y sacrificar la calidad de voz.

La estación móvil medirá el tiempo de arribo para cada piloto reportado a la estación base. El tiempo del componente multitrayecto útil del piloto que arriba primero es usado para medir relativo a la referencia de tiempo de la estación móvil en unidades de chips PN.

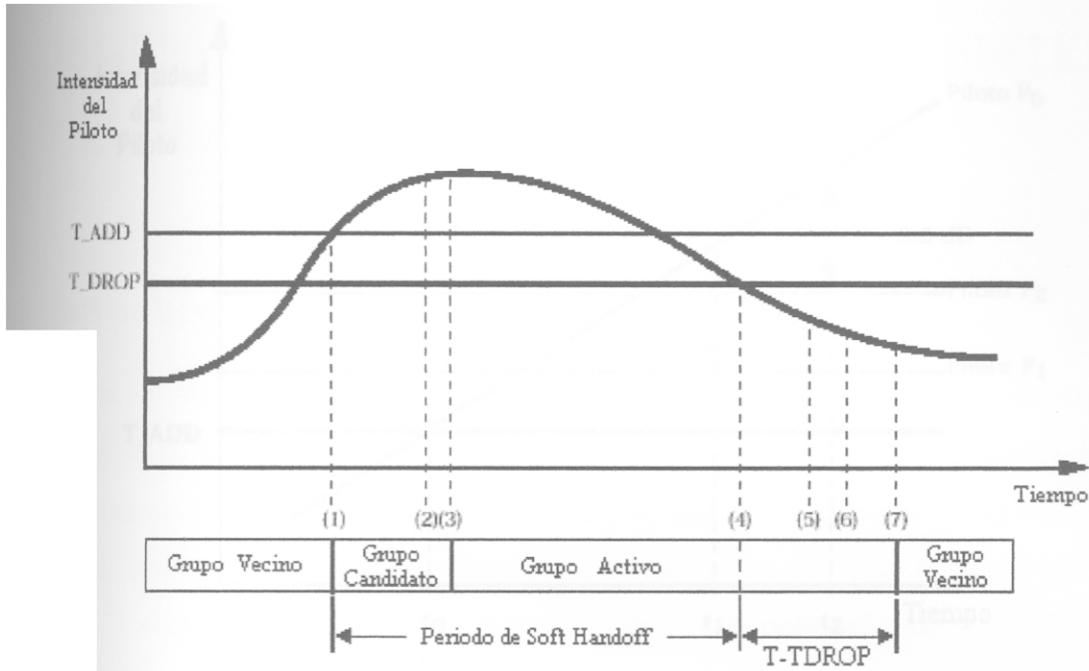
2.8.4 Soft Handoff

Todos los Canales de Tráfico Adelante asociados con pilotos en el Grupo Activo de la estación móvil llevan símbolos de modulación idénticos a aquellos de el subcanal de control de potencia. Cuando el Grupo Activo contiene más de un piloto, la estación móvil debería proveer combinación de diversidad de los Canales de Tráfico Adelante asociados. La estación móvil proveerá para retardos de propagación diferencial desde cero hasta por lo menos 150 μ s.

Para el control de potencia del Canal de Tráfico Reversa durante soft handoff, el mensaje de dirección de handoff identifica grupos de canales de Trafico Adelante que llevan subcanales de control de potencia de lazo cerrado idénticos. Un grupo consiste de una o más transmisiones de Canal de Tráfico Adelante con información de control de potencia idéntica. La estación móvil obtendrá a lo más un bit de control de potencia de cada grupo de subcanales de control de potencia de lazo cerrado idénticos. Si los bits de control de potencia obtenidos de todos los grupos son iguales a 0, la estación móvil incrementará su potencia; si ellos son igual a 1, la estación móvil decrementará su potencia.

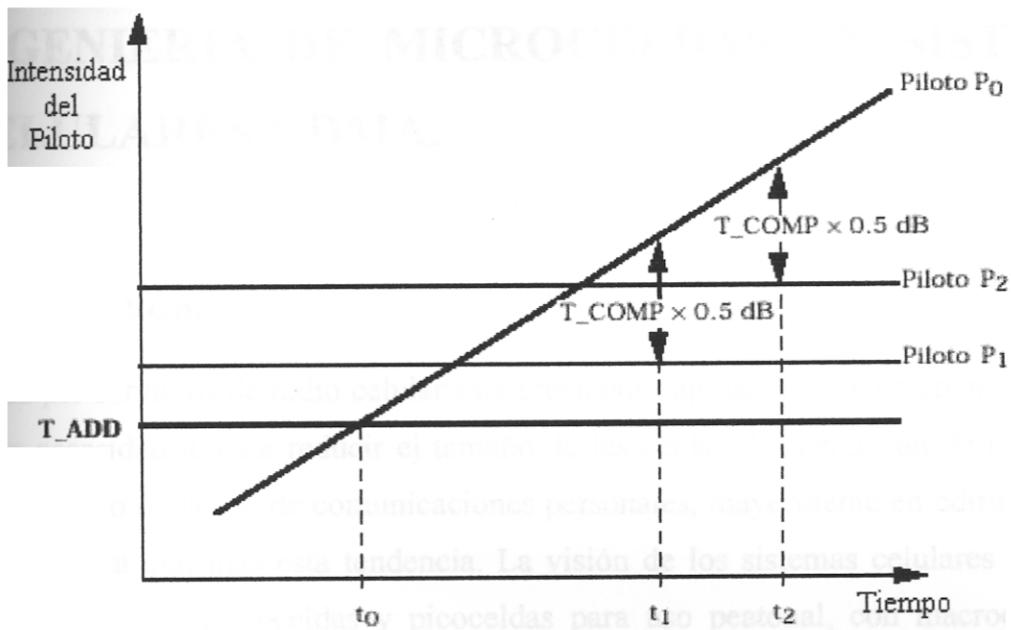
Los mensajes intercambiados entre la estación móvil y la estación base durante un proceso de handoff típico son mostrados en la fig. 2.12. Hay siete mensajes durante los soft handoffs. El primer mensaje que la estación móvil envía es un Mensaje de Medida de Intensidad de Piloto cuando la intensidad del piloto vecino excede TADD. El soft handoff se inicia. El séptimo mensaje indica que la estación móvil debería mover el piloto de el Grupo Activo al Grupo Vecino y enviar un mensaje de Finalización de Handoff (*Handoff Completion Message*). El soft handoff es así completado.

La fig. 2.13 ilustra el disparo de mensajes por el gradual incremento de la intensidad de un piloto del Grupo Candidato por encima de la intensidad de cada piloto del Grupo Activo. Durante el inicio del soft handoff, los dos pilotos P_1 y P_2 están indicados en el Grupo Activo. Note que la estación móvil reporta que un piloto P_0 en el Grupo Candidato es más fuerte que un piloto en el Grupo Activo solamente si la diferencia entre sus respectivas intensidades es por lo menos $T_COMP \times 0.5$ dB como se muestra en la fig. 2.13.



- (1) La intensidad del piloto excede T_ADD . La estación móvil envía un Mensaje de Medida Intensidad de Piloto y transfiere el piloto al Grupo Candidato.
- (2) La estación base envía un Mensaje de Dirección de Handoff.
- (3) La estación móvil transfiere el piloto al Grupo Activo y envía un Mensaje de Finalización de Handoff.
- (4) La intensidad del piloto cae por debajo de T_DROP . La estación móvil inicia el *handoff drop timer*.
- (5) El *handoff drop timer* expira. La estación móvil envía un Mensaje de Medida Intensidad de Piloto.
- (6) La estación base envía un Mensaje de Dirección de Handoff.
- (7) La estación móvil mueve el piloto desde el Grupo Activo hacia el Grupo Vecino y envía un Mensaje de Finalización de Handoff.

Fig. 2.12. Ejemplo de Umbral de Handoff.



Grupo Candidato: Piloto P₀

Grupo Activo: P₁, P₂

t_0 — Mensaje de Medida de Intensidad de Piloto enviado, $P_0 > T_ADD$

t_1 — Mensaje de Medida de Intensidad de Piloto enviado, $P_0 > P_1 + T_COMP \times 0.5 \text{ dB}$.

t_2 — Mensaje de Medida de Intensidad de Piloto enviado, $P_0 > P_2 + T_COMP \times 0.5 \text{ dB}$.

Fig. 2.13. Medidas de Intensidad de Piloto disparadas por un piloto candidato.

3 INGENIERIA DE MICROCELDAS EN SISTEMAS CELULARES CDMA.

3.1 Introducción.

La demanda por servicios de radio celular está creciendo rápidamente, y en áreas densamente pobladas la necesidad lleva a reducir el tamaño de las celdas. La extensión de los servicios dentro del dominio de la red de comunicaciones personales, mayormente en edificios y áreas de peatones, realza aún más esta tendencia. La visión de los sistemas celulares de “tercera generación” incorpora microceldas y picoceldas para uso peatonal, con macroceldas para móviles. La conectividad entre todas estas celdas, mientras se maximiza la capacidad total del sistema, es el mayor desafío que encaran los “arquitectos de tercera generación”. El sistema celular CDMA, el cual comparte el mismo canal de frecuencia en todo el sistema, y aplica soft handoff entre las celdas, ha mostrado ya, tanto por análisis como por pruebas, tener conectividad completa, sin degradación de la capacidad, entre las microceldas y las macroceldas que las cubren. [Sha94].

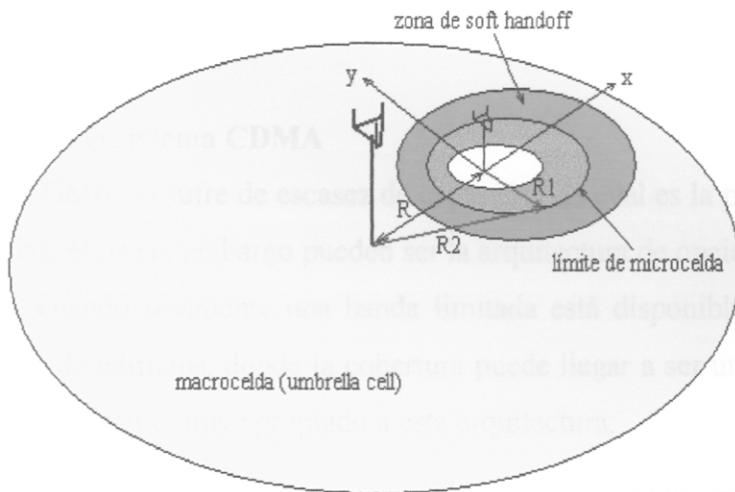


Fig. 3.1. Límite macrocelda/microcelda y la zona de handoff.

3.1.1 Tipos de microceldas

La radio comunicación celular fue diseñada para incrementar la capacidad teletráfica en un área de servicio determinado. La demanda para la atención está creciendo rápidamente, y en áreas densamente pobladas el servicio está alcanzando su límite, problema conocido como “el muro de ladrillo” (“*the brick wall*”).

La solución obvia para el sistema es encoger el tamaño de la celda y balancear el patrón de agrupamiento de las mismas; es decir, utilizar microceldas.

Las microceldas pueden clasificarse en [Sha94]:

1. **“Hot Spots”**: Estas pueden ser áreas de servicio con una densidad de tráfico muy alta, ó áreas cubiertas pobremente. Un *hot spot* está típicamente aislado e incluido en un *cluster* de celdas más grandes.
2. **Microceldas de la zona céntrica de una ciudad** (*downtown microcells*): Presentes en áreas contiguas densas que atienden a peatones y móviles. Se encuentran típicamente en zonas urbanas y comerciales antiguas de calles angostas, con antenas localizadas muy por debajo de la altura de los edificios.
3. **Celdas 3-D dentro de edificios**: Estas atienden peatones y edificios de oficinas. Este ambiente se encuentra altamente atestado de usuarios, con una densidad extremadamente alta y movilidad de usuario relativamente baja, - por ejemplo, un centro comercial – y un fuerte interés por el consumo de potencia de la unidad portátil.

3.1.2 Microceldas en el sistema CDMA

Aunque el sistema CDMA no sufre de escasez de capacidad, la cual es la principal razón para el uso de microceldas, éstas sin embargo pueden ser la arquitectura de opción en ciertos casos, como por ejemplo, cuando solamente una banda limitada está disponible en el periodo de transmisión, o dentro de edificios, donde la cobertura puede llegar a ser un factor primordial. El sistema CDMA es por tanto muy apropiado a esta arquitectura:

- Una potencia de transmisión baja y un amplificador de potencia simple y conversión *up/down* permiten unidades remotas simples. La antena distribuida, conformada por una serie de radiadores distribuidos con retardos de propagación insertados dentro de ellos, permite a la celda CDMA iluminar uniformemente un ambiente heterogéneo mientras usa la diversidad de “multitrayecto artificial” para mantener una señal de alta calidad.

El uso de una frecuencia común y soft handoff alivia un gran problema de transferencia entre microceldas y entre micro- y macroceldas y elimina la necesidad de un complejo plan de frecuencias.

3.2 El Control de Potencia y el Límite de Celda.

3.2.1 Control de potencia del enlace de reversa – la ecuación del control de potencia.

En sistemas celulares CDMA que emplean enlaces hacia adelante (*forward* - del sitio de celda hacia el móvil) y enlaces de reversa (*reverse* - del móvil hacia el sitio de celda) separados, celdas vecinas comparten la misma frecuencia, y cada estación base controla la potencia transmitida de cada uno de sus usuarios dentro de la celda. Sin embargo, una estación base en particular es incapaz de controlar la potencia de usuarios de celdas vecinas, así, en el receptor de la estación base en particular las potencias de transmisión de usuarios fuera de la celda añadirán interferencia a la ya existente dentro de la celda (donde los usuarios están bajo control de potencia), reduciendo la capacidad en el enlace de reversa de la celda en particular. Por lo tanto, la cantidad de interferencia fuera de la celda determina el factor de reuso de frecuencia, F , de un sistema celular CDMA. Concluyendo, si idealmente, cada celda comparte la misma frecuencia, el máximo valor posible de F ($F=1$) es alcanzado; en la práctica, sin embargo, la interferencia fuera de la celda reduce F significativamente. Así, mientras una única celda de un sistema CDMA ofrece reuso de frecuencia ideal ($F=1$), el real reuso de frecuencia está marcadamente en función de la distribución de usuarios y de las pérdidas por trayectoria [Rap96].

La ecuación que registra la capacidad de un sistema CDMA, dada en [Gil91], para el enlace de reversa es:

$$\frac{q \frac{W}{R_b}}{1 + \left(\frac{n}{F} - 1\right) dq} = \frac{E_b}{N_o} \quad (3.1)$$

donde:

- W es el ancho de banda CDMA.
- R_b es la velocidad de datos.

q es la señal recibida en el sitio de celda desde un solo usuario, referida al ruido del sistema N_oW ($q = \text{SNR}$ umbral por usuario en el sitio de celda).

n es el número de usuarios activos (número de llamadas).

d es el factor de actividad de voz, definido como la velocidad promedio de datos dividida por 9600 (la velocidad de datos nominal)

i es la interferencia introducida por celdas/sector circundante, referida a la autointerferencia en la celda/sector.

F es el factor de reuso de frecuencia $1+i = F$.

E_b es la energía por bit.

N_o es la densidad espectral de ruido.

El control de potencia de todos los transmisores en la celda provoca cambios en la interferencia al sitio de celda proporcionales a los cambios de q (la relación señal a ruido). En un ambiente en donde todas las celdas reciben la misma carga y son controladas a la misma SNR q , la interferencia externa es también proporcional a q .

Despejando q de la ecuación (3.1):

$$q = \frac{1}{\frac{W}{R_b} \frac{N_o}{E_b} - \left(\frac{n}{F} - 1\right) d} \quad (3.2)$$

$$q = \frac{1}{\frac{W}{R_b} \frac{N_o}{E_b} (1 - \eta)} \quad (3.3)$$

con:

$$\eta = \frac{\left(\frac{n}{F} - 1\right) d}{\frac{W}{R_b} \frac{N_o}{E_b}} \quad (3.4)$$

donde η es la carga fraccional de la celda [Sha92].

La figura 3.2 es la representación gráfica de la ecuación (3.3), en donde asumiendo una ganancia de procesamiento de espectro⁴ ensanchado W/R_b de 128 ($\cong 21$ dB)⁵ y una E_b/N_o requerida de 7 dB, la SNR umbral es de -14 dB para un solo usuario. Usuarios adicionales añaden interferencia que disminuye esta ventaja, formándose así, la curva de carga. Se

⁴ W/R_b : la ganancia de procesamiento de espectro es usada para reducir la interferencia y determinar el número de canales de tráfico que pueden ser creados [Lee95].

⁵ Considerando $W=1,23\text{MHz}$ y $R_b=9600\text{bps}$.

observa que el límite de capacidad en cada celda aparece como un polo en la ecuación de potencia; donde:

$$n_{pole}[\eta = 1] = \left(1 + \frac{W}{R_b} \frac{N_o}{E_b} \frac{1}{d}\right) F \quad (3.5)$$

es el límite superior del número de llamadas en una celda/sector para una E_b establecida.

Una capacidad nominal conveniente establece $\eta = 0.9$, en tal caso cada usuario es recibido en el sitio de celda con $SNR = -4.2$ dB. Este establecimiento nominal es un intercambio entre la capacidad y la sensibilidad del control de potencia para cambios en la carga.

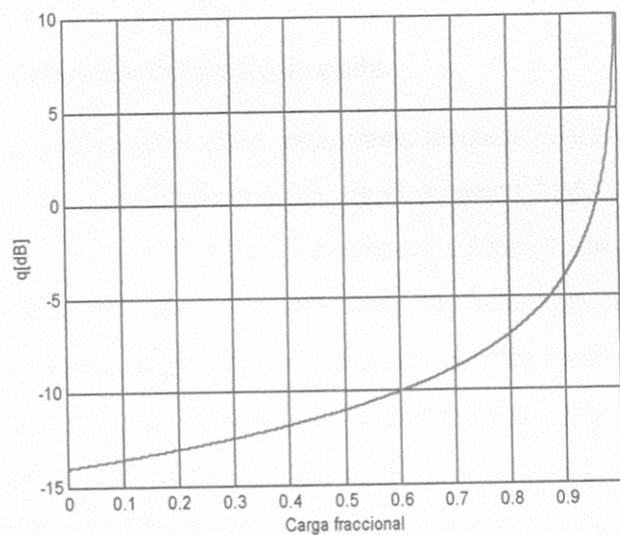


Fig. 3.2. SNR requerida en el sitio de celda en función de la carga, con $E_b/N_o=7$ dB.

El efecto de los parámetros del sistema en la capacidad de la celda puede apreciarse en la tabla 3.1⁶. F , el factor de reuso, depende de la interferencia de las celdas circundantes, y para un sistema cargado uniformemente puede variar entre 0,6 y 0,67. Esto depende de la ubicación de las celdas circundantes, de las condiciones de propagación entre las celdas, y de la distribución de los usuarios en las celdas circundantes. La relación E_b/N_o requerida depende de las condiciones de multirayectoria, y puede variar desde 5 dB hasta más de 8 dB.

⁶ Se considera actividad de voz del 40%, por lo tanto el factor de voz d es de 0,4.

	Celdas omnidireccionales cargadas uniformemente	Celda omnidireccional aislada
F	0,667	1
E_b/N_o	7 dB	6 dB
W/R_b	128	128
$n [\eta=0,9]$	39	72

Tabla 3.1 Efecto de los parámetros del sistema en la capacidad.

3.2.2 Soft handoff y definición del límite de celda.

El establecimiento de celdas adyacentes esta interconectado a través de la condición de handoff la cual determina el límite de la celda. En el sistema CDMA, un móvil en la zona de handoff esta controlado por ambas celdas adyacentes. El móvil inicia comunicación con la nueva estación base sin interrumpir su comunicación con la antigua estación base. El proceso de soft handoff involucra una asignación de frecuencia idéntica entre la antigua estación base y la nueva estación base. El nivel de potencia es siempre fijado para encajar el requerimiento de menor potencia entre estas celdas respondiendo al canal piloto recibido con la mayor potencia. El límite entre las celdas esta así definido por exigencias de igual potencia de ambas celdas. Obviamente, este balance depende del establecimiento de potencia en cada celda, lo cual a su vez, depende del número de móviles activos en la celda y en la interferencia adicional de las celdas vecinas.

El límite entre las celdas está definido como el punto de equilibrio donde la potencia de transmisión requerida desde los usuarios por ambas celdas es la misma P_m .

En el límite:

$$\frac{q_1}{T_2} = \frac{q_2}{T_2} = \frac{P_m}{N_0W} \equiv p_m \quad (3.6)$$

donde:

T_1 y T_2 son las pérdidas de transmisión desde los usuarios a cada sitio de celda (estación base).

Si las condiciones de propagación fueran iguales en ambas celdas, la condición de límite sería la mostrada en la figura 3.3. Un cambio en el establecimiento de umbral de cada celda obliga

a la curva a alternar (trasladarse de la línea continua a la línea punteada en la fig. 3.3) y el límite de celda (cruce de curvas) también se traslada de tal forma que se reduce la cobertura de la celda con mayor q (celda #2 en la Fig. 3.3). La carga es así automáticamente compartida a través del sistema, y las celdas que están muy cargadas, se reducen y utilizando el handoff envían a sus usuarios a las celdas vecinas. Este proceso es instantáneo, puesto que ambas celdas están conectadas al usuario por la ventana de soft handoff.

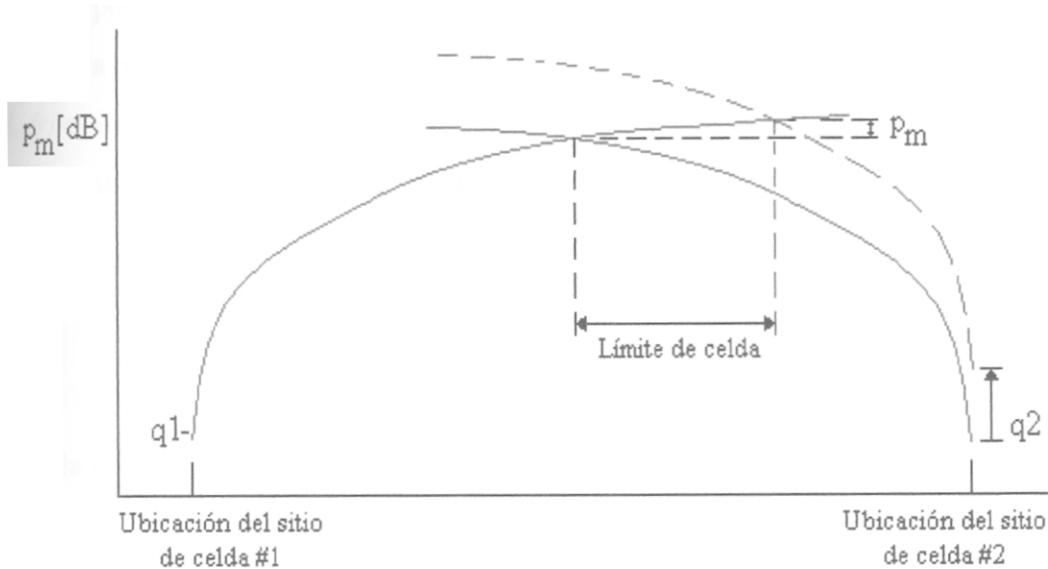


Fig. 3.3. El límite de celda y sus parámetros.

3.2.3 El Control Piloto y la Condición de Handoff.

El soft handoff del sistema CDMA requiere balance de enlace, para asegurar handoffs suaves y evitar casos de “huérfanos”, donde el usuario está en una celda en una dirección y en otra celda en la otra dirección. esto es hecho por la detección de usuario y por la comparación de las señales piloto de las diferentes (una o más) celdas alrededor. El límite de celda del enlace adelante es determinado en el punto de igual potencia y la zona de soft handoff – dentro de una relación predeterminada de potencia de pilotos recibidos.

El piloto es recibido sin protección de código, para evitar retardo en el control. La ecuación de enlace piloto es:

$$\frac{E_c}{I_0} = \frac{\phi P_c T(r)}{N_0 W + I_{oc}(r)W + P_c T(r)(1-\phi)} = \frac{q_m}{1 + \frac{I_{oc}(r)}{N_0} + q_m \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right)} \quad (3.7)$$

donde:

- E_c es la energía por chip requerida para un nivel de servicio dado.
- I_0 es la densidad espectral de potencia total.
- ϕ es la porción de potencia del sitio de celda destinada al piloto.
- P_c es la potencia de transmisión del sitio de celda.
- $T(r)$ es la pérdida de transmisión.
- $I_{oc}(r)$ es la densidad de potencia espectral recibida de otras celdas.
- q_m es el umbral de SNR recibido requerido en el móvil:

$$q_m = \phi \frac{P_c T(r)}{N_0 W} = \phi p_c T(r) \quad (3.7.a)$$

donde:

- p_c es la potencia de transmisión total normalizada desde el sitio de celda.

Ahora:

$$q_m = \frac{\frac{E_c}{I_0} \left(1 + \frac{I_{oc}(r)}{N_0} \right)}{\left(1 - \frac{1-\phi}{\phi} \frac{E_c}{I_0} \right)} \quad (3.8)$$

Igualando la pérdida de transmisión en ambos enlaces; es decir, despejando $T(r)$ de (3.7.a) y utilizando (3.8):

$$T(r) = \frac{q_m}{\phi p_c} = \frac{\frac{E_c}{I_0} \left(1 + \frac{I_{oc}(r)}{N_0} \right)}{\phi p_c \left(1 - \frac{1-\phi}{\phi} \frac{E_c}{I_0} \right)} \quad (3.9)$$

y también despejando T en (3.6), y luego utilizando el valor de q en (3.3), se tiene:

$$T(r) = \frac{q}{p_m} = \frac{\frac{E_b}{N_0}}{p_m \frac{W}{R_b} (1-\eta)} \quad (3.10)$$

Despejando ϕ de (3.9), y reemplazando el valor de $T(r)$ en (3.10), se obtiene:

$$\phi = \frac{\frac{E_c}{I_0}}{1 + \frac{E_c}{I_0}} \left[1 + \frac{P_m}{P_c} \frac{\frac{W}{R_b}}{\frac{E_b}{N_0}} \left(1 + \frac{I_{oc}(r)}{N_0} \right) (1 - \eta) \right] \quad (3.11)$$

En el borde de la cobertura, la pérdida de transmisión es la mayor que el sistema pueda soportar, y el móvil transmite su máxima potencia $P_m \Rightarrow P_m$ máx.

De acuerdo con la ecuación (3.11), ϕ es mostrada entonces linealmente dependiente en la capacidad restante de la celda $(1-\eta)$, para mantener el balance requerido entre los enlaces. La potencia de piloto es por tanto controlada como una función lineal decreciente de la carga de la celda.

3.3 Agrupamiento (*clustering*) Heterogéneo de Celdas.

3.3.1 Parámetros que gobiernan el tamaño de la celda.

El límite de celda está definido en la intersección de las curvas de transmisión (Fig. 3.3). Las pendientes de estas curvas varían con la distancia desde el sitio de celda, y dependen ambas de las condiciones de propagación y de la colocación de la antena del sitio de celda, altura, y forma del haz. En un modelo genérico de terreno plano, la pérdida de transmisión promedio se mantiene constante a una distancia $R=1.4GH$, luego sigue una curva R^{-2} a $8H/\lambda$, y más allá, sigue una tendencia R^{-4} . Aquí, G representa el producto de las ganancias de las antenas del sitio de celda y del móvil en el plano vertical, λ es la longitud de onda de operación, H es la altura de la antena del sitio de celda, y se asume la antena del móvil a 1.5 m.

La posición de la curva está determinada por q en el sitio de celda (enlace reversa) y por la correspondiente potencia de transmisión del piloto del sitio de celda (ϕp_c , enlace adelante).

Una celda más pequeña debe tener una pendiente más empinada en la curva de transmisión o un q mayor (y un ϕp_c correspondiente menor), o ambos. Una microcelda puede ser acomodada dentro de una macrocelda si sus curvas de transmisión se intersectan en ambos lados de la microcelda (ver Fig. 3.4). Nótese que el límite exterior de la microcelda se alarga cuanto más la diferencia en las pendientes de las curvas de transmisión de la microcelda y de la macrocelda son menores. Esto produce que la zona de soft handoff también se alargue más en esa dirección.

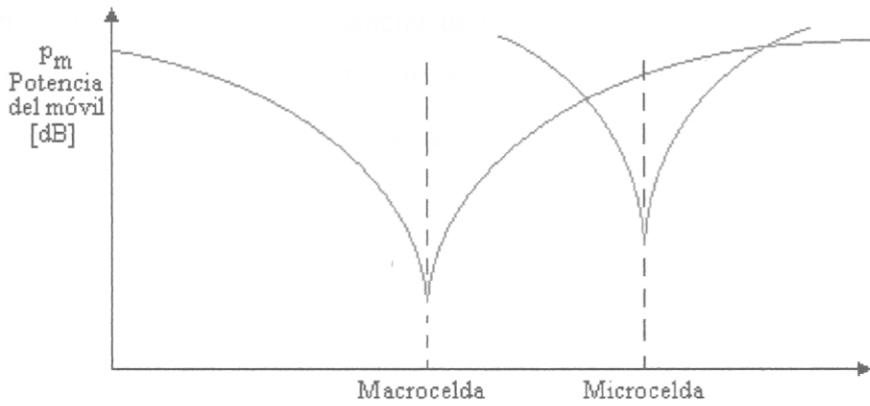


Fig. 3.4. Una microcelda dentro de una macrocelda.

Una celda diseñada apropiadamente debería cubrir más allá del punto de quiebre. Allí, la pérdida de transmisión depende de:

$$T \propto \frac{H^2}{R^4} \quad (3.12)$$

y, de la ecuación (3.6):

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^4 \quad (3.13)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \left[\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^2 \frac{q_2}{q_1} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.14)$$

La condición de límite para el enlace reversa es mostrada en la figura 3.5(a).

De manera similar, las potencias de transmisión del piloto de ambas celdas tienen que emparejarse en el móvil:

$$q_m = \phi_1 p_1 T_1 = \phi_2 p_2 T_2 \quad (3.15)$$

$$\frac{\phi_1 p_1}{\phi_2 p_2} = \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^4 \quad (3.16)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \left[\frac{\phi_1 p_1}{\phi_2 p_2} \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.17)$$

Finalmente, de las ecuaciones (3.14) y (3.17), la ecuación de balance del enlace es:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\phi_2 p_2}{\phi_1 p_1} \quad (3.18)$$

la cual relaciona la razón entre las potencias de transmisión de la celda a su desensibilización. Esto es mostrado en la figura 3.5(b). Allí, p_1 , p_2 son las potencias totales transmitidas por los sitios de celda, ϕ_1 , ϕ_2 son las porciones de la potencia total destinada para el piloto en cada celda, y q_m es la señal recibida en el móvil.

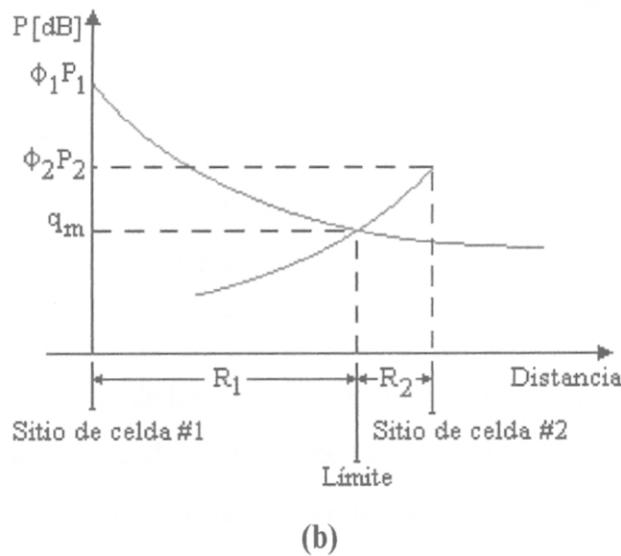
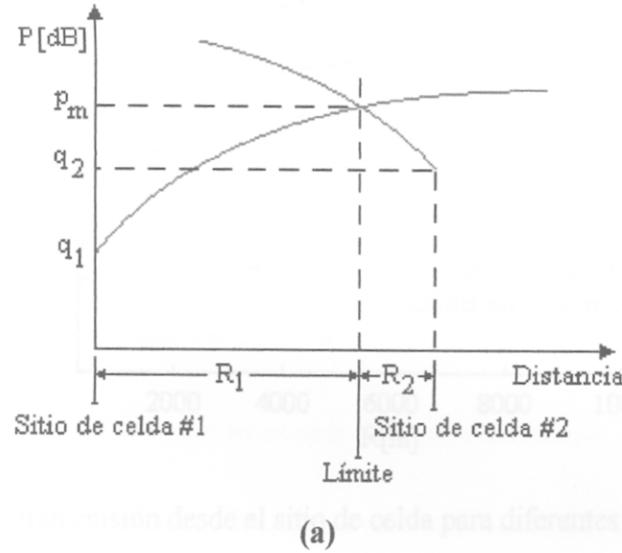


Fig. 3.5. Condición y balance del límite de celda. (a) Enlace reversa.
(b) Enlace adelante – potencia piloto.

3.3.2 Tamaño de la antena e inclinación del haz (*Beam Tilt*).

La pérdida de transmisión mínima capaz de ser obtenida para un móvil cerca de la antena del sitio de celda es mayor para la antena más alta. La menor antena genera una curva más empinada (línea punteada), como que el punto de quiebre al régimen R^{-4} es más cercano a la antena en ese caso, y las curvas por tanto se cruzan. Inclinando hacia abajo el haz del lóbulo

principal de la antena trae a la zona R^{-4} más cerca aún como se muestra en puntos y líneas en la figura 3.6.

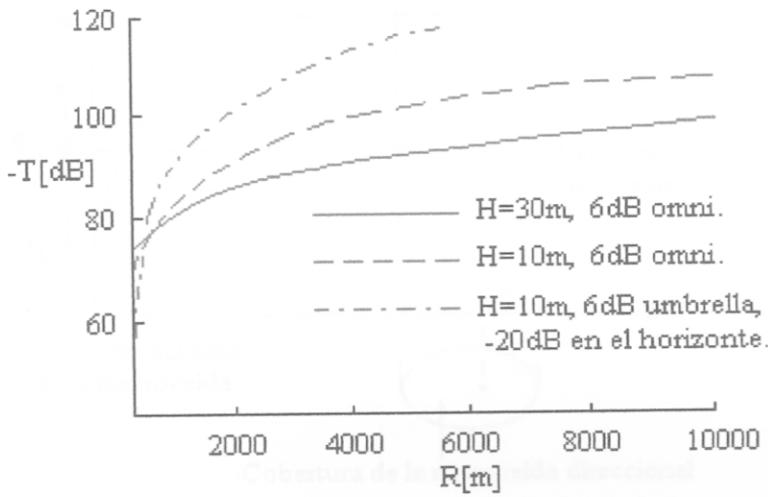


Fig. 3.6. Pérdida de transmisión desde el sitio de celda para diferentes alturas de antenas e inclinación.

3.3.3 Directividad de la celda.

Las celdas pueden ser direccionales utilizando en el sitio de celda antenas directivas. Un sector es un ejemplo de una celda direccional. El sitio de celda en este tipo de celda no está en el centro del área de cobertura, sino más bien cerca al perímetro.

Una mayor pendiente de cruce de las curvas de pérdida de transmisión de la microcelda y la macrocelda es obtenida dirigiendo el lóbulo de la microcelda hacia el sitio de celda de la macrocelda (como se aprecia en la figura 3.7), lo cual ayuda a controlar la cobertura de la microcelda y la extensión de la zona de soft handoff. El efecto de directividad es equivalente a la reducción de la potencia de transmisión, y a desensibilizar el receptor por esa cantidad en la dirección de lóbulo posterior. Esto es mostrado en la Fig. 3.7. Una antena direccional irradia cierta radiación residual en su lóbulo posterior. Para muchas antenas e instalaciones, esta radiación residual puede ser 10 a 20 dB por debajo del lóbulo principal. Esta relación adelante-atrás (*front-to-back ratio*) se denomina B en la Fig. 3.7.

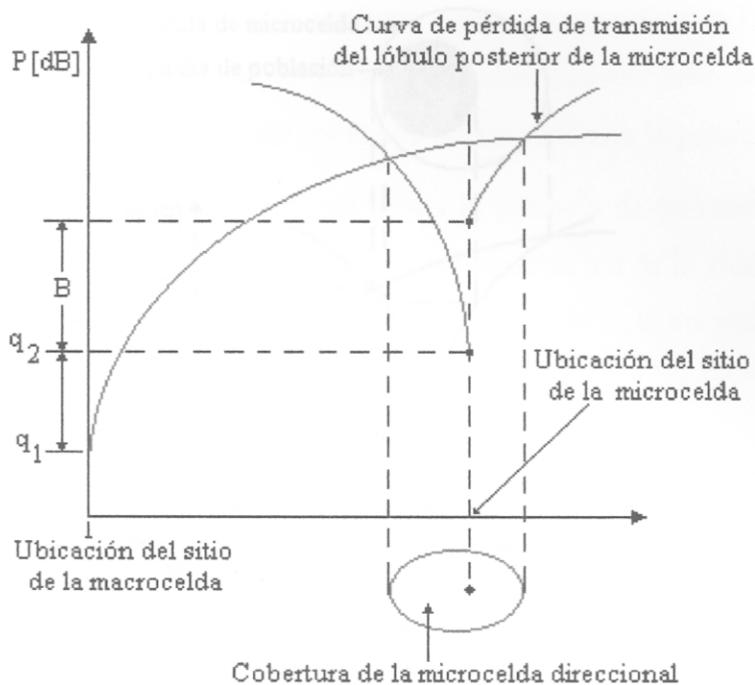
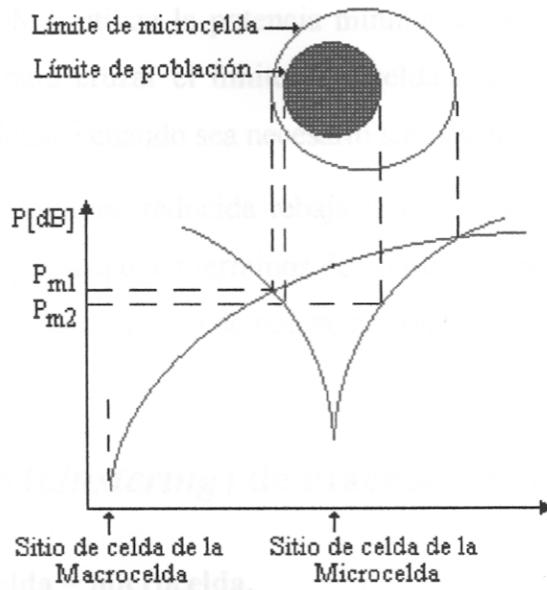


Fig. 3.7. Control de potencia y límite de la celda para una microcelda direccional dentro de una macrocelda .

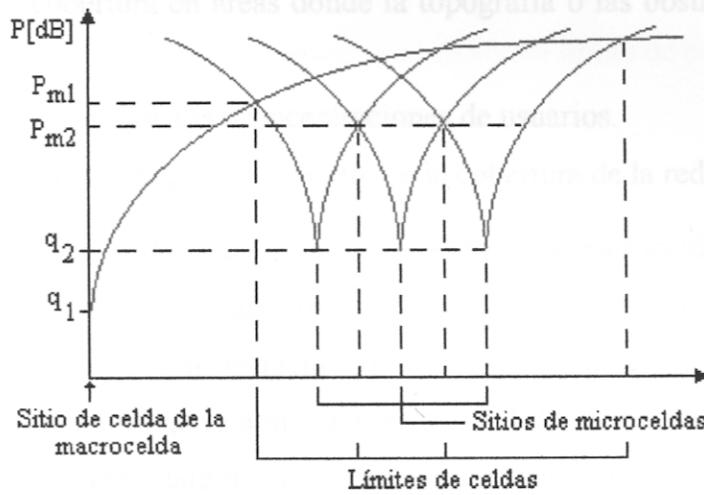
3.3.4 Desensitización.

El acoplamiento máximo entre el sitio de celda y la unidad de usuario depende de la altura de la antena del sitio de celda y su ganancia. Esta pérdida mínima es por lo menos 70 dB para celdas con antenas de 30 m de altura (ver Fig. 3.6). El tamaño de la antena para microceldas es tan bajo como 6 m, lo cual conduce a una pérdida mínima de 50 – 55 dB. En edificios, donde la altura es solamente 3 o 4 m, la pérdida mínima es de 35 – 40 dB.

Esta baja pérdida de transmisión hace al receptor del sitio de celda susceptible a interferencia de varias fuentes y a saturación de unidades cercanas. Es por tanto necesario, desensitizar la microcelda. Sin embargo, el monto de desensitización requerido es menor que el acoplamiento de exceso debido a la ubicación de la antena más baja en la microcelda.



(a)



(b)

Fig. 3.8. Distribución de la población en microceldas de potencia portátil limitada. (a) Un “hot spot”. (b) Macrocelda cercado un cluster de microceldas.

La desensitización también afecta el alcance de la microcelda para una potencia de transmisión portátil dada, pero la capacidad más que el alcance es el tema primario considerado en el diseño de una microcelda. En ciertas configuraciones, la cobertura para un portátil con máxima potencia limitada no debe alcanzar el límite con la macrocelda vecina, y el portátil no debe ser capaz de pasar de una microcelda a la macrocelda, mientras que móviles de la microcelda pueden pasar por todas las microceldas como se aprecia en la figura 3.8.

Puesto que el sistema CDMA utiliza la potencia mínima requerida para hacer su enlace, la amplia potencia de pico para cruzar el límite a la celda maestra debe ser reservada en la unidad para extender su alcance cuando sea necesario sin consumir la potencia de la unidad.

La pérdida de transmisión mínima reducida rebaja la potencia de transmisión del portátil a microwatts (lo cual es insignificante en términos de conservación de la vida de la batería). La desensitización así, no afecta el consumo de potencia promedio en la microcelda.

3.4 Agrupamiento (*clustering*) de macroceldas – microceldas.

3.4.1 Jerarquía Macrocelda – microcelda.

El agrupamiento jerárquico de celdas es generalmente usado en tres situaciones:

- Para emparejar la cobertura en áreas donde la topografía o las obstrucciones crean áreas sin servicio.
- Para acomodar regiones con altas concentraciones de usuarios.
- Para acomodar redes locales privadas dentro de la cobertura de la red pública.

Un handoff suave entre las celdas y entre la macrocelda y las microceldas es importante para propósitos de *roaming*. Esta es una tarea difícil de conseguir para sistemas que utilizan *hard* handoff. Inclusive cuando se usan esquemas móviles de handoff asistido (*mobile assisted handoff* – MAHO), un handoff suave a menudo no es fácil de lograr porque el límite entre las celdas no está definido tan claramente entre microceldas donde está dominado por la obstrucción, como el límite entre celdas grandes. Así, un gran margen de potencia es necesario en este sistema para vencer intentos “ping-pong” de handoff los que inadvertidamente reducen la capacidad.

El soft handoff en CDMA asegura handoffs suaves debido a su diversidad de combinación entre las celdas sobre la zona de transición. la potencia es así reducida , en lugar de ser desplazada como en otros sistemas.

3.4.1.1 Capacidad en Jerarquía Macrocelda – microcelda.

Un arreglo de celdas jerárquicas es posible en el mismo canal de radio con el sistema CDMA. Considerando los siguientes parámetros, la capacidad de la macrocelda y de la microcelda se detallan a continuación:

- R es el radio de la macrocelda.
- r es el radio de la microcelda.
- $U=R/r$.
- N es la capacidad nominal de un celda aislada.
- $C=N/(1+i)$ es la capacidad de una celda afectada por la interferencia externa i .
- C_0 es la capacidad de una celda en un ambiente uniforme con otras celdas.
- $i_l=P_l/N$ es la interferencia externa normalizada a la macrocelda.
- $i_m=P_m/N$ es la interferencia externa normalizada a la microcelda.
- i_{lm} es la interferencia normalizada a la macrocelda desde la microcelda.
- i_{l0} es la interferencia normalizada a la macrocelda desde las macroceldas vecinas.
- i_{m0} es la interferencia normalizada a una microcelda en un *cluster* de otras microceldas.
- D es la razón de la potencia de transmisión del móvil en el límite entre microcelda y macrocelda a la máxima potencia del portátil en la microcelda.
- es la razón del radio de población de usuarios al radio del límite de celda.
- En un régimen de pérdida de trayecto $r^{-\alpha}$, $D=\delta^{-\alpha}$.
- m es el número de microceldas en el *cluster*.
- La capacidad de la macrocelda es $N/(1+i_{l0}+i_{lm})$.
- La capacidad de la microcelda es $N/(1+i_m)$.

Como $U \gg 1$, se puede asumir que la microcelda está inmersa en una distribución uniforme de transmisores de igual potencia en la macrocelda.

Interferencia de la microcelda a la macrocelda:

Las condiciones de handoff igualan la potencia de transmisión, de las unidades de la microcelda en el límite, a aquella de la macrocelda en ese punto. Como $U \gg 1$, ese nivel de potencia se puede asumir constante en el contorno de la microcelda para el siguiente análisis:

La potencia de la microcelda interferente a la macrocelda es:

$$P_{lm} = \frac{mN}{D(1+i_m)\pi r^2} 2\pi \int_0^r (x/r)^4 x dx = \frac{mN}{3D(1+i_m)} \quad (3.19)$$

$$i_{lm} = \frac{P_{lm}}{N} = \frac{m}{3D(1+i_m)} = i_l - i_{l0} \quad (3.20)$$

Interferencia de la macrocelda a la microcelda:

Como la macrocelda es mucho mayor que la microcelda $U \gg 1$, la microcelda puede considerarse inmersa en una distribución uniforme de transmisores de igual potencia. La potencia interferente es por tanto:

$$P_{ml} = \frac{N}{(1+i_l)\pi(R^2-r^2)} 2\pi \int_r^\infty (r/x)^4 x dx \quad (3.21)$$

$$P_{ml} = \frac{1}{(U^2-1)} \frac{N}{(1+i_l)} \quad (3.22)$$

$$i_m = \frac{1}{(U^2-1)(1+i_l)} \quad \text{para } m=1 \quad (3.23)$$

$$i_m \cong i_{m0} \quad \text{para } m \gg 1 \quad (3.24)$$

Capacidad de la microcelda y la macrocelda:

Si definimos $x=1+i_l$, $x_0=1+i_{l0}$, $y=1+i_m$, $y_0=1+i_{m0}$, $A=U^2-1$, de la ecuación (3.20) se tiene:

$$x - x_0 = \frac{m}{3Dy} \quad (3.25)$$

de la ecuación (3.23):

$$y = 1 + \frac{1}{Ax} \quad \text{para } m=1 \quad (3.26)$$

y de la ecuación (3.24):

$$y = y_0 \quad \text{para } m \gg 1 \quad (3.27)$$

Si resolvemos para x , tenemos:

$$x = \frac{1}{2} \left(x_0 + \frac{1}{3D} - \frac{1}{A} \right) \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{4x_0}{A \left(x_0 + \frac{1}{3D} - \frac{1}{A} \right)^2}} \right\} \quad \text{para } m=1 \quad (3.28)$$

$$x = x_0 + \frac{m}{3Dy_0} \quad \text{para } m \gg 1 \quad (3.29)$$

finalmente, se obtiene:

$$\frac{C_{umbrella}}{C_0} = \frac{\frac{N}{1+i_l}}{\frac{N}{1+i_{l0}}} = \frac{1+i_{l0}}{x} \quad (3.30)$$

$$\frac{C_{microcell}}{C_0} = \frac{\frac{N}{1+i_m}}{\frac{N}{1+i_{m0}}} = \frac{1+i_{m0}}{y} \quad (3.31)$$

3.4.2 Capacidad de una microcelda “Hot Spot” y de la Macrocela.

A veces se requiere el área de cobertura de un “hot spot” dentro del área de cobertura de una celda más grande. Este tipo de arreglo perturba la planificación de frecuencias en sistemas con un patrón de re uso de frecuencias mayor a uno. Dichos sistemas tienen que retirar las frecuencias usadas por las celdas interiores en un radio comparable al patrón de re uso de las celdas exteriores mayores (aplicar una zona de guarda alrededor de las celdas interiores contra las celdas exteriores mayores y de mayor potencia). Esto resulta en una pérdida de capacidad para el sistema.

La situación es diferente para el sistema CDMA, donde las celdas interiores y exteriores comparten la misma frecuencia y su eficiencia de re uso esta determinada por el soft handoff entre ellas. La capacidad total bajo esta circunstancia es más que el doble que el de una celda cargada en un ambiente uniforme con otras celdas (C_0).

La capacidad de la microcelda es mayor que aquella de una celda cargada en este tipo de arreglo. Esto, debido a que la macrocelda alrededor de la microcelda tiene una población más dispersa y contribuye con muy poca interferencia. La macrocelda pierde algo de su capacidad debido a la interferencia adicional desde la microcelda. Esta pérdida; sin embargo, disminuye cuando la población de usuarios de la microcelda no alcanza el límite de celda, pero es encerrada dentro de un radio menor, como se aprecia en la figura 3.8(a). Este es además el típico caso de una microcelda tipo “hot spot”, donde la alta concentración local motiva la colocación de una microcelda. La potencia de transmisión de las unidades portátiles en este caso no exceden p_p , que es menor la potencia requerida en el límite p_m por un factor $p_m/p_p=D$.

La capacidad total es más que el doble que el de una celda cargada en un ambiente uniforme con otras celdas (C_0).

Por ejemplo, sea:

$U = 5$ la relación entre el radio de la macrocelda al radio de la microcelda.

$i_0 = 0.5$ la interferencia normalizada a la macrocelda desde las celdas adyacentes.

Entonces de acuerdo a las ecuaciones (3.28) y (3.26), la capacidad de la macrocelda se degrada $0.822C_0$ para $D = 1$, pero es casi no afectada para $D = 10$. Por otra parte, la capacidad de la microcelda interna es mayor que C_0 y no es afectada por la elección de D . La capacidad compuesta de la macrocelda y la microcelda exceden $2C_0$ por 10 a 20 %. Esto se muestra resumido en la tabla 3.2.

	$D=1$	$D=10$
$C_{macrocelda}/C_0$	0.822	0.98
$C_{microcelda}/C_0$	1.467	1.46
$(C_{macrocelda} + C_{microcelda})/C_0$	2.28	2.44

Tabla 3.2. Capacidad de una macrocelda con una microcelda interna “hot spot”.

3.4.3 Capacidad de un agrupamiento (*cluster*) de microceldas.

Microceldas urbanas pueden ser agrupadas bajo la cubierta de una macrocelda. Bajo esta circunstancia, las microceldas están en un grupo uniforme y su capacidad es C_0 . La macrocelda pierde algo de sus capacidad debido a la carga de las microceldas, pero esta pérdida se hace insignificante cuando la potencia de los portátiles en las microceldas es forzada por debajo del nivel de transmisión en el límite de celda. Esta tendencia es mostrada en la figura 3.9.

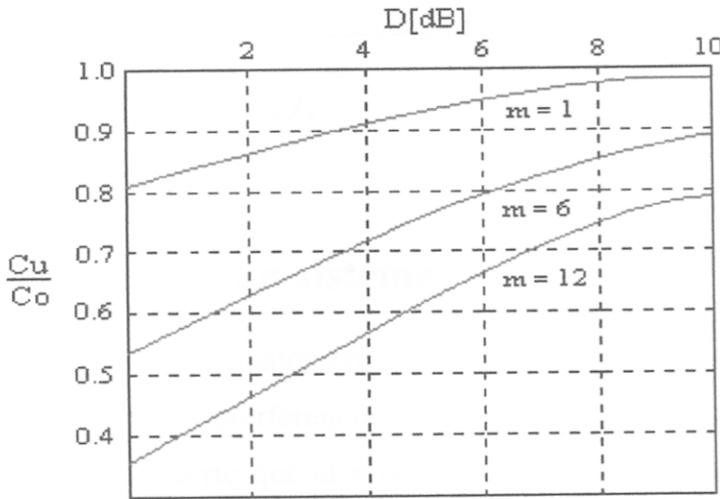


Fig. 3.9. Pérdida de capacidad de la macrocelda en función de D (la relación de potencia) y de m (el número de microceldas internas).

Por ejemplo, con $i_{10} = 0.5$, $U = 5$, $D = \{1,10\}$, $m = 12$, y utilizando las ecuaciones (3.29) y (3.27), se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.3. La degradación de la capacidad de la macrocelda debido a la interferencia adicional del *cluster* de microceldas es minimizada por un diseño de cobertura apropiada del *cluster* de microceldas; es decir, la elección de D . Para $D = 10$ la pérdida es solamente de 15%. La capacidad compuesta mostrada en la tabla en realidad excede a 13. Esto es porque la capacidad de las microceldas que bordean la macrocelda es mayor que C_0 , puesto que la macrocelda representa una interferencia menor. Esta no ha sido incorporada en el modelo descrito anteriormente por simplicidad.

	$D=1$	$D=10$
$C_{macrocelda}/C_0$	0.36	0.85
$C_{microcelda}/C_0$	1.0	1.
$(C_{macrocelda} + m C_{microcelda})/C_0$	12.36	12.85

Tabla 3.3. Capacidad de un *cluster* de microceldas.

4 ANALISIS Y DISEÑO.

4.1 Filosofía de diseño de un sistema celular CDMA.

Como se sabe, en sistemas celulares analógicos y en TDMA, el incremento de la capacidad es el resultado de la eliminación de interferencia a la señal deseada. El nivel de señal de una señal deseada es siempre más fuerte que el nivel de interferencia; es decir, 18 dB o mejor, para AMPS. Sin embargo, en un sistema CDMA, el incremento de capacidad se basa en cuanta interferencia la señal deseada puede tolerar. El nivel de señal de una señal deseada está siempre por debajo del nivel de interferencia. También, todos los usuarios tienen que compartir el mismo canal de radio. Si un usuario toma más potencia de la que necesita, entonces los otros sufrirán y la capacidad del sistema se reducirá.

Diseñar un sistema celular CDMA uniforme es comparativamente simple. CDMA uniforme, significa que a todas las celdas se les asignará el mismo número de canales. Sin embargo, en la realidad, los sistemas CDMA no son uniformes. El número de canales de voz de cada celda en un sistema CDMA no son los mismos. Debido a necesidades demográficas, algunas celdas tienen más canales de voz y otras tienen menos. Puesto que CDMA tiene únicamente un canal de radio, generar diferentes canales de voz bajo demanda de un único canal de radio CDMA es un gran desafío. [Lee95].

4.2 Elementos clave en el diseño de un sistema CDMA.

El diseño de un sistema CDMA es mucho más complejo que el diseño de un sistema TDMA. En CDMA todos los canales de tráfico son atendidos por un único canal de radio en toda celda. Por lo tanto, en una celda de m canales de voz, uno de los m canales de tráfico es el canal deseado y los $m-1$ canales de tráfico restantes son los canales de interferencia. En este caso, la interferencia es mucho mayor que el canal deseado. Entonces, C/I (relación portadora a interferencia) es difícil de obtener usando un medidor de intensidad de señal. Así, los elementos clave en el diseño de un sistema CDMA son diferentes a aquellos utilizados en el diseño de sistemas CDMA.

4.2.1 Relación entre C/I y FER.

En CDMA, el elemento clave es E_b/I_0 (energía por bit/potencia por hertz) la cual está relacionada a la tasa de error (*frame error rate*). La calidad de voz aceptable de un *vocoder* específico determinará el FER el cual está relacionado a E_b/I_0 a una velocidad de vehículo dada. De un aspecto de diseño del sistema, se considera el desempeño del sistema con todas las velocidades de vehículos y con todas las condiciones ambientales y se menciona un E_b/I_0 específico. Ahora, es posible diseñar el sistema CDMA en la base de un E_b/I_0 específico. La siguiente ecuación es utilizada:

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{E_b}{I_0} \right) \left(\frac{R_b}{B} \right) \eta \quad (4.1)$$

donde:

R_b son los bits por segundo.

B es el ancho de banda del canal CDMA.

η es el ciclo de actividad de voz en porcentaje.

De la ecuación (4.1), B/R_b es la ganancia de procesamiento (PG), la cual es conocida en un sistema CDMA dado. E_b/I_0 y η también son conocidos en el sistema. Entonces la relación C/I de cada canal CDMA puede ser obtenida. Cada canal codificado en CDMA puede ser tratado como un canal de frecuencia en FDMA o TDMA. Si los canales codificados son enviados sobre un medio de transmisión por cable, la interferencia entre los canales codificados puede ser tratada como interferencia de canal adyacente. Debido a la naturaleza de ortogonalidad del canal, la interferencia debería ser muy pequeña. Pero en el ambiente de radio móvil, debido al fenómeno de multitrayectos de onda, la ortogonalidad entre los canales no puede ser sostenida. Por lo tanto, la ganancia de procesamiento es la única protección de interferencia entre los canales.

E_b/I_0 siempre varía para hallar una FER específica bajo diferentes condiciones. Para diseñar el sistema, de la ecuación (4.1) puede hallarse una relación C/I específica $[(C/I)_s]$ de una $(E_b/I_0)_s$ específica para el escenario de peor caso. Sin embargo, los valores de $(E_b/I_0)_s$ para los canales de enlace adelante y para los canales de enlace reversa son diferentes debido a sus diferentes esquemas de modulación. Por lo tanto, se tendrán dos requisitos diferentes para C/I : una $(C/I)_F$ para los canales de enlace adelante y una $(C/I)_R$ para los canales de enlace reversa.

4.3 Escenario de celdas uniformes⁷.

A continuación se presentan los parámetros de diseño de cada celda para el enlace adelante y el enlace reversa bajo condiciones de capacidad uniforme realística.

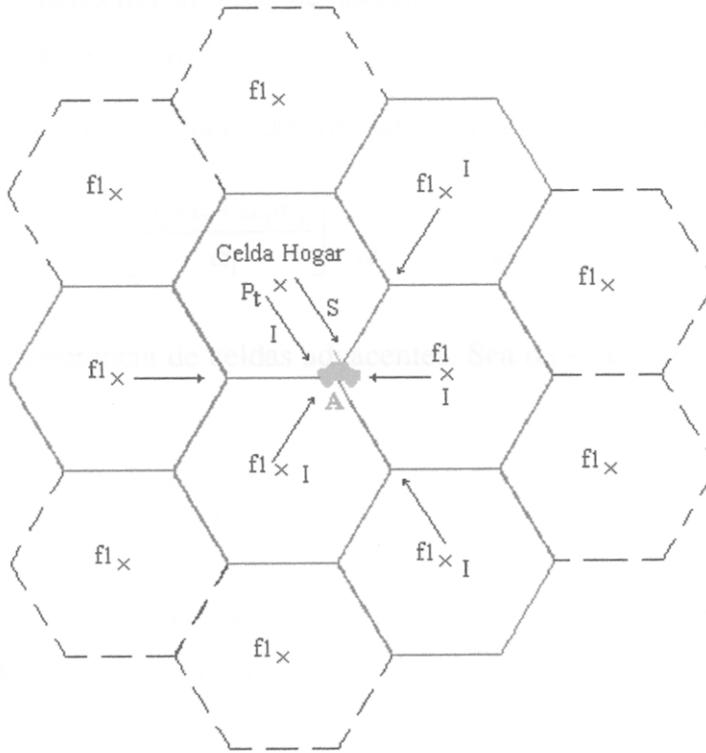


Fig. 4.1. Sistema CDMA y su interferencia (desde un escenario de enlace adelante).

4.3.1 Para el enlace adelante.

Un escenario de peor caso es utilizado para hallar la relación entre las potencias transmitidas de todos los sitios de celda. Primero se forma una ecuación que relaciona la C/I recibida en la ubicación del móvil A (figura 4.1) con las potencias transmitidas de todos los sitios de celda:

$$\frac{C}{I} = \frac{\alpha_1 R^{-4}}{\underbrace{\alpha_1(m_1 - 1)R^{-4}}_a + \underbrace{(\alpha_2 m_2 + \alpha_3 m_3)R^{-4}}_b + \underbrace{\beta(2R)^{-4}}_c + \underbrace{\gamma(2.633R)^{-4}}_d} \quad (4.2)$$

donde:

a = de la propia celda.

b = de 2 celdas adyacentes.

⁷ El escenario de celdas no uniformes es descrito en el Apéndice C.

c = de 3 celdas intermedias.

d = de 6 celdas distantes.

α_i ($i=1,3$) es la potencia transmitida por cada canal de voz en la celda.

m_i es el número de canales por celda.

β y γ son las potencias transmitidas de las celdas adyacentes combinadas a una distancia $2R$ y $2.633R$, respectivamente.

Resolviendo la ecuación (4.2) se puede determinar m_i de la siguiente manera:

$$m_1 = \left(\frac{1}{C/I} + 1 \right) - \left[\frac{\alpha_2 m_2 + \alpha_3 m_3}{\alpha_1} \right] - \frac{\beta}{\alpha_1} (2)^{-4} - \frac{\gamma}{\alpha_1} (2.633)^{-4} \quad (4.3)$$

Caso 1: No existe interferencia de celdas adyacentes. Sea $\alpha_2 = \alpha_3 = \beta = \gamma = 0$ en la ecuación (4.3). Entonces:

$$m_1 = \left(\frac{1}{C/I} + 1 \right) \quad (4.4)$$

Si el valor de C/I obtenido de la ecuación (4.1) es $C/I = -17$ dB, entonces $m_1 = 51$, el máximo número de canales de voz en una celda.

Caso 2: No existe interferencia otra que de las dos celdas más cercanas. En la ecuación (4.3), el tercer y cuarto término son muy pequeños en valor que los dos primeros términos y por lo tanto pueden ser despreciados. Entonces:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_2 m_2 + \alpha_3 m_3}{\frac{1}{C/I} + 1 - m_1} \quad (4.5)$$

Si $C/I = -17$ dB, y los canales de voz asignados en las tres celdas son $m_1=30$, $m_2=25$, y $m_3=15$, respectivamente, entonces la ecuación (4.5) se convierte en:

$$\alpha_1 = \frac{25\alpha_2 + 15\alpha_3}{51 - 30} = 1.19\alpha_2 + 0.714\alpha_3 \quad (4.6)$$

La ecuación (4.6) expresa la relación entre α_1 , α_2 , y α_3 .

La potencia total transmitida P en cada sitio de celda es $P_1 = \alpha_1 m_1$, $P_2 = \alpha_2 m_2$, $P_3 = \alpha_3 m_3$. Así, P_1 , P_2 , y P_3 son las máximas potencias transmitidas de las tres celdas. Entonces la ecuación (4.5) puede simplificarse a:

$$\left(\frac{1}{C/I} + 1\right) \frac{P_1}{m_1} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (4.7)$$

Siguiendo los mismos pasos de derivación, se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{1}{C/I} + 1\right) \frac{P_2}{m_2} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (4.8)$$

$$\left(\frac{1}{C/I} + 1\right) \frac{P_3}{m_3} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (4.9)$$

La relación de las tres máximas potencias transmitidas de las tres celdas es:

$$\frac{P_1}{m_1} = \frac{P_2}{m_2} = \frac{P_3}{m_3} \quad (4.10)$$

Deducida de la ecuación (4.10), un criterio de diseño que será utilizado en general para un sistema CDMA de N celdas es:

$$\frac{P_i}{m_i} = \frac{P_j}{m_j} = \text{constante} \quad (4.11)$$

Donde i indica la i -ésima celda y j indica la j -ésima celda. La ecuación (4.11) indica que a más canales de voz generados, es necesaria una mayor potencia de transmisión. Por lo tanto, la interferencia se reducirá ya sea aplicando control de potencia a los canales de voz en una celda de tal forma que un mayor número de canales de voz pueden proporcionarse con una potencia de transmisión dada, o usando menor número de canales en una celda de tal forma que se reducirá la potencia de transmisión P .

4.3.2 Para el enlace reversa.

El escenario de peor caso (mostrado en la figura 4.2) es también usado en el análisis del enlace reversa. Se asume que todas las unidades móviles que viajan en las dos celdas adyacentes estarán ubicadas en el límite de celda de la celda *hogar*. Para el enlace reversa, las potencias de las m_1 señales de voz recibidas en el sitio hogar son las mismas, debido a la implementación de control de potencia para vencer la interferencia cerca-a-lejos (*near-to-far interference*).

Sea C la señal recibida desde una unidad móvil deseada en el sitio de celda hogar. Se asume que cada señal de otros m_1 canales recibidos en el sitio hogar en la figura 4.2 es también C .

También, se asume que la interferencia de ciertas unidades móviles; es decir rm_1 , de las dos celdas adyacentes vienen desde el límite de celda. Debido al control de potencia en cada celda adyacente, la interferencia proveniente desde la celda adyacente para cada canal de voz aproximadamente sería C , recibida por el sitio de celda hogar. La relación C/I recibida en el canal de voz deseado puede expresarse como:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{(m_1 - 1)C + r_{12}m_2C + r_{13}m_3C} \quad (4.12)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{m_1 - 1 + r_{12}m_2 + r_{13}m_3} \quad (4.13)$$

donde r_{12} y r_{13} son una porción del número total de canales de voz en celdas adyacentes que interferirán con la señal deseada en la celda hogar, que es la celda 1.

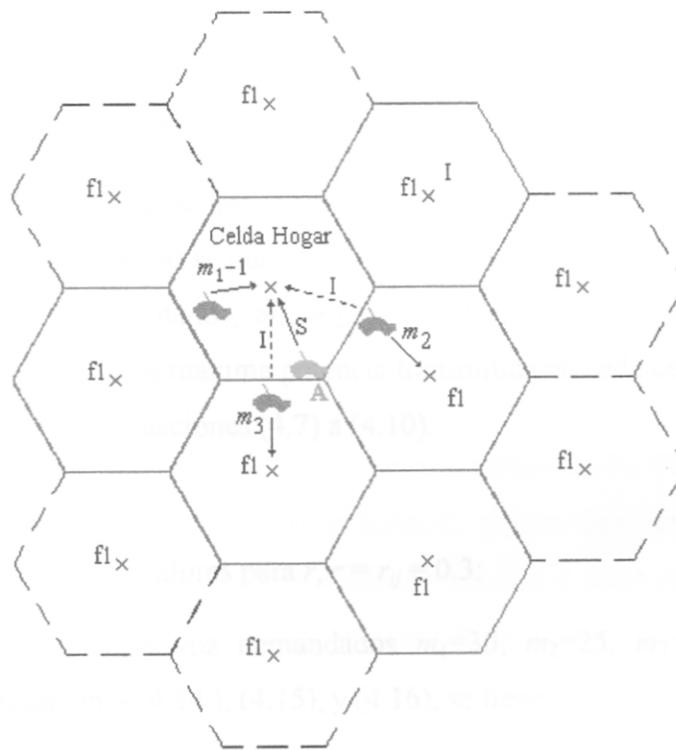


Fig. 4.2. Sistema CDMA y su interferencia (desde un escenario de enlace reversa).

De la ecuación (4.13), el escenario de peor caso es cuando:

$$m_1 + r_{12}m_2 + r_{13}m_3 \leq \frac{1}{C/I} + 1 \quad (4.14)$$

Siguiendo el mismo procedimiento, se encuentra:

$$r_{21}m_1 + m_2 + r_{23}m_3 \leq \frac{1}{C/I} + 1 \quad (4.15)$$

$$r_{31}m_1 + r_{32}m_2 + m_3 \leq \frac{1}{C/I} + 1 \quad (4.16)$$

El valor de r depende del tamaño de la región solapada en la celda adyacente, y puede ser asumida razonablemente como $1/6$ (lo que es 0.166) si el sistema es diseñado apropiadamente.

Si $C/I = -17$ dB, lo que es 50 , y $r_{12} = r_{13} = 0.166$, entonces la ecuación (4.14) es:

$$m_1 + 0.166(m_2 + m_3) = 51 \quad (4.17)$$

Las relaciones entre el número de canales de voz en cada celda, m_1 , m_2 , y m_3 , están expresadas en las ecuaciones (4.14), (4.15), y (4.16).

4.3.3 Diseño de un sistema CDMA.

Del escenario de enlace reversa, se puede verificar si todas las condiciones expresadas en las ecuaciones (4.14), (4.15), y (4.16) se cumplen. Los principales elementos en estas ecuaciones son los canales de voz demandados, m_1 , m_2 , y m_3 . Para valores representativos de estos términos, se puede determinar la máxima potencia transmitida en cada celda de las ecuaciones de enlace adelante; es decir, ecuaciones (4.7) a (4.10).

Ejemplo:

Sean $C/I = -17$ dB y todos los valores para r , $r = r_{ij} = 0.3$:

Caso 1: Sean los canales de voz demandados $m_1=30$, $m_2=25$, $m_3=15$. Verificando las condiciones en las ecuaciones (4.14), (4.15), y (4.16), se tiene:

$$30 + 0.3(25 + 15) = 42 < 51$$

$$25 + 0.3(30 + 15) = 38.5 < 51$$

$$15 + 0.3(30 + 25) = 31.5 < 51$$

Puesto que el tamaño de las tres celdas es el mismo:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = CR^{+4}$$

Si se asume $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 100$ mW, entonces:

$$P_1 = 30 \times 0.1 = 3 \text{ W}$$

$$P_2 = 25 \times 0.1 = 2.5 \text{ W}$$

$$P_3 = 15 \times 0.1 = 1.5 \text{ W}$$

Caso 2: Sean los canales de voz demandados $m_1=40$, $m_2=30$, $m_3=20$. Verificando las condiciones en las ecuaciones (4.14), (4.15), y (4.16), se tiene:

$$40 + 0.3(30 + 20) = 55 > 51 \text{ (no cumple la condición)}$$

$$30 + 0.3(40 + 20) = 48 < 51$$

$$20 + 0.3(40 + 30) = 41 < 51$$

El número de canales de voz demandados debería ser reducido antes de que el sistema sea diseñado.

4.4 Determinación del umbral de movilidad⁸ [Nan96].

Se ha asumido que el valor umbral V_0 (o τ_0) está predeterminado. A continuación se describe como determinar el valor óptimo para V_0 y como V_0 puede variar dinámicamente en función de la carga, para un mejor desempeño. V_0 está relacionado al tiempo de permanencia umbral τ_0 a través de $\tau_0 = \pi R / (2 V_0)$ en la ecuación (A.22).

Sea B_0 la probabilidad de bloqueo requerida tanto en la macrocelda como en las microceldas. Cuando la carga de tráfico es ligera, B_m y B_μ están por debajo de B_0 . Para mejorar la calidad del servicio, se puede minimizar la tasa de handoff, puesto que una menor cantidad de handoffs implica menores posibilidades de fallas de handoff e interrupciones. V_0 puede ser colocada a un valor bajo para permitir que móviles de baja velocidad sean asignados a la macrocelda. A medida que la carga de tráfico se incrementa, V_0 es incrementada para limitar el número de móviles llamantes en la macrocelda de tal forma que $B_m \leq B_0$. Se asume que V_0 varía lentamente en comparación con el tiempo de retención de llamada, y se asume un equilibrio cuasi estático para este análisis.

Además se asumen las siguientes limitaciones del sistema para el máximo valor de V_0 :

⁸ El análisis para determinar el umbral de movilidad viene precedido por la información presentada en los Apéndices A y B.

• **Establecimiento de llamada y retardo de Handoff:**

Las llamadas generadas por unidades móviles con velocidades mayores a V_L no deben ser asignados a microceldas. Esto porque el tiempo que los móviles tardan dentro del área de cobertura de la microcelda es insuficiente para permitir el establecimiento de llamada y/o funciones de handoff.

• **Capacidad de procesamiento Handoff:**

El máximo número de handoffs por segundo que pueden ser procesados por una microcelda debe ser menor que λ_{HL} . Para una distribución de velocidad dada y afluencia o tasa total de llegada de llamadas, esto limita V_0 a ser menor que una correspondiente velocidad umbral V_H .

V_H depende de Λ , la tasa total de llegada de llamadas a una macrocelda y a sus microceldas incluidas, y $f(v)$, la distribución de velocidad de los móviles. Utilizando la ecuación (A.28) se calcula $E[V]$, la velocidad media de los móviles en microceldas, y luego determinamos V_H resolviendo:

$$E[V] = \int_{-\infty}^{\infty} v f(v | v \leq V_H) dv = \int_{-\infty}^{\infty} v \frac{f(v)}{F(V_H)} dv \quad (4.18)$$

$$E[V] = \frac{\int_0^{V_H} v f(v) dv}{\int_0^{V_H} f(v) dv} \quad (4.19)$$

Para una $f(v)$ fija, con carga Λ en incremento, más llamadas a menores velocidades son aceptadas incrementando así la carga de handoff ofrecida a las microceldas. Es decir, una carga en incremento resulta en una menor V_H .

V_0 debe ser menor o igual a $\min[V_H, V_L]$. Por razones de simplicidad, se asume que V_H es siempre mayor que V_L y así $V_0 \leq V_L$.

Procedimiento:

Se asume que la distribución de velocidad $f(v)$ de los móviles en un sistema permanece invariable cuando la carga de incrementa. Posteriormente se verá que esta asunción puede relajarse. Sea Λ_m la carga de tráfico inicial a una macrocelda y sus microceldas contenidas. Cuando sea posible, sea V_0 colocada de tal forma que el tráfico dividido entre la macrocelda y las microceldas hacen $B_m = B_0$ y $B_\mu < B_0$. Cuando V_0 se incrementa, B_m se decrementará y B_μ se

incrementará. V_0 puede ser incrementada hasta un punto tal que cualquiera de los siguientes casos ocurra primero: $B_\mu=B_0$ o $V_0=V_L$. V_0 puede tener cualquier valor dentro de este rango puesto que las probabilidades de bloqueo en la macrocelda y microcelda satisfacen el requisito de grado de servicio (*grade of service* GOS).

Para reducir el número de handoffs por llamada, se escoge el menor valor de V_0 que satisface las limitaciones de bloqueo. Este valor es llamado el umbral óptimo V_0 , a esa carga de tráfico particular. A medida que el tráfico se incrementa, el valor V_0 óptimo se incrementa y el rango de posibles valores de V_0 se reduce. Finalmente, este rango de V_0 se reduce a un único punto mientras aún satisface $V_0 \leq V_L$. La carga de tráfico en este punto está denominada como A_L . Si el tráfico se incrementa mas allá de A_L , el requisito de grado de servicio B_0 , no puede satisfacer B_m y B_μ simultáneamente. Así, A_L es la máxima capacidad del sistema.

Probabilidad de Bloqueo:

Se asume que cada macrocelda incluye c microceldas y las cargas de tráfico están uniformemente distribuidas. Una llamada será bloqueada si no existen canales disponibles en esa microcelda o macrocelda; es decir, no se permite el tráfico de sobreflujo de microcelda a macrocelda⁹. Esta es una simplificación del problema.

Sea A la afluencia o tasa total de llegada de llamadas a una macrocelda y sus microceldas incluidas. Sean λ_m y λ_μ la nueva tasa de llegada de llamadas a la macrocelda y microcelda respectivamente, donde $A = \lambda_m + c\lambda_\mu$. Sea el tiempo de retención de llamada distribuido exponencialmente con media μ^{-1} . El tiempo de retención de canal medio en una microcelda está dado por $\mu_\mu^{-1} = (\mu + \mu_H)^{-1}$, donde μ_H está aproximada en (A.28).

Sea n_μ el número de canales en una microcelda de los cuales m canales son tanto para nuevas llamadas y llamadas de handoff, mientras que $n_\mu - m$ canales están reservados para handoffs. Una nueva llamada será bloqueada si m canales están ocupados, y una llamada de handoff será bloqueada solamente si todos los canales n_μ están ocupados. Por simplicidad, la llegada de llamadas de handoff se asume de tipo Poisson¹⁰ con tasa de llegada de llamadas dada por λ_H en la ecuación (A.31). La cadena de Markov para este modelo se muestra en la figura 4.3.

⁹ Cuando está permitido el tráfico de sobreflujo de microceldas a macroceldas, el tráfico de sobreflujo puede ser modelado como un Proceso Poisson Interrumpido. [Nan96].

¹⁰ Las características de una distribución de tipo Poisson se presentan en el Apéndice F.3.

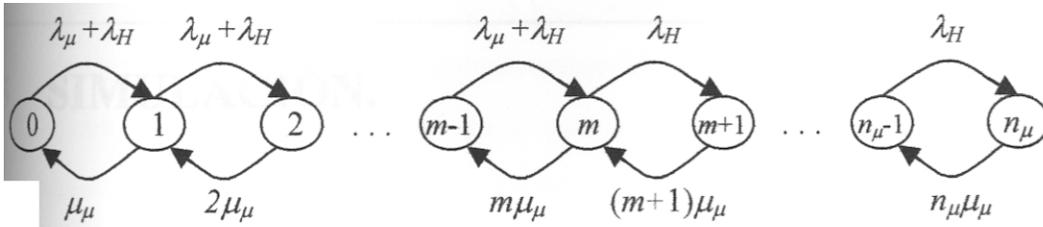


Fig. 4.3. Modelo de cadena de Markov para ocupación de canal en una microcelda.

La probabilidad de que el sistema esté en el estado i está dada por:

$$P_i = \begin{cases} \frac{p_0 (\lambda_\mu + \lambda_H)^i}{(\mu_\mu^i i!)}, & \text{si } i \leq m \\ \frac{p_0 (\lambda_\mu + \lambda_H)^m \lambda_H^{i-m}}{(\mu_\mu^i i!)}, & \text{si } m < i \leq n_\mu \end{cases} \quad (4.20)$$

donde:

$$p_0 = \left[\sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_\mu + \lambda_H)^i}{\mu_\mu^i i!} + \sum_{i=m+1}^{n_\mu} \frac{(\lambda_\mu + \lambda_H)^m \lambda_H^{i-m}}{\mu_\mu^i i!} \right]^{-1} \quad (4.21)$$

La probabilidad de bloqueo de una nueva llamada es:

$$B_{nll} = \sum_{i=m}^{n_\mu} p_i \quad (4.22)$$

y la probabilidad de falla de handoff es:

$$B_{handoff} = p_{n_\mu} \quad (4.23)$$

Si $m = n_\mu$, es decir, no existen canales reservados para llamadas de handoff, $B_\mu = B_{nll} = B_{handoff}$.

5 SIMULACIÓN.

5.1 Modelos de simulación.

La simulación realizada comprende dos casos:

a) Una microcelda (*hot spot*) dentro de una macrocelda.

- Para la microcelda *hot spot*:

Considerando de manera similar al Caso 1, de la sección 4.3.1; es decir, no existe interferencia de celdas adyacentes, se tiene que el número de canales para la microcelda estará determinado por la ecuación (4.4). Sin embargo, la relación C/I está en función de la ganancia de procesamiento, B/R_b , y de la relación E_b/I_0 . Por lo tanto, si para un sistema CDMA se tienen los siguientes valores:

B = ancho de banda de la portadora = 1.25 Mhz.

R_b = velocidad de transmisión de datos = 9600 bps.

η = ciclo de actividad de voz = 1

y si la relación mínima aceptable entre la energía de bit y la densidad espectral de ruido es $E_b/I_0=10$ dB [Rap96], entonces de la ecuación (4.1) se obtiene $C/I = -11.15$ dB.

Finalmente, con $C/I = -11.15$ dB $\equiv 0.0767$ en la ecuación (4.4), se tiene $m_\mu = 14$ canales en la microcelda, de los cuales 10 son canales para nuevas llamadas o llamadas de handoff, y 4 canales sólo son para tráfico de handoff.

- Para la macrocelda:

Considerando de manera similar al Caso 2, de la sección 4.3.1; es decir, sólo existe interferencia proveniente de las dos celdas (macrocelas) más cercanas, se tiene que el número de canales para la macrocelda estará determinado por la ecuación (4.5). Así, tomando en cuenta los mismos valores para B , R_b , y η de la microcelda, pero considerando $E_b/I_0=4.135$ dB como la relación mínima aceptable entre la energía de bit y la densidad espectral de ruido, de la ecuación (4.1) se obtiene $C/I = -17$ dB [Lee95].

Ahora, considerando:

α = potencia transmitida por cada canal de voz en las celdas = $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 100$ mW

$m_2 =$ número de canales de voz en la macrocelda 2 = 20

$m_3 =$ número de canales de voz en la macrocelda 3 = 21

y con $C/I = -17$ dB $\equiv 0.0199$, en la ecuación (4.5) se obtiene $m_1 = 10$ canales en la macrocelda 1, que contiene a la microcelda *hot spot*.

Finalmente, al igual que en el ejemplo de la sección 4.3.3, deben verificarse las condiciones expuestas en las ecuaciones (4.14), (4.15) y (4.16). Suponiendo $r_{ij} = 0.3$ (las porciones del número total de canales de voz en celdas adyacentes que interferirán con la señal deseada), se tienen:

$$10 + 0.3(20 + 21) = 22.3 < 51$$

$$20 + 0.3(10 + 21) = 29.3 < 51$$

$$21 + 0.3(10 + 20) = 30 < 51$$

De esta forma, en una primera simulación se utilizarán 10 canales de tráfico tanto para la microcelda *hot spot*, como para la macrocelda que la contiene.

b) Tres microceldas de igual tamaño (CDMA uniforme) dentro de una macrocelda.

Para una segunda simulación se considera un *cluster* de tres microceldas de igual tamaño, con características similares a la microcelda *hot spot* descrita anteriormente; sin embargo, tomando en cuenta los parámetros de diseño para el escenario de celdas uniformes expuestos en la sección 4.3 y el ejemplo presentado en 4.3.3, es necesario verificar las condiciones de las ecuaciones (4.14), (4.15) y (4.16) para este *cluster* de tres microceldas, cada una con 10 canales para nuevas llamadas o llamadas de handoff, y 4 canales sólo para tráfico de handoff ($r_{ij} = 0.3$):

$$14 + 0.3(14 + 14) = 22.4 < 51$$

$$14 + 0.3(14 + 14) = 22.4 < 51$$

$$14 + 0.3(14 + 14) = 22.4 < 51$$

La macrocelda que contiene este *cluster* de tres microceldas, tiene las mismas características de la macrocelda anterior, por lo tanto se le considera también con 10 canales de tráfico.

Para ambos casos se asume¹¹ que:

- Las microceldas son circulares con radio $r = 300$ m.

¹¹ Los modelos asumidos están justificados en [Nan96] y [Sha94].

La macrocelda también es circular con radio $R = 3000$ m.

Los móviles están uniformemente distribuidos en el sistema.

La afluencia o tasa de llegada de llamadas se considera con distribución exponencial negativa, con valor medio en función de la iteración realizada. En la generación de variables aleatorias con este tipo de distribución se utiliza el Método de Transformación Percentil presentado en [Pap91], donde para generar una secuencia aleatoria x_i con distribución exponencial, se tiene:

$$F_x(x) = 1 - e^{-x/\lambda}$$

$$x = -\lambda \ln(1 - u)$$

Debido a que $1-u$ es una variable aleatoria con distribución uniforme, se concluye que la secuencia $x_i = -\lambda \ln u_i$ tiene una distribución exponencial.

- El tiempo de ocupación de la llamadas se considera con distribución exponencial negativa, con valor medio de 120 segundos.
- La llegada de llamadas de handoff se asume de tipo Poisson.
- La probabilidad de bloqueo es de $B_0=0.02$
- La probabilidad de asignación errónea de una llamada es insignificante.
- La distribución de velocidad $f(v)$ es una función triangular mostrada en la figura 5.1 con velocidades desde 0 hasta 20 m/s (0 – 72 km/h).
- La velocidad límite es $V_L=17$ m/s; es decir que las llamadas generadas por móviles con velocidad mayor a V_L no serán asignadas a microceldas.

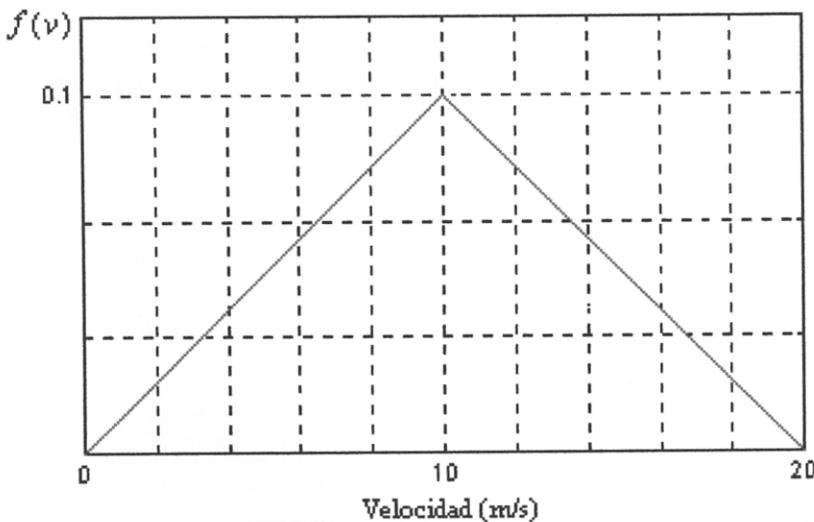


Fig. 5.1. Distribución triangular de velocidad.

Para generar λ_H , la tasa entrante de handoff por microcelda, se utiliza la ecuación (A.31), donde λ_H es el producto de μ_H , la tasa media de handoff saliente por móvil llamante, por el número medio de móviles llamantes en una microcelda. μ_H a su vez está en función de la velocidad media de los móviles, tal como lo expresa la ecuación (A.28). la velocidad media¹² de los móviles en las microceldas, $E[V]$, se halla de $f(v)$, y es:

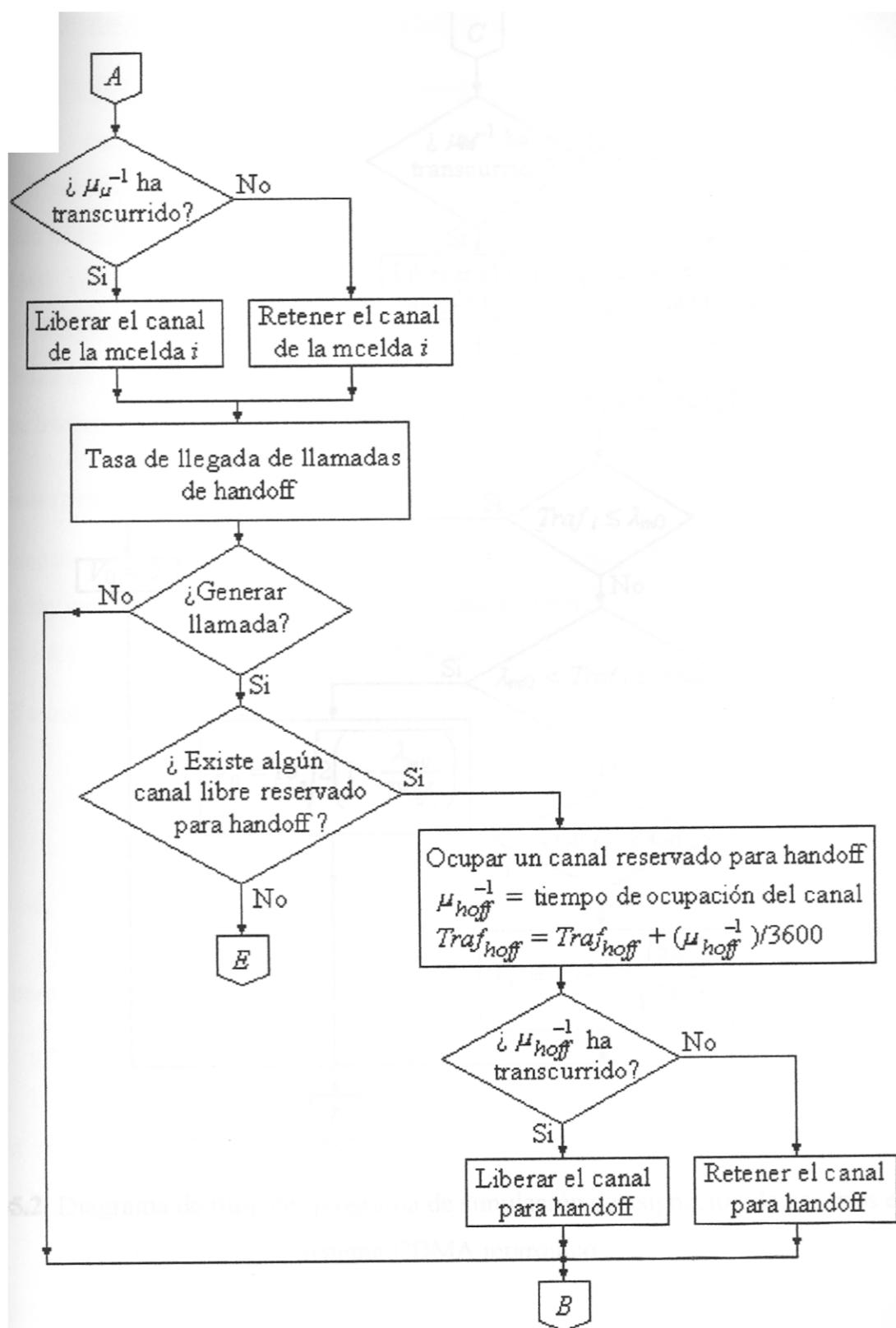
$$E[V] = \begin{cases} \frac{2}{3}V_0 & \text{para } V_0 \leq 10 \\ \frac{2V_0^3 - 30V_0^2 + 1000}{3V_0^2 - 40V_0 + 200} & \text{para } 10 < V_0 \leq V_L \end{cases} \quad (5.1)$$

Por otro lado, si A es la carga total ofrecida a una macrocelda y a sus microceldas incluidas, λ_m es la carga ofrecida a la macrocelda, y λ_μ es la carga ofrecida a las microceldas, entonces $A = \lambda_m + c\lambda_\mu$, donde c es el número de microceldas. Así, de acuerdo con la tabla para probabilidad de bloqueo Erlang B , la carga ofrecida a una macrocelda de 10 canales de tal manera que $B = B_0 = 0.02$, es $\lambda_{m0} = 0.054$ Erlangs. Por lo tanto, fijando la carga y el bloqueo ofrecidos a la macrocelda a su máximo valor, y asignando la carga ofrecida restante $A - \lambda_{m0}$ a las c microceldas, los valores óptimos de la velocidad umbral¹³, V_0 , pueden obtenerse a partir de $f(v)$:

$$V_0 = \begin{cases} 0 & \text{para } \Lambda \leq \lambda_{m0} \\ 10 \sqrt{2 \left(1 - \frac{\lambda_{m0}}{\Lambda} \right)} & \text{para } \lambda_{m0} < \Lambda \leq 2\lambda_{m0} \\ 20 - 10 \sqrt{\frac{2\lambda_{m0}}{\Lambda}} & \text{para } \Lambda > 2\lambda_{m0} \end{cases} \quad (5.2)$$

¹² La solución de la ecuación (5.1) es presentada en el Apéndice F.1.

¹³ La solución de la ecuación (5.2) es presentada en el Apéndice F.2.



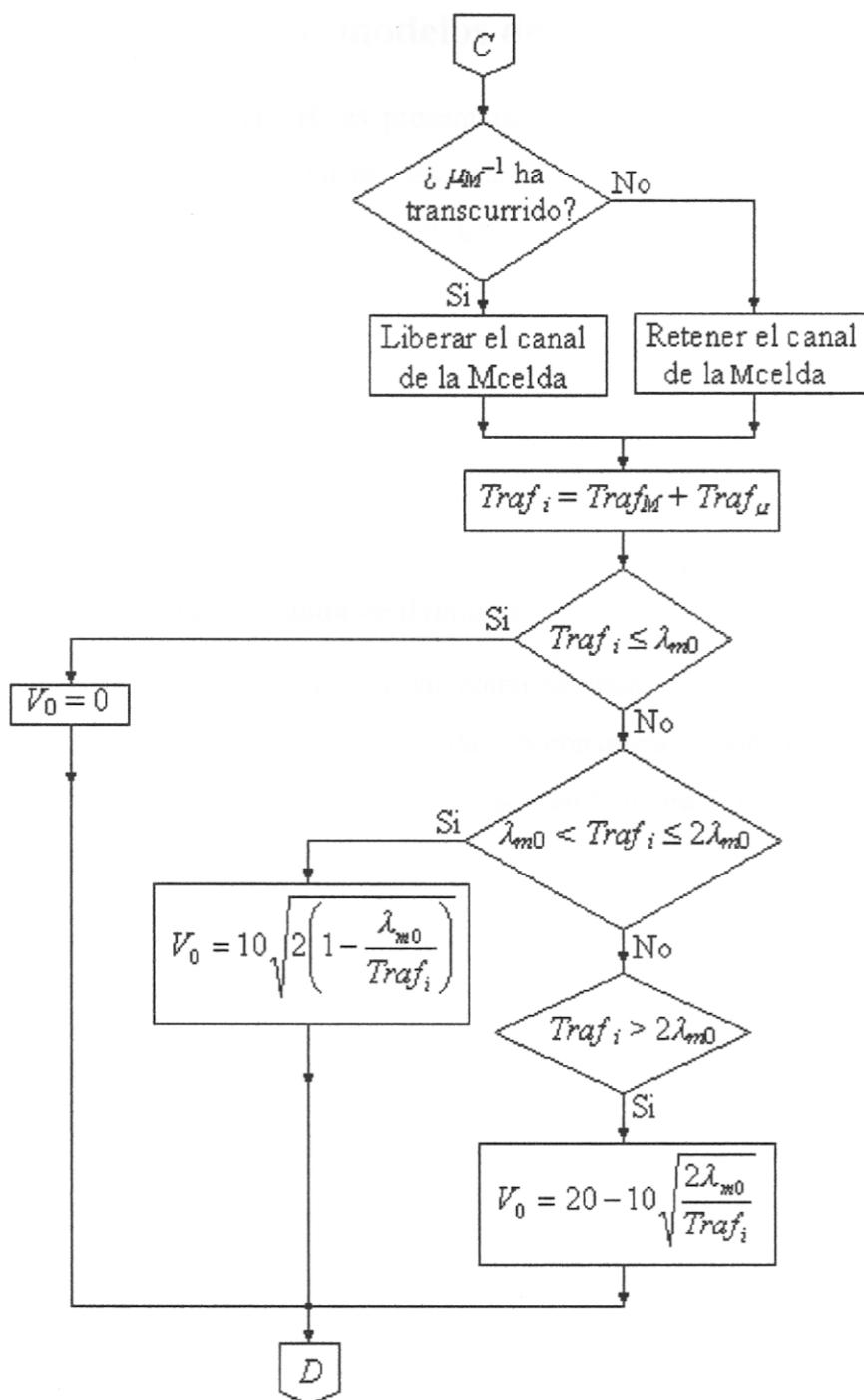


Fig. 5.2. Diagrama de flujo del programa de simulación de asignación de usuarios en un sistema CDMA jerárquico.

5.3 Implementación de los modelos de simulación.

El programa simulado en MATLAB, es presentado en su totalidad en el Apéndice E.1; sin embargo, a continuación se detallan las etapas del mismo que fueron probadas independientemente; es decir, de manera modular para luego ser probado en su totalidad. La simulación se realiza considerando una afluencia de llegada de llamadas en el intervalo de una hora (3600 segundos), para luego ir incrementando la tasa de llegada de llamadas en sucesivos intervalos de una hora cada uno; de manera que cada una de las mediciones de probabilidad de bloqueo B y velocidad umbral V_0 se realizan considerando el tráfico generado en dichos intervalos.

5.3.1 Generación aleatoria de llegada de llamadas.

Las llamadas llegan de forma aleatoria y tal como se indicó anteriormente la distribución asociada de intervalos entre llegadas de llamadas se considera exponencial negativa¹⁴. Una representación gráfica de dicha distribución se muestra en la figura 5.3.

```
if temp(:,mi)==1
    tunif=rand;
    tentrell=(-1)*(tiempo/ll)*log(tunif);
    tentrell2(:,mi)=round(tentrell);
    seg2(:,mi)=seg;
    temp(:,mi)=0;
end;
```

5.3.2 Generación aleatoria de velocidad del móvil.

Una vez generada una llamada, se le asigna una velocidad aleatoria al móvil que generó la llamada. La distribución de velocidad corresponde a una función triangular tal como la mostrada en la figura 5.1.

```
temp(:,mi)=1;
n=n+1;
for i=1:2
    V1(i,:)=10*rand;
end;
V=sum(V1);
```

¹⁴ Las características de la función exponencial se presentan en el Apéndice F.3.

5.3.3 Asignación de llamada a macrocelda o microcelda.

Si la velocidad del móvil es mayor a la velocidad umbral V_0 , la llamada es asignada a un canal de la macrocelda, caso contrario se asignará a un canal de la microcelda. Si la llamada debía ser asignada a la macrocelda, pero todos los canales en ella están ocupados, la llamada será asignada a un canal de la microcelda.

```
if V>Vo(1,1)|V>VL
    nM=nM+1;
    for z=1:prueb1
        if CaM(z,)==0
            CaM(z,)=1;
        end;
    end;
    if q1==z
        nM=nM-1;
        nm(1,mi)=nm(1,mi)+1;
        for w=1:prueb2
            if Cam(w,mi)==0
                Cam(w,mi)=1;
            end;
        end;
    end;
else
    nm(1,mi)=nm(1,mi)+1;
    for w=1:prueb2
        if Cam(w,mi)==0
            Cam(w,mi)=1;
        end;
    end;
end;
```

5.3.4 Generación aleatoria del tiempo de ocupación de las llamadas.

Las llamadas duran un tiempo aleatorio y la distribución asociada de tiempos de ocupación de las llamadas se considera exponencial negativa¹⁵ con valor medio de 120 segundos. Una representación gráfica de dicha distribución se muestra en la figura 5.4. Para la macrocelda está dado por:

```
tservp=120;
tM=rand;
tservM=(-1)*(tservp)*log(tM);
```

Si la llamada es asignada a la microcelda, el tiempo de ocupación estará también en función de la velocidad a la que se desplaza el móvil y al radio de la microcelda, tal como se expresa en la ecuación (A.28) del Apéndice A.

¹⁵ Las características de la función exponencial se presentan en el Apéndice F.3.

```

tm=rand;
tservm=(-1)*(tservp)*log(tm);
mu=(tservm)^(-1);
muh(1,mi)=(2*V)/(pi*R(1,mi));
tservmh=(mu+muh(1,mi))^(-1);

```

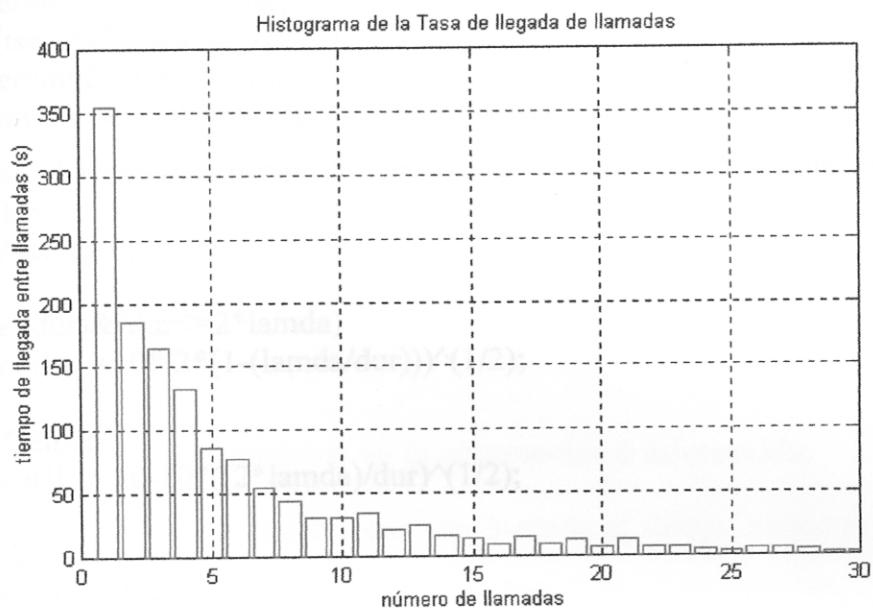


Fig. 5.3. Histograma de la tasa de llegada de llamadas¹⁶.

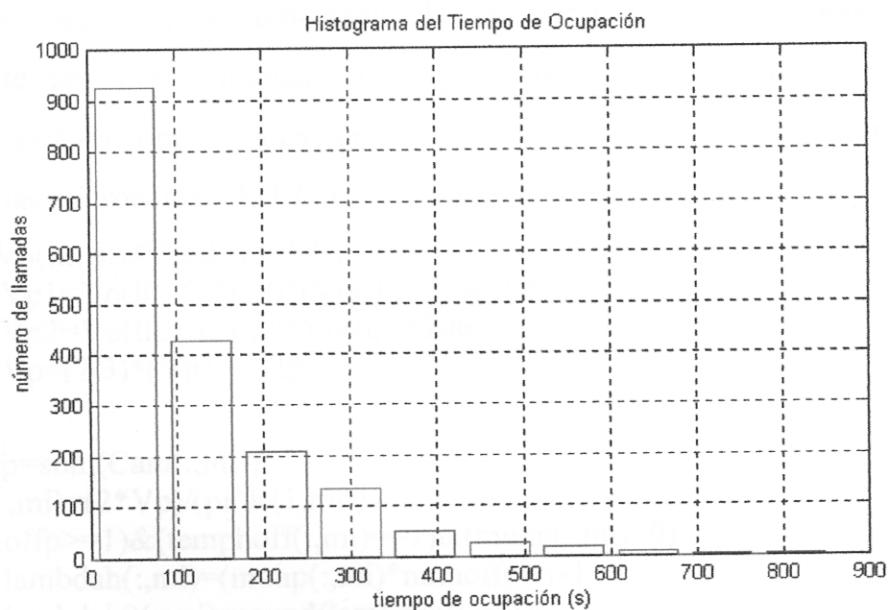


Fig. 5.4. Histograma del tiempo de ocupación¹⁷.

¹⁶ El programa en MATLAB para la tasa de llegada de llamadas se presenta en el Apéndice E.2.

¹⁷ El programa en MATLAB para el tiempo de ocupación se presenta en el Apéndice E.3

5.3.5 Almacenamiento del tráfico generado.

El tráfico generado tanto en la macrocelda como en la microcelda se almacenará progresivamente a medida que pasen los segundos, ya que su medida determinará el valor de V_0 durante el intervalo de una hora.

```
dur=((tservM2)/tiempo)+dur;
durM=((tservM2)/tiempo)+durM;
dur=((tservmh2)/tiempo)+dur;
durm(1,mi)=((tservmh2)/tiempo)+durm(1,mi);
```

El valor de V_0 está determinado por las desigualdades presentadas en la ecuación (5.2):

```
if dur<=lamda
    Vo(ll,:)=0;
end;
if (lamda<dur)&(dur<=2*lamda)
    Vo(ll,:)=10*(2*(1-(lamda/dur)))^(1/2);
end;
if dur>2*lamda
    Vo(ll,:)=20-10*((2*lamda)/dur)^(1/2);
end;
if Vo(ll,:)<=10
    Vp=(2/3)*Vo(ll,:);
end;
```

5.3.6 Generación de llegada de llamadas de handoff.

La tasa de llegada de llamadas de handoff (número de handoffs a ser procesados por una estación base por segundo), tal como indica la ecuación (A.31), es el producto de la tasa de handoff saliente por móvil llamante (μ_H) y el número de móviles llamantes en una microcelda. μ_H está dada por la ecuación (A.28), y está en función de la velocidad media de los móviles en las microceldas, $E[V]$, presentada en la ecuación (5.1).

```
if (10<Vo(ll,:))&(Vo(ll,:)<=VL)
    Vp1=Vo(ll,:)^3-30*(Vo(ll,:)^2)+1000;
    Vp2=Vo(ll,:)^2-40*Vo(ll,:)+200;
    Vp=(2/3)*(Vp1/Vp2);
end;
nmhoffp=sum(Cam(:,mi));
muhp(1,mi)=(2*Vp)/(pi*R(1,mi));
if (nmhoffp>=1)&(temphoff(:,mi)==1)&(muhp(:,mi)>0)
    lambdah(:,mi)=(muhp(:,mi)*nmhoffp)^(-1);
    lambdah2(:,mi)=round(lambdah(:,mi));
    seghoff(:,mi)=seg;
    temphoff(:,mi)=0;
end;
```

La asignación de llamadas de handoff se hará primero a canales para handoff, pero si estos están ocupados en su totalidad, la llamada de handoff será asignada a un canal de tráfico de la microcelda.

```

for wh=1:prueb3
    if Camhoff(wh,mi)==0
        Camhoff(wh,mi)=1;
    end;
end;
if qh==wh
    nm(1,mi)=nm(1,mi)+1;
    for w=1:prueb2
        if Cam(w,mi)==0
            Cam(w,mi)=1;
        end;
    end;
end;
end;

```

5.3.7 Liberación de canales ocupados en la macrocelda o microcelda.

Un canal de la macrocelda es ocupado por una llamada el tiempo aleatorio generado como tiempo de ocupación, una vez transcurrido este tiempo, el canal es liberado:

```

for d=1:prueb1
    if seg<=(TSERVM(d,:)+TSERVM2(d,:))
        CaM(d,:)=1;
    else
        CaM(d,:)=0;
        TSERVM(d,:)=0;
        TSERVM2(d,:)=0;
    end;
end;

```

De manera similar, los canales de la microcelda, sean estos canales de tráfico o canales para handoff, serán ocupados hasta haber transcurrido el tiempo aleatorio de ocupación de llamada, y luego ser liberados:

```

for k=1:prueb2
    if seg<=(TSERVm(k,mi)+TSERVm2(k,mi))
        Cam(k,mi)=1;
    else
        Cam(k,mi)=0;
        TSERVm(k,mi)=0;
        TSERVm2(k,mi)=0;
    end;
end;

for kh=1:prueb3
    if seg<=(TSERVmhoff(kh,mi)+TSERVmhoff2(kh,mi))

```

```

        Camhoff(kh,mi)=1;
    else
        Camhoff(kh,mi)=0;
        TSERVmhoff(kh,mi)=0;
        TSERVmhoff2(kh,mi)=0;
    end;
end;
end;

```

5.3.8 Cálculo de la probabilidad de Bloqueo.

La probabilidad de bloqueo de la macrocelda está determinada por la relación entre el número de llamadas bloqueadas y el número total de llamadas presentadas a la macrocelda:

$$B1(l1,:)=b1/nM;$$

De manera similar, la probabilidad de bloqueo de la microcelda se calcula de la relación entre el número de llamadas bloqueadas por la microcelda y el número total de llamadas presentadas a la microcelda:

$$B2(l1,y)=b2(1,y)/nm(1,y);$$

Finalmente, la probabilidad de bloqueo del sistema será la relación entre el número total de llamadas bloqueadas y el número total de llamadas presentadas al sistema:

$$Bsis(l1,:)=(b1+b22)/(nM+sum(nm'));;$$

5.4 Análisis de los resultados de la simulación.

a) Una microcelda (*hot spot*) dentro de una macrocelda.

Los resultados gráficos obtenidos, luego de realizada la simulación de este primer caso, se muestran en las figuras 5.5, 5.6, y 5.7. La figura 5.5.a muestra los valores óptimos de la velocidad umbral V_0 versus diferentes cargas de tráfico ofrecidas. Para tráfico menor a 5.084 Erlangs – el tráfico capaz de ser atendido por 10 canales al 2% de probabilidad de bloqueo (de acuerdo con la tabla de Erlang B) – todas las llamadas pueden ser atendidas por canales en la macrocelda y la probabilidad de bloqueo de la macrocelda será $B_m \leq B_0 = 0.02$. El valor óptimo de V_0 , de manera que la tasa de handoff λ_H es mínima, es $V_0 = 0$. A medida que el tráfico se incrementa, el valor óptimo de V_0 también se incrementa para limitar el número de llamadas atendidas por la macrocelda, de tal forma que la probabilidad de bloqueo en la macrocelda sea igual a B_0 . El rango de posibles valores de V_0 decrece a medida que la carga se incrementa, hasta A_L , la máxima capacidad del sistema de tal manera que $B_m \leq B_0$ y $B_\mu \leq B_0$.

En la figura 5.5.b se puede observar que $\Lambda_L \approx 12.5$ Erlangs; y en la figura 5.6.a, para esta máxima capacidad, el valor de la velocidad umbral es $V_0 \approx 11$ m/s (40 km/h).

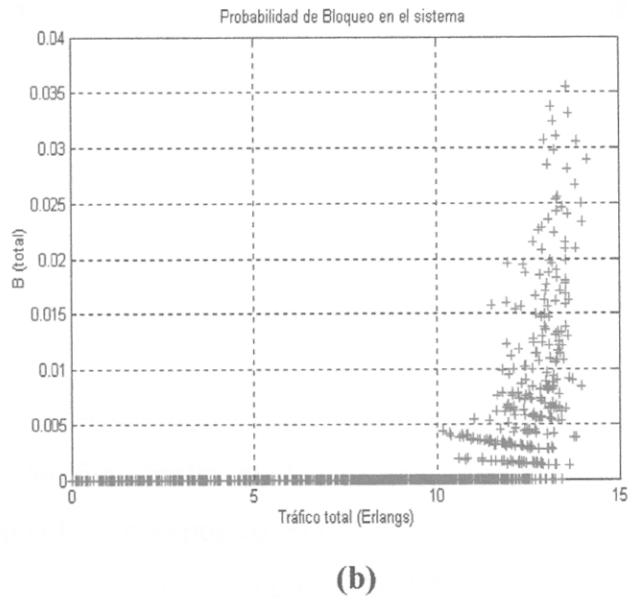
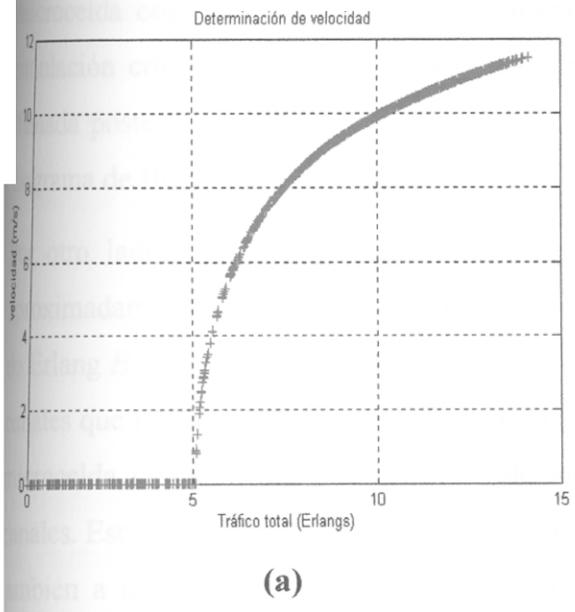


Fig. 5.5. (a) Determinación de la velocidad. (b) Probabilidad de bloqueo en el sistema.

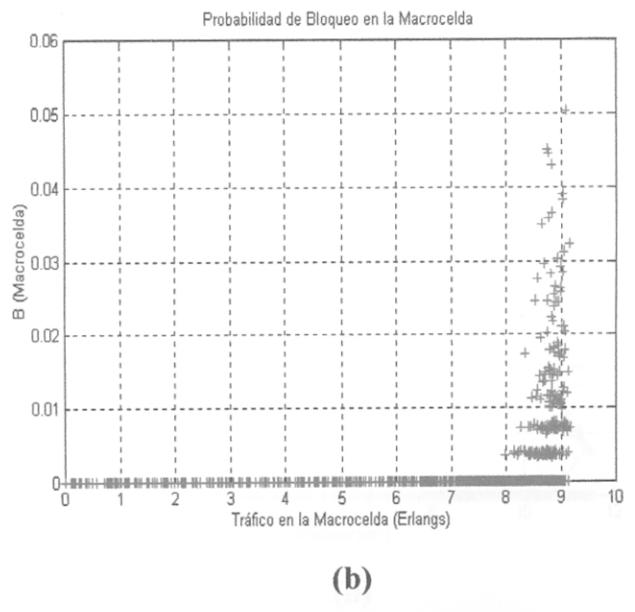
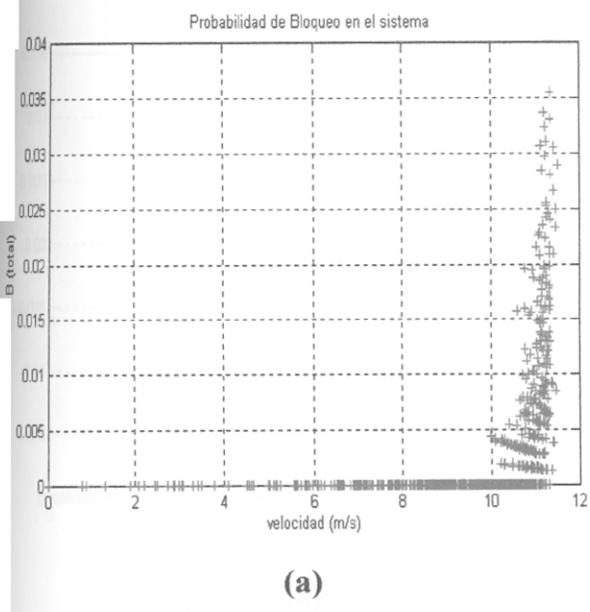


Fig. 5.6. (a) Probabilidad de bloqueo en el sistema. (b) Probabilidad de bloqueo en la macrocela.

En la figura 5.6.b, puede apreciarse que para un tráfico superior a 8.5 Erlangs aproximadamente, la probabilidad de bloqueo es superior a 0.02 (2%). De acuerdo con la

tabla de Erlang B , si la probabilidad de bloqueo es de 2% y el tráfico de 8.5 Erlangs, el número de canales que podría atender esta carga es de 14; es decir, que a pesar de que en la simulación la macrocelda contó con 10 canales, su desempeño fue similar al de una macrocelda con 14 canales. Este incremento de capacidad se debe a que el programa de simulación contemplaba que si todos los canales de la macrocelda estaban ocupados, una llamada posterior era asignada a un canal libre en la microcelda, tal como se aprecia en el diagrama de flujo de la página 92.

Por otro lado, en la figura 5.7.a se observa que para un tráfico superior a 4 Erlangs aproximadamente, la probabilidad de bloqueo supera el valor de 0.02. De acuerdo con la tabla de Erlang B , si la probabilidad de bloqueo es de 2% y el tráfico de 4 Erlangs, el número de canales que podría atender esta carga es de 9; es decir, que a pesar de que en la simulación la microcelda contó con 10 canales, su desempeño fue similar al de una microcelda con 9 canales. Esta reducción de capacidad se debe no sólo a lo expuesto en el párrafo anterior, sino también a que en la simulación los canales de tráfico de la microcelda debían atender a aquella llamada de handoff que encontrase bloqueados todos los canales reservados para handoff, tal como se aprecia en el diagrama de flujo de la página 93.

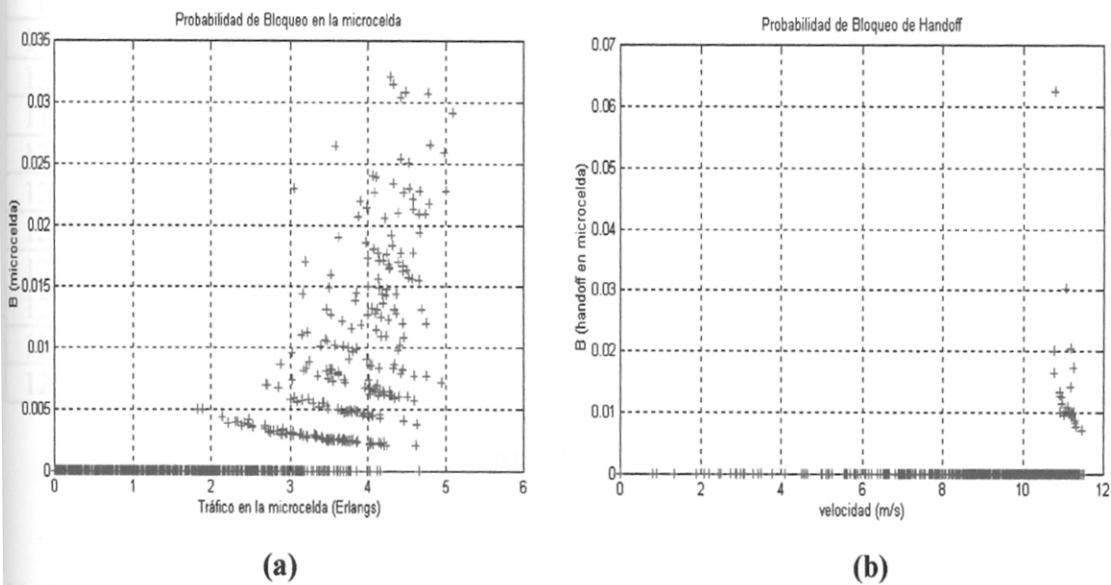


Fig. 5.7. (a) Probabilidad de bloqueo en la microcelda *hot spot*. **(b)** Probabilidad de bloqueo de handoff en la microcelda.

Si deseamos considerar la capacidad total del sistema; tenemos que sumar los 5.084 Erlangs que podrían atender los 10 canales de tráfico de la macrocelda, más los 5.084 Erlangs que podrían atender los 10 canales de tráfico de la microcelda; es decir, 10.168 Erlangs. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, de los resultados de la simulación se obtuvo una máxima capacidad del sistema $A_L \approx 12.5$ Erlangs; es decir, un incremento aproximado del 20% en relación al valor de 10.168 Erlangs.

La pérdida de llamadas de handoff es prácticamente nula para valores de velocidad umbral $V_0 \leq 11$ m/s (V_0 para $A_L \approx 12.5$ Erlangs) tal como se presenta en la figura 5.7.b. La asignación de usuarios de acuerdo con la velocidad del móvil, reduce la probabilidad de bloqueo de llamadas de handoff; sin embargo, cuando se alcanza la máxima capacidad del sistema, la pérdida de llamadas de handoff es superior a B_0 .

Finalmente, resultados numéricos obtenidos de la simulación pueden observarse en la tabla 5.1, donde aparecen además, el número de llamadas atendidas tanto por la macrocelda como por la microcelda *hot spot*, y el número de llamadas de handoff.

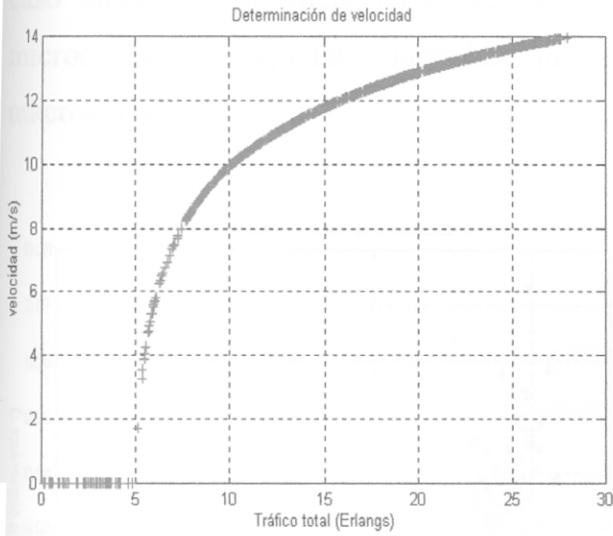
Tráfico total (E)	V_0 (m/s)	$B_{macrocelda}$	$B_{microcelda}$	llamadas en la macrocelda	llamadas en la microcelda	$B_{handoff}$	llamadas de handoff
11,93	10,77	0.0152	0.0230	263	348	0.0164	61
12,37	10,93	0.0202	0.0190	297	368	0	55
11,91	10,76	0.0145	0.0170	275	352	0.0200	50
12,63	11,03	0.0275	0.0181	255	441	0	103
12,87	11,11	0.0179	0.0227	280	441	0	98
12,41	10,95	0.0072	0.0265	279	415	0.0125	80
12,72	11,06	0.0069	0.0145	290	413	0.0303	66
12,77	11,08	0.0237	0.0220	253	455	0	101
13,02	11,16	0.0117	0.0179	257	448	0.0204	98
12,87	11,11	0.0262	0.0207	267	434	0	97

Tabla 5.1. Resultados numéricos.

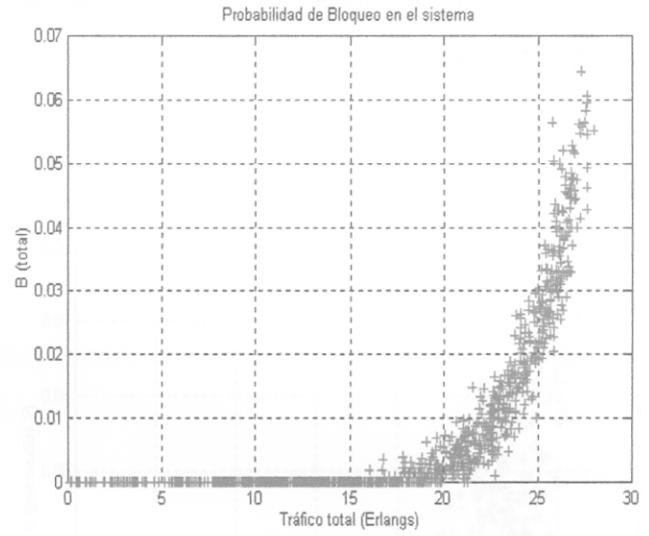
b) Tres microceldas de igual tamaño (CDMA uniforme) dentro de una macrocelda.

Los resultados gráficos obtenidos, luego de realizada la simulación de este segundo caso, se muestran en las figuras 5.8 a 5.12. De manera similar al caso anterior, la figura 5.8.a muestra que para tráfico menor a 5.084 Erlangs todas las llamadas pueden ser atendidas por canales en la macrocelda y la probabilidad de bloqueo de la macrocelda será $B_m \leq B_0 = 0.02$. El rango de

posibles valores de V_0 decrece a medida que la carga se incrementa, hasta Λ_L , la máxima capacidad del sistema de tal manera que $B_m \leq B_0$ y $B_\mu \leq B_0$. En la figura 5.8.b se observa que $\Lambda_L \approx 24$ Erlangs; y en la figura 5.9.a, para esta máxima capacidad, el valor de la velocidad umbral es $V_0 \approx 13.5$ m/s (49 km/h).

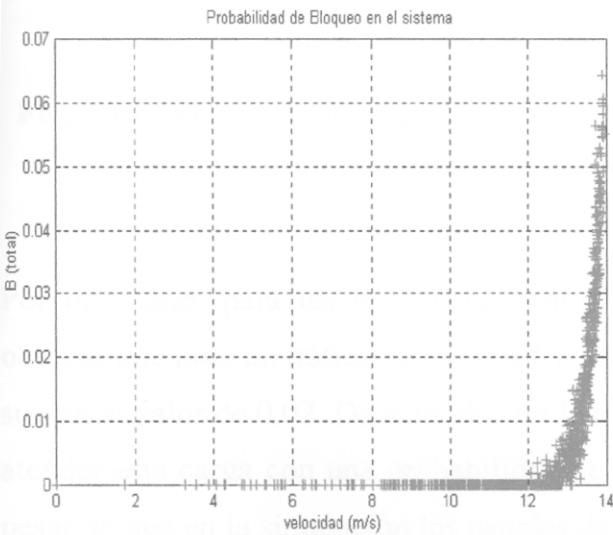


(a)

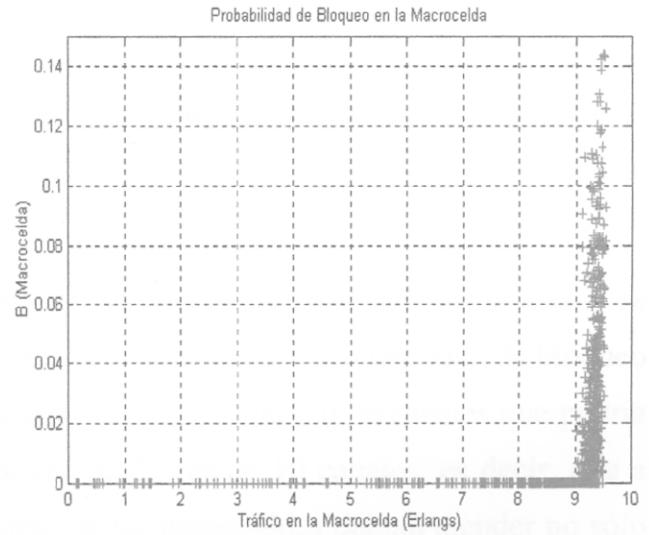


(b)

Fig. 5.8. (a) Determinación de la velocidad. (b) Probabilidad de bloqueo en el sistema.



(a)



(b)

Fig. 5.9. (a) Probabilidad de bloqueo en el sistema. (b) Probabilidad de bloqueo en la macrocelda.

En la figura 5.9.b, puede apreciarse que para un tráfico superior a 9 Erlangs aproximadamente, la probabilidad de bloqueo es superior a 0.02. De acuerdo con la tabla de Erlang B , el número de canales que podría atender esta carga con una probabilidad de bloqueo de 2% es de 15 canales; es decir, que a pesar de que en la simulación la macrocelda contó con 10 canales, su desempeño fue similar al de una macrocelda con 15 canales. Igual que en el caso anterior, este incremento de capacidad se debe a la asignación a canales de las microceldas de aquellas llamadas que encuentren ocupados todos los canales de la macrocelda.

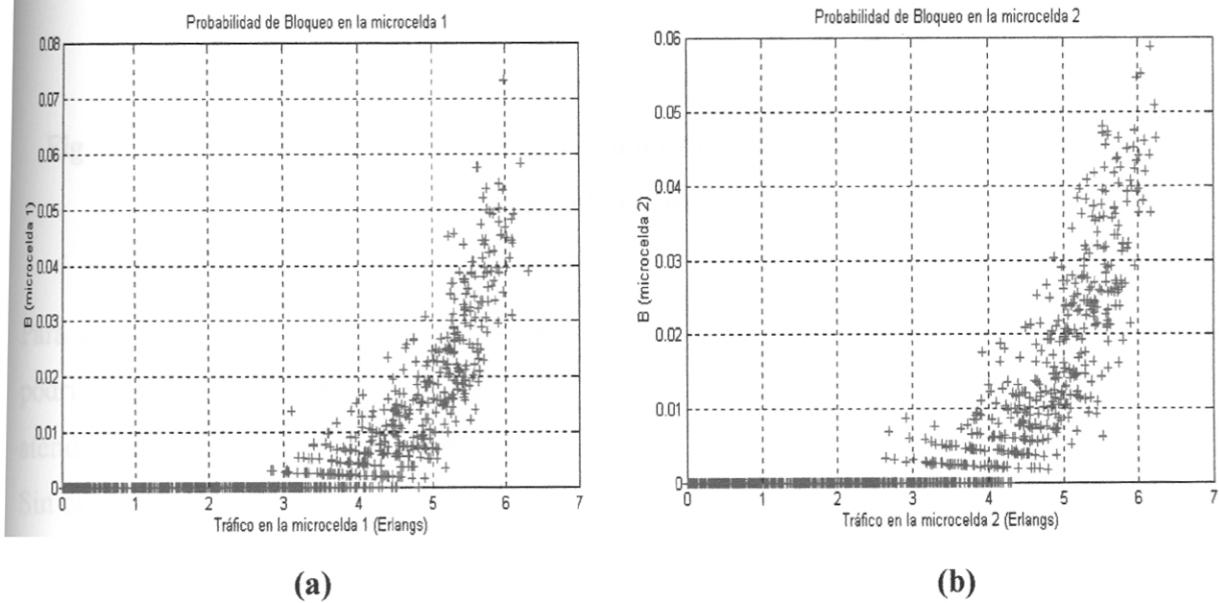


Fig. 5.10. (a) Probabilidad de bloqueo en la microcelda 1. **(b)** Probabilidad de bloqueo en la microcelda 2.

Por otro lado, para las microceldas uniformes, en las figuras 5.10.a, 5.10.b, y 5.11.a se observa que para un tráfico superior a 5 Erlangs aproximadamente, la probabilidad de bloqueo supera el valor de 0.02. De acuerdo con la tabla de Erlang B , el número de canales que podría atender esta carga con una probabilidad de bloqueo de 2% es de 10 canales; es decir, que a pesar de que en la simulación los canales de tráfico de las microceldas debían atender no sólo aquellas llamadas que encontrasen todos los canales de la macrocelda ocupados, sino también atender las llamadas de handoff que encontrasen bloqueados todos los canales reservados para handoff, la capacidad de las microceldas no se redujo sustancialmente.

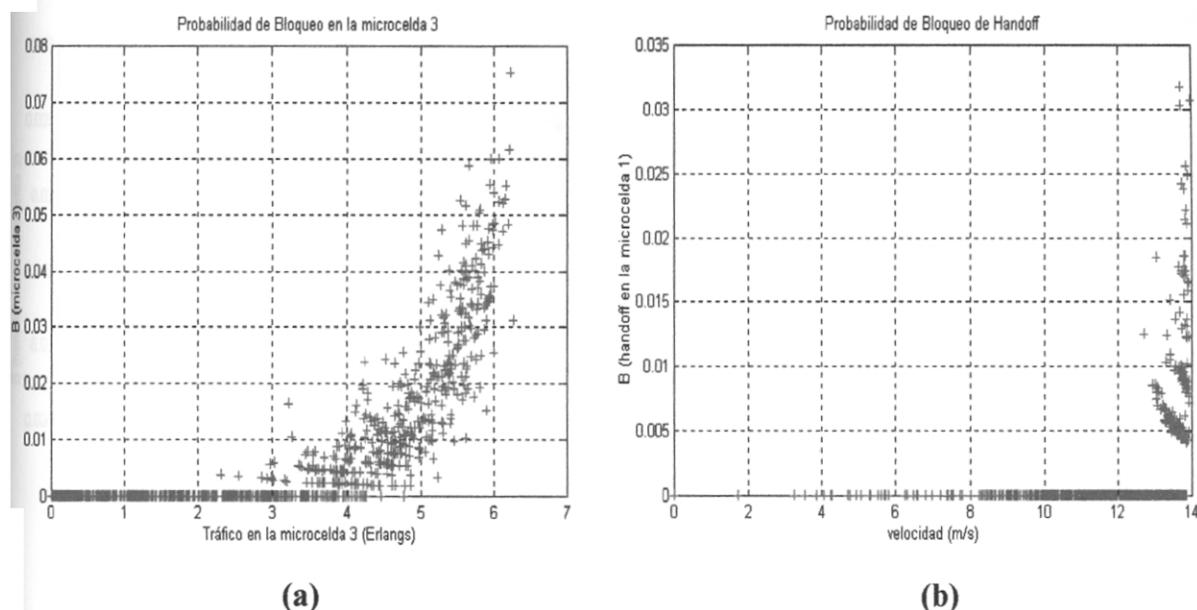
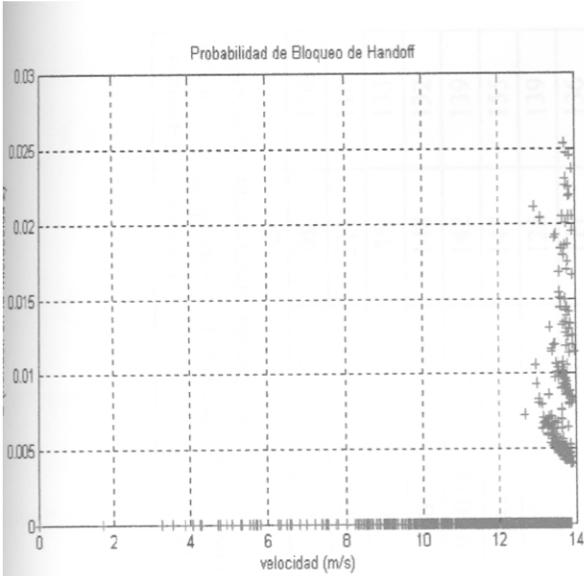


Fig. 5.11. (a) Probabilidad de bloqueo en la microcelda 3. **(b)** Probabilidad de bloqueo de handoff en la microcelda 1.

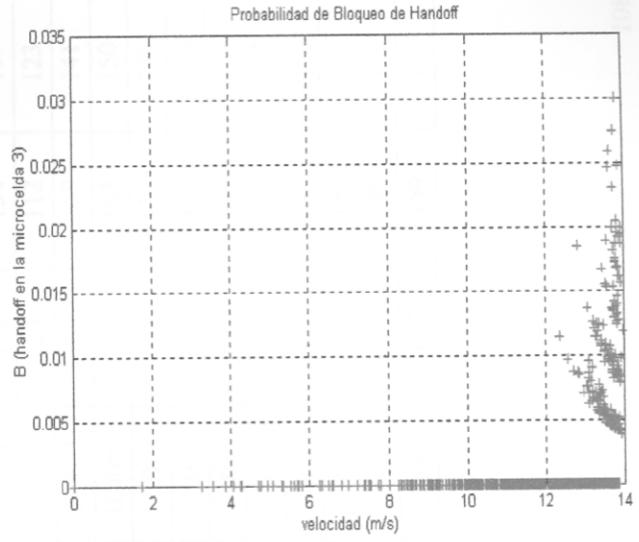
Para considerar la capacidad total del sistema; tenemos que sumar los 5.084 Erlangs que podrían atender los 10 canales de tráfico de la macrocelda, más los 5.084 Erlangs que podrían atender los 10 canales de tráfico de cada una de las 3 microceldas; es decir, 20.336 Erlangs. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, de los resultados de la simulación se obtuvo una máxima capacidad del sistema $A_L \approx 24$ Erlangs; es decir, un incremento aproximado del 20%, igual valor al caso anterior de una sola microcelda *hot spot* dentro de una macrocelda.

En las 3 microceldas uniformes, la pérdida de llamadas de handoff es prácticamente nula para valores de velocidad umbral $V_0 \leq 13.5$ m/s (V_0 para $A_L \approx 24$ Erlangs) tal como se presenta en las figuras 5.11.b y 5.12. La asignación de usuarios de acuerdo con la velocidad del móvil, reduce la probabilidad de bloqueo de llamadas de handoff; sin embargo, cuando se alcanza la máxima capacidad del sistema, la pérdida de llamadas de handoff es superior a B_0 .

Finalmente, resultados numéricos obtenidos de la simulación de este segundo caso pueden observarse en la tabla 5.2, donde aparecen además del número de llamadas atendidas por la macrocelda y por las 3 microceldas uniformes, el número de llamadas de handoff en las 3 microceldas.



(a)



(b)

Fig. 5.12. (a) Probabilidad de bloqueo de handoff en la microcelda 2. **(b)** Probabilidad de bloqueo de handoff en la microcelda 3.

Tráfico total (G)	β (m/s)					
		microcelda 1	microcelda 2	microcelda 3	microcelda 4	microcelda 5
21,23	13,1	0,0105	0	0,0124	0,0306	2,85
21,35	13,1	0,0221	0,0071	0	0,0177	2,85
21,52	13,1	0,0292	0,0109	0,0137	0,0236	2,85
22,04	13,2	0,0353	0,0064	0,0187	0,0295	2,85
21,94	13,2	0,0283	0,0044	0,0175	0,0282	2,85
21,9	13,2	0,0181	0,0062	0,0175	0,0282	2,85
22,25	13,2	0,0211	0,0152	0,0175	0,0282	2,85
22,65	13,3	0,0433	0,0067	0,0175	0,0282	2,85
22,88	13,2	0,0094	0,0024	0,0175	0,0282	2,85
21,3	13,2	0,0239	0,0043	0,0175	0,0282	2,85
22,86	13,3	0,0257	0,0065	0,0175	0,0282	2,85
21,85	13,3	0,0201	0,0065	0,0175	0,0282	2,85
21,5	13,3	0,0253	0,0167	0,0175	0,0282	2,85
21,25	13,3	0,0233	0,0077	0,0175	0,0282	2,85
20,25	13,3	0,0225	0,0099	0,0175	0,0282	2,85
21,1	13,4	0,0524	0,0151	0,0175	0,0282	2,85
20,96	13,3	0,0256	0,0039	0,0175	0,0282	2,85
22,11	13,3	0,0104	0,0115	0,0175	0,0282	2,85
21,15	13,4	0,0307	0,0151	0,0175	0,0282	2,85
22,73	13,3	0,0263	0,0159	0,0175	0,0282	2,85

Tráfico total (E)	V_0 (m/s)	B macrocelda	B microcelda 1	B microcelda 2	B microcelda 3	llamadas en la macrocelda	llamadas en la microcelda 1	llamadas en la microcelda 2	llamadas en la microcelda 3	$B_{handoff}$ microcelda 1	$B_{handoff}$ microcelda 2	$B_{handoff}$ microcelda 3	llamadas de handoff microcelda 1	llamadas de handoff microcelda 2	llamadas de handoff microcelda 3
21,28	13,1	0.0105	0	0.0124	0.0066	285	433	484	452	0	0.0204	0	137	98	136
21,35	13,1	0.0221	0.0093	0	0.0126	271	431	444	476	0	0	0.0086	0	111	116
21,52	13,1	0.0292	0.0109	0.0187	0.0064	274	457	482	466	0	0	0	132	55	133
22,04	13,2	0.0353	0.0064	0.0121	0.0061	283	469	497	489	0	0.0068	0	132	148	132
21,94	13,2	0.0283	0.0044	0.0078	0.0191	283	452	510	470	0	0	0.0072	67	142	139
21,9	13,2	0.0181	0.0062	0	0.0238	276	486	479	504	0	0	0.0065	139	147	155
22,25	13,2	0.0211	0.0102	0	0.0077	284	488	451	518	0	0	0	7	125	139
22,65	13,3	0.0433	0.0062	0.0167	0.0116	277	480	539	517	0	0.0085	0	0	117	136
22,02	13,2	0.0094	0.0020	0.0045	0.0243	318	497	441	534	0	0	0.0126	160	134	159
21,8	13,2	0.0239	0.0043	0	0.0149	293	470	478	470	0.0079	0	0	127	112	123
22,49	13,3	0.0257	0.0019	0.0039	0.0163	272	529	517	492	0	0	0.0071	167	169	141
22,45	13,3	0.0201	0	0.0133	0.0120	299	462	527	500	0	0	0.0067	137	163	150
22,15	13,2	0.0232	0.0167	0.0039	0.0183	302	479	511	493	0.0068	0	0	148	170	156
22,92	13,3	0.0223	0.0077	0.0123	0.0078	269	520	570	514	0	0	0	173	174	160
22,53	13,3	0.0225	0.0039	0.0063	0.0079	267	519	475	504	0	0	0	151	147	151
23,1	13,4	0.0324	0.0131	0.0056	0.0158	278	533	535	507	0	0	0	168	171	182
22,94	13,3	0.0256	0.0059	0.0120	0.0198	273	508	500	555	0	0	0.0056	142	158	180
22,63	13,3	0.0104	0.0115	0.0213	0	289	523	516	506	0.0066	0.0067	0	152	150	143
23,15	13,4	0.0307	0.0151	0.0037	0.0077	293	531	542	522	0.0063	0	0	159	188	158
22,73	13,3	0.0263	0.0159	0.0039	0.0131	266	504	514	535	0.0123	0	0.0060	162	154	167

Tabla 5.2. Resultados numéricos.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.

6.1 Observaciones.

Con respecto a las características del sistema celular CDMA y a las características propias de un sistema celular jerárquico macrocelda–microcelda, se detallan las siguientes observaciones:

1. En sistemas celulares analógicos y en TDMA, la capacidad se incrementa como resultado de la eliminación de la interferencia en la señal deseada. El nivel de la señal deseada es siempre mucho mayor que el nivel de interferencia, por ejemplo 18 dB o más para AMPS. Sin embargo, en un sistema CDMA, el incremento de capacidad está basado en cuanto interferencia puede tolerar la señal deseada. El nivel de la señal deseada está siempre por debajo del nivel de interferencia. Si un usuario toma más potencia de la que necesita, entonces los otros usuarios sufrirán y la capacidad del sistema se reducirá.
2. El diseño de un sistema CDMA es mucho más complejo que el diseño de un sistema TDMA. En sistemas analógicos y en TDMA, el elemento clave más importante es la relación C/I . Existen dos tipos diferentes de C/I . Una es la relación C/I medida la cual es usada para indicar la calidad de voz en el sistema. A un mayor valor medido, mejor. La otra es la relación C/I específica $[(C/I)_s]$, la cual es un valor específico para un sistema celular específico. Por ejemplo, la $(C/I)_s$ en el sistema AMPS es 18 dB. Dado que en sistemas analógicos y en TDMA, debido a separaciones geográficas y espectrales, la interferencia I es mucho menor que la señal recibida C , algunas veces es posible utilizar medidores de intensidad de campo para medir C y determinar la cobertura de cada celda. El medidor de intensidad de campo se convierte así en una herramienta útil en el diseño de sistemas TDMA. En CDMA todos los canales de tráfico son atendidos solamente por un único canal de radio en todas las celdas. Entonces, C/I es difícil de obtener usando un medidor de intensidad de señal. Por lo tanto, los elementos clave en el diseño de un sistema CDMA son diferentes de aquellos utilizados en el diseño de un sistema TDMA.
3. Las microceldas son una solución conceptual a áreas con alta densidad de tráfico. La densidad es frecuentemente no uniforme y también las condiciones de propagación en

estas áreas. Esto conduce a un agrupamiento (*clustering*) de celdas heterogéneo y a entrelazar los límites de las celdas. Estas son condiciones no favorables para sistemas que cuentan con asignación de frecuencias y hard handoff (FDMA, TDMA) debido a que reducen su eficiencia nominal; sin embargo, explotan muy bien las características únicas del sistema CDMA: la densidad no uniforme ayuda a incrementar la capacidad; y el soft handoff se ajusta a límites de celda irregulares.

4. El sistema celular CDMA ha mostrado tener completa conectividad entre microceldas y macroceldas sin degradación de la capacidad. El uso de una frecuencia común en todo el sistema (patrón de reuso=1) y la aplicación de soft handoff, no sólo alivia el problema de traspaso entre microceldas y entre micro y macroceldas, sino también elimina la necesidad de un complejo plan de frecuencias.
5. La ubicación del límite entre celdas depende del establecimiento del umbral momentáneo en cada celda y de las curvas de pérdida de transmisión. Un apropiado control de estos parámetros permite el agrupamiento de celdas heterogéneas, dar forma y tamaño a las celdas, incluir una microcelda dentro de una macrocelda, y también controlar la zona de soft handoff.
6. La capacidad de cada celda depende de la interferencia externa debida a la transmisión de los móviles en celdas vecinas. Una microcelda incluida en una macrocelda recibe menos interferencia que en un *cluster* uniforme, debido a que la densidad de los móviles es menor en la macrocelda.

Con respecto a las características del programa de simulación y del modelo empleado, es necesario detallar las siguientes observaciones:

7. La simulación a través de computadoras es una popular técnica de evaluación de la performance de sistemas de comunicación. En la simulación realizada en la presente investigación, un trabajo adicional es necesario en la optimización del mismo; como por ejemplo, incluir todos los componentes de un enlace de comunicaciones extremo a extremo, representados con adecuada fidelidad, incluyendo las características del canal. Por ejemplo, el proyecto titulado "*Successive Interference Cancellation for a DS-CDMA System*" realizado por Hans Peter Ostergaard de la Universidad de Aalborg, Dinamarca, comprende un simulador desarrollado para un típico ambiente urbano de desvanecimiento severo, con estaciones móviles desplazándose a 50 km/h; aunque, como detalla su autor,

debido a una inestabilidad en el simulador, las conclusiones de performance se dan con algunas reservaciones.

De manera similar, la exposición titulada “*Design, Simulation and Analysis of CDMA Communication Systems*”, presentada¹⁸ por el Dr. Kurt Matis de *ICUCOM Corporation*¹⁹, presenta un modelo de canal intermedio con distribución Ricean, señalando no sólo que a menudo los modelos de nivel intermedio proporcionan estándares para canales más reales, sino también que un modelado eficiente y una apropiada simulación son necesarios para la evaluación de modernos sistemas inalámbricos. Puntualiza además, que el utilizar niveles variables de abstracción del modelo realza la formalidad del análisis.

8. En sistemas microcelulares, el número de handoffs crece. Esto implica que el tiempo entre handoffs, así como el tiempo para completar handoffs, se hace más corto; y es así que se han desarrollado estudios de algoritmos de handoffs más rápidos. El problema de asignación de móviles a microceldas o macroceldas basada en su movilidad, referido como el problema de selección de micro-macrocelda, ha atraído considerable interés. Por ejemplo, en el trabajo de W. Jolley y R. Warfield²⁰ todas las llamadas originadas son asignadas primero a una microcelda. Si el tiempo de permanencia residual del móvil (después de originada la llamada), en la microcelda de origen tiende a ser mayor que un tiempo umbral definido (τ_1), la llamada será trasladada (*handed off*) a la microcelda vecina. De otra manera, la llamada será trasladada (*handed off*) a la macrocelda incluyente.

Otra investigación presentada en Unitel²¹, ha sido utilizada para el sistema GSM. Aquí, cuando el móvil determina que está ingresando a una microcelda, aplica un *offset* negativo específico al nivel de potencia recibido de la estación base de la microcelda por un periodo de tiempo específico τ_2 . Si el móvil origina una llamada antes de la expiración de τ_2 , debido al *offset* negativo el móvil decidirá originar la llamada en la macrocelda. Una vez que τ_2 expira, el *offset* negativo es retirado de manera que la llamadas pueden originarse en la microcelda.

En cada caso, una porción del tiempo utilizado por el móvil en la celda de origen de llamada es usado para determinar la asignación a micro-macrocelda. Dado que la

¹⁸ En *Wireless Symposium 1997*, Santa Clara, California, EE.UU.

¹⁹ www.icucom.com

²⁰ W. Jolley y R. Warfield, “Modeling and analysis of layered cellular mobile networks,” *Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change*, vol. ITC-13, pp. 161-166, 1991.

²¹ Unitel, “Idle mode cell reselection for microcells,” in *ETSI GSM2*, Ronneby, Sweden, Sept. 1991.

movilidad del usuario y el cruce del límite de microcelda son independientes de la llegada de llamadas, en ambas investigaciones anteriores a menudo ocurrirá asignación errónea de móviles de movimiento rápido a microceldas, y de vehículos de movimiento lento a macroceldas, dependiendo del tiempo de origen de una llamada con respecto al límite de la microcelda. En la selección de micro-macro-celda utilizando una velocidad umbral V_0 , se separa la asignación del tiempo de origen de llamada. La asignación depende solamente de la movilidad del usuario.

9. La ejecución de una simulación consume una cantidad considerable de tiempo. Ambos casos simulados en el capítulo 5 demandaron un tiempo aproximado de 2 horas cada uno. Sin embargo, si se desea examinar solamente el escenario de peor caso; es decir, cuando el tráfico bordea la probabilidad de bloqueo establecida (B_0), la simulación puede ejecutarse en un tiempo menor, de inclusive 10 minutos.
10. El segundo caso simulado comprendió una macrocelda incluyendo tres microceldas; sin embargo, extender las características de la simulación a un sistema entero de macroceldas incluyendo microceldas es un problema desafiante e interesante; considerando además, el sobreflujo de tráfico de microceldas a macroceldas, así como handoffs entre las mismas (*hand up* y *hand down*).
11. Debido a que la simulación realizada abarca la distribución uniforme de celdas, el apéndice C presenta el escenario de celdas no uniformes a manera de información para aquellos interesados en realizar una simulación que abarque este escenario.

6.2 Conclusiones.

Finalmente, se arriban a las siguientes conclusiones:

1. En un sistema CDMA uniforme, a un mayor número de canales, es necesaria una mayor potencia de transmisión. Así, ya sea aplicando control de potencia a los canales de voz en una celda, de tal forma que más canales de voz pueden ser proporcionados con una potencia de transmisión dada; o usando menos canales en una celda, de tal forma que la potencia de transmisión decrece, reducirán la interferencia.
2. A través de la simulación se verifica que para ambos casos; es decir, una microcelda *hot spot* incluida dentro de una macrocelda, y tres microceldas uniformes dentro de una

macrocelda, la capacidad total del sistema se incrementa en un 20%. Es necesario resaltar que en el caso de la microcelda *hot spot*, su capacidad se ve reducida; sin embargo, en el caso de las tres microceldas uniformes, la capacidad de cada una de ellas no se altera. Así, podemos concluir que a un mayor número de microceldas incluidas en una macrocelda, la capacidad de aquellas no se verá afectada sustancialmente. Para observar el desempeño de la técnica del Promedio Exponencial (presentado en el apéndice B) frente a otras técnicas, el apéndice D incluye una comparación con estas investigaciones utilizando un modelo de similares características.

3. Si se deseara extender la capacidad del sistema, de manera que pueda atender un tráfico mayor al límite (A_L de la sección 5.4), simplemente se establece un requisito *de grado de servicio* mayor; es decir, asignando en el modelo una nueva probabilidad de bloqueo B_0' , donde $B_0' > B_0$.
4. La selección de micro-macro-celda basada en la movilidad de los usuarios utilizando una velocidad umbral V_0 , mantiene reducida la tasa de handoff, y en consecuencia la probabilidad de bloqueo de llamadas de handoff, tal como se aprecia en los resultados de la simulación.
5. En condiciones de tráfico ligero, el número de handoffs por llamada puede minorarse reduciendo la velocidad umbral V_0 y asignando más llamadas a la macrocelda. A medida que el tráfico se incrementa, la capacidad del sistema es maximizada incrementando V_0 .
6. Mayor trabajo es necesario para establecer las utilidades prácticas y para eliminar las simplificaciones derivadas de ciertas suposiciones en el análisis. Así mismo, también un mayor trabajo de performance es requerido para mostrar que el esquema trabaja bien para modelos de movilidad más realísticos.
7. Además de ser necesario trabajo adicional en la optimización de la simulación, las respectivas consideraciones prácticas deben ser investigadas para la efectividad de la relación performance/costo.