



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA

“SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL BASADOS EN EL ESTÁNDAR
CDMA2000”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN:

**Cruz Venegas Carolina
García Zamudio Liliana**

Asesores:

M. en C. José Ernesto Rojas Lima
M. en C. Jaime Pedro Abarca Reyna



México, D.F. 2008

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ ADOLFO LOPEZ MATEOS”**

T E M A D E T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
POR LA OPCION DE TITULACION
DEBERA(N) DESARROLLAR**

**INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C. LILIANA GARCÍA ZAMUDIO
C. CAROLINA CRUZ VENEGAS**

“SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL BASADOS EN EL ESTÁNDAR CDMA 2000”

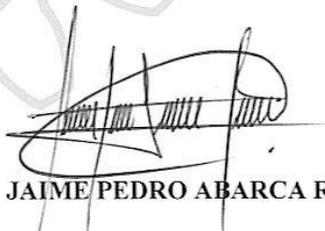
IDENTIFICAR LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR IS-95 PARA TELEFONÍA MÓVIL CON LA FINALIDAD DE CONOCER E IDENTIFICAR LAS MEJORAS QUE OFRECE EL ESTÁNDAR CDMA 2000.

- ❖ IS-95 A CDMA 2000.
- ❖ SISTEMA CDMA 2000 IX.
- ❖ EVOLUCIÓN DE CDMA 2000.
- ❖ EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ENLACE DE SUBIDA PARA SERVICIOS DE VOZ EN CDMA 2000.

MÉXICO D. F., A 29 DE JULIO DE 2008.

ASESORES


M. EN C. JOSÉ ERNESTO ROJAS LIMA


M. EN C. JAIME PEDRO ABARCA REYNA


**M. EN C. RICARDO MENESES GONZÁLEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
DE I.C.E.**

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Por que las palabras no bastan para agradecer el apoyo y esfuerzo de aquellas personas que influyeron directa o indirectamente en la realización de este trabajo:

➤ *A mi familia:*

A mi madre.- Por tu esfuerzo, desvelos y sobre todo por acompañarme y apoyarme en todo momento, no importando las circunstancias. Y principalmente por ser como eres, por que más que mi madre eres mi amiga.

A mi padre.- Le agradezco a Dios por darte otra oportunidad de vida, permitiéndote de esta forma compartir este momento conmigo. A ti, gracias por enseñarme que por más obstáculos y barreras que existan, siempre hay que trabajar duro para alcanzar los objetivos que me proponga.

A Julián.- Por guiarme y apoyarme en todo momento de mi vida, sé que siempre podré contar contigo. Ahora sólo me basta decirte que cuentas conmigo para todo y que lo que un día empezaste es momento de terminarlo.

A Ernesto.- Por escucharme y apoyarme, sabes que en mí cuentas con una amiga que siempre te apoyará en todas las decisiones que tomes.

➤ *A los profesores que fueron la parte fundamental en la realización de la presente tesis, ya que sin ustedes no se hubiera logrado este objetivo:*

Al profesor Ernesto Rojas por transmitirnos sus conocimientos en el tiempo que estuvimos en el curso, pero sobre todo por habernos dedicado tiempo y sé que todas las correcciones que en su momento nos expresó sólo fue con el objetivo de motivarnos a dar lo mejor de nosotras.

Al profesor Pedro Abarca por transmitirnos sus conocimientos, haciendo que se vean más interesantes las comunicaciones y cambiar con el estereotipo de impartir clases. Pero sobre todo por acercarme sin querer a una gran persona: Liliana.

➤ *A mis amigos que son una parte muy importante en mi vida, y por demostrarme que si existe la verdadera amistad:*

A Liliana.- ...[sabes que significan estos puntos suspensivos]. Por todos los momentos de alegría y frustración que compartimos fuera y dentro del anexo, durante la realización de este trabajo. Fue un placer haber trabajado contigo, pero sobre todo quiero agradecer que me hayas brindado tu amistad.

A Diana y Gabriel.- Por compartir conmigo en todo este tiempo alegrías y tristezas, ustedes son muy especiales para mí, espero que sigan juntos.

A Adriana y Reyna.- Por acompañarme y apoyarme en los momentos que más las necesité, sé de antemano que muchas cosas han cambiado pero a pesar de todo, agradezco la amistad que me han brindado y no está por demás decir que son una parte muy importante de mi vida.

A Abraham.- Por aguantarme y apoyarme en todos estos años, no está por demás decirte que siempre encontrarás en mí una amiga.

"Cuando buscamos el tesoro, nos damos cuenta de que el camino es el propio tesoro."

Carolina Cruz Venegas

A mi familia por todo el apoyo, comprensión, consejos y amor, brindado a lo largo de este tiempo. Mamá gracias por confiar y cuidar de mí, física y emocionalmente, por todas las horas de sueño que durante toda mi carrera te he robado, eres una mujer excepcional y sé que vas a entender estas líneas a la perfección “Gracias por ser una mala madre”.

Papá, no sé cómo pagarte todo lo que has hecho por mí, por todo lo que has sacrificado por darnos lo que necesitamos, gracias porque me enseñaste el valor de las cosas, y que para obtener lo que uno quiere se tiene que trabajar y luchar por ellas.

Vivis no se cómo expresar con palabras mi gratitud, este año aprendí muchas cosas, me diste la oportunidad de conocerte un poco mas y darme cuenta de cuanto te preocupas por mí, gracias por todo Vivis de verdad este trabajo hubiese sido muy difícil concluirlo sin tu apoyo y todas las porras que me dabas en esas noches que yo ya no podía seguir.

Cesar o mejor dicho “Pit”, nunca cambies, no sabes cuanto te quiero y admiro tu forma de ver la vida, eres y serás parte esencial en la mía, gracias por enseñarme con hechos que cuando se quiere algo no importa lo que digan los demás solo hay que luchar por conseguir lo que uno quiere. Y crees que se me había olvidado? pues no! gracias por todo el “Soporte Técnico” y por hacerme sonreír cuando mas lo necesitaba.

A Ernesto por todas las tardes que nos dedicaste para transmitirnos tus conocimientos y por los regaños dados, por tu apoyo, tu paciencia pero sobre todo gracias por confiar en nosotras.

Como no agradecerte a ti Pedro, eres una de las personas clave en mi desarrollo académico, fuiste la persona que me impulso a meterme a la especialidad de comunicaciones, jamás pensé que iba a encontrar a un profesor que se entregara tanto a su materia y nos hiciera darnos cuenta que nosotros podemos rendir mas, que somos capaces de aprender, razonar y hacer las cosas por nosotros mismos. Gracias por todo hasta por esas frases de sarcasmo que te caracterizan y sobre todo gracias por brindarme tu AMISTAD.

Karo tu mejor que nadie sabes lo que costo este trabajo, todas las tardes que vivimos en el anexo, las noches que pasamos detrás de nuestros respectivos monitores, solo quiero que sepas que le agradezco a Dios por ponerte en mi camino y por darte toda la paciencia que te dió, me soportaste y me haz brindado tu amistad incondicionalmente. Fue más que un placer realizar este trabajo contigo y nunca lo olvides te quiero mucho.

Hay tantas personas a las cuales quiero agradecer que no me alcanzarían las hojas para hacerlo, Adriana, tú con tu carisma, tu apoyo incondicional y sufriendo con nosotras cada tarde, nos dabas ánimo y nos alegrabas, te quiero y gracias por estar en todo momento, recuerda solo faltas tú.

AGRADECIMIENTOS

Diana y Gabriel que estuvieron muy involucrados en la realización de este trabajo, nos apoyaron, nos dieron ánimo en los momentos difíciles y sufrían con nosotros. Diana nunca cambies se fiel a tus convicciones, con ese gran corazón que te caracteriza gracias por tu amistad y por estar ahí te quiero y Gabriel tampoco cambies tienes muchos defectos y virtudes, pero tus virtudes le ganan a los defectos, aunque siempre digas que solo importas tú, yo se y me lo haz demostrado en estos cuatros y medio de conocerte que me quieres y te preocupas por mí, te quiero nunca lo olvides. Reyna deseo de todo corazón que te vaya bien en la vida gracias por tu amistad.

Así como a todos los del tópico de Telefonía Móvil, ellos saben todas las que pasamos cada uno para lograr nuestros objetivos. Fue un placer trabajar con cada uno de ustedes.

García Zamudio Liliana

OBJETIVOS

-  Identificar las principales características del estándar IS-95 para telefonía móvil, con la finalidad de conocer e identificar las mejoras que ofrece el estándar CDMA2000.

-  Conocer las principales características de diseño del estándar CDMA2000 para comprender su funcionamiento, así como las diferentes fases de su evolución como CDMA2000 1xEV-DO, CDMA2000 1xEV-DV y CDMA2000 3x.

-  Establecer un ambiente de simulación dinámico el cual considere: macroceldas, movilidad, duración de llamadas con distribución exponencial negativa, el modelo de propagación para ambientes vehiculares de IMT-2000, desvanecimientos correlacionados, algoritmo de transferencia de llamada de umbrales fijos y un control de potencia perfecto.

-  A partir del ambiente de simulación, obtener la función de densidad de probabilidad interferencia del enlace de subida producida por usuarios de voz en el sistema y evaluar así, la capacidad del enlace de subida en términos del número de usuarios de voz simultáneos por celda para un sistema basado en IS-95 y CDMA2000, mediante un análisis y realizar una comparación.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
OBJETIVOS.....	VII
CONTENIDO	VIII
ACRÓNIMOS Y SIGLAS	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XVII

CAPÍTULO 1
IS-95 A CDMA2000

1.1 Conceptos de IS-95.....	2
1.1.1 Concepto del espectro disperso.....	2
1.1.2 Códigos de dispersión	8
1.1.2.1 Códigos Walsh	9
1.1.2.2 Códigos deseudoruido (PN)	10
1.1.3 Codificación de canal	13
1.1.4 Control de potencia	14
1.1.5 Transferencia de llamada (Handoff) en IS-95.....	18
1.1.5.1 Algoritmo de transferencia de llamada para IS-95	20
1.1.7 Estructura del enlace de bajada	22
1.1.8 Estructura del enlace de subida.....	25
1.1.9 Evolución de IS-95 hacia CDMA2000	26
REFERENCIAS	30

CAPÍTULO 2
SISTEMA CDMA2000 1X

2.1 Capa Física.....	33
2.1.1 Diversidad en la transmisión	34
2.1.2 Estructura del enlace de bajada	36
2.1.3 Estructura del enlace de subida.....	45
2.1.4 Codificación de canal	50
2.1.5 Control de potencia	52
2.2. Capa de enlace de datos	54
2.2.1 Subcapa de control de acceso al medio (MAC)	55
2.2.2 Subcapa de Control de Acceso del Enlace (LAC).....	57
2.3 Transferencia de llamada (Handoff) en CDMA2000 1x	57
2.3.1 Algoritmo de transferencia de llamada para CDMA2000 1x	58
REFERENCIAS	61

CAPÍTULO 3
EVOLUCIÓN DE CDMA2000

3.1 CDMA2000 1x EV-DO.....	63
3.1.1 Estructura del enlace de bajada	65
3.1.2 Estructura del enlace de subida.....	67

CONTENIDO

3.2 CDMA2000 1x EV-DV	69
3.2.1 Estructura del enlace de bajada	72
3.2.2 Estructura del enlace de subida	74
3.3 CDMA2000 3X.....	75
REFERENCIAS	77

CAPÍTULO 4
EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ENLACE DE SUBIDA PARA SERVICIOS
DE VOZ EN CDMA2000

4.1 Capacidad del enlace de subida para servicio de voz.....	79
4.1.1 Capacidad en una sola celda.....	80
4.1.2 Efecto de la carga.....	81
4.1.3 Efectos de sectorización	82
4.1.4 Efectos de la actividad de voz.....	83
4.2 Ambiente de simulación.....	84
4.2.1 Trazado del Cluster	85
4.2.2 Generación de variables aleatorias.....	86
4.2.3 Modelo de movilidad.....	88
4.2.4 Modelo de pérdidas de propagación	90
4.2.4.1 Modelo de pérdidas por trayectoria IMT-2000.....	90
4.2.4.2 Desvanecimientos correlacionados	91
4.2.4 Calculo de la intensidad del canal piloto (E_c/I_0).....	94
4.2.5 Algoritmo de transferencia de llamada.....	97
4.3 Evaluación de la capacidad en el enlace de subida.....	99
4.3.1 Análisis de la interferencia del enlace de subida	99
4.3.2 Capacidad del enlace de subida	101
4.4 Resultados obtenidos	103
4.4.1 Capacidad para el enlace de subida de los estándares IS-95 y CDMA2000	103
REFERENCIAS	106
CONCLUSIONES	109
APÉNDICE A.....	112
APÉNDICE B	115
APÉNDICE C	118
APÉNDICE D.....	120

ACRONIMOS Y SIGLAS

A

ACKCh	Canal de Reconocimiento.
ADD_INTERCEPT	Umbral de Detección de Piloto para CDMA2000.
AMC	Codificación y Modulación Adaptable.
AMPS	Sistema de Telefonía Móvil Avanzado.
APiCh	Canal Piloto Auxiliar.
ARQ	Petición Automática de la Retransmisión.
AS	Conjunto Activo.
ATDPiCh	Canal Piloto de Diversidad en la Transmisión Auxiliar.
AWGN	Ruido Blanco Aditivo Gaussiano.

B

BCCh	Canal de Voceo Rápido.
BER	Tasa de bit erróneo.
BPSK	Modulación por Cambio de Fase Binario.
BS	Estación Base.

C

CACH	Canal de Asignación Común.
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CN	Núcleo de la Red.
CoS	Clases de Servicio.
CPCCh	Canal de control de Potencia Común.
CQICH	Canal Indicador de Calidad del Canal.
CS	Conjunto Candidato.

D

DRC	Control de Tasa de Datos.
DRCLock	Subcanal de Control de la Tasa de Transmisión.
DROP_INTERCEPT	Umbral de Caída del Piloto para CDMA2000.
DS	Secuencia Directa.
DS-SS	Espectro Disperso por Secuencia Directa.

E

EACh	Canal de Acceso Mejorado.
Eb/No	Relacion Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido.
Ec/Io	Relación Energía de Chip a Densidad Espectral de Potencia de Interferencia.
EHDM	Mensaje de Dirección de Transferencia de Llamada Extendido.
EV-DO	Evolución de CDMA2000 Sólo para Datos.
EV-DV	Evolución de CDMA2000 para Voz y Datos.

F

FCCCh	Canal de Control Común de Bajada.
FDCCh	Canal de Control Dedicado de Bajada.
FER	Tasa de Trama Errónea.
FFCh	Canal Fundamental de Bajada.
FFH-SS	Espectro Disperso por Saltos en Frecuencia Rápidos.
FH-SS	Espectro Disperso por Salto en Frecuencia.
FPCh	Canal de Voceo de Bajada.
FPiCh	Canal Piloto de Bajada.
FSCCh	Canal Código Suplementario de Bajada.
Esch	Canal Suplementario de Bajada.
FTCh	Canal de Tráfico de Bajada.

G

GHDM	Mensaje de Dirección de Transferencia de Llamada General.
------	---

H

HCM	Mensaje de Término de Transferencia de Llamada
HDM	Mensaje de Dirección de la Transferencia de Llamada.
HRPD	Paquetes de Datos de Alta Tasa.

I

IMT	Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000
ISDN	Acceso a la red digital de servicios integrados

L

LAC	Control de Acceso al Enlace.
-----	------------------------------

M

MAC	Control de Acceso al Medio.
MFSK	Modulación por Cambio de Frecuencia Multinivel.
MSC	Centro de Conmutación Móvil.

N

NS	Conjunto Vecino.
----	------------------

O

OSI	Interconexión de Sistemas Abiertos.
OTD	Diversidad de Transmisión Ortogonal.

P

PCB	Bits de Control de Potencia.
PCS	Sistemas de comunicación Personal.
PDCCh	Canal de control de Paquetes de Datos.
PDCh	Canal de Paquetes de Datos.
PDCh	Canal de Paquetes de Datos.
PDChCF	Canal de Control de las Funciones de los Paquetes de Datos.
PDU	Unidad de Datos de Protocolo.
PMRC	Mensaje de Reporte de la Medida de Potencia.
PN	Secuencia de Seudoruido.
PN-I	Secuencia de Seudoruido en Fase.

PN-Q	Secuencia de Seudoruido en Cuadratura.
PPP	Protocolo Punto a Punto.
PSK	Modulación por Cambio de Fase.
PMM	Mensaje de la Medida del Piloto.
PSTN	Red Telefónica Pública Conmutada.
Q	
QoS	Calidad de Servicio.
QPCh	Canal de Voceo Rápido.
QPSK	Modulación por Cambio de Fase en Cuadratura.
R	
RA	Subcanal de Actividad de Subida.
RAB	Bit de Actividad de Subida.
RACH	Canal de Acceso de Subida.
RAN	Red de Radio Acceso.
RC	Radio Configuraciones.
RCCCh	Canal de Control Común de Subida.
RDCCh	Canal de Control Dedicado.
RF	Radio Frecuencia.
RFCh	Canal Fundamental de Subida.
RLP	Protocolo del Enlace de Radio.
RPC	Subcanal de Control de Potencia de Subida.
RPiCh	Canal Piloto de Subida.
RRI	Indicador de la Tasa de Subida.
RRM	Servicio de Recursos de Radio.
RS	Conjunto Restante.
RSCCh	Canales Código Suplementarios de Subida.
RSCh	Canales Suplementarios de Subida.
RTCh	Canal de Tráfico de Subida.
S	
SCC	Canal Código Suplementario.
SDU	Unidad de Datos de Servicio.

SFH-SS	Espectro Disperso por Salto en Frecuencia Lento.
SMS	Servicio de Mensajes Cortos.
SNR	Relación Señal a Ruido.
SOFT_SLOPE	Parámetro que intervine en el cálculo de ADD_INTERCEPT y DROP_INTERCEPT usualmente es de 2 dB.
SPDCCh	Canal de Control de Paquetes de Datos Secundarios.
SPID	Identificador del Subpaquete.
SR	Tasas de Dispersión.
STS	Dispersión en Espacio Tiempo.
SyncCh	Canal de Sincronía.

T

T_ADD	Umbral de Detección de Piloto.
T_COMP	Umbral de Comparación de Pilotos.
T_DROP	Umbral de Caída del Piloto.
T_TDROP	Umbral del Temporizador de Caída del Piloto.
TDM	Multiplexaje por División de Tiempo.
TDPiCh	Canal Piloto de Diversidad en la Transmisión
TQ	Umbral de Calidad.

U

ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
Um	Interfaz de radio entre el móvil y la estación base.

INTRODUCCIÓN

Espectro disperso es una técnica de transmisión de la señal, en donde ésta ocupa un ancho de banda mayor al mínimo requerido para enviar la información; esto es posible mediante la dispersión del espectro, utilizando un código de dispersión que es independiente de los datos. En el receptor para recuperar los datos se requiere sincronía con el código de dispersión utilizado (correlación), que se utiliza para contraer el espectro de la señal y de esta forma sea posible recuperar los datos originales.

Las técnicas de espectro disperso fueron propuestas para aplicaciones que requieren rechazo a la interferencia de origen intencional ó no intencional. En los sistemas de comunicación se han propuesto para aplicaciones de acceso múltiple por división de código (CDMA), permitiendo comunicaciones digitales entre usuarios que ocupan un mismo ancho de banda simultáneamente, en donde el número de usuarios es proporcional a la ganancia de procesamiento ó factor de dispersión. El factor de dispersión es una relación entre el ancho de banda de la señal dispersada y el ancho de banda de la señal original y nos indica que tanto rechazo tiene la dispersión del espectro a las señales interferentes de potencia finita [1].

Por esta razón la tecnología CDMA ha sido propuesta para una gran variedad de sistemas de telefonía móvil y durante los años ochenta la compañía Qualcomm investigó las técnicas de espectro disperso para CDMA, y en 1993 se empezó a comercializar la tecnología a través del estándar IS-95. Posteriormente a su revisión en 1995, se denominó en IS-95A.

Los sistemas basados en el estándar IS-95, se han implementado debido a las ventajas que ofrece, como gran capacidad y alta calidad de voz. Sin embargo por la alta demanda de diferentes tipos de servicios inalámbricos como voz, datos y servicios multimedia, existió la necesidad de evolucionar estos sistemas, a otros que pudieran proporcionar los servicios demandantes así como también mantener la compatibilidad con IS-95, permitiendo a los proveedores del servicio evolucionar hacia nuevas tecnologías, protegiendo su inversión realizada en las redes existentes [2].

El primer paso de la evolución de IS-95 hacia la tercera generación es IS-95 B, el cual proporciona servicios de tasa alta teniendo una estricta compatibilidad con IS-95-A.

Uno de sus principales objetivos fue introducir conectividad con las redes de paquetes de datos por medio del sistema celular, así como también incrementar la capacidad de voz.

El siguiente paso de la evolución, es el estándar CDMA2000 que cuenta con una interface de radio aumentada, la cual soporta CDMA sobre anchos de banda más grandes, de ésta manera proporciona una capacidad mejorada y tasas de datos más altas manteniendo compatibilidad con IS-95-A/B, entre otras características [1], [3].

En este trabajo, evaluamos la capacidad del enlace de subida para servicios de voz de los sistemas de telefonía móvil basados en el estándar IS-95 y CDMA2000. Para este estudio se utiliza una metodología basada en simulaciones dinámicas, las cuales consideran: macroceldas, movilidad, duración de llamadas con distribución exponencial negativa, el modelo de propagación para ambientes vehiculares de IMT-2000, desvanecimientos correlacionados, algoritmo de transferencia de llamada de umbrales fijos y un control de potencia perfecto.

A partir del ambiente de simulación se obtiene la función de densidad de probabilidad de la interferencia del enlace de subida producida por los usuarios de voz en el sistema y evaluar así la capacidad del enlace.

En el capítulo 1 se describen los principales conceptos y características del estándar IS-95 definido para CDMA, así como los requisitos que debe cumplir un sistema para que se considere de espectro disperso, también se mencionan las técnicas para realizar la dispersión del espectro ya sea salto en frecuencia ó mediante secuencia directa. La ganancia de procesamiento o factor de dispersión es de gran importancia ya que nos indica qué tanta protección proporciona la dispersión de la señal contra las señales interferentes [1], [4].

Posteriormente se desarrollan los códigos de dispersión que utiliza IS-95, siendo algunos de ellos mutuamente ortogonales y por lo tanto deben de cumplir ciertas propiedades; tal es el caso de los códigos Walsh y los códigos PN, los cuales deben tener un ancho de banda mayor que el de la señal para poder realizar la dispersión; con el uso de estos códigos en una misma banda de frecuencia pueden existir varias señales, existiendo poca interferencia entre las mismas [5].

Para que las señales sean menos susceptibles al ruido, interferencias, desvanecimientos, entre otros, que existen en el canal, IS-95 utiliza códigos convolucionales [6]; en cuanto al control de potencia su principal función es controlar la potencia transmitida de cada móvil considerando la distancia que tenga con respecto a la BS, de esta manera se resuelve el efecto carga-lejos [5]. El control de potencia para este sistema puede ser en lazo cerrado o abierto, teniendo como principal objetivo, reducir la interferencia producida por un móvil cuando transmite a alta potencia, de esta manera se incrementa la capacidad del sistema.

Debido a que en un sistema de telefonía móvil los usuarios tienen una conducta dinámica, es importante que estos mantengan la conexión en la red cuando se mueve de una celda a otra sin perder la comunicación con el sistema. Para esto se requiere realizar un cambio del enlace de comunicación de una BS a otra el cual se conoce como transferencia de llamada (handoff o handover). Se describen los tres tipos que existen en el sistema CDMA, así como el algoritmo de transferencia de llamada que se basa en umbrales estáticos, asimismo se describen los parámetros que utiliza para llevarla a cabo [8].

Se mencionan las principales características y funciones de los canales que intervienen en el enlace de subida así como en el de bajada. Al final del capítulo se explican brevemente las principales características de la evolución de IS-95 hasta llegar a CDMA2000, que es el tema central de este trabajo.

En el capítulo 2 se revisa a mayor detalle el estándar CDMA2000 1x. Se menciona que CDMA2000 1x puede emplear portadoras con un ancho de banda de 1.25 MHz para tener compatibilidad con estándares antecesores como el sistema IS-95 A/B y así como con CDMA2000-3x MHz para tener compatibilidad con 3G.

En CDMA2000 1x hay un incremento de la capacidad de voz y datos, éstas se logran mediante las mejoras en la capa física y la adición de canales lógicos en el enlace de subida y de bajada, el uso de éstos depende de nuevas características que consisten en 10 radio configuraciones (RC) y 2 tasas de dispersión (SR) [3]. CDMA2000 1x se basa en la capa física y la capa de enlace de datos del modelo para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI) ya que este es el responsable para transportar los datos así como la información de señalización y el tráfico de usuarios; las capas mencionadas se describen así como las subcapas MAC y LAC en las que se divide la capa de enlace de datos.

Se describen las técnicas de diversidad de transmisión en CDMA2000 1x, que se pueden implementar de dos maneras: diversidad en la transmisión de portadoras múltiples y diversidad en la transmisión por dispersión directa, ya que éstas ayudan a reducir los requerimientos de la E_b/N_o para mejorar la capacidad del sistema [9].

Se mencionan las principales características y funciones de los canales implementados en los enlaces de subida y de bajada de CDMA2000 1x. En cuanto a la codificación del canal se implementan los turbo códigos, el control de potencia en el enlace de bajada que opera a altas tasas y compensa los desvanecimientos tipo Rayleigh [3], [9].

En cuanto a la transferencia de llamada, CDMA2000 1x utiliza umbrales dinámicos y nuevos parámetros que son descritos, así como su algoritmo de transferencia de llamada.

En el capítulo 3 se mencionan las principales características de la evolución del sistema CDMA2000 1x, la cual se divide en 3 fases. A la primera fase de la evolución se le conoce como CDMA2000 1x-EV-DO y sus principales características son descritas en el estándar IS-856 al cual también se le conoce como datos por paquetes de alta velocidad (HRPD) actualmente denominado 1x EV-DO. La principal característica de éste es que transmite voz y datos a través de dos canales separados. Se basa en el protocolo de solicitud de repetición automática híbrida (HARQ) para la transmisión de datos.

El objetivo de 1xEV-DO es apoyar a usuarios fijos y móviles, proporcionándoles ancho de banda, potencia, así como permitir que se adapte a desvanecimientos, con el fin de aprovechar al máximo su capacidad y que sea espectralmente eficiente. Estos requerimientos los consigue a través de las técnicas de codificación y modulación adaptable (AMC), las cuales eligen el mejor esquema de modulación y de codificación en base a las condiciones de los canales de RF, para lograr un mejor aprovechamiento del ancho de banda [10].

Otra técnica utilizada en 1xEV-DO es la diversidad en tiempo, en donde las señales son representadas en una sola sobre el mismo canal a diferentes tiempos. Asimismo se describen las principales características y funciones de los nuevos canales que son introducidos en los enlaces [3].

A la segunda fase de la evolución de CDMA2000 1x se le conoce como CDMA2000 1x EV-DV. Las redes 1x-EV-DV son reguladas por R.S0026, las cuales tienen como expectativas ofrecer una gran capacidad para soportar altas velocidades de datos para sistemas basados en Internet existentes, aceptar ráfagas de datos e incrementar la eficiencia espectral permitiendo la transmisión de voz y datos en la misma portadora de 1.25 MHz [3].

La evolución de CDMA2000-1x a CDMA2000 1x-EV-DV se divide en dos fases. La primera fase permite HRPD para aplicaciones en tiempo real, es decir una portadora se utiliza para el servicio de paquetes de datos a gran velocidad, de esta manera si un usuario requiere servicio de voz en tiempo real, la red de EV-DV utiliza CDMA2000-1x para proporcionar este servicio. Soporta voz sobre IP e implementa 16 Clases de Servicios (CoS) para la transmisión de paquetes de datos alcanzando el mejor funcionamiento del sistema, además de maximizar el rendimiento de procesamiento. La clase 1 es para servicio en tiempo real y una alta velocidad de paquetes de datos, la clase 2 sirve para paquetes de alta velocidad en tiempo no real, la clase 3 entrega programada y las clases 4-16 son reservadas para futuras CoS. La segunda fase de 1x-EV-DV soporta altas velocidades de paquetes de datos y servicios en tiempo real.

La idea principal es integrar todos los servicios proporcionados por la fase uno en la misma portadora conservando los servicios de paquetes de datos en una portadora independiente. De este modo las redes de 1x-EV-DV requieren compatibilidad con sistemas CDMA IS-95 A/B y CDMA20001x usando las mismas estaciones base e incluyendo la interoperabilidad de canales de CDMA2000-1x para servicios de voz y paquetes, mismas CoS (1-16), compatibilidad y la combinación de varios tipos de tráfico con QoS variables incluyendo voz, video y datos.

También se muestra la arquitectura de la red de CDMA2000-3G en la cual se encuentra una interfaz de radio de 1xEV-DV, los segmentos principales de esta arquitectura incluyen la red de radio acceso (RAN) y el núcleo de la red (CN). Los usuarios se comunican con las estaciones base que se encuentran dentro de la RAN, las cuales constituyen el punto de contacto de la red ya que aquí es donde interviene la señalización con las capas superiores, las subcapas LAC y MAC, el protocolo de radio enlace (RLP) que reduce la tasa de error en los canales de tráfico de CDMA y por último la capa física.

En el enlace de bajada se agrega un canal de control de las funciones de los paquetes de datos (PDChCF) [3].

De acuerdo con las condiciones del canal, se elige un tipo de modulación y codificación; éstas se transmiten continuamente por medio del canal de paquetes de datos (PDC) y del canal indicador de calidad del canal (CQICH), de este modo permite la operación efectiva en la transmisión y recepción de datos [11]. También se muestran los cambios en los canales para el enlace de subida así como en el de bajada.

A la tercera fase de la evolución de CDMA2000 se le conoce como CDMA2000 3x, la cual se caracteriza por utilizar tres portadoras con un ancho de banda de 1.25 MHz cada una, opera con una tasa de bits de 2 Mbps, utilizan códigos convolucionales y turbo códigos.

El servicio de datos se puede realizar por conmutación de circuitos o por conmutación de paquetes. Para el servicio de voz en el enlace de bajada, opera con portadoras múltiples y con dispersión directa, en cambio para el enlace de subida sólo opera con dispersión directa [3], [11].

En el capítulo 4, en la primera parte se describe el proceso para evaluar la capacidad en una celda, así como los factores que intervienen en la capacidad del sistema como son el uso de sectorización y el factor de actividad de la voz, se realiza este estudio por que los sistemas de CDMA están limitados en interferencia, por lo tanto lo que se busca con la sectorización y el factor de actividad de la voz es reducir la interferencia.

Posteriormente se desarrolla la metodología mediante la cual es posible evaluar la capacidad en el enlace de subida para servicios de voz del sistema CDMA2000, la cual comprende, el trazado del conjunto de celdas (cluster), la movilidad del usuario con una duración de llamada la cual esta determinada por una variable aleatoria con distribución exponencial negativa, la estimación de la relación energía de chip a densidad espectral de potencia de interferencia (E_c/I_o), ya que interviene en el algoritmo de transferencia de llamada y en la estimación de las interferencias.

En la parte final de este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación haciendo una comparativa del estándar IS-95 y CDMA2000, para observar a detalle la mejora que ofrece éste último.

Para realizar esta comparativa se calculan las interferencias que producen los usuarios externos en la celda central. Teniendo estas interferencias es posible estimar la probabilidad de degradación (P_{out}), la cual es distinta para IS-95 y CDMA2000.

Finalmente se presentan las conclusiones realizadas en este trabajo y se plantea el posible trabajo futuro a desarrollar.

REFERENCIAS

- [1] Andrew J. Viterbi, "CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication", Adisson-Wesley, 1995.
- [2] Juha Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House, 2003.
- [3] Leonhard Korowajszuk, Bruno de Souza Abreu Xavier, "Designing CDMA2000 Systems", John Wiley & Sons LTD, 2004
- [4] Peter Stavroulakis, "Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems", Artech House, 1998.
- [5] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House, 1998.
- [6] Goldsmith Andrea, "Gíreles Communication". Cambridge University Press, 2005.
- [7] Saleh Faruque, "Cellular Mobile System Engineering", Artech House Boston, Edición 1996
- [8] Bongkarn Homman, Kunsriruksakul Vikorn "A Comparative Performance Evaluation of Soft Handoff between IS-95A and IS-95B/cdma2000", The IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Año 2000, IEEE APCCAS 2000,
- [9] Garg,Vijay Kumar, " Wireless Network Evolution: 2G to 3G" , Prentice Hall PTR, 2002

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

IS-95 a CDMA2000

1.1 Conceptos de IS-95

IS-95 fue desarrollado por Qualcomm y publicado en 1993, como parte de la segunda generación de sistemas celulares, el cual se basa en la técnica de acceso múltiple por división de código (CDMA: Code Division Multiple Access) y representa la transición para las tecnologías de un sistema analógico a digital.

Este estándar define los requerimientos de compatibilidad con sistemas de telefonía móvil avanzados (AMPS: Advanced Mobile Phone System) en la banda de 800 MHz. En 1995 se publica el estándar IS-95A el cual contiene las siguientes especificaciones:

- Ancho de banda del canal de 1.25 MHz.
- Una tasa de chip de 1.2288 Mcps.
- Control de potencia.
- Procesamiento y transferencia de llamada.

En este capítulo se presentan las principales características que incluye este estándar así como los avances que ha tenido hasta llegar al estándar CDMA2000, que ofrece a los usuarios servicios múltiples.

1.1.1 Concepto del espectro disperso

Espectro disperso es una técnica de transmisión en la cual se dispersa la potencia de la señal de un usuario; es decir, ocupa un mayor ancho de banda en comparación con la señal original.

Un sistema se considera de espectro disperso si cumple los siguientes requisitos:

- La señal dispersada ocupa un ancho de banda mucho más grande que el mínimo necesario para enviar la información.
- La dispersión se realiza por medio de señales de dispersión, a menudo llamadas como señales código, los cuales son independientes de los datos.

- Para recuperar los datos originales, en el receptor se realiza la correlación de las señales dispersadas recibidas con una réplica sincronizada de la señal de dispersión usada en el transmisor.

Este proceso se realiza mediante una multiplicación binaria de la señal original con un código de dispersión el cual debe tener una ancho banda mayor que el primero como se observa en la figura 1.1.

Los bits que componen el código de dispersión son nombrados **chips**² y los bits que componen la secuencia de datos original son nombrados **símbolos** [1].

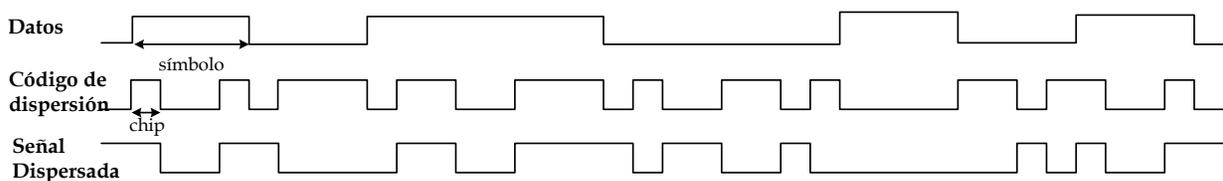


Figura 1.1 Dispersión de una secuencia de datos

Existe una relación entre el ancho de banda de la señal de transmisión o dispersada y el ancho de banda de la señal original la cual es nombrada **ganancia de procesamiento** o **factor de dispersión** el cual esta definido por la siguiente expresión:

$$G = \frac{\omega_s}{\omega} \quad (1.1)$$

Donde:

G= Ganancia de procesamiento

ω_s = Ancho de banda de la señal transmitida

ω = Ancho de banda de la señal original

Esta relación nos indica cuantos chips son usados para dispersar un símbolo. Existen técnicas para generar códigos de dispersión. En la sección 1.1.2 se desarrollarán los códigos Walsh y los códigos deseudoruido (PN: Pseudo Noise) que son utilizados en el estándar IS-95. Con el uso de estos códigos en una misma banda frecuencia pueden existir varias señales, existiendo poca interferencia entre las mismas [1].

² El termino chip se refiere a la operación de dividir la cadena de datos original en partes mas pequeñas.

En el receptor para recuperar la señal transmitida, se multiplica de forma binaria la señal que llega al receptor con el código de dispersión que se le asignó en el transmisor como se puede ver en la figura 1.2.

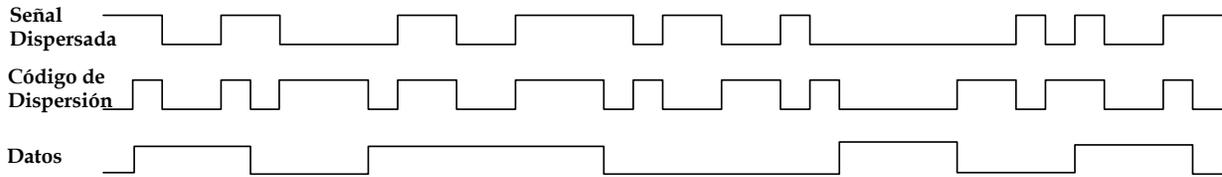


Figura 1.2 Agrupación de una secuencia de datos

Existen dos técnicas para realizar la dispersión del espectro: Espectro disperso por salto en frecuencia y espectro disperso mediante secuencia directa.

a) Espectro disperso por salto en frecuencia (FH-SS: Frequency Hopping-Spread Spectrum)

En FH-SS la señal de banda base que se transmite usa diferentes frecuencias de portadora en diferentes tiempos, este salto se logra mediante un sintetizador de frecuencias digital, el cual es conducido por un generador de secuencia de PN.

La transmisión de cada símbolo se da en uno o más saltos, las modulaciones más usadas en salto en frecuencia, son la de cambio en frecuencia para múltiples señales (MFSK: M-ary Frequency Shift Keying) y la modulación por cambio de fase para el caso binario (BPSK: Binary Phase Shift Keying). En la figura 1.3 se muestra el diagrama a bloques del transmisor y receptor para el salto en frecuencia utilizando una modulación BPSK [1],[5].

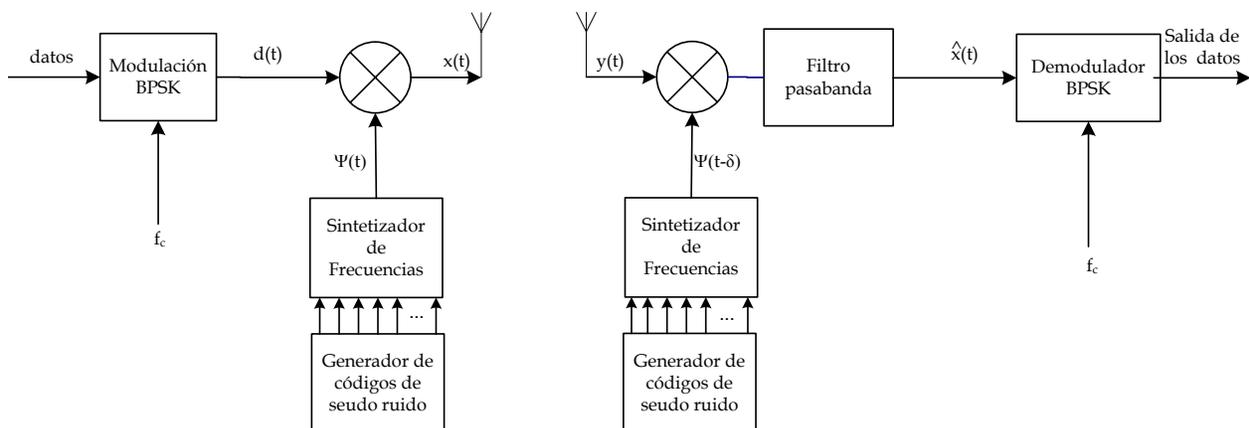


Figura 1.3 Diagrama a bloques del transmisor y receptor de FH-SS

La función que representa esta modulación es:

$$d(t) = \sqrt{2P}b(t)\exp(i\omega t) \quad (1.2)$$

Donde:

P=Potencia transmitida,

b(t)= cadena de datos de 1's y 0's, con duración T_b ,

$\omega=2\pi f$, frecuencia de la portadora,

La secuencia de dispersión por salto en frecuencia es la suma de las secuencias de los códigos con duración T_c , y esta representado por la siguiente expresión:

$$\Psi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2p(t-nT_c)\exp(i\omega_n t + i\phi_n) \quad (1.3)$$

Donde:

p(t)= amplitud unitaria de un pulso

T_c = duración del pulso unitario

ω_n y ϕ_n = frecuencia dada en radianes la cual esta asociada con la fase durante múltiples saltos.

De la ecuación (1.2) y (1.3) se puede escribir la señal transmitida x(t):

$$x(t) = d(t)\Psi(t) \quad (1.4)$$

La señal recibida y(t) en el receptor tiene un retardo de propagación en el canal dado por δ .

El sistema FH-SS se clasifica en dos tipos; si el salto en frecuencia existe en varios periodos un bit el sistema es llamado **espectro disperso por salto en frecuencia lento** (SFH-SS: Slow Frequency Hopping- Spread Spectrum), pero si existen varios saltos durante el período de un bit el sistema se conoce como **espectro disperso por saltos en frecuencia rápido** (FFH-SS: Fast Frequency Hopping- Spread Spectrum) [2], estos sistemas se ilustran en la figura 1.4.

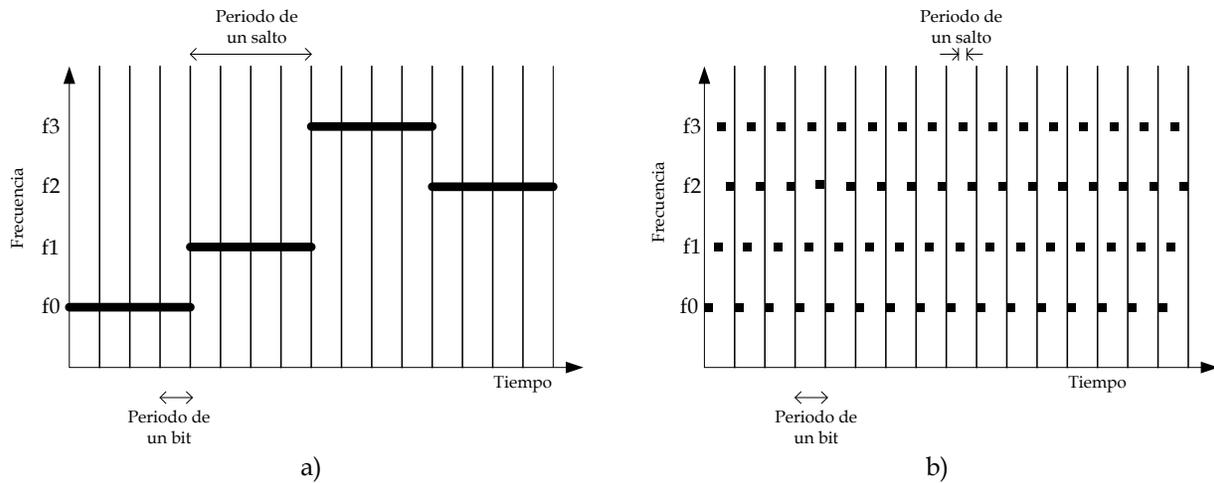


Figura 1.4 Sistemas de FH-SS: a) sistema SFH-SS, b) sistema FFH-SS

b) Espectro disperso por secuencia directa (DS-SS: Direct Sequence-Spread Spectrum)

DS-SS se basa directamente en la dispersión y agrupación de los datos en banda base mediante una secuencia PN. En la modulación BPSK los datos se representan por $d(t)$ de la ecuación (1.2), la cual para poder dispersarse se multiplica por una secuencia de PN que cuenta con un ancho de banda mucho más grande que el de la señal de información, como se muestra en el diagrama a bloques de la figura 1.5a. La señal transmitida se expresa por la siguiente expresión:

$$x(t) = \sqrt{2Pb}(t)a(t)\exp(j\omega t) \tag{1.5}$$

Donde:

$a(t)$ = secuencia de dispersión PN con chips de amplitud ± 1 con una longitud de código de $N= T_b/T_c$.

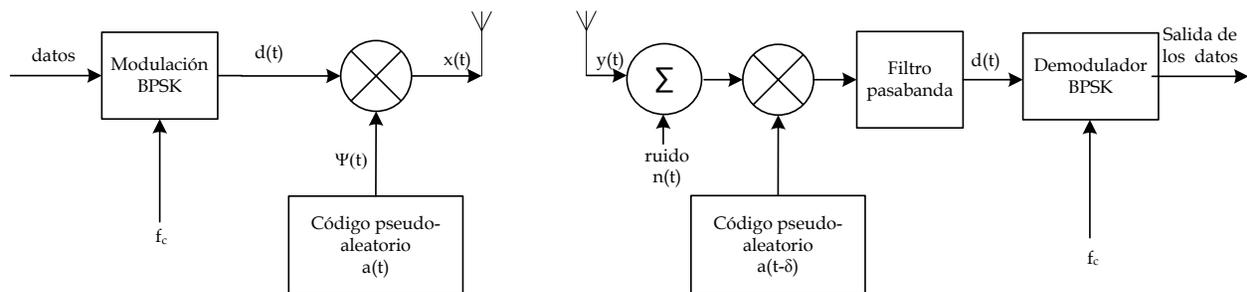


Figura 1.5 Sistema DS-SS: a) transmisor, b) receptor

En la Figura 1.6 se muestran las etapas que se presentan en la transmisión de la señal de espectro disperso, en la cual la señal de información se multiplica por la secuencia de PN, en donde la energía es dispersada sobre el ancho de banda permaneciendo constante. Si la relación de dispersión es muy grande la señal tiene baja potencia de ruido [2].

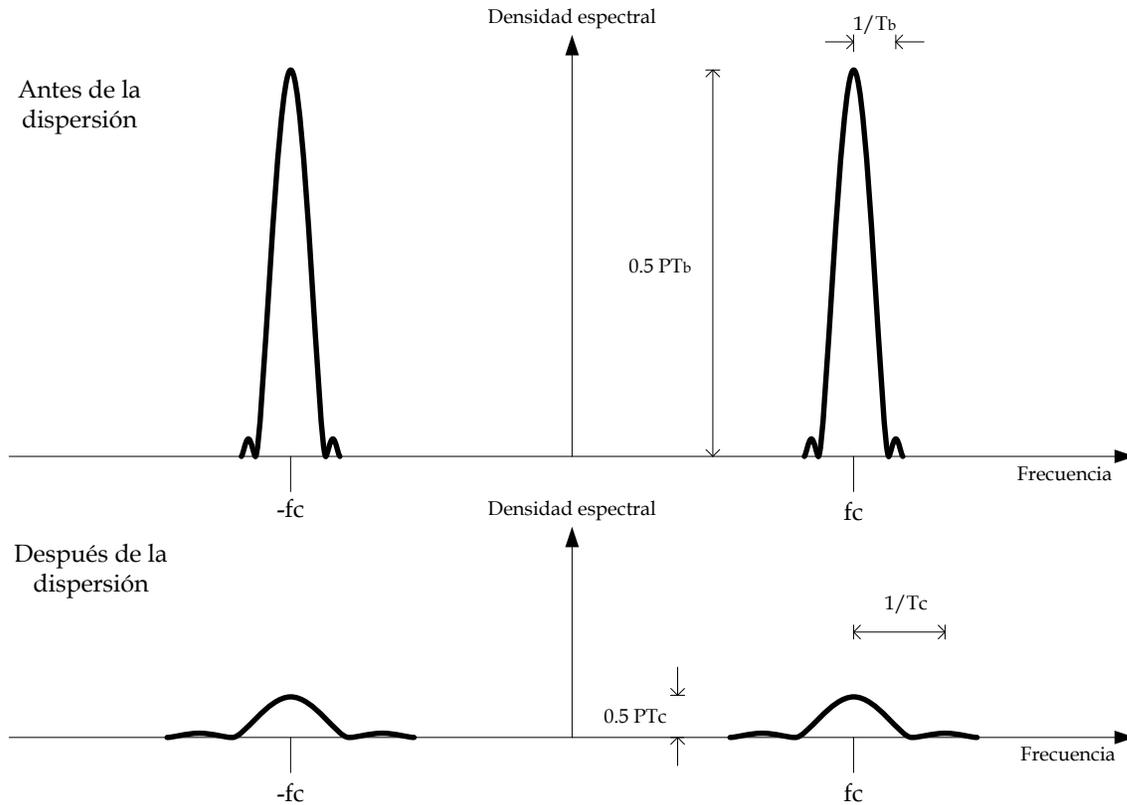


Figura 1.6 Espectro de una señal con DS-SS antes y después de la dispersión.

En la figura 1.5b se muestra el diagrama a bloques del receptor DS-SS. La señal recibida $y(t)$ está expresada por :

$$y(t) = h(t)x(t - \delta_d) + n(t) \quad (1.6)$$

Donde:

$h(t)$ = representa la respuesta al impulso del canal de propagación, incluyendo pérdidas por trayectorias múltiples y desvanecimientos por obscurecimientos .

δ_d = retardo de propagación en el canal.

$n(t)$ = Ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN: Additive White Gaussian Noise) con media cero.

En DS-SS la señal se agrupa por un filtro acoplado, la función de este es ir agrupando las señales que llegan en el receptor las cuales cuentan con un retardo, la forma en que el filtro las agrupa es mediante el uso de unos registros los cuales suman las secuencias entrantes hasta encontrar el par que coincida con la señal de la entrada y la secuencia dispersada como se muestra en la figura 1.7, otra forma de encontrar la señal es mediante las propiedades de las secuencias deseudoruido, estas propiedades se mencionan en la sección 1.1.2.

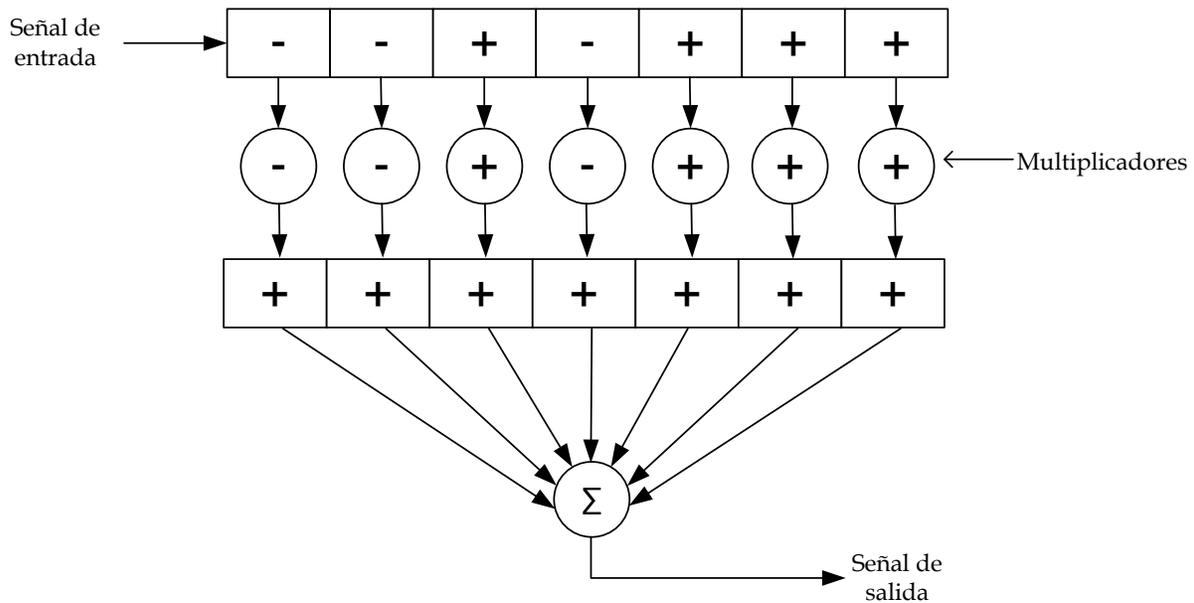


Figura 1.7 Operación de un filtro acoplado .

Todas las señales que son dispersadas con diferentes secuencias PN permanecen con su mismo ancho de banda. Esta es la base para el sistema CDMA, donde a diferentes usuarios se les asigna diversos códigos de dispersión, dando la oportunidad de que todas las señales sean transmitidas en la misma portadora de frecuencia y estos pueden ser distinguidos al recibir la señal por su único código de dispersión.

1.1.2 Códigos de dispersión

En CDMA la señal de cada usuario es dispersada sobre un ancho de banda, que es mayor al mínimo requerido para transmitir la información. La dispersión se realiza mediante diferentes códigos, algunos de los cuales son mutuamente ortogonales, y cuentan con cuatro propiedades:

1. *Propiedad de correlación.* La correlación cruzada debe ser cero o muy pequeña.

2. *Propiedad de balance:* En esta secuencia existe igual número de 1s y -1s, ó difiere tan solo por un solo número.
3. *Propiedad de sucesión.* Sucesión en una secuencia binaria, es aquella que esta conformada por un conjunto de datos de un solo tipo durante un periodo. A lo largo de una sucesión de unos y ceros dentro de un periodo, es 1/2 de esta son de longitud 1, 1/4 de longitud 2, 1/8 de longitud 3 y así sucesivamente
4. El producto escalar de cada código debe ser igual a 1.

En el sistema CDMA IS-95, el enlace de bajada y el enlace de subida tienen diferentes estructuras, cada enlace utiliza diferentes códigos en su estructura de canal, en el enlace de bajada maneja códigos Walsh y en el enlace de subida códigos PN [4]. A continuación se describen estos dos tipos de códigos.

1.1.2.1 Códigos Walsh

Creados en 1923 por J. L Walsh, introduciendo un conjunto de códigos ortogonales generados por la matriz Hadamard, a partir de la cual se generan las diferentes familias de códigos Walsh [3].

La matriz base para generar los diferentes conjuntos de códigos es:

$$H_1 = [0] \quad (1.7)$$

A partir de la ecuación (1.7) se realizan las secuencias Walsh, siguiendo la siguiente estructura:

$$H_{2N} = \begin{bmatrix} H_{1N} & H_{1N} \\ H_{1N} & \overline{H_{1N}} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Donde:

$\overline{H_1}$ = Es el complemento de H_1

Por ejemplo si se quiere obtener el conjunto de secuencias de 4 códigos Walsh, se requiere generar la matriz de Hadamard de orden 4.

$$H_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & \overline{H_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Las secuencias de los 4 códigos Walsh son:

$$w_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$w_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 1]$$

$$w_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]$$

$$w_4 = [0 \ 1 \ 1 \ 0]$$

Se cambian los 0's por -1 y lo 1's por +1 quedando los códigos Walsh de la siguiente forma [4]:

$$w_1 = [-1 \ -1 \ -1 \ -1]$$

$$w_2 = [-1 \ +1 \ -1 \ +1]$$

$$w_3 = [-1 \ -1 \ +1 \ +1]$$

$$w_4 = [-1 \ +1 \ +1 \ -1]$$

Los códigos Walsh utilizados en IS-95 son un conjunto de 64 códigos ortogonales almacenados en una memoria de solo lectura (ROM) [3], su principal objetivo es:

- Dispersar el canal de bajada sobre la banda de 1.2288MHz.
- Identificación del móvil

La velocidad de chip de un código Walsh es de 1.2288Mcps. En el apéndice A se muestra un ejemplo de cómo se generan los códigos Walsh.

1.1.2.2 Códigos de seudoruido (PN)

Las secuencias de PN son muy utilizadas en los sistemas de comunicación digital, las cuales cumplen con las propiedades que se mencionan en la sección 1.1.2. Estos códigos son generados mediante el cambio de registros de corrimiento con retroalimentación lineal.

Un registro puede contener N número de etapas, los datos que entran en el registro se cambian por las diferentes etapas de este, pasando por una etapa en la cual se efectúa una suma módulo dos teniendo a la salida de este, un dato de la secuencia de PN, así el número total de secuencias pseudoaleatorias³ L que se pueden generar por N número de registros, esta dado por la siguiente expresión [3], [4]:

$$L = 2^N - 1 \tag{1.9}$$

En la figura 1.8 se muestra un ejemplo el cual cuenta con un registro y 3 etapas, en el cual la salida de la última etapa y de la intermedia se realiza la suma modulo dos y el resultado es introducido a la primera etapa. El registro comienza con una secuencia inicial, o el estado inicial almacenado en sus etapas [4].

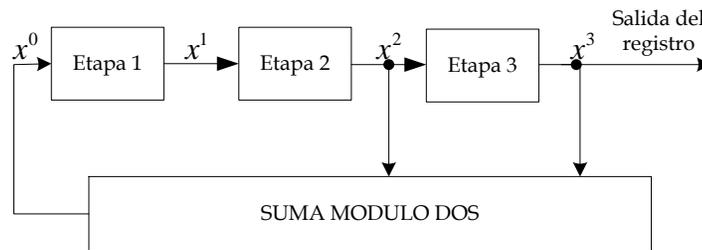


Figura 1.8 Ejemplo de una registro para generar códigos PN

Por medio de polinomios primitivos se puede asociar a cada conjunto de registros de cambio. Esta expresión se muestra en la siguiente ecuación:

$$P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x^1 + 1 \tag{1.10}$$

Donde:

a_n =retroalimentación cuando existe un x_i en la salida a_i igual a 1, de otra forma a_i igual a cero.

x^n =registros de cambio.

Por ejemplo, en la figura 1.9 se muestra como se realiza el desplazamiento del contenido de los registros y en la tabla 1.1 se muestran los resultados obtenidos con el estado inicial [1 0 1].

³ Las secuencias PN no son aleatorias del todo, estas son determinísticas ya que son conocidas por el transmisor y el receptor.

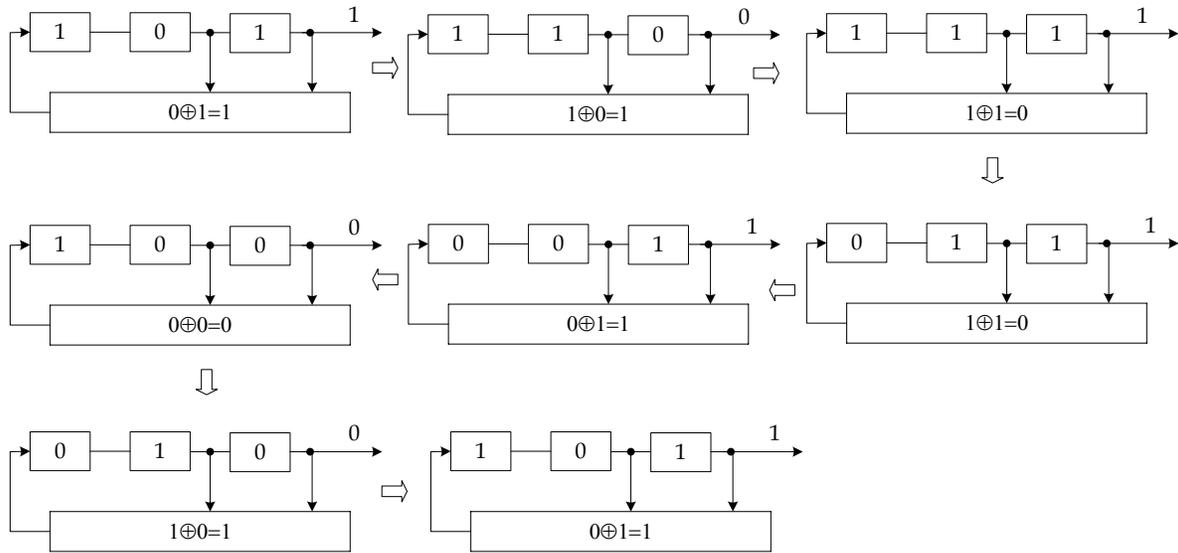


Figura 1.9 Proceso para obtener los códigos PN

	Salida	Salida	Salida	Salida
Cambio	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Registro
0	1	0	1	1
1	1	1	0	0
2	1	1	1	1
3	0	1	1	1
4	0	0	1	1
5	1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	1	0	1	1

Tabla 1.1 Etapas del registro y salidas

Como se puede observar en la tabla 1.1 en el cambio 7 se vuelve a repetir la secuencia con la que se inicio el registro, por lo tanto la longitud efectiva de nuestro código PN periódico es de 7. El registro a la salida nos da el siguiente código PN:

$$p = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Una propiedad que los códigos de PN tienen es que a partir de uno generado se pueden generar otros, para este ejemplo a partir del código generado obtenemos los siguientes códigos:

$$p_0 = [+1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1]$$

$$p_1 = [-1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1]$$

$$p_2 = [-1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1]$$

$$p_3 = [+1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1]$$

$$p_4 = [+1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1]$$

$$p_5 = [+1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1]$$

$$p_6 = [-1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1]$$

Estos códigos cumplen con las propiedades mencionadas en la sección 1.1.2. En el apéndice B se muestra un ejemplo de cómo se genera una secuencia PN.

1.1.3 Codificación de canal

La codificación de canal es un proceso de la transformación de la información para mejorar el desempeño de las comunicaciones, esto para que sean menos susceptibles al ruido, interferencias, desvanecimientos, etc.

IS-95 sólo utiliza códigos convolucionales, los cuales se describen a continuación:

Códigos convolucionales

Los códigos convolucionales son códigos lineales, donde la suma de dos palabras código da como resultado otra palabra código; por lo tanto cuentan con memoria, ya que la codificación depende de los datos anteriores y de los actuales.

Se usan en canales con alta probabilidad de error y en aplicaciones en las cuales los datos se generan en forma serial y no en bloques grandes.

Un código convolucional se describe mediante tres parámetros (n,k,m) donde:

n es el número de bits de la secuencia codificada.

k es el número de bits de la secuencia de entrada.

m es la longitud de restricción o memoria (parámetro que se varía para controlar la información redundante).

En la figura 1.10 se muestra un codificador convolucional (n,k,m) que acepta bloques de k bits de la secuencia de entrada y produce bloques de n bits de la secuencia codificada.

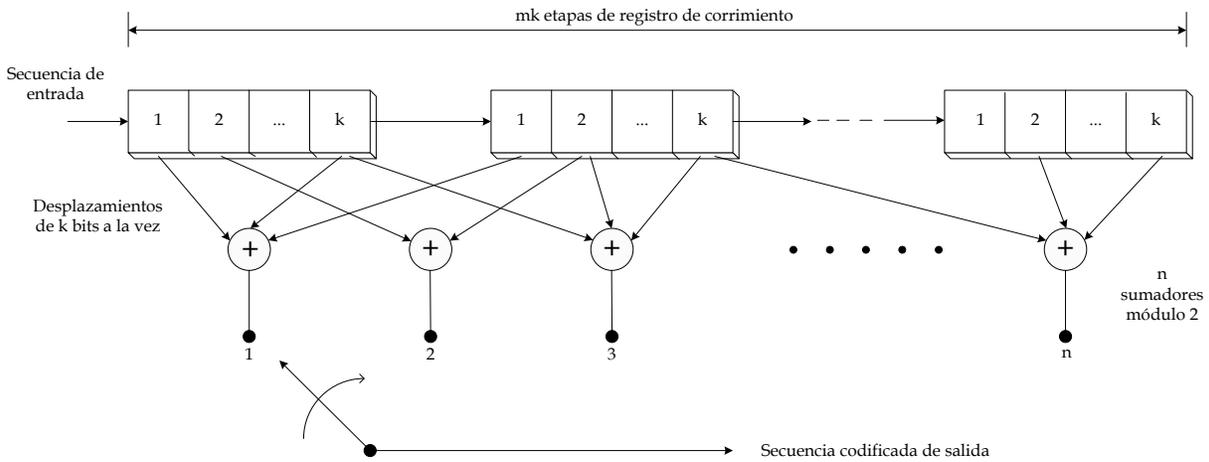


Figura 1.10 Diagrama de un codificador convolucional (n,k,m) .

La decodificación de los códigos convolucionales puede ser por verosimilitud máxima o por el algoritmo de Viterbi el cual implica calcular una medida de similitud entre la secuencia recibida en el instante t_i y todas las trayectorias del diagrama de Trellis en cada estado en el mismo instante t_i , reduciendo así la complejidad de la decodificación [10].

1.1.4 Control de potencia

Considerando una celda con dos usuarios como se muestra en la figura 1.11, se observa que el móvil 2 se encuentra más cercano a la estación base (BS: Base Station) que el móvil 1, si no existiera un control en la potencia en este caso en el enlace de subida, ambos usuarios transmitirían la misma cantidad de potencia no importando la distancia a la que se encuentran de la estación base, dando como resultando que la potencia del móvil 2 sea más grande que la del móvil 1.

Por lo tanto al recibir la potencia de los usuarios en la estación base, esta será diferente debido a la distancia a la que se encuentra con respecto a la BS, tal efecto se denomina **cerca-lejos** [3], el cual degrada el funcionamiento y reduce la capacidad.

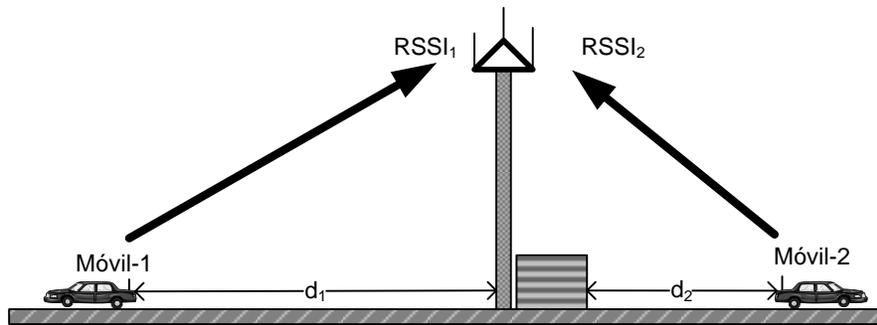


Figura 1.11 Ilustración del problema cerca-lejos

Si los usuarios transmiten con la misma potencia desde dos diferentes distancias, la relación de la señal recibida en la BS será:

$$\frac{RSSI_1}{RSSI_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^\gamma \quad (1.11)$$

Donde:

$RSSI_1$ = señal recibida del móvil 1

$RSSI_2$ = señal recibida del móvil 2

d_1 = distancia entre el móvil 1 y la BS

d_2 = distancia entre el móvil 2 y la BS

γ = exponente de pérdidas por trayectoria en la zona de propagación

La ecuación (1.14) implica que las distancias $d_1 \neq d_2$ de las señales recibidas son diferentes para diversos usuarios dependiendo de la zona de propagación y de las respectivas distancias. La función del control de potencia es controlar la potencia transmitida de cada móvil, considerando la distancia que tenga hacia la BS, de esta manera se resuelve el efecto cerca-lejos. De acuerdo a IS-95, el control de potencia en CDMA se da en el enlace de subida cada 1.25 ms y en el enlace de bajada se da de 15 a 20 ms.

a) Control de potencia en enlace de subida.

En este tipo de enlace existen dos casos uno cuando un móvil transmite a una potencia alta lo cual ocasiona interferencia en el sistema y dos cuando un móvil transmite con baja potencia, teniendo como ventaja una baja interferencia, pero afecta en la calidad del servicio.

Para evitar estos inconvenientes IS-95 especifica que para tener acceso al sistema tiene que realizar una serie de pruebas de acceso, las cuales se realizan aumentando progresivamente la potencia del móvil.

Así, este intenta tener acceso probando con un bajo nivel potencia, si la BS no le manda un acuse de recibo, en un intervalo aleatorio de tiempo el móvil intenta nuevamente pero ahora con un nivel de potencia mayor que el anterior, y así sucesivamente hasta que la BS le da el acceso, como se muestra en la figura 1.12. A la diferencia entre pruebas de acceso se le conoce como **corrección en la prueba de acceso** [4].

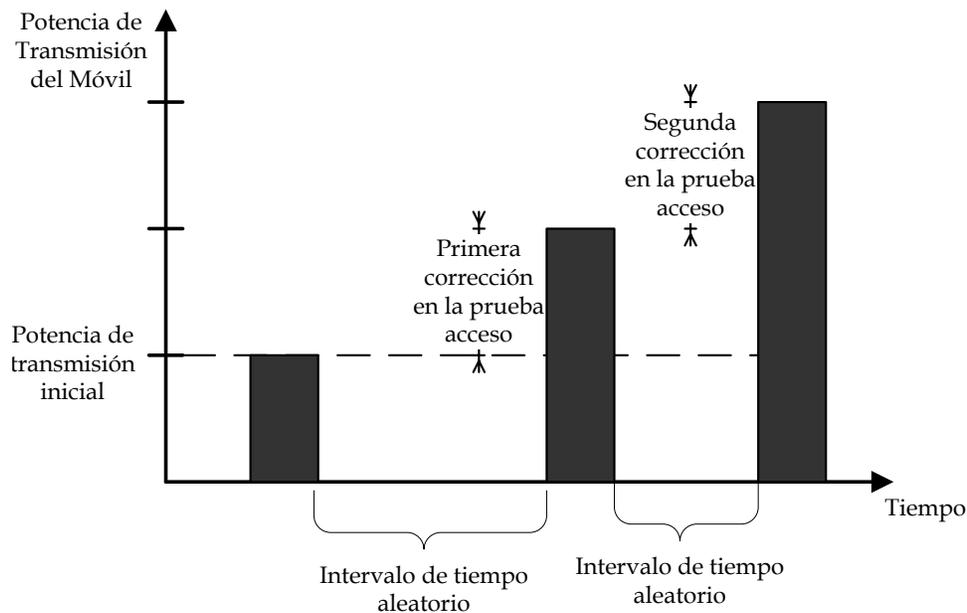


Figura 1.12 Pruebas de acceso de los usuarios a la estación base.

Por medio de estas pruebas (dependiendo de la potencia necesaria para poder tener enlace) el móvil puede estimar si existen pérdidas por trayectoria entre la BS y éste.

Existen dos tipos de control de potencia en el enlace de subida:

- **Lazo abierto.** Este proceso controla la potencia a la cual va a transmitir el móvil, sin involucrar a la BS, tomando en cuenta que el móvil se desplaza por toda la celda, es decir, el control de potencia en lazo abierto monitorea la potencia que recibe el móvil y ajusta la potencia con la cual va a transmitir éste a través del canal de tráfico.

Como se sabe la función del control de potencia es compensar los efectos que producen los desvanecimientos por oscurecimientos (log-normal), sin embargo en lo que respecta al control de potencia de lazo abierto no resulta adecuado para resolver estos efectos debido a que el enlace de subida y de bajada se encuentra a distintas frecuencias y por lo tanto es muy lento para compensar los desvanecimientos rápidos (Rayleigh).

- **Lazo cerrado.** Se utiliza para compensar las fluctuaciones de potencia que existen en los desvanecimiento rápidos (Rayleigh), este proceso involucra a la estación base y al usuario. En el control de potencia de lazo cerrado la BS continuamente controla el enlace de bajada y la calidad del mismo. Si la calidad del enlace es mala, la BS le ordena al móvil que aumente su potencia, si por el contrario la calidad del enlace es muy buena significa que esta excediendo la potencia y la BS le ordena al móvil que la disminuya. Se tiene un indicador ideal para la medida de la calidad del enlace que es conocido como **tasa de trama errónea** (FER: Frame Error Rate), pero debido a que para calcularla tiene que esperar tiempos muy largos y no resulta apropiado, por consiguiente se utiliza la E_b/N_o , para medir la calidad del enlace de subida.

El control de potencia en lazo cerrado para el enlace de subida se realiza de la siguiente forma:

1. La BS continuamente controla la E_b/N_o .
2. Si la E_b/N_o es elevada la BS ordena al móvil que disminuya su potencia de transmisión.
3. Si la E_b/N_o es baja la BS le ordena al usuario que incremente su potencia de transmisión.

Esto quiere decir que constantemente compara la E_b/N_o con un intervalo ya definido.

b) Control de potencia del enlace de bajada

El estándar IS-95 especifica que el móvil tiene que reportar a la BS la calidad del enlace de bajada, el móvil continuamente esta monitoreando la FER del enlace de bajada y reporta antes esta FER a la BS, en un mensaje llamado **mensaje de reporte de la medida de potencia** (PMRC: Power Measurement Report Message).

Este reporte puede ser enviado de dos formas: una es cuando el móvil reporta periódicamente el estado de la PMRM y el otro cuando el móvil reporta solo si la FER excede del umbral establecido. Por medio de este mensaje la BS conoce la calidad del enlace en ese instante y tiene la capacidad de ajustar la potencia de transmisión para el móvil en particular.

1.1.5 Transferencia de llamada (Handoff) en IS-95

Un teléfono móvil puede mantener su conexión en una red celular cuando este se mueve de una celda a otra sin perder la conexión. A este cambio de enlace de una BS a otra se le conoce como **transferencia de llamada** (handoff o handover).

La transferencia de llamada es uno de procedimientos más importantes en los sistemas de comunicaciones móviles para tener calidad en el servicio, ya que los usuarios se encuentran en constante movimiento y por lo tanto existe un cambio con las estaciones base que proporcionan el servicio [9].

Como se puede observar en la figura 1.13 la zona en la que ocurre la transferencia de llamada es vulnerable y por lo tanto se consumen mas recursos⁴ debido a su tamaño, por lo tanto se busca que la zona sea lo mas pequeña posible.

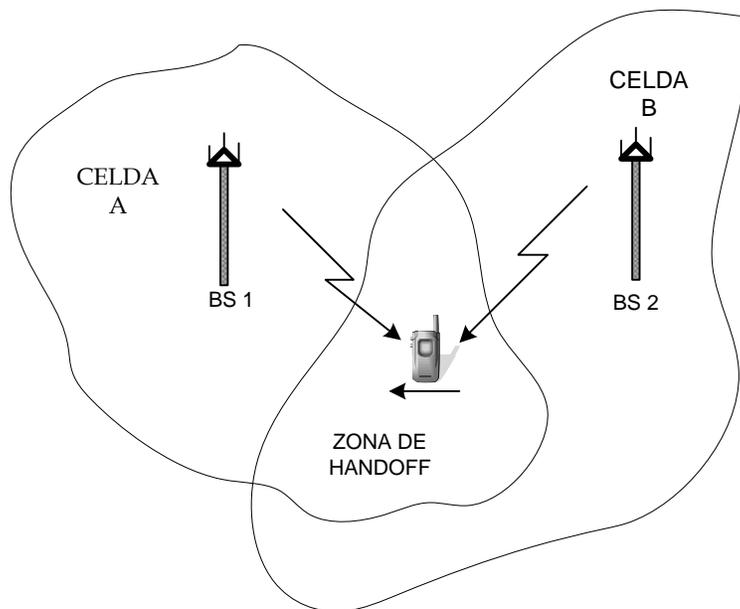


Figura 1.13 Transferencia de llamada

⁴ Se refiere a recursos, a la potencia, a los requerimientos de la E_b/N_0 y a la calidad del servicio..

Existen tres tipos de transferencia de llamada en el sistema CDMA:

a) Transferencia de llama sin interrupción (Soft Handoff)

Durante el lapso en el que ocurre la transferencia de llama sin interrupción, es decir, mientras el móvil se traslada de una celda a otra, este mantiene una conexión por medio del canal de tráfico con dos o más estaciones base, esta conexión puede ocurrir de dos formas como se muestra en la figura 1.14a y 1.14b la cual depende si el enlace es de bajada ó de subida.

El primer caso es el que ocurre en el enlace de bajada y se muestra en la figura 1.14a este es cuando el móvil usa un receptor "RAKE" para demodular dos señales de dos o más estaciones base diferentes, estas señales son combinadas para obtener una señal de mejor calidad.

El segundo caso se da en el enlace de subida el cual se puede observar en la figura 1.14b, el móvil transmite la señal que se recibe en ambas estaciones base, las dos celdas demodulan la señal y la mandan al centro de conmutación móvil (MSC: Mobile Switching Center) este centro contiene un selector el cual elige la mejor señal de ambas para enviarla de regreso [1],[4].

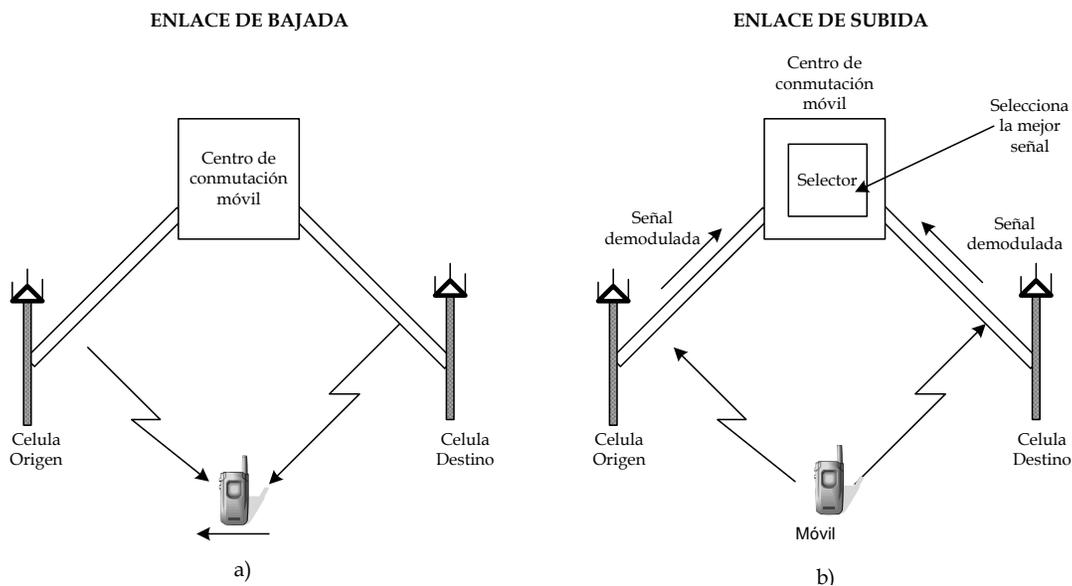


Figura 1.14 Transferencia de llamada sin interrupción según el enlace: a) Enlace de bajada b) Enlace de subida

b) Transferencia de llamada sin interrupción intercelular (Softer Handoff)

Este tipo de transferencia de llamada ocurre cuando un móvil se mueve entre dos sectores diferentes dentro de una misma celda, al igual que en la transferencia de llamada sin interrupción existen dos formas de mantener la conexión dependiendo el enlace en el que se encuentre. En el enlace de bajada se lleva a cabo el mismo proceso que en transferencia de llamada sin interrupción, y en el enlace de subida, sin embargo, los dos sectores reciben simultáneamente la señal del móvil. Las señales son demoduladas y se combinan en una sola estructura para ser enviadas de regreso al MSC [4].

c) Transferencia de llamada con interrupción (Hard Handoff)

El tercer tipo de transferencia de llamada se caracteriza por utilizar una pequeña interrupción de la conexión, debido a que cambia de un sistema a otro. Existen dos tipos de transferencia de llamada con interrupción: CDMA-CDMA y el CDMA-analógico, el primero ocurre cuando el móvil hace un cambio entre dos portadoras en un sistema CDMA o cuando un móvil cambia entre dos sistemas de diferentes operadoras. El otro tipo de transferencia de llamada con interrupción ocurre cuando una llamada en un sistema de CDMA se cambia a otra red de tipo analógica.

1.1.5.1 Algoritmo de transferencia de llamada para IS-95

IS-95 utiliza cuatro conjuntos de pilotos [6], [9]:

- Conjunto activo (AS: Active Set).- Contiene los canales piloto que se usan actualmente en una llamada; éste conjunto contiene como máximo 6 canales.
- Conjunto candidato (CS: Candidate Set).- Contiene los canales piloto que tienen la posibilidad de pertenecer al conjunto activo; éste conjunto contiene hasta 5 canales piloto para IS-95 a diferencia de CDMA2000 que contiene como máximo hasta 10 canales
- Conjunto vecino (NS: Neighbor Set).- Contienen los canales piloto que no se encuentran en el conjunto activo ni en el conjunto candidato, pero son más propensos a

pertenecer al conjunto candidato ó al conjunto activo; éste conjunto contiene hasta 40 canales piloto.

- Conjunto restante (RS: Remaining Set).- Este conjunto lo integran aquellos canales piloto que no intervienen en los conjuntos anteriores.

IS-95 opera con umbrales estáticos, en los cuales intervienen los siguientes parámetros:

- T_ADD.- Es un umbral de detección, su valor se encuentra en el rango de -13 a -17 dB. Se utiliza como referencia para pilotos que se encuentran en el conjunto vecino y que el valor de su E_c/I_o alcanzan o rebasan este umbral se integran al conjunto candidato o al conjunto activo.
- T_COMP.- Es un umbral de comparación, este es usado cuando se tienen cuatro o más canales pilotos en el conjunto activo, eligiendo al canal que posea el mayor valor de E_c/I_o .
- T_DROP.- Es un umbral de bajada y su valor se encuentra en el rango de -13 a -20 dB. Cuando el valor de la E_c/I_o se encuentra por debajo del valor del umbral T_DROP inmediatamente inicializa su temporizador (T_TDROP), si termina el temporizador y su valor de E_c/I_o permanece por debajo del umbral T_DROP este canal piloto se remueve al conjunto vecino.
- T_TDROP.- Es un temporizador y su valor se encuentra entre el rango de 2 a 5 segundos.

En la figura 1.15 se muestra el intercambio de conjuntos de un canal piloto en el estándar IS-95A [11]. El intercambio de conjuntos se realiza de la siguiente forma:

(1) Si el valor de la E_c/I_o de un canal piloto alcanza o sobrepasa el valor del T_ADD, el móvil envía un mensaje de la medida del piloto (PSMM: Pilot Strength Measurement Message) a la BS y transfiere este canal al conjunto candidato.

(2) Cuando la BS le envía un mensaje de dirección de la transferencia de llamada (HDM: Handoff Direction Message) al móvil, éste transfiere el canal piloto al conjunto

activo y envía un mensaje de término de transferencia de llamada (HCM: Handoff Completion Message) a la BS.

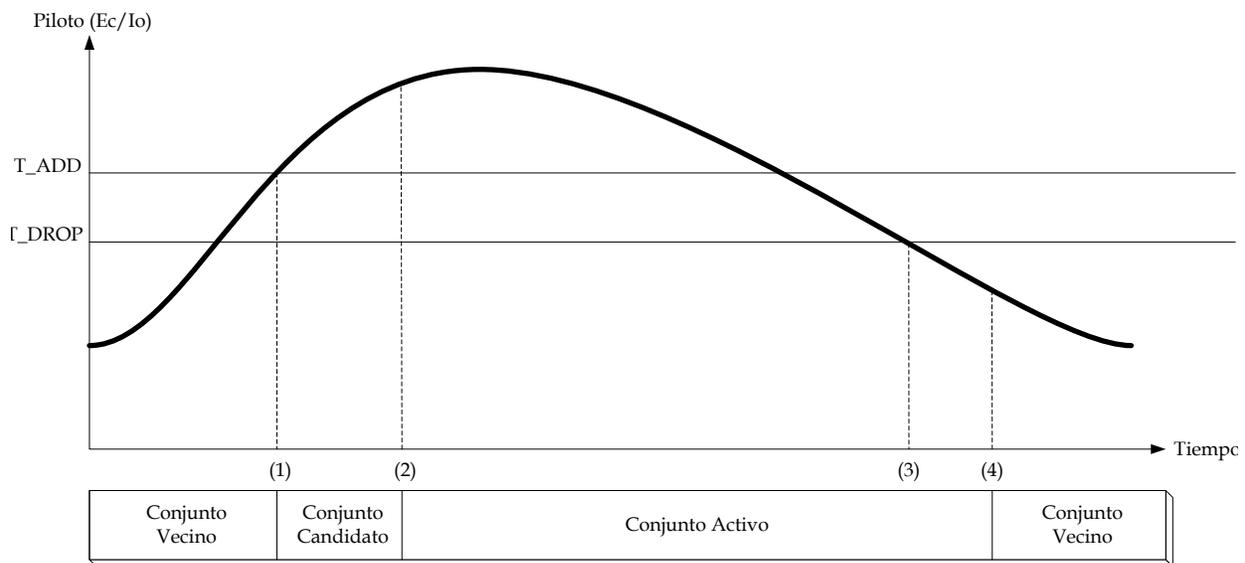


Figura 1.15 Intercambio de conjuntos de un canal piloto en el estándar IS-95A.

(3) Cuando el valor de la E_c/I_0 es menor al valor del T_{DROP} , el móvil inicializa el T_{TDROP} .

(4) Si el temporizador expira, el móvil envía un PSMM a la BS, y cuando recibe un HDM de la BS el móvil transfiere este canal piloto al conjunto Vecino enviando un último HCM a la BS.

1.1.7 Estructura del enlace de bajada

En IS-95 se usa una matriz de Hadamard de 64 por 64, para generar 64 códigos Walsh los cuales son mutuamente ortogonales y así cada canal lógico sobre el enlace de bajada es identificado por la asignación de un código Walsh. En la figura 1.16 se muestra la estructura del enlace de bajada para CDMA IS-95 [4]. El enlace de bajada se compone de 4 tipos de canales lógicos: canal piloto, canal de sincronía, canal de voice y canal de tráfico.

a) Canal piloto de bajada (FPiCh: Forward Pilot Channel)

En este canal no se transmite información, pero al mismo tiempo es uno de los canales lógicos más importantes de los sistemas de CDMA, ya que por medio de éste, la BS garantiza que utilizando los tres códigos (Walsh, secuencias de pseudo-ruido en cuadratura (PN-Q) y en fase (PN-I)) que emplea de acuerdo con el estándar IS-95, exista una perfecta sincronía entre el móvil y la BS.

A este canal se le asigna el código Walsh (W_0^{64}) y se transmiten a la misma tasa que la secuencia PN corta a 1.2288 Mcps. Las secuencias de PN son de $2^{15}-1$, así como también dentro de este canal se utilizan 512 corrimientos.

Al comienzo de cada transmisión los códigos Walsh son alineados con un corrimiento específico de PN-I y PN- Q, establecidos para cada BS en el sistema. Las estaciones base en la red transmiten en sincronía las secuencias PN, por lo cual cada BS es identificada por un nivel de fase específico de las secuencias, éste método de identificación, permite la reutilización de portadoras de frecuencias en CDMA IS-95, permitiendo así que la misma portadora de frecuencia puede reutilizarse simultáneamente por otras estaciones base.

Existen 512 corrimientos con intervalos de 64 chips entre cada nivel consecutivo. Aproximadamente el 20% del total de la potencia radiada por la BS se asigna en este canal [3], [4].

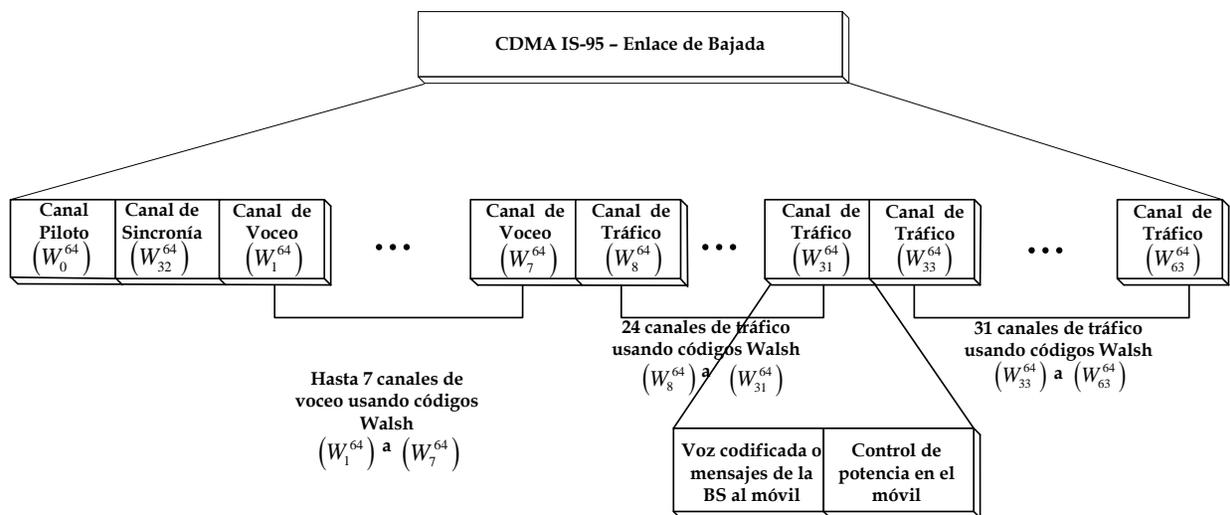


Figura 1.16 Estructura del enlace de bajada

b) Canal de sincronía (SyncCh: Sync Channel)

Este canal de sincronía utiliza el código Walsh (W_{32}^{64}) y transmite mensajes que contienen información acerca de la BS, estos son codificados utilizando códigos convolucionales a una razón de 1/2, lo cual permite a los usuarios que se encuentran en una celda, identificar el nivel de la BS (Pilot_PN) y sincronizar el mismo. La tasa de transmisión del canal es de 1200 bps.

Los usuarios usan este canal para recibir mensajes, los cuales le permiten sincronizarse con los códigos generados localmente por la red. Cuando se termina la llamada el móvil vuelve a buscar la configuración de los datos en el sistema, ejecutando así un proceso similar a una resincronización.

c) Canal de voceo de bajada (FPCh: Forward Paging Channel)

Este canal es similar al canal de sincronía, ya que también contiene mensajes de información, pero con la diferencia que transmite a tasas de 4.8 ó 9.6 Kbps. Una vez que el móvil se ha sincronizado con el canal de sincronía, comienza a supervisar el canal de voceo. Los datos transmitidos por medio de los canales de voceo dan a los móviles toda la información necesaria para acceder a la red CDMA, asignándole un canal de tráfico al móvil.

Cada portadora CDMA puede contener hasta siete canales de voceo usando códigos Walsh (W_{1-7}^{64}). El código Walsh (W_1^{64}) es el canal primario de voceo, por este se transmiten los datos de información de voz y la respuesta de acceso del sistema. Los canales restantes son utilizados para transmitir información referente a la respuesta de acceso, todos los canales de voceo transmiten con la misma tasa de transmisión y utilizan el mismo sistema de identificación que el canal de sincronía.

d) Canal de tráfico de bajada (FTCh: Forward Traffic Channel)

El canal de tráfico es el responsable para transmitir voz, datos (a bajas tasas de transmisión) y los mensajes de señalización que se envían por el canal de tráfico. La estructura de este canal es similar al canal de voceo, su diferencia radica en que el canal de tráfico contiene Bits de Control de Potencia PCB (Power Control Bits) multiplexados.

Utiliza códigos Walsh (W_{8-31}^{64}) , (W_{33-63}^{64}) con una tasa de transmisión de 9.6 Kbps.

Soporta cuatro tasas diferentes de transmisión:

- A 9.6Kbps tiene una tasa de símbolos de 19.2Ksps.
- A 4.8Kbps tiene una tasa de símbolos de 9.6Ksps.
- A 2.4Kbps tiene una tasa de símbolos de 4.8Ksps.
- A 1.2Kbps tiene una tasa de símbolos de 2.4Ksps.

Estas tasas de símbolos son obtenidas a la salida de un codificador convolucional con una razón de codificación de 1/2.

1.1.8 Estructura del enlace de subida

La estructura del canal de subida consiste de dos tipos de canales lógicos: el canal de acceso y el canal de tráfico. Cada uno de estos canales se dispersa por secuencias únicas de PN largas. En la figura 1.17 se muestra la estructura del enlace de subida para el sistema CDMA IS-95 [4].

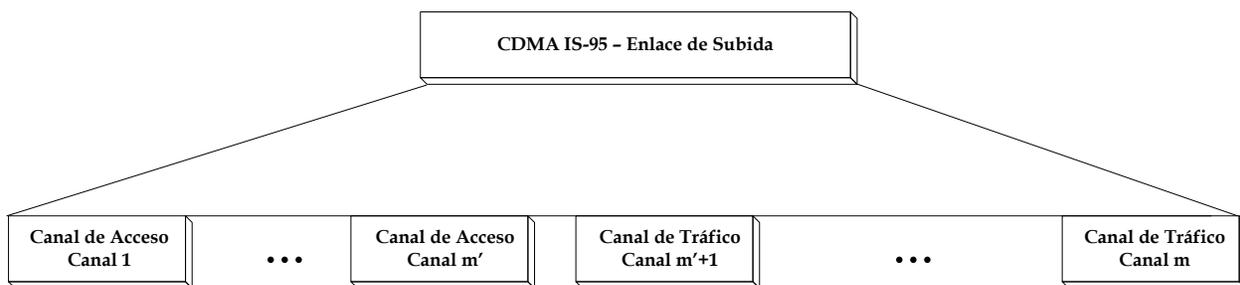


Figura 1.17 Estructura del enlace de subida

a) Canal de acceso de subida (RACH: Reverse Access Channel)

Este canal de acceso es usado por el móvil para comunicarse con la BS cuando el móvil no tiene asignado un canal de tráfico. El móvil usa este canal para hacer la llamada de origen y responder ésta. Su tasa de transmisión de datos en banda base es de 4.8 Kbps.

La información que contiene este canal se codifica convolucionalmente a una razón de 1/3, para protegerla de errores.

Los datos después son codificados mediante una modulación ortogonal 64-aria. El modulador en este caso consta de 64 códigos Walsh, los cuales representan los datos en grupos de seis símbolos. Al estar representados estos seis símbolos por un código Walsh único, es posible distinguir entre símbolos diferentes. Estos datos son modulados a una tasa de 4.8Ksps, entonces son dispersados por una secuencia de PN larga que tiene una tasa de 1.2288Mcps. Esta secuencia se utiliza para distinguir el canal de acceso de los otros canales que ocupan el enlace de subida [3], [4].

b) Canal de tráfico de subida (RTCh: Reverse Traffic Channel)

El canal de tráfico se utiliza para transmitir datos y voz; en este canal también son enviados los mensajes de señalización. Por el hecho de transmitir voz este canal tiene un proceso complejo ya que es necesario cuantizar la voz y codificarla antes del procesamiento del canal.

El canal de tráfico tiene una estructura similar al canal de acceso, la diferencia radica en que el canal de tráfico ocurre el proceso de aleatorización de ráfagas de datos DBR (Data Burst Randomising) estas ocurren entre dos tramas y evita la transmisión de datos redundantes.

1.1.9 Evolución de IS-95 hacia CDMA2000

Como se sabe todo estándar presenta mejoras y en el caso de IS-95 no podía ser la excepción, en 1995 fue publicado IS-95A, sus características principales de operación del sistema son:

- Un ancho de banda en el canal de 1.25MHz
- Una tasa de chip de 1.2288Mchps
- Control de potencia
- Transferencia de llamada sin interrupción

En ese mismo año, se publican dos documentos: ANSI-J-STD-008 y el TSB-74. En estos documentos se definen normas para la compatibilidad y la interacción de CDMA y los sistemas de comunicación personal (PCS: Personal Communication Systems) en un rango de frecuencia de 1800-2000MHz y especifica una tasa de datos opcional de 14.4Kbps para la conmutación de circuitos.

La combinación de estos documentos junto con algunos datos específicos del IS-95A, lograron conseguir que estas modificaciones se introduzcan en el IS-95B, a esta nueva revisión también se le conoce como TIA/EIA-95B. Algunos rasgos de esta revisión son los siguientes [6]:

- Compatibilidad con IS-95.
- Datos por conmutación de paquetes.
- Una velocidad en el canal de tráfico de hasta 115.2Kbps
- Una mejor calidad de la voz

Debido a estas características IS-95 fue desplegado por todo el mundo y considerado una tecnología de Segunda Generación como se puede observar en la figura 1.18.

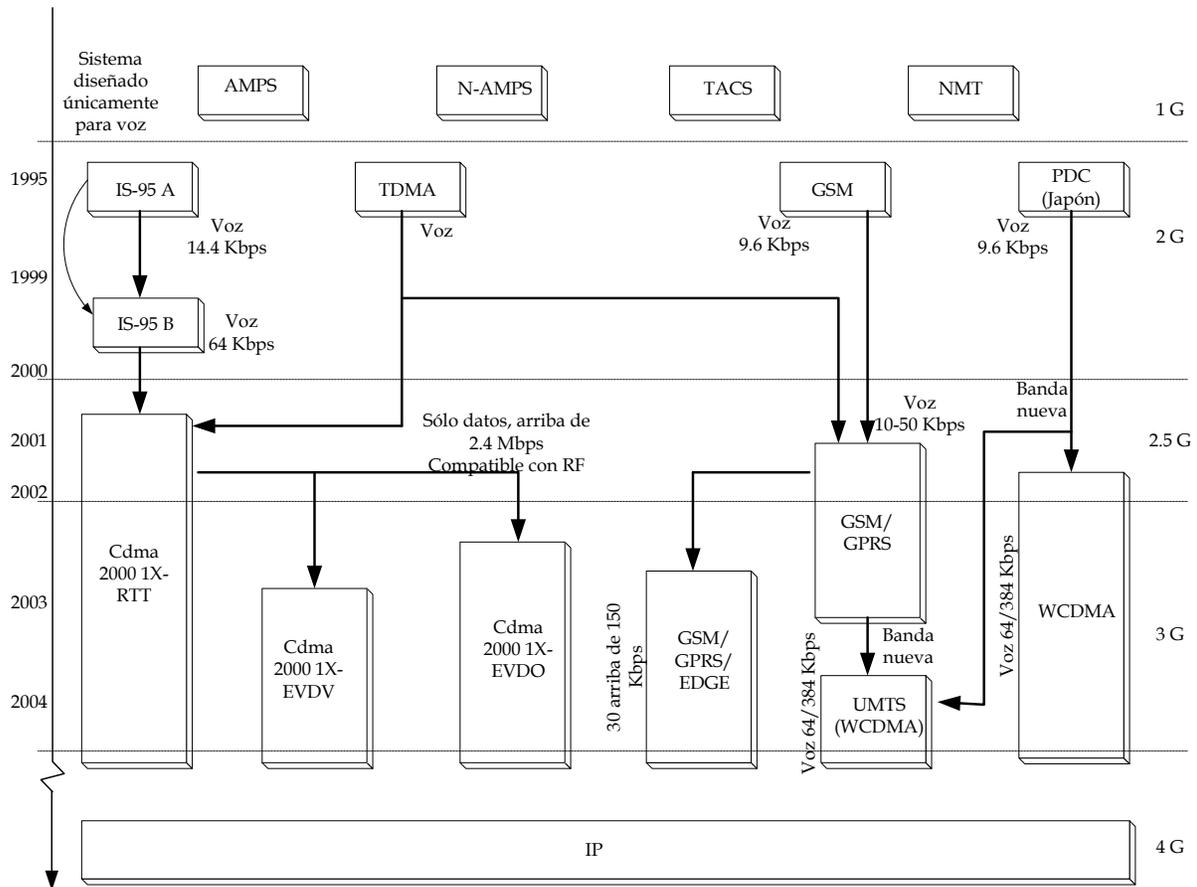


Figura 1.18 Evolución de los sistemas de telefonía

El sistema CDMA IS-95 B, se caracteriza por la mejora de los canales de subida y de bajada para optimizar las capacidades del tráfico de datos. En el canal de tráfico se le

pueden asignar hasta siete canales código suplementarios y un canal fundamental a un móvil teniendo un aumento en la tasa de datos de 115.2kbps.

La evolución hacia la tercera generación de IS-95, es conocida como CDMA2000, usa la tecnología de CDMA de banda ancha para cubrir los requerimientos de la IMT-2000⁵.

Además, CDMA2000 incluye la opción de un ancho de banda de canal de 1.25 MHz, permitiendo una fácil migración de IS-95B a sistemas CDMA2000 de banda ancha. CDMA2000 ofrece como ventajas duplicar la capacidad del sistema y proporcionar tasas de datos más altas, superiores a 144Kbps.

El sistema CDMA2000 para ser compatible con redes IS-95, conserva muchos atributos de éste, como ya se mencionó IS-95 proporciona tasas de datos más altas agregando canales suplementarios.

En CDMA2000, estas tasas son mucho más altas por los múltiples canales código. Además, hay mejoras en la capa física que facilitan el servicio de datos con tasas más altas. En la tabla 1.2 tienen los contrastes de las mejoras de CDMA2000 respecto a IS-95.

Los principales atributos de CDMA2000 son:

- Banda Ancha.
- Canales suplementarios.
- Detección coherente en base a un canal piloto en el enlace de subida.
- Control de potencia rápido.
- Diversidad de transmisión en el enlace de bajada.
- Turbo códigos y códigos convolucionales.
- Canal piloto auxiliar.

⁵ Las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000) son la norma mundial para la tercera generación (3G) de comunicaciones inalámbricas, definida por un conjunto de Recomendaciones interdependientes de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

Característica	IS-95	CDMA2000
Ancho de banda del canal de Radio Frecuencia (MHz)	1.25	1.25/5/10/15/20
Tasa de Chip (Mchips/s)	1.2288	1.2288/3.6864/7.7328/ 11.0592/14.7456
Tasa de un solo usuario (kb/s)	9.6-115.2	9.6K-2.4M
Canal código Suplementario (SCCh)	0-7 SCChs a 9.6/14.4 kb/s/SCCh	0 or 1 SCCh por servicio a 9.6kbps hasta 2 Mbps
Longitud de la trama (ms)	20	20, con una opción de 5 ms
Modulación	BPSK	QPSK
Detección coherente en base a un canal piloto	Enlace de bajada: si Enlace de subida: no	Enlace de bajada: si Enlace de subida: si
Codificación de canal	Código convolucional, K= 9, razón 3/4, 1/2, y 1/3	Código convolucional, K= 9, razón 1/3 y 1/4
Canal de Control Dedicado	No	Si
Canal de control de potencia rápido en el enlace de bajada	No	Si
Diversidad de Transmisión en el enlace de bajada	No	Si
Uso de Turbo Códigos	No	Si

Tabla 1.2 Características de la capa física de IS-95 y CDMA2000

REFERENCIAS

- [1] Juha Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House, 2003.
- [2] Riaz Esmailzadeh, Masao Nakagawa, "TDD-CDMA for Wireless Communications", Artech House, 2002.
- [3] Saleh Faruque, "Cellular Mobile System Engineering", Artech House Boston, Edición 1996, págs. 89-125.
- [4] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House, 1998.
- [5] Peter Stavroulakis, "Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems", Artech House, 1998.
- [6] Leonhard Korowajszuk, Bruno de Souza Abreu Xavier, "Designing CDMA2000 Systems", John Wiley & Sons LTD, 2004
- [7] Douglas N. Knisely, Sarath Kumar, "Evolution of Wireless Data Services: IS-95 to CDMA2000", IEEE Communications Magazine, October 1998
- [8] Bernard Sklar, "Digital Communications Fundamentals and Applications", Prentice Hall, 2001.
- [9] Bongkarn Homman, Kunsriruksakul Vikorn "A Comparative Performance Evaluation of Soft Handoff between IS-95A and IS-95B/cdma2000", The IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Año 2000, IEEE APCCAS 2000, Págs. 34-37
- [10] Goldsmith Andrea, "Gíreles Communication". Cambridge University Press, 2005.
- [11] Walid K. M. Ahmed "Simulation and Performance Evaluation of IS-95 Handoff Algoritms", Bell Labs Technical Journal, Vol 7, No. 1, 20002, Págs. 165-170.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2

SISTEMA CDMA2000 1x

Los sistemas basados en el estándar CDMA2000 son capaces de utilizar distintas configuraciones, empleando portadoras con ancho de banda de 1.25 MHz (para tener compatibilidad con los sistemas CDMA IS-95) y 3.75 MHz (para ser compatibles con 3G).

La necesidad de incrementar la capacidad del sistema (voz y canales de tráfico de datos) tiende a implementar canales lógicos. El uso de canales de CDMA2000 depende de nuevas características como radio configuraciones (RC: Radio Configuration) y tasas de dispersión (SR: Spreading Rates).

Los canales lógicos utilizan dos configuraciones para la SR:

- SR1: El ancho de banda de las portadoras es de 1.25 MHz, son compatibles con los estándares IS-95, IS-95-A e IS-95-B con una tasa de dispersión de 1.2288 Mcps. Este sistema utiliza la tasa de dispersión de IS-95 debido a que utiliza una portadora de 1.25 MHz.
- SR3: Esta tasa de dispersión se realiza de dos formas. A la primera se le conoce como **secuencia directa (DS: Direct Sequence) SR3** la cual emplea portadoras de 3.75 MHz para ambos enlaces, a una tasa de dispersión de 3.6864 Mcps. La segunda es por **portadoras múltiples SR3** la cual emplea tres diferentes portadoras de 1.25 MHz en el enlace de bajada y una portadora de 3.75 MHz para el enlace de subida.

En CDMA2000 la canalización para ambos enlaces se realiza por los códigos Walsh, existiendo también códigos de longitud variable de 4 a 128 chips, los cuales se utilizan para identificar cada canal sobre el enlace de bajada dependiendo de la SR y de la RC. Los códigos Walsh y las portadoras en uso permiten identificar los canales sobre el enlace de subida [1]. CDMA2000 1x se basa en el modelo para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI: Open System Interconnect) ya que este es el responsable para transportar todos los tipos de datos incluyendo la información de señalización y el tráfico de usuarios.

La planeación de los datos involucra diferentes protocolos que son utilizados entre el móvil y la red de acceso inalámbrica. En la figura 2.1 se muestra la arquitectura de capas de CDMA2000.

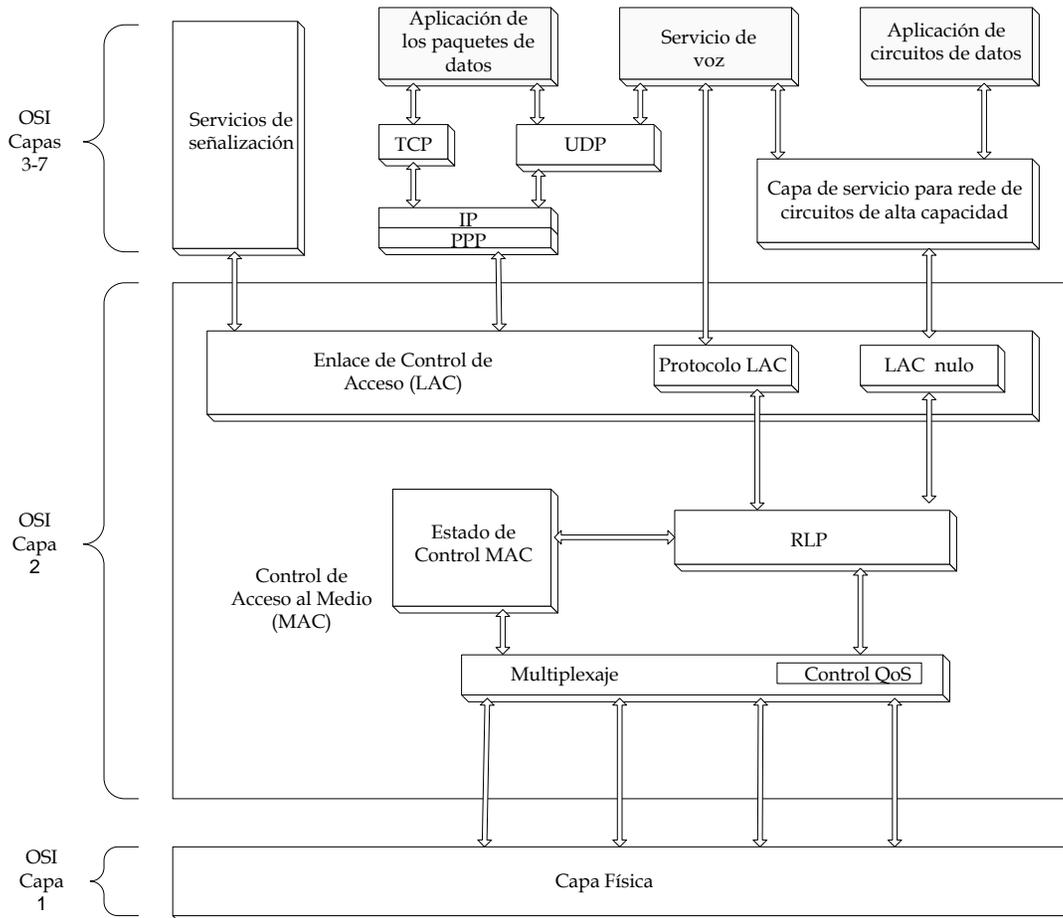


Figura 2.1 Arquitectura de capas del sistema CDMA2000

En el estándar CDMA2000 sólo se definen la capa física y la capa de enlace de datos así como sus subcapas MAC y LAC de acuerdo con el modelo OSI. A continuación se describe la capa física y posteriormente la capa de enlace de datos.

2.1 Capa Física

El objetivo de la capa física es condicionar los datos digitales de capas superiores para que puedan ser transmitidos sobre el canal. En la figura 2.2 se muestran los canales físicos de CDMA2000.

Los canales físicos para ambos enlaces se clasifican en:

- **Canales físicos dedicados:** Conjunto de canales información que transportan información de manera punto a punto (de forma dedicada) entre la BS y el móvil.
- **Canales físicos comunes:** Conjunto de canales físicos que transportan la información que comparten el acceso de manera punto a multipunto, es decir, entre la BS y los múltiples usuarios [2].

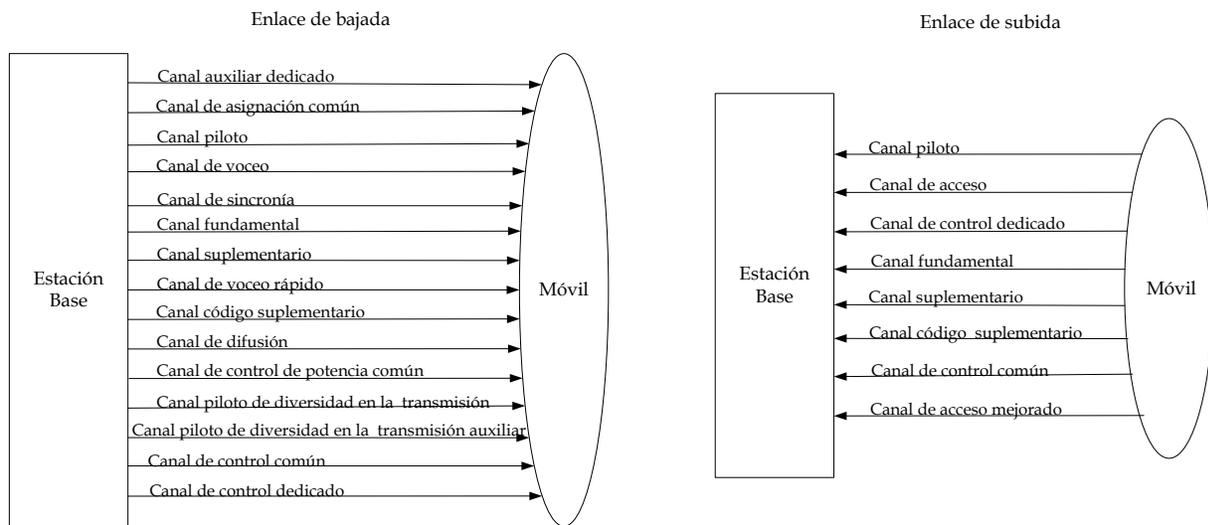


Figura 2.2 Canales físicos de CDMA2000

2.1.1 Diversidad en la transmisión

La diversidad en la transmisión implica propagar la información por múltiples trayectorias, canales, técnicas o posiciones físicas con el objetivo de reducir los efectos de los desvanecimientos o la pérdida de la transmisión. El sistema puede utilizar diversidad espacial, diversidad por polarización, diversidad en frecuencia o diversidad en tiempo. Las técnicas de diversidad ayudan a reducir los requerimientos de la E_b/N_0 o los requerimientos de potencia para transmitir en cada canal, de este modo se mejora la capacidad del sistema⁶.

La diversidad en la transmisión se puede implementar de dos maneras en CDMA2000: diversidad en la transmisión de portadoras múltiples y diversidad en la transmisión por dispersión directa.

⁶ La capacidad del sistema es la cantidad de usuarios que soporta un sistema al mismo tiempo.

a) **Diversidad en la transmisión de portadoras múltiples.** La diversidad de las antenas puede implementarse en el enlace de bajada mediante portadoras múltiples, donde un subconjunto de portadoras se transmite en cada antena. Las principales características de portadoras múltiples son [2]:

- Los símbolos de información codificados son demultiplexados entre portadoras múltiples de 1.25MHz.
- La diversidad en frecuencia transmite la información por canales diferentes que operan en frecuencias distintas.
- La diversidad en tiempo se realiza por medio del entrelazado o por la transmisión de la señal en diferentes tiempos.
- Un receptor "RAKE" recibe señales de diversas trayectorias, las cuales combina y genera una de mejor calidad y la reenvía.
- Cada canal del enlace de bajada puede ser localizado con un código Walsh idéntico.

En la figura 2.2 se representa el uso de diversidad en la transmisión en el enlace de bajada con tres portadoras, cada una es transmitida a 1.25MHz, las portadoras uno y tres utilizan una configuración de dos antenas, mientras que la portadora dos se transmite por la antena uno, esta forma de ordenar las portadoras proporciona un grado máximo de diversidad en frecuencia. En la configuración de tres antenas que se muestra en la figura 2.3 se asume que no hay correlación entre las antenas. [2].

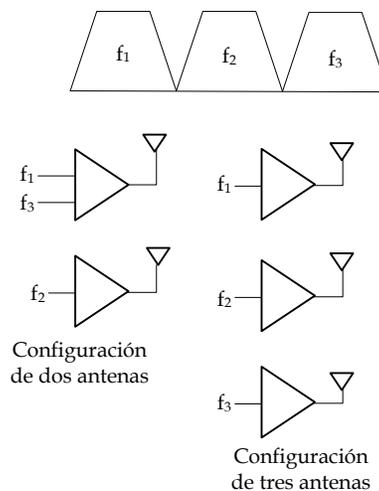


Figura 2.3 Configuración de la Diversidad en la Transmisión para trayectorias múltiples en el enlace de bajada

b) **Diversidad en la transmisión por dispersión directa.** Utiliza diversidad de transmisión ortogonal (OTD: Orthogonal Transmit Diversity) donde los bits codificados se dividen en dos secuencias de bits y son transmitidos en antenas separadas.

Otra técnica que se utiliza para la diversidad en la transmisión es la de dispersión en espacio tiempo (STS: Space Time Spreading) esta técnica solo distribuye los símbolos de los canales del enlace de bajada entre múltiples antenas, pero los símbolos son dispersados utilizando códigos Walsh complementarios [1].

2.1.2 Estructura del enlace de bajada

En la figura 2.4, se muestra la estructura del enlace de bajada para el sistema CDMA2000, en este se observa que se compone de diez canales lógicos y de sus respectivos subcanales. La configuración de los canales depende de la RC y de la SR utilizadas por el móvil.

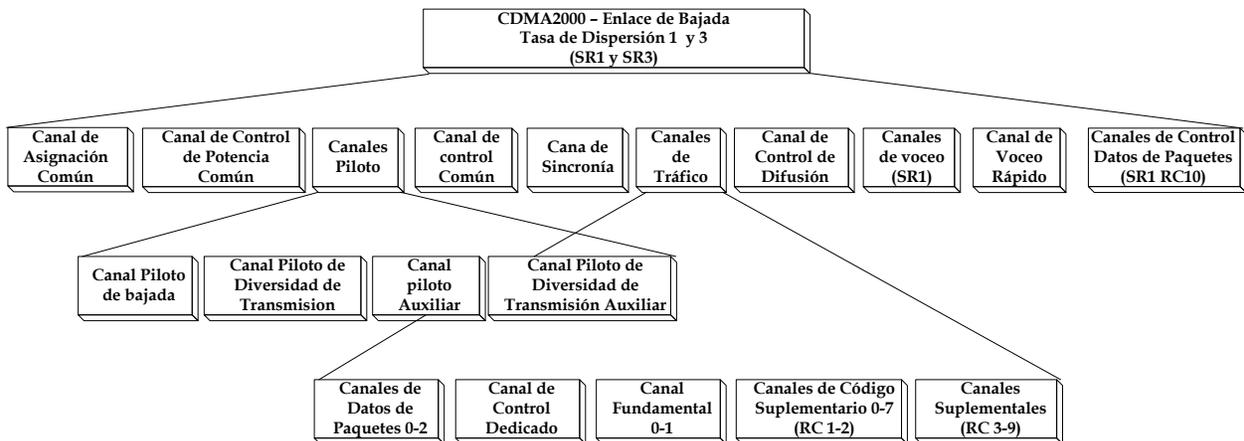


Figura 2.4 Estructura de los canales en el enlace de bajada

En la tabla 2.1 se muestran las RC en el enlace de bajada para redes basadas en CDMA2000. La tabla 2.1 proporciona las principales característica de cada RC y las asocia con las SR.

RC	SR	Tasa de transmisión (Kbps)	Codificador convolucional (R)	Esquema de Modulación	Diversidad
1	1	1.2, 2.4, 4.8, 9.6	1/2	BPSK pre-dispersión	
2	1	1.8, 3.6, 7.2, 14.4	1/2	BPSK pre-dispersión	
3	1	1.2, 1.35, 1.5, 2.4, 2.7, 4.8, 9.6 , 19.2, 38.4, 76.8, 153.6	1/4	QPSK pre-dispersión	TD (OTD y/o STS)
4	1	1.2, 1.35, 1.5, 2.4, 2.7, 4.8, 9.6 , 19.2, 38.4, 76.8, 153.6, 307.2	1/2	QPSK pre-dispersión	TD (OTD y/o STS)
5	1	1.8, 3.6, 7.2, 14.4 , 28.8, 57.6, 115, 230.4	1/4	QPSK pre-dispersión	TD (OTD y/o STS)
6	3	1.2, 1.35, 1.5, 2.4, 2.7, 4.8, 9.6 , 19.2, 38.4, 76.8, 153.6, 307.2	1/6	QPSK pre-dispersión	
7	3	1.2, 1.35, 1.5, 2.4, 2.7, 4.8, 9.6 , 19.2, 38.4, 76.8, 153.6, 307.2	1/2	QPSK pre-dispersión	
8	3	1.8, 3.6, 7.2, 14.4 , 28.8, 57.6, 115, 230.4, 406.8	1/4 (20ms) 1/3 (5ms)	QPSK pre-dispersión	
9	3	1.8, 3.6, 7.2, 14.4 , 28.8, 57.6, 115, 230.4, 259.2, 460.8, 518.4, 1036.8	1/2 (20ms) 1/3 (5ms)	QPSK pre-dispersión	
10	1	81.6, 158.4, 163.2, 312.0, 316.8, 326.4, 465.6, 619.2, 624.0, 633.6, 772.8, 931.2, 1238.4, 1248.0, 1545.6, 1862.4, 2476.8, 3091.2	1/5	QPSK, 8-PSK, 16-QAM	

Tabla 2.1 Radio configuraciones evaluadas para el enlace de bajada del sistema de CDMA2000

a) Canal piloto de bajada (FPiCh: Forward Pilot Channel)

Este canal no contiene información y se transmite utilizando secuencias Walsh W_0^{64} para SR1 y SR3. Las principales funciones de este canal son: sincronizar el móvil con el sistema permitiendo de esta manera la localización del mismo por parte de la BS, además de proporcionar una referencia en tiempo y en frecuencia para lograr una detección coherente [3].

A diferencia de IS-95, las redes de CDMA2000 pueden transmitir cuatro tipos de canales piloto en el enlace de bajada:

- **Canal piloto de bajada (FPiCh: Forward Pilot Channel):** Este canal sigue la misma lógica que en el estándar IS-95.

- **Canal piloto de diversidad en la transmisión (TDPiCh: Transmit Diversity Pilot Channel):** Este canal se transmite con el mismo nivel de potencia que se utiliza en el canal piloto o puede reducirse en 3, 6 o 9 dB, asimismo utiliza el código W_{16}^{128} .

La BS transmite continuamente señales de espectro disperso por secuencias directas para soportar la diversidad de transmisión en el enlace. Este canal junto con el canal piloto proporciona referencias de fase, para ayudar a la detección coherente de los canales.

- **Canal piloto auxiliar (APiCh: Auxiliary Pilot Channel):** Este canal se utiliza para proporcionar una referencia de fase para la detección coherente. Utiliza un código Walsh W_n^N , donde $N \leq 512$ y $1 \leq n \leq N-1$, el valor de N y n lo especifica la BS. También se utiliza para aplicaciones donde se soportan antenas inteligentes.

- **Canal piloto de diversidad en la transmisión auxiliar (ATDPiCh: Auxiliary Transmit Diversity Pilot Channel):** Este canal se requiere para proporcionar una referencia de fase para la detección coherente, asociado con el canal piloto auxiliar, así como para utilizarlo en la diversidad de transmisión. Este canal utiliza un código Walsh $W_{n+N/2}^N$, donde $N \leq 512$ y $1 \leq n \leq N/2 - 1$. El valor de n y N lo especifica la BS [1], [2], [3].

b) Canal de sincronía (SyncCh: Sync Channel)

Este canal se utiliza con SR1 y SR3 presenta las mismas características que en IS-95 e IS-95B utilizando la secuencia W_{32}^{64} . Se utiliza para el envío de los mensajes de sincronización a los móviles que se encuentran dentro del área de cobertura de la BS y determina la localización del canal de voice.

Opera a 1200 bps y la BS transmite mensajes de sincronización en toda su área de cobertura. Para una portadora el ancho de banda es de 1.25 MHz y la tasa de codificación del canal es de 1/2, en cambio si el sistema consta de múltiples portadoras o una portadora con ancho de banda de 5 MHz la tasa de codificación es de 1/3 para este canal [1], [2], [3].

c) Canal de voceo de bajada (FPCh: Forward Paging Channel)

Este canal sólo opera con SR1 el cual también emite mensajes de información directamente a los usuarios que se encuentran en el área de cobertura de la BS, a tasas de transmisión de 4.8 o 9.6 Kps, los cuales contienen la información necesaria para acceder a la red. Para un sola portadora el ancho de banda del canal es de 1.25 MHz que opera a una razón de codificación de 1/2, si consiste de portadoras múltiples con un ancho de banda de 5 MHz la razón de codificación de 1/3. Cada portadora puede contener hasta siete canales de voceo usando códigos Walsh W_{1-7}^{64} . Ya que el móvil se encuentra sincronizado con el canal de sincronía, supervisa el canal de voceo [1], [2].

d) Canal de control común de bajada (FCCCh: Forward Common Control Channel)

Este canal está diseñado para operar con CDMA2000 y su principal función es realizar la misma tarea que el canal de voceo, pero con la diferencia de que opera con SR1 y SR3. El código Walsh que utiliza este canal depende de la SR y de la razón de codificación como se muestra en la tabla 2.2.

Cada portadora de RF puede tener hasta siete canales de control común y la BS los utiliza para controlar el envío de los mensajes a uno o varios usuarios. Estos canales están organizados en tramas de 5, 10 y 20 ms usando tasas de bit que varían de acuerdo a la longitud de la trama y que son utilizados dependiendo de la zona de operación. Este canal es utilizado para enviar mensajes al móvil utilizando la capa 3 y en la subcapa MAC. Su tasa de de transmisión es de 9.6 Kbps [1], [2], [3].

e) Canal de control de difusión (BCCh: Broadcast Control Channel)

Este canal transmite mensajes de difusión a usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura de la BS tal es el caso del servicio de mensajes cortos (SMS: Short Message Service) con las RC3-RC9.

Este canal elimina los mensajes del canal de voceo, a través del canal de difusión separado. Esto mejora el tiempo de inicialización del móvil, así como la ejecución del sistema de acceso, al mismo tiempo reduce el número de mensajes sobre el canal piloto de bajada mejorando la capacidad de voceo.

SR	Razón de codificación	Código Walsh	Condición
1	1/4	W_n^{16}	$1 \leq n \leq 15$
		W_n^{32}	$1 \leq n \leq 31$
		W_n^{64}	$1 \leq n \leq 63$
	1/2	W_n^{32}	$1 \leq n \leq 31$
		W_n^{64}	$1 \leq n \leq 63$
		W_n^{128}	$1 \leq n \leq 127$
3	1/3	W_n^{64}	$1 \leq n \leq 63$
		W_n^{128}	$1 \leq n \leq 127$
		W_n^{256}	$1 \leq n \leq 255$

Tabla 2.2 Asignación de Códigos

El código Walsh que utiliza este canal depende de la SR y de la razón de codificación como se muestra en la tabla 2.3, el móvil es informado por medio de canal de sincronía del enlace de bajada.

El canal de control de difusión transmite a una tasa de datos de 19.2, 9.6 o de 4.8 Kbps [1], [2], [3].

SR	Razón de codificación	Código Walsh	Condición
1	1/2	W_n^{64}	$1 \leq n \leq 63$
1	1/4	W_n^{32}	$1 \leq n \leq 31$
3	1/3	W_n^{128}	$1 \leq n \leq 127$

Tabla 2.3 Asignación de códigos

f) Canal de voceo rápido (QPCh: Quick Paging Channel)

El canal de voceo rápido esta diseñado para los sistemas de CDMA20000, con el propósito de reducir el tiempo de monitoreo del móvil, incrementando el tiempo de vida la batería. La BS utiliza este canal cuando necesita tener contacto con el móvil en la siguiente ranura de un canal de control común de bajada o del canal de voceo de bajada.

Cada portadora en CDMA2000 tiene hasta tres canales de voiceo rápido. El código Walsh que se le asigna a este canal puede ser W_{80}^{128} , W_{48}^{128} y W_{112}^{128} para una SR1 y para una SR3 utiliza W_n^{256} , donde n puede tomar valores de $1 \leq n \leq 255$ [3].

g) Canal de control de potencia común (CPCCh: Common Power Control Channel)

El canal de control de potencia común envía bits para el control de potencia hacia los diversos usuarios, los códigos Walsh asignados a este canal son W_n^{64} donde n puede tomar valores de $1 \leq n \leq 63$ para SR1. Los móviles pueden recibir información transmitida por este canal de dos formas:

- **Modo de acceso reservado:** Los usuarios ajustan la potencia de transmisión del canal de control común de subida enviando parámetros por un subcanal asociado con el canal de control de potencia común.
- **Modo de acceso controlado en potencia:** Los usuarios ajustan la potencia de transmisión del canal de acceso mejorado, el canal de reconocimiento de subida y del canal de indicador de calidad. Posteriormente solo ajusta la potencia [1], [2], [3].

h) Canal de asignación común (CACH: Common Assignment Channel)

Este canal está diseñado específicamente para CDMA2000 y proporciona respuestas rápidas de la configuración y asignación de comandos para los canales del enlace de subida, de este modo mantiene la transmisión en el acceso aleatorio de paquetes.

Sus principales funciones son:

- Controlar los canales de control común en el enlace de subida y la potencia en los subcanales cuando se encuentra en el modo de acceso reservado, en relación con el canal de control de potencia común.
- Facilita la admisión de mensajes cuando se controla la potencia en el modo de acceso (en relación con el canal de control de potencia común), especialmente en la transmisión de los paquetes en el enlace de subida.
- Asigna y controla el tráfico cuando el sistema se congestiona [1].

La asignación del código Walsh para este canal se define en la tabla 2.4.

SR	Razón de codificación	Código Walsh	Condición
1	1/2	W_n^{128}	$1 \leq n \leq 127$
1	1/4	W_n^{64}	$1 \leq n \leq 63$
3	1/3	W_n^{256}	$1 \leq n \leq 255$

Tabla 2.4. Asignación de los códigos Walsh

i) Canal fundamental de bajada (FFCh: Forward Fundamental Channel)

Una de las principales características de los sistemas CDMA2000 es la determinación de canales lógicos que realizan las tareas que previamente se realizaban por el canal de tráfico en IS-95, con la diferencia de que operan en las RC1-RC9, y enfocados a la voz y tráfico de datos a bajas tasas. Estos canales incluyen canales fundamentales, canales de control dedicados y canales suplementarios en el enlace de bajada. Este canal se emplea para tasas de transmisión bajas: 9.6, 4.8, 2.7 y 1.5 Kbps para RC1 y 14.6, 7.2, 3.6 y 1.8 Kbps para RC2 [2], [3]. La asignación de su código Walsh se define en la tabla 2.5.

RC	Código Walsh	Condición
1, 2, 3 ó 5	W_n^{64}	$1 \leq n \leq 63$
4, 6 ó 8	W_n^{128}	$1 \leq n \leq 127$
7 ó 9	W_n^{256}	$1 \leq n \leq 255$

Tabla 2.5 Asignación de códigos

j) Canal de control dedicado de bajada (FDCCh: Forward Dedicated Control Channel)

Opera con las RC3 a RC9 usadas para la transmisión de datos, control de potencia y de la información [3].

k) Canal suplementario de bajada (FSCh: Forward Supplemental Channel)

Este canal solamente está disponible para RC3 a RC9 y transmite servicio de datos a tasas superiores que los datos transmitidos por los canales fundamentales.

Cada canal de tráfico puede asignar a un móvil hasta 2 canales suplementarios [1]. Este canal utiliza códigos convolucionales o turbocódigos para la RC5.

Para SR1 la BS puede utilizar OTD o STS en el Canal de Control Dedicado, el Canal Fundamental, el Canal Fundamental, el Canal Suplementario, el Canal de Control de difusión, el Canal de Voceo rápido, el Canal de control de Potencia Común, el Canal de Asignación común y el Canal de Control Común. Para SR3 la BS puede utilizar diversidad espacial para transmitir al móvil el Canal de Control Dedicado, el Canal Fundamental y el Canal suplementario.

1) Canal Código Suplementario de Bajada (FSCCh: Forward Supplemental Channel)

Sólo esta disponible en las RC1 y RC2 sobre el canal de tráfico, los cuales operan junto con el canal fundamental, siendo el canal de tráfico que proporciona servicio de datos de alta tasa [5].

En la tabla 2.6 se muestran las tasas de transmisión en el enlace de bajada para SR1 y SR3, así como la RC en la que trabajan los canales.

Tipo de canal	Tasa de Transmisión (kbps), RC	
	SR1	SR3
Canal suplementario	153.6,76.8,38.4,19.2,9.6,4.8,2.7, o 1.5(RC3)	307.2,153.6,76.8,38.4,19.2,9.6,4.8,2.7 o 1.5 (RC6)
	307.2,153.6,76.8,38.4,19.2,9.6,4.8,2.7 o 1.5 (RC4)	614.4,307.2,153.6,76.8,38.4,19.2,9.6,4.8,2 .7 o 1.5 (RC7)
	230.4,115.2,57.6,28.8,14.4,7.2,3.6 o 1.8 (RC5)	460.8,230.4,115.2,57.6,28.8,14.4,7.2,3.6 o 1.8 (RC8)
	Convolucional ó turbocódigos (>14.4) 1/2(RC4) 1/4(RC3 o RC5)	1036.8,460.8,230.4,115.2,57.6,28.8,14.4,7 .2,3.6, o 1.8(RC9)
		Convolucional ó turbocódigos (>14.4) 1/3RC7 1/4RC8 1/2RC9

Tabla 2.6 Tasas de transmisión en el enlace de bajada para SR1 y SR3

Tipo de canal	Tasa de Transmisión (kbps), RC	
	SR1	SR3
Canal de sincronía	1.2 Razón de codificación: 1/2	1.2 Razón de codificación: 1/3
Canal de voceo	9.6 ó 4.8 Razón de codificación: 1/2	
Canal de difusión	19.2 (ranura de 40ms), 9.6 (ranura de 80ms) ó 4.8 (ranura de 160ms) Razón de codificación: 1/2	19.2 (ranura de 40ms), 9.6 (ranura de 80ms) ó 4.8 (ranura de 160ms) Razón de codificación: 1/3
Canal de voceo rápido	4.8 ó 2.4 Ninguna	4.8 o 2.4 Ninguna
Canal de control de potencia común	9.6 Ninguna	14.4 Ninguna
Canal asignación común	9.6 Razón de codificación: 1/2	9.6 Razón de codificación: 1/3
Canal de control común	38.4 (tramas 5-,10, o 20 ms) 19.2(tramas 10- o 20 ms), o 9.6(tramas 20 ms) Razón de codificación:1/4 ó 1/2	38.4 (tramas de 5,10- o 20 ms) 19.2(tramas 10 o 20) o 9.6 (tramas de 20 ms) Razón de codificación: 1/3
Canal de control dedicado	9.6 (RC3 ó RC4) 14.4(tramas de 20ms) o 9.6(tramas de 5 ms) (RC5) Razón de codificación: 1/4 (RC3 o RC5) 1/2 (RC4)	9.6 (RC6 o (RC7) 14.4 (tramas de 20 ms), o 9.6(tramas 5 ms) (RC8 o RC9); Razón de codificación:1/6 (RC6) 1/3 (RC7) 1/4 (RC8, 20 ms) 1/3 (RC8, 5 ms) 1/2 (RC9, 20 ms) 1/3 (RC9, 5ms)
Canal de código suplementario	9.6 (RC1),14.4 (RC2) Razón de codificación 1/2 (RC1 o RC2)	

Tabla 2.6 Tasas de transmisión en el enlace de bajada para SR1 y SR3 (continuación)

Tipo de canal	Tasa de Transmisión (kbps), RC	
	SR1	SR3
Canal fundamental	9.6,4.8, o 1.2 (RC1), 14.4,7.2,3.6 o 1.8 (RC2), 9.6,4.8,2.7,1.5(tramas 20ms) 9.6 (tramas 5ms) (RC5) 14.4,7.2,3.6,1.8(tramas 20ms) 9.6(tramas 5ms)(RC5) Razón de codificación 1/2(RC1,RC2 o RC4) 1/4 (RC3 o RC5)	9.6,4.8,2.7 o 1.5 (tramas 20ms), 9.6(tramas 5 ms)(RC6 o RC7), 14.4,7.2,3.6,1.8(tramas 20ms) 9.6(tramas 5ms)(RC8 o RC9) Razón de codificación 1/6(RC6) 1/3(RC7) 1/4(RC8, 20 ms) 1/3(RC8,5ms) 1/2(RC9,20 ms) 1/3(RC9, 5ms)

Tabla 2.6 Tasas de transmisión en el enlace de bajada para SR1 y SR3 (continuación)

2.1.3 Estructura del enlace de subida

En el enlace de subida de CDMA2000 existen cinco canales lógicos, en la figura 2.5 se presenta la división de estos canales, en donde su configuración depende de la RC y de la SR utilizadas por el móvil. En la tabla 2.7 se muestran las RC contempladas en el enlace de subida para redes de CDMA2000. La tabla proporciona las principales características de cada RC y las asocia con las SR.

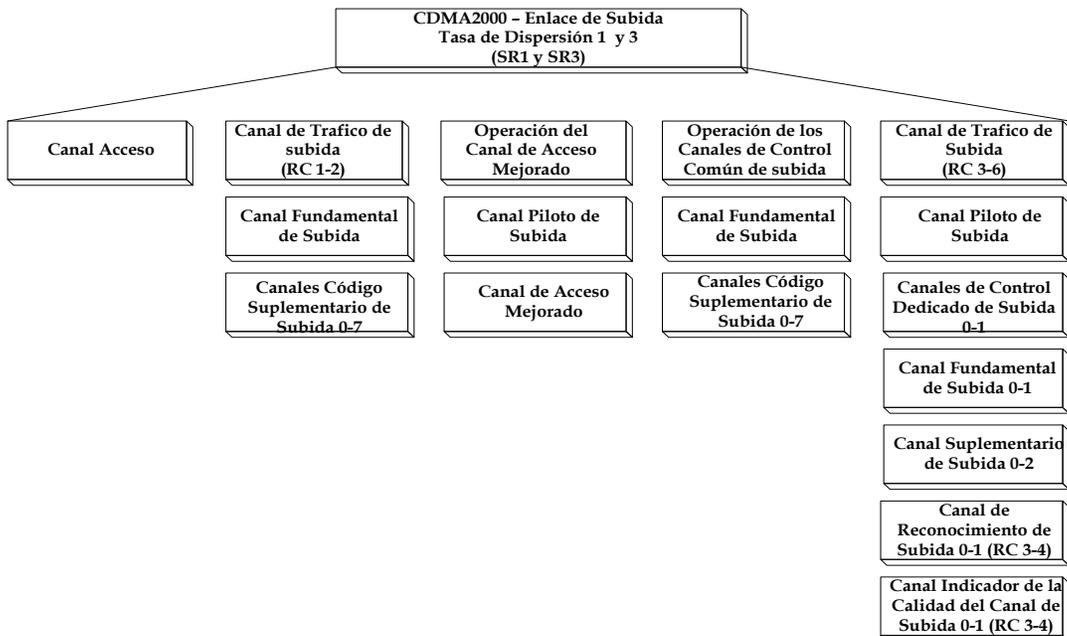


Figura 2.5 Estructura del los canales del enlace de subida.

RC	SR	Tasa de transmisión (Kbps)	Razón de codificación	Esquema de Modulación
1	1	1.2, 2.4, 4.8, 9.6	1/3	Ortogonal de orden 64
2	1	1.8, 3.6, 7.2, 14.4	1/2	Ortogonal de orden 64
3	1	1.2, 1.35, 1.5, 2.4, 2.7, 4.8, 9.6 , 19.2, 38.4, 76.8, 153.6, 307.2	1/4 1/2	BPSK con el canal piloto de subida
4	1	1.8, 3.6, 7.2, 14.4 , 28.8, 57.6, 115, 230.4	1/4	BPSK con el canal piloto de subida
5	3	1.2, 1.35, 1.5, 2.4, 2.7, 4.8, 9.6 , 19.2, 38.4, 76.8, 153.6, 307.2, 614.4	1/4 1/3	BPSK con el canal piloto de subida
6	3	1.8, 3.6, 7.2, 14.4 , 28.8, 57.6, 115.2, 230.4, 460.8, 1036.8	1/4 1/2	BPSK con el canal piloto de subida
7	1	19.2, 40.8, 79.2, 156, 309.6, 463.2, 616.8, 924, 1231.2, 1538.4, 1845.6	1/5	BPSK con el canal piloto de subida QPSK con uno o dos canales piloto de subida 8-PSK con uno o dos canales piloto de subida

Tabla 2.7 Radio configuraciones evaluadas para el enlace de subida del sistema CDMA2000

a) Canal piloto de subida (RPiCh: Reverse Pilot Channel)

Este canal se emplea para ayudar a la BS a detectar transmisiones hechas por el móvil. Así como también puede utilizarse para transmitir bits de control de potencia, bits indicadores y para servir como referencia de potencia y tiempo para los canales del enlace de subida. El canal piloto es multiplexado en código con otros canales del enlace de subida usando el código Walsh W_0^{32} . El móvil solo transmite por este canal cuando esta operando de RC3 a RC6, mientras están en uso los canales de acceso mejorado, el canal de control común o el canal de tráfico (fundamental, control dedicado o suplementario) en el enlace de subida. El canal piloto puede operar de dos modos:

- Como un preámbulo, cuando antes se transmitieron, los canales de acceso mejorado, los canales de control común ó canales de tráfico, sin transmitir los bits de control de potencia.
- Cuando transmite simultáneamente con algún otro canal lógico, con el esquema de control de potencia de bajada habilitado, transmitiendo los bits de control de potencia para los canales de bajada y actuando como referencia de tiempo para la detección coherente [1], [3], [6].

b) Canal de Acceso de Subida (RACH: Reverse Access Channel)

El móvil lo utiliza para iniciar comunicación con la BS y para responder los mensajes del canal de voice. La transmisión del canal de acceso se codifica y la señal de espectro disperso se modula. Este canal es usado para cambios en los mensajes de señalización cortos, como orígenes de llamada y registros [3], [4] y [1].

c) Canal de Acceso Mejorado (EACH: Enhanced Access Channel)

Los usuarios que funcionan con RC3-RC6 utilizan los canales de acceso mejorado para sustituir a los canales de acceso. Estos canales realizan tareas como la autenticación, el inicio de la comunicación con una BS y respuesta a la orden de la BS.

Los canales de acceso mejorado transmiten mensajes cortos, tales como de llamada, respuestas de voz y creación de la llamada, así como pueden transmitir los mensajes de datos de tamaños moderados, este canal utiliza el código Walsh W_2^8 [1],[2],[3].

d) Canal de Control Común de Subida (RCCCh: Reverse Common Control Channel)

Esta canal se utiliza para la señalización y transmisión de información a la BS cuando el canal de tráfico no está en uso.

Este canal se puede utilizar de dos maneras: modo de acceso reservado, puede controlar potencia y soportar transferencia de llamada sin interrupción; y modo de acceso designado.

El móvil transmite información a tasas de 9.6, 19.2 y 38.4 Kpbs, envía mensajes por la capa 3 del modelo de referencia OSI y la subcapa MAC, utiliza el código Walsh W_2^8 con una razón de codificación de 1/4 para SR1 y SR3 [4].

e) Canal Fundamental de Subida (RFCh: Reverse Fundamental Channel)

Se utiliza de la RC1 a RC6, soporta una tasa de 9.6 Kbps con subtasas de 4.8, 2.7 y 1.5 Kbps o una tasa de 14.4 Kbps con subtasas de 7.2, 3.6 y 1.8 Kbps. Para estas tasas se utilizan códigos convolucionales, y éste canal utiliza el código Walsh W_4^{16} .

f) Canal de Control Dedicado de Subida (RDCCh: Reverse Dedicated Control Channel)

Este canal se utiliza para la transmisión y control de la información del móvil a la BS durante una llamada. El canal de tráfico opera con un canal fundamental ó con un canal de control dedicado para proporcionar tasas altas en los servicios.

El móvil transmite información a una tasa de 9.6 Kbps para RC3 y RC5 y para RC4 y RC6 transmite a 14.4 Kbps, utiliza el código Walsh W_8^{16}

g) Canales Suplementarios de Subida (RSCh: Reverse Supplemental Channel)

Son canales de tráfico de subida, pero usados únicamente de RC3 a RC6. Uno o dos de estos canales se transmiten por la BS, permitiendo mayores tasas de datos que las transmitidas por los canales fundamentales. Este canal mejora la transmisión de datos del canal de tráfico de subida, obteniendo como resultado una mayor capacidad.

Comparando los canales de IS-95 con los implementados en CDMA2000, en este último se tiene que en un móvil puede usar hasta dos canales suplementarios mientras que en IS-95 se podían usar hasta siete canales código suplementario.

h) Canales Código Suplementarios de Subida (RSCCh: Reverse Supplemental Code Channel)

Los canales código suplementarios fueron creados y definidos en el sistema IS-95B para permitir la transmisión de datos a altas tasas. Después en CDMA2000, estos canales se utilizan solo por las RC1 y RC2 para la compatibilidad con sistemas anteriores. Un móvil solo puede transmitir hasta siete canales simultáneamente.

Cada canal código suplementario transmite a una tasa de transmisión máxima de 9.6 Kbps ó 14.4 Kbps. En la tabla 2.8 se muestran las tasas de transmisión en el enlace de subida para SR1 y SR3.

Tipo de canal	Tasa de transmisión (Kbps)		
		SR1	SR3
Canal de acceso	Cabecera	9.6	9.6
Canal de acceso mejorado	Datos	38.4(tramas 5,10 ó 20ms), 19.2(tramas 10 ó 20ms) 9.6 (tramas 20ms)	38.4(tramas 5,10 ó 20ms) 19.2(tramas 10 ó 20ms) 9.6 (tramas 20ms)
Canal de acceso		4.8	N/A
Canal de control		38.4(tramas 5,10 ó 20ms) 19.2(tramas 10 ó 20ms)o 9.6 (tramas 20 ms)	38.4(tramas 5,10 ó 20ms), 19.2(tramas 10 ó 20ms), 9.6(tramas 20ms)
Canal de control dedicado	RC3	9.6	N/A
	RC4	14.4(tramas 20ms) o 9.6 (tramas 20ms)	N/A
	RC5	N/A	9.6
	RC6	N/A	14.4 (tramas 20 ms) o 9.6 (tramas 5 ms)
Canal código suplementario	RC1	9.6	N/A
	RC2	14.4	N/A
Canal fundamental	RC1	9.6,4.8,2.4 o 1.2	N/A
	RC2	14.4,7.2,3.6 o1.8	N/A
	RC3	9.6,4.8,2.7 o1.5 (tramas 20ms) o 9.6(tramas 5 ms)	N/A
	RC4	14.4,7.2,3.6 o 1.8 (tramas 20ms) o 9.6(tramas 5 ms)	N/A
	RC5	N/A	9.6,4.8,2.7 o1.5 (tramas 20ms) o 9.6(tramas 5ms)
	RC6	N/A	14.4,7.2,3.6 o1.8 (tramas 20 ms) o 9.6 (tramas 5 ms)

Tabla 2.8 Tasas de transmisión de los canales de enlace de subida para SR1 y SR3.

Tipo de canal	Tasa de transmisión (Kbps)		
		SR1	SR3
Canal suplementario	RC3	307.2,153.6,76.8,38.4,19.2 9.6,7.5 o 1.5 (tramas 20 ms) 153.6,76.8,38.4,19.2,9.6,4.8 2.4 o 1.35 (tramas 40 ms) 76.8,38.4,19.2,9.6,4.8,2.4 o 1.2 (tramas 80 ms)	N/A
	RC4	230.4,115.2,57.6,28.8,14.4, 7.2,3.6 o 1.8	N/A
Canal suplementario	R5	N/A	614.4,307.2,153.6,76.8,38.4, 19.2,9.6,4.8,2.7 o 1.5 (tramas 20 ms) 307.2,153.6,76.8,38.4,19.2, 9.6,4.8,2.4,1.35 (tramas 40 ms) 153.6,76.8,38.4,19.2,9.6, 4.8,2.4 o 1.2 (tramas 80 ms)
	R6	N/A	1036.8,518.4,460.8,259.2, 230.4,115.2,57.6,28.8,14.4, 72.3 o 1.8

Tabla 2.8 Tasas de transmisión de los canales de enlace de subida para SR1 y SR3.

2.1.4 Codificación de canal

En CDMA2000 se utilizan dos formas de codificación de canal, los códigos convolucionales que sólo eran utilizados en IS-95 y los turbo códigos los cuales operan a mayores tasas de transmisión y bajos valores de E_b/N_o resultando una mayor capacidad en el sistema [5].

Turbo códigos

Los turbo códigos son una mejora de los códigos concatenados⁷ ya que reducen en mayor proporción la tasa de error, cuentan con un algoritmo que implica suministrar salidas de un decodificador a la entrada de otro y repetirlo de manera iterativa para producir decisiones más confiables, lo cual trae como desventaja el incremento en el retardo de la decodificación.

Para aproximarse más al límite de Shannon⁸ requieren incrementar la longitud de las palabras código (en un bloque lineal) ó en la memoria (en un convolucional), esto trae como consecuencia el incremento exponencial en la complejidad de la decodificación.

Los turbo códigos se aplican en los sistemas celulares basados en CDMA2000 para la transmisión de altas tasas de datos ya que permiten reducir la E_b/N_o requerida. La figura 2.6 muestra los componentes de los turbo códigos:

- Concatenación en paralelo de dos codificadores
- Decodificación iterativa (“Turbo”)

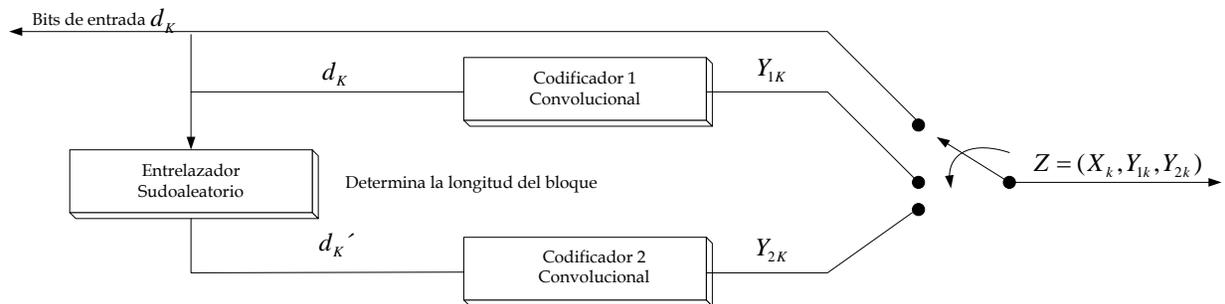


Figura 2.6 Diagrama de un turbo código

Donde:

X_k Bits sistemáticos

Y_{1k} Primer grupo de bits de paridad

Y_{2k} Segundo grupo de bits de paridad

⁷ Los códigos concatenados ayudan a reducir la tasa de error sin aumentar su complejidad y son efectivos para corregir ráfagas de errores. La decodificación casi-óptima para estos códigos se basa en la decodificación iterativa.

⁸ El límite de Shannon busca una probabilidad de error 0 reduciendo la E_b/N_o .

Los bits de información (d_k) se transmiten como parte de la palabra código Z por lo cual se considera turbo código sistemático. El turbo decodificador se compone de dos decodificadores elementales en un esquema de concatenación en serie como muestra la figura 2.7.

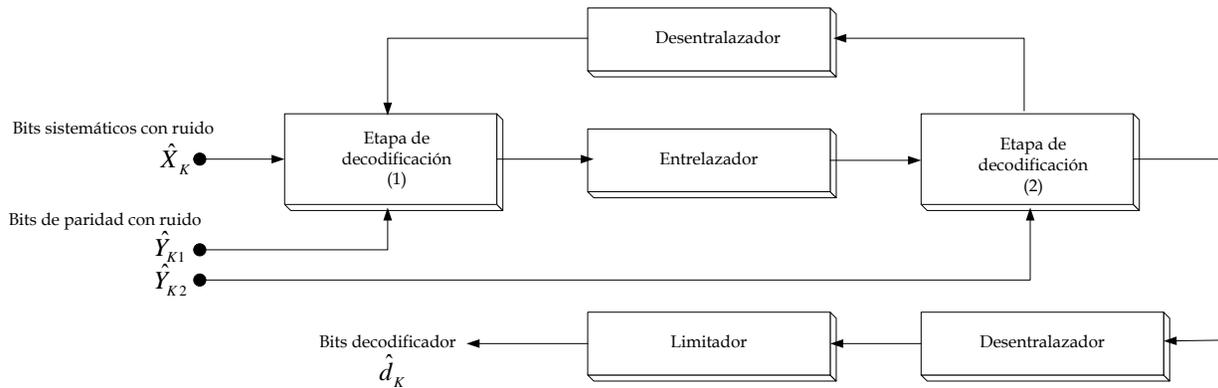


Figura 2.7 Diagrama de un turbo decodificador

La etapa de decodificación (1) estima la secuencia recibida y mejora la confiabilidad de las decisiones [8].

2.1.5 Control de potencia

El control de potencia en CDMA2000 1x se da de la siguiente manera:

a) Control de potencia en el enlace de bajada

El control de potencia en el enlace de bajada en CDMA2000, funciona similarmente al enlace de subida utilizado en IS-95. El proceso consiste de dos lazos a una frecuencia de 800 Hz. Su principal objetivo en CDMA2000 es incrementar la capacidad de llamadas en el enlace debido a las siguientes mejoras:

- Control de potencia en el enlace de bajada a una alta velocidad.
- En el lazo cerrado se tiene una respuesta más rápida.
- Control de las variaciones de la potencia por medio de las BSs.

El control de potencia en el enlace de bajada opera a altas tasas y compensa los desvanecimientos rápidos tipo Rayleigh.

Debido a la rapidez con que la estación base ubica la potencia necesaria para el móvil, incrementa la capacidad de llamadas en este enlace. En control de potencia en CDMA2000 1x en el enlace de bajada se da cada 1.25ms, 2.5ms ó 5ms.

La mejora que se da en CDMA2000 en el control de potencia sobre este enlace, es la adición de dos canales, el canal fundamental y el canal suplementario. Para el control de potencia de estos dos canales se han propuestos dos esquemas:

- **Control de potencia del canal.** Basado en la ejecución de altas tasas de canal entre el canal fundamental y el canal suplementario. La ganancia para las tasas bajas de canal esta determinado en relación a las altas tasas del canal.
- **Control de potencia independiente.** En este caso la ganancia del canal fundamental y del canal suplementario son determinadas por separado [2] , [3]

b) Control de potencia del enlace de subida.

El principal objetivo en el enlace de subida es resolver el problema que ocasiona el efecto cerca lejos. Este problema se resuelve controlando la potencia de transmisión por cada móvil en este enlace cada 1.25 ms, y requiere que la relación señal a ruido sea la misma en la BS.

El control de potencia puede ser dinámico para compensar las variaciones dependientes del tiempo de los ambientes de Radio Frecuencia. En IS-95 el control de potencia en lazo abierto solo involucra al móvil. Este estima las pérdidas por trayectoria y en base a estas determina la potencia de transmisión. Debido a que los enlaces operan en diferentes frecuencias de portadora, el control de potencia es inadecuado y muy lento para compensar los desvanecimientos.

En los sistemas de CDMA2000, el control de potencia de lazo cerrado del enlace de bajada se basa en el modelo de los sistemas de IS-95 con la implementación de dos componentes principales que son el lazo interno y externo.

El sistema soporta los mismos lazos pero integra la función del control de potencia de los canales fundamentales y suplementarios de una manera más simple.

Esto se debe a la introducción del canal piloto en el enlace de subida, el cual se utiliza como referencia para medir la potencia del lazo abierto y del lazo externo. El canal piloto en el enlace de subida se utiliza para medir y aumentar la potencia en los lazos abiertos y cerrados y estos realizan los cambios de esta misma y los aplican en el canal fundamental.

En CDMA2000 el móvil transmite el canal fundamental de una manera continua con la misma sub tasa, mientras que en IS-95 el canal de tráfico de subida se obtiene por el móvil dependiendo de las subtasas. Los aumentos en la potencia se realizan por canal y por la tasa de datos. En el enlace de subida para el control de potencia de lazo abierto, el móvil aproxima la potencia transmitida de los canales basados en la potencia recibida. En IS-95 la función del control de potencia de lazo abierto es localizar al móvil, sin embargo la BS le proporciona los parámetros que el móvil necesita para operar en este lazo abierto. Este lazo compensa las pérdidas por trayectoria del móvil a la estación base [2],[3].

2.2. Capa de enlace de datos

IS-95-B tiene una estructura de capas diseñada para proporcionar voz, datos por paquetes (hasta 64 kbs), datos por circuitos (FAX asíncrono) y servicio simultáneo de voz y paquetes de datos [4].

CDMA2000 proporciona servicios que involucran a las capas inferiores del modelo OSI, es decir; a la capa 1 ó física y la capa 2 ó de enlace de datos. Así mismo la capa de enlace se divide en subcapas: control de acceso al enlace (LAC: Link Access Control) y en control de acceso al medio (MAC: médium Access Control).

Las aplicaciones y protocolos correspondientes a las capas superiores del modelo OSI (capa 3 a la 7) utilizan los servicios que proporciona la subcapa LAC, como los servicios de señalización y servicios de voz.

También incluye un mecanismo de control de Calidad de Servicio (QoS) que equilibra las variaciones de QoS necesarios para servicios múltiples.

El diseño de las subcapas LAC y MAC están determinadas por:

- La necesidad de soportar amplios servicios de las capas superiores.
- Los requisitos para proporcionar gran eficiencia en el servicio de datos con funcionamiento amplio de 1.2 Kbps a 2Mbps.
- La necesidad de soportar QoS avanzada en servicios de paquetes de datos y de circuitos.
- La demanda para servicios multimedia, los cuales soportan servicios de voz, de datos por paquetes y servicios de datos por circuitos, cada uno con una QoS específica [2], [4], [5].

2.2.1 Subcapa de control de acceso al medio (MAC)

La subcapa MAC proporciona tres funciones importantes:

- Estado de control MAC: Controla el acceso del servicio de datos (por paquetes y por circuitos) a la capa física.
- Mejor entrega posible: Transmisión confiable en la transmisión sobre el protocolo de enlace (RLP: Radio Link Protocol) proporcionando un mejor nivel de fiabilidad.
- Multiplexaje y control de QoS: Los niveles de QoS se negocian por medio de la petición de servicios.

Para IS-95-B la subcapa MAC tiene dos estados, activo⁹ e inactivo¹⁰, como se presenta en la figura 2.8, la cual actúa a una baja velocidad en el servicio de datos.

En CDMA2000 este modelo resulta inadecuado debido a que para los servicios de datos requiere de velocidades más altas.

⁹ Estado activo cuando se le asignan a los usuarios canales de control, canales de tráfico y de control de potencia. La capa de enlace mantiene conexión con el Protocolo punto a punto (PPP: Point-to-Point Protocol).

¹⁰ Estado inactivo cuando no se le asigna un canal de tráfico al móvil y por lo tanto se considera como un estado anterior a la activación del servicio de paquete de datos.

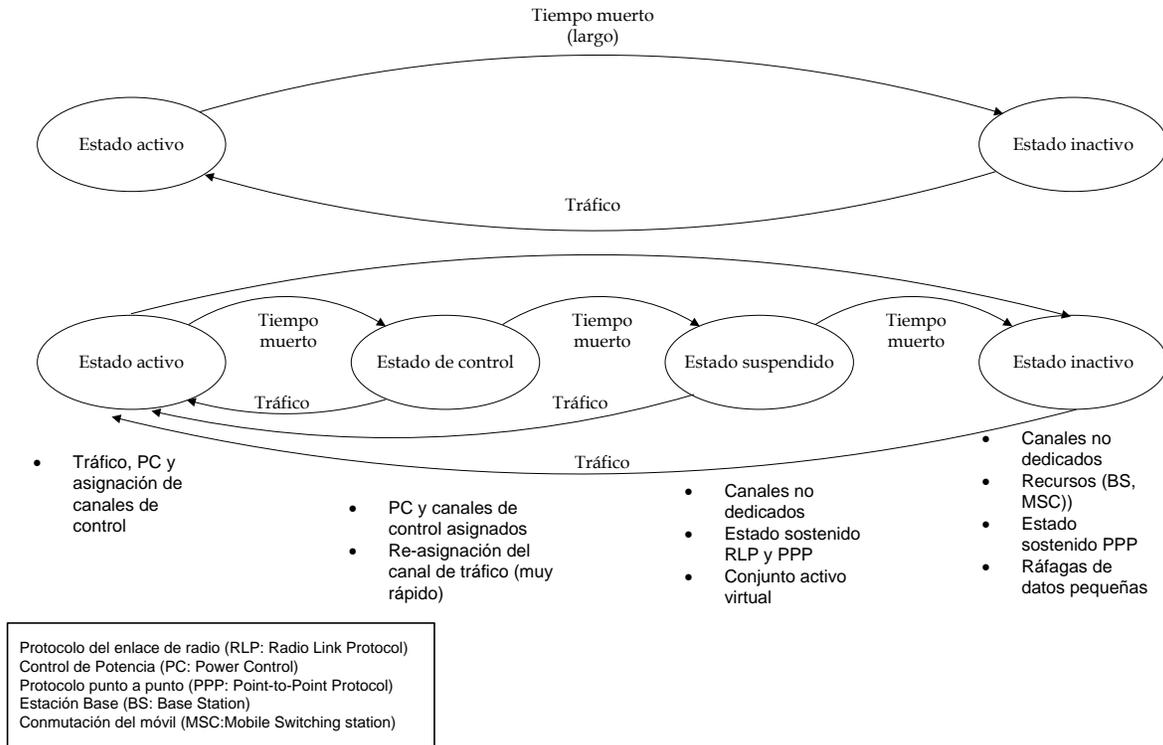


Figura 2.8. Comparación de IS-95-B con la capa MAC de CDMA2000

CDMA2000 incorpora dos estados intermedios entre el estado activo e inactivo de IS-95-B:

- Estado de control sostenido: Es este estado un canal de control dedicado se mantiene entre el usuario y la BS, el cual controla las órdenes de la capa MAC. El control de potencia se mantiene con la operación de ráfagas de alta velocidad.
- Estado suspendido: En este estado no se mantiene algún canal dedicado. El protocolo de estado de enlace se mantiene y la BS y el móvil mantienen un “conjunto activo virtual”, que permite identificar la BS que puede utilizarse ya sea por la estación base o por el móvil en el caso de que se tenga tráfico de datos por paquetes.

Un modo de ráfaga de datos se agrega en el estado inactivo para apoyar la entrega de mensajes cortos, sin pasar al estado activo [2], [4], [6].

2.2.2 Subcapa de Control de Acceso del Enlace (LAC)

La subcapa LAC proporciona control en la transmisión del enlace, así mismo si las capas inferiores proporcionan una QoS adecuada, ésta subcapa puede ser omitida [2].

La subcapa LAC se subdivide de la siguiente manera:

- **Autenticación:** Es responsable para ejecutar las funciones relacionadas a la autenticación. Solo se utiliza en los canales de señalización del enlace de subida.
- **Petición de retransmisión automática (ARQ: Automatic Retransmission Request):** Es el protocolo responsable de detectar y rechazar los paquetes redundantes o con errores de las capas superiores.
- **Direccionamiento (addressing):** Es responsable de controlar los campos relacionados con la dirección en los mensajes.
- **Segmentación y Concentración:** Es responsable de dividir los datos en la transmisión y preparar estos para que sean reensamblados en sus PDU originales en el lado del receptor.
- **Utilidad:** Es responsable de convertir o de recuperar los tipos de mensajes de la Unidad de Servicio de Datos (SDU: Service Date Unit) de los tipos de mensaje de la Unidad de Datos de Protocolo (PDU: Protocol Date Unit). Es usada por el canal de señalización común, canal de señalización dedicado y el canal de control de acceso al medio dedicado en ambos enlaces. [2], [4], [5], [7].

2.3 Transferencia de llamada (Handoff) en CDMA2000 1x

CDMA2000 se utiliza el manejo de recursos de radio (RRM: Radio Resource Management), evitando los tiempos de decisión prolongados en el cual el móvil, cambia de celda, sector o sistema. Esto mejora los mensajes que permiten la asignación del canal, el RRM y el sistema de respuestas de negociación del móvil.

2.3.1 Algoritmo de transferencia de llamada para CDMA2000 1x

IS-95B como CDMA2000 operan con umbrales dinámicos, por lo tanto utilizan los parámetros que utiliza IS-95A e implanta a su vez nuevos parámetros entre el Conjunto Candidato y el Conjunto Activo, siempre y cuando en el Conjunto Activo se encuentren más de tres canales piloto:

- $SOFT_SLOPE = 2.0 \text{ dB}$
- $ADD_INTERCEPT = T_ADD - TQ * SOFT_SLOPE$
- $DROP_INTERCEPT = ADD_INTERCEPT - 2.0 \text{ dB}$

Donde el umbral de calidad (TQ: Threshold Quality) representa la intensidad del Conjunto Activo para el cual la intensidad del conjunto activo, empieza a desviarse de IS-95A a IS-95B/CDMA2000, su valor común es de 9.0 dB, como se muestra en la figura 2.9.

En la figura 2.10 se muestra el intercambio de conjuntos de un canal piloto en CDMA2000.

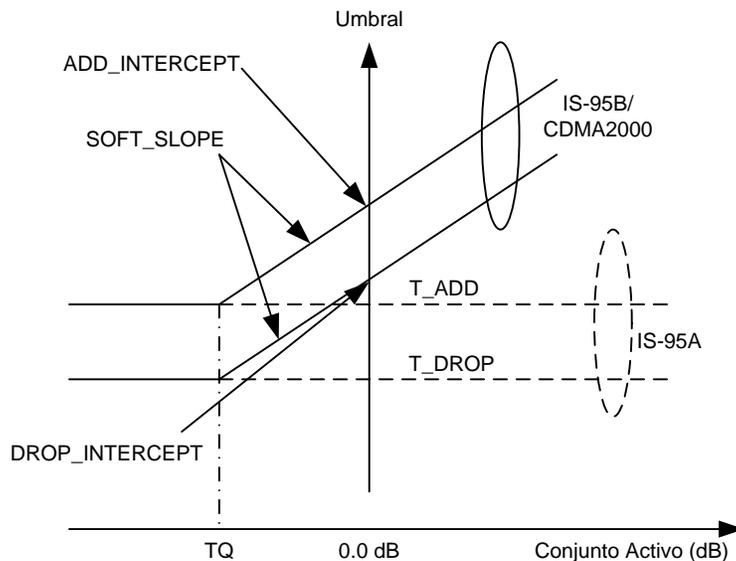


Figura 2.9 Umbral de Calidad (umbral vs la intensidad del conjunto activo)

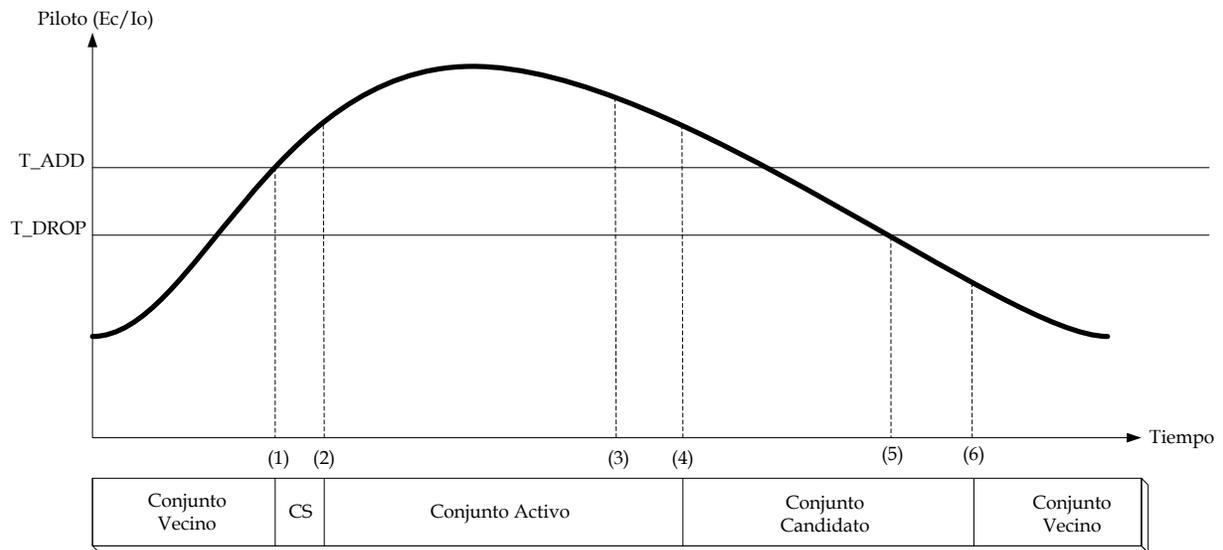


Figura 2.10 Intercambio de conjuntos de un canal piloto en CDMA2000.

El intercambio de conjuntos se realiza de la siguiente forma [9]:

(1) Si el valor de E_c/I_o excede el valor $DAT = \max((SOFT_SLOPE \times 10 \times \log_{10}(E_c/I_o) + ADD_INTERCEPT), T_ADD)$ el móvil envía un PSMM a la BS.

(2) El móvil recibe de la BS un mensaje de dirección de transferencia de llamada extendido (EHDM: Extended Handoff Direction Message) o un mensaje general de dirección de transferencia de llamada (GHDM: General Handoff Direction Message). Posteriormente transfiere el canal piloto al conjunto activo y envía un HCM a la BS.

(3) Si el valor de la E_c/I_o se encuentra por debajo del $DDT = \max((SOFT_SLOPE \times 10 \times \log_{10}(E_c/I_o) + DROP_INTERCEPT), T_DROP)$, el móvil comienza un temporizador. Si el temporizador expira el móvil envía un PSMM a la BS.

(4) Si el móvil recibe de la BS un EHDM o un GHDM, transfiere el canal piloto al conjunto candidato, y envía a la BS un HCM.

(5) Cuando el valor de la E_c/I_o se encuentra por debajo del T_DROP , el móvil inicializa el T_TDROP .

(6) El temporizador expira, el móvil transfiere el canal piloto al conjunto vecino y no envía un PSMM a la BS.

Como se puede observar en CDMA2000 los canales pilotos no se mueven directamente del conjunto activo al conjunto vecino, esto se debe a los umbrales dinámicos utilizados.

REFERENCIAS

- [1] Leonhard Korowajszuk, Bruno de Souza Abreu Xavier, "Designing CDMA2000 Systems", John Wiley & Sons LTD, 2004
- [2] Garg, Vijay Kumar, "Wireless Network Evolution: 2G to 3G", Prentice Hall PTR, 2002
- [3] TIA/EIA/IS-2000.2.D, "Physical Layer for cdma2000® Spread Spectrum Systems", March 2004.
- [4] Douglas N. Knisely, Quinn Li, "CDMA2000: A Third-Generation Radio Transmission Technology", Bell Labs Technical Journal, Vol 3, No. 3, September 1998, pags. 63-78
- [5] Douglas N. Knisely, Sarath Kumar, "Evolution of Wireless Data Services: IS-95 to CDMA2000", IEEE Communications Magazine, October 1998
- [6] TIA-2000.3-D, "Medium Access Control (MAC) Standard for cdma2000® Spread Spectrum Systems", April 2004.
- [7] TIA-2000.4-D, "Signaling Link Access Control (LAC) Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems", April 2004.
- [8] Goldsmith Andrea, "Wireless Communication", Cambridge University Press, 2005.
- [9] Walid K. M. Ahmed, "Simulation and Performance Evaluation of IS-95 Handoff Algorithms", Bell Labs Technical Journal, Vol 7, No. 1, 2002, Págs. 165-170
- [10] Bongkarn Homman, Kunsriruksakul Vikorn "A Comparative Performance Evaluation of Soft Handoff between IS-95A and IS-95B/cdma2000", The IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. Año 2000, IEEE APCCAS 2000, Págs. 34-37

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

EVOLUCIÓN DE CDMA2000

CDMA2000 tiene 3 fases de evolución posteriores a 1x, éstas son CDMA2000 1x-EV-DO la cual se caracteriza por especializarse en los servicios de datos, la segunda es CDMA2000 1x-EV-DV donde los servicios se amplían a voz y datos; y por último es CDMA 2000 3x el cual implementa el uso de tres portadoras.

3.1 CDMA2000 1x EV-DO

CDMA2000 1xEV-DO es la primera fase de la evolución de CDMA2000. Las características de CDMA2000 1xEV-DO son descritas en el estándar IS-856 conocido también como Datos por Paquetes de Alta Tasa (HRPD: High Rate Packet Data) [4] ahora comúnmente denominado 1xEV-DO, la característica principal de este, es que transmite voz y datos a través de dos canales separados [1].

De acuerdo a las necesidades para la transmisión de datos 1x-EV-DO permite una amplia gama de tasas de transmisión de datos, en la tabla 3.1 se muestran las tasas de transmisión mínimas necesarias para 1x-EV-DO para algún ambiente en particular.

	Enlace de bajada por usuario	Enlace de subida por usuario (Kbps)
Tasa de datos máxima vehicular	1.25 Mbps	144
Tasa de datos media vehicular	600 Kbps	144
Tasa de datos máxima para peatones fijos.	2 Mbps	144

Tabla 3.1 Tasa de transmisión iniciales requeridas para 1xEV-DO

Para aplicaciones de HRPD, en la tabla 3.2 se presentan las tasas de transmisión máximas proporcionadas para esta tecnología [2].

Un concepto clave para una transmisión de datos alta es el protocolo de solicitud de repetición automática híbrida (HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request) el cual reproduce los procesos del protocolo de enlace de radio (RLP: Radio Link Protocol) en la capa física de CDMA2000 1xEV-DO.

Enlace de bajada	Enlace de subida (Kbps)
38.4 Kbps	9.6
76.8 Kbps	19.2
153.6 Kbps	38.4
307.2 Kbps	76.8
614.2 Kbps	153.6
1.2288 Mbps	
1.8432 Mbps	
2.4572 Mbps	

Tabla 3.2 Tasa de transmisión máximas para HRPD en 1xEV-DO

Para la utilización del HARQ es necesario que los datos que se encuentran en esta capa sean codificados en subpaquetes, que el transmisor esté enviando constantemente hasta que se le notifique lo contrario. En el receptor estos subpaquetes son identificados y se van acumulando hasta que se encuentra el valor requerido de la relación señal a ruido (SNR: Signal to Noise Ratio), dando como consecuencia que se necesite menos potencia de transmisión y exista menos interferencia entre los usuarios [1].

Los sistemas de 1xEV-DO pueden ser desplegados en toda la banda de frecuencia donde los sistemas de PCS han sido desplegados. En la tabla 3.1 se muestran los requerimientos de las tasas de datos iniciales de 1xEV-DO especificados en el estándar.

Uno de los objetivos fué desarrollar 1xEV-DO sobre estaciones bases existentes, que pudieran operar sobre varios canales de RF, incluyendo IS-95 y CDMA2000 1x, con la finalidad de reducir el impacto que se tiene en infraestructura y terminales, en lo que respecta a costos.

El objetivo de 1xEV-DO es apoyar a usuarios fijos y móviles, proporcionándoles ancho de banda, potencia, con el fin de aprovechar al máximo su capacidad y que sea espectralmente eficiente.

Estos requerimientos los consigue a través de las técnicas de codificación y modulación adaptable (AMC: Adaptive Modulation and Coding), las cuales eligen el mejor esquema de modulación y de codificación para el canal y para la tasa de transmisión. Estas técnicas incluyen métodos para la adaptación del enlace de llamada, que consiste en el estado de la información del canal, adaptación en diversidad de tiempo, HARQ y diversidad de multiusuarios.

La adaptación del enlace consiste en determinar cuales son las condiciones más eficientes para un enlace e incluyen:

- Detección rápida de las condiciones de transmisión del canal (en términos del nivel de la señal de interferencia y de la capacidad de tráfico)
- Modulación adaptable.
- Una planificación de acuerdo al tipo de demanda, numero de usuarios y tiempo de uso para determinar que usuario es atendido primero.

La modulación adaptable selecciona el mejor tipo de modulación (QPSK, 8PSK o 16QAM) en base a las condiciones de los canales de RF, para lograr un mejor aprovechamiento del ancho de banda. También es responsable del tamaño de los paquetes a transmitir dependiendo del tipo de codificación, del número de repeticiones y de los datos dispersados.

En el receptor se pueden detectar los errores y se manda el aviso de retransmisión de los datos de manera automática. Otra técnica utilizada en 1xEV-DO es la diversidad en tiempo, en la cual las señales son representadas en una misma sobre el mismo canal a diferentes tiempos.

3.1.1 Estructura del enlace de bajada

La figura 3.1 muestra la estructura de los canales del sistema 1xEV-DO para el enlace de bajada, especificando el código Walsh que le corresponde a cada canal, algunos canales no son multiplexados por estos códigos. Los canales se describen a continuación:

- **Canal Piloto**

Tiene las mismas características que en el estándar de CDMA2000 1x, es decir permite el acceso para el móvil. Sin embargo en CDMA2000 1xEV-DO el canal esta multiplexado en tiempo. El canal piloto transmite potencia pero no contiene información alguna, su funciones son monitorear los niveles de potencia de la estación base actual y de las estaciones de las celdas vecinas, evaluar la BER, ayudar en la detección coherente, mantiene la ruta de conexión accionando mensajes de enrutamiento y monitoreando cada celda con el canal de control [2], [4].

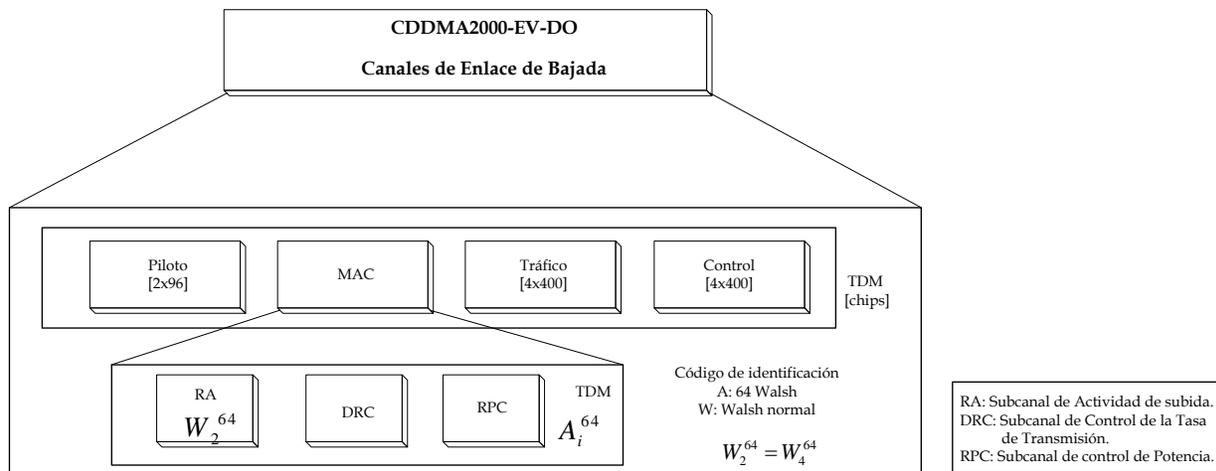


Figura 3.1 Estructura de los canales del enlace de bajada en CDMA2000 1xEV-DO.

- **Canal MAC**

Este canal sirve de apoyo para organizar a los diferentes usuarios en el enlace de bajada, informándoles las capacidades del receptor del enlace de subida por medio de sus tres subcanales: subcanal de actividad de subida (RA: Reverse Activity), subcanal de control de potencia de subida (RPC: Reverse Control Power) y subcanal de control de la tasa de transmisión (DRCLock: Dta Rate Control).

- **Subcanal de Actividad de Subida (RA)**

El RA es un subcanal de difusión, su función es indicar el nivel de actividad del enlace subida. Transmite el bit de actividad de subida (RAB: Reverse Activity Bit), el cual está relacionado con la carga del sector en cuestión.

- **Subcanal de Control de Potencia de Subida (RPC)**

Después de establecer la conexión la BS transmite continuamente el bit de control de potencia con el fin de controlar la potencia en el enlace de subida, incrementa ('0') o disminuye ('1') su nivel de potencia según la calidad de servicio.

- **Subcanal de Control de la Tasa de Transmisión(DRCLock)**

El subcanal RPC junto con los bits del subcanal DRCLock, están dirigidos a uno de los sectores dentro de una terminal activa.

Ambos subcanales estas multiplexados por división de tiempo (TDM) y se transmiten sobre el canal MAC. Una vez que la conexión se establece la BS transmite continuamente '0' y '1' en los bits del DRCLock dirigidos al móvil por medio del subcanal DRCLock.

- **Canal de tráfico y control**

El canal de control es un canal de difusión del enlace de bajada usado por la BS para transmitir mensajes o información de señalización. Estos dos canales tienen dos protocolos específicos en la capa MAC: el protocolo MAC del canal de tráfico de subida y el protocolo MAC del canal de control. Estos dos canales están divididos en dos partes en la interfaz de radio: preámbulo y datos.

El preámbulo es similar a un encabezado donde todos los bits son iguales a cero con una identificación de los usuarios o la tasa de transmisión del canal de control. La parte de datos del canal contiene la transmisión de información modulada, codificada y distribuida en ranuras.

3.1.2 Estructura del enlace de subida

La figura 3.2 muestra la estructura de los canales del sistema 1xEV-DO para el enlace de subida, especificando el código Walsh que le corresponde a cada canal. Los canales se describen a continuación:

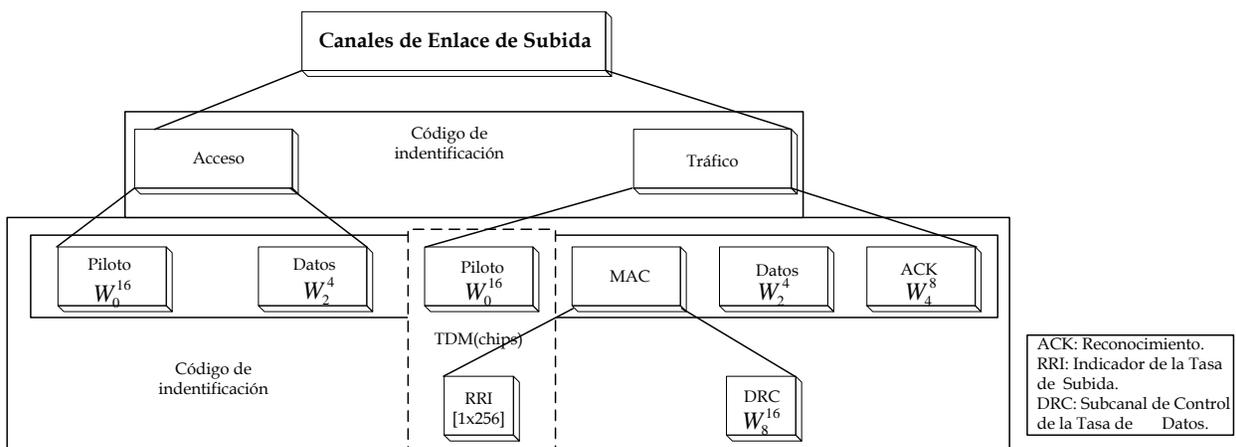


Figura 3.2 Estructura de los canales del enlace de subida en CDMA2000 1xEV-DO.

- **Canal de Acceso**

Este canal está dividido en dos canales: Piloto y Datos. El canal de acceso está identificado por medio de secuencias de PN largas. Las terminales de acceso usan este canal para iniciar la comunicación con la red para responder los mensajes dirigidos al móvil. Éste canal se divide en:

- **Subcanal piloto**

Una vez que el canal de acceso ha sido reconocido el canal piloto es identificado usando el código Walsh W_0^{16} . El móvil solo transmite símbolos no modulados con un valor binario cero sobre el canal piloto. Este canal se transmite mientras el canal de acceso transmitió.

- **Subcanal de datos**

Este canal se identifica mediante el código Walsh W_2^4 , por este canal se pueden transmitir los paquetes de la capa física durante cada prueba de acceso.

- **Canal de tráfico**

Este canal se divide en canal piloto, MAC, datos y canal ACK.

El canal de tráfico se identifica por medio de las secuencias de PN largas, las terminales usan este canal para transmitir el tráfico específico de un usuario o la información de señalización para la red. Este canal también es responsable de transportar los mensajes de varias capas.

- **Subcanal piloto**

Este canal tiene las mismas funciones que las del estándar CDMA2000 1x, su diferencia radica en que este canal está multiplexado por división de tiempo con el canal indicador de la tasa de subida (RRI: Reverse Rate Indicator) que se encuentra en el canal MAC. Ambos están transmitiendo al mismo nivel de potencia. Este canal se identifica por medio del código Walsh W_0^{16}

- **MAC**

Este canal se divide en canal RRI y en canal de control de la tasa de datos.

- **Subcanal RRI**

Este canal indica la tasa de transmisión a la cual el móvil puede recibir el canal de datos para tráfico.

- **Subcanal de control de la tasa de datos (DRC: Date Rate Control)**

Después de que el canal de tráfico ha sido identificado, el canal DRC es identificado usando el código Walsh W_8^{16} . Este canal se utiliza por la BS para indicar el sector seleccionado y la tasa de datos del canal de subida que fue solicitada por la red [2], [4].

- **Canal de datos**

La identificación de este canal es por medio del código Walsh W_2^4 , el canal de datos se usa para transmitir el tráfico contenido a la red.

- **Canal ACK**

Este canal es identificado por el código Walsh W_4^{16} , se utiliza por la BS para verificar una recepción satisfactoria de los paquetes de la capa física que han sido transmitidos sobre el canal de tráfico de bajada. Este canal trabaja junto con el HARQ [2], [4].

3.2 CDMA2000 1x EV-DV

1x-EV-DV representa la segunda fase de la evolución de CDMA2000, ya que se basa en el concepto de 1x-EV-DO con la diferencia de que integra servicios de voz en la misma portadora. Las redes 1x-EV-DV son reguladas por el R.S0026, las cuales tienen como expectativas ofrecer una gran capacidad para soportar altas velocidades de datos para sistemas basados en Internet existentes, aceptar ráfagas de datos e incrementar la eficiencia espectral permitiendo la transmisión de voz y datos en la misma portadora de 1.25 MHz.

La evolución de CDMA2000-1x a CDMA2000 1x-EV-DV se divide en dos fases. La primera fase permite HRPD para aplicaciones en tiempo real. Una portadora se utiliza para el servicio de paquetes de datos a gran velocidad, de esta manera si un usuario requiere servicio de voz en tiempo real, la red de EV-DV utiliza CDMA2000-1x para proporcionar este servicio. Incluye una interoperabilidad con canales de CDMA2000-1x para servicio de paquetes incluyendo transferencia de llamada. Reemplaza el servicio de datos en tiempo real liberando tráfico en tres modos, ya sea para tiempo real, tiempo no real y para ambos en la misma portadora.

Soporta voz sobre IP e implementa 16 Clases de Servicios (CoS: Class of Services) para la transmisión de paquetes de datos alcanzando el mejor funcionamiento del sistema, además de maximizar el rendimiento de procesamiento. La clase 1 es para servicio en tiempo real y una alta velocidad de paquetes de datos, la clase 2 sirve para paquetes de alta velocidad en tiempo no real, la clase 3 entrega programada y clases 4-16 son reservadas para futuras CoS.

La segunda fase de 1x-EV-DV soporta altas velocidades de paquetes de datos y servicios en tiempo real. La idea principal es integrar todos los servicios proporcionados por la fase uno en la misma portadora conservando los servicios de paquetes de datos en una portadora independiente. De este modo las redes de 1x-EV-DV requieren compatibilidad con sistemas CDMA IS-95 A/B y CDMA2000 usando las mismas estaciones base e incluyendo la interoperabilidad de canales de CDMA2000-1x para servicios de voz y paquetes, mismas CoS (1-16), compatibilidad y la combinación de varios tipos de tráfico con QoS variables incluyendo voz, video y datos [2].

La figura 3.3 muestra la arquitectura de la red de CDMA2000-3G en la cual se encuentra una interfaz de radio de 1xEV-DV. Los segmentos principales de esta arquitectura incluyen la red de radio acceso (RAN: Radio Access Network) y el núcleo de la red (CN: Core Network). Los usuarios se comunican con las estaciones base que se encuentran dentro de la RAN, las cuales constituyen el punto de contacto de la red ya que aquí es donde interviene la señalización con las capas superiores, las subcapas LAC y MAC, el Protocolo de Radio Enlace (RLP) el cual reduce la tasa de error en los canales de tráfico de CDMA y por último la capa física. En el enlace de bajada se agrega un canal de control de las funciones de los paquetes de datos (PDChCF: Packet Data Channel Control Function).

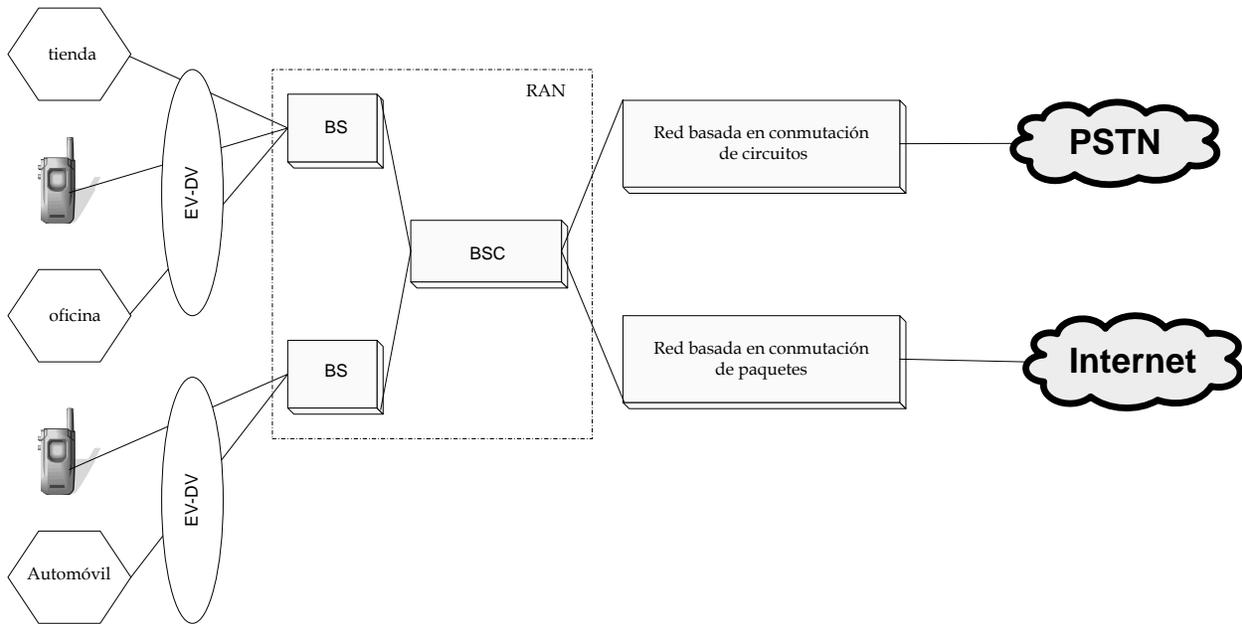


Figura 3.3 Arquitectura de la red 1xEV-DV.

Éste enlace de comunicación inalámbrica entre los usuarios y las estaciones base constituye la interfaz de radio conocida como interfaz Um. La red que se basa en conmutación de circuitos se dirige hacia la red telefónica pública conmutada (PSTN: Public Switched Telephone Network) mientras que la red basada en conmutación de paquetes se dirige hacia Internet.

De acuerdo con las condiciones del canal, se elige un tipo de modulación y codificación; estas condiciones se transmiten continuamente por medio del canal de paquete de datos (PDCh: Packet Data Channel) y del canal indicador de calidad del canal (CQIch: Channel Quality Indication Channel), de este modo permite la operación efectiva en la transmisión y recepción de datos.

Las redes 1x-EV-DV proporcionan diversas tasas de transmisión convenientes para servicios de paquetes de datos, la tabla 3.3 muestra las tasas, mínimas necesarias para 1x-EV-DV para algún ambiente en particular [2].

	Enlace de bajada	Enlace de subida
Tasa de transmisión vehicular máxima	2.4 Mbps	1.25 Mbps
Tasa de transmisión vehicular promedio	600 Kbps	600 Kbps
Tasa de transmisión vehicular máxima fija para peatones	2.4 Mbps	2.4 Mbps

Tabla 3.3 Tasa de transmisión mínima requerida para 1xEV-DV

1x-EV-DV utiliza una modulación y codificación que se adapta sobre el enlace de bajada en tiempo real dependiendo del ambiente (QPSK, 8-PSK, 16-QAM), la duración de la trama 1.25, 2.5 y 5 ms y el móvil selecciona una de las N estaciones base activas para servir en el enlace de bajada [3].

- **Canal de control de las funciones de los paquetes de datos (PDCHCF: Packet Data Control Channel Function).**

PDCHCF proporciona un protocolo de retransmisión automático que asegura la entrega de los paquetes codificados de la BS al móvil. Esta operación se realiza retransmitiendo los paquetes codificados utilizando turbo-códigos cuando la recepción fracasa o no se pueda decodificar el paquete enviado. Como se muestra en la figura 3.4 PDCHCF emplea los siguientes canales asociados con paquetes de datos:

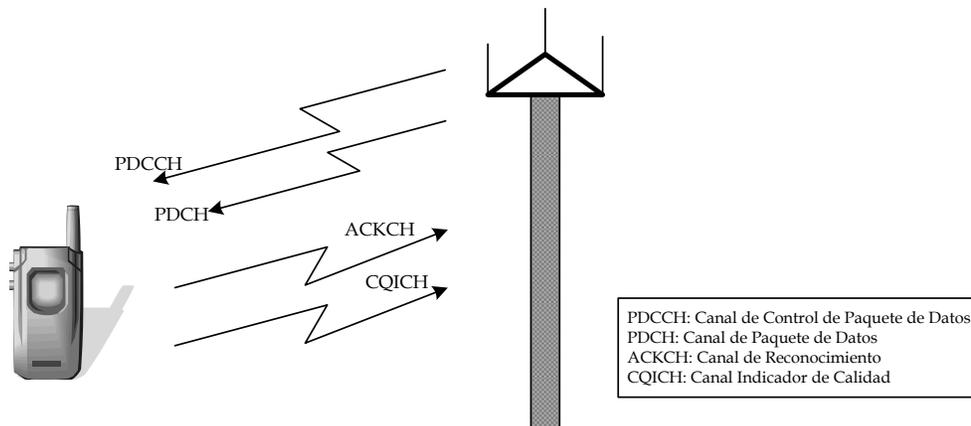


Figura 3.4 Canales de Paquetes de Datos.

3.2.1 Estructura del enlace de bajada

En la figura 3.5 se muestra la estructura de los canales del enlace de bajada para el sistema CDMA2000 1x-EV-DV. En el enlace de bajada la tasa de transmisión es 3.1 Mbps con la adición canales para paquetes de datos, como el canal de control de paquete de datos (PDCCh: Packet Data Control Channel) el cual se divide en canal de control de paquetes de datos primario (PPDCCH: Primary Packet Data Control Channel) y canal de control de paquetes de datos secundario (SPDCCh: Secondary Packet Data Control Channel). Otro es el canal de paquete de datos (PDCh: Packet Data Channel).

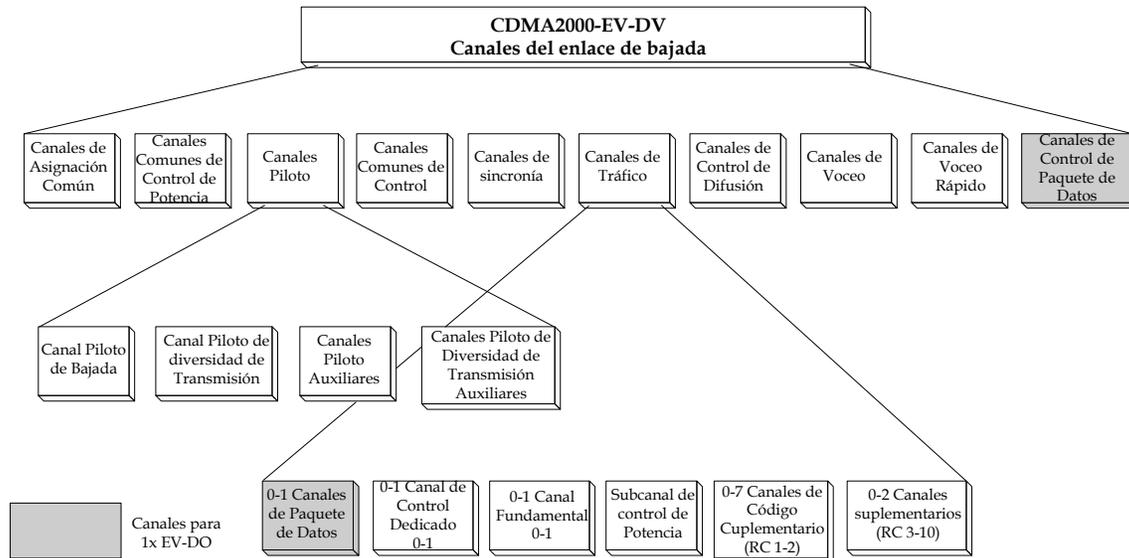


Figura 3.5 Estructura del enlace de bajada del sistema CDMA2000 EV-DV

- **Canal de control de paquetes de datos (PDCCH)**

El móvil monitorea el PDCCh cuando el canal de paquetes de datos se le asigna. La transmisión sobre este canal puede ser de longitud variable, 1 (1.25 ms), 2 (2.5 ms) o 4 (5ms) ranuras de longitud. El PPDCCh indica la duración del Canal de Paquete de Datos (PDCh: Packet Data Channel) y SPDCCh se utiliza para enviar el identificador de la capa MAC ID por los usuarios (identificador de 8-bit únicamente para el móvil en el PDCCH compartido), identificar la HARQ del canal, tamaño del paquete codificado y el ID del subpaquete.

- **Canal de paquete de datos (PDCh: Packet Data Channel).**

El PDCh está multiplexado por división de tiempo entre diferentes usuarios y puede ser multiplexado por división de código lo cual permite a la BS transmitir paquetes codificados a diferentes usuarios.

Un canal CDMA de enlace de bajada puede contener hasta 2 PDCh y cada uno transmite información a un móvil en especial en modo TDM. La transmisión en este canal puede ser de longitud variable: 1 (1.25 ms), 2 (2.5 ms) ó 4 (5 ms) ranuras de longitud.

El PDCh transporta subpaquetes del paquete codificado enviado por la BS, la cual codifica los paquetes de datos utilizando turbo códigos a una razón de 1/5. A cada subpaquete transmitido se le asigna un identificador del subpaquete (SPID: Sub Packet Identifier), para asegurar la entrega de los paquetes codificados, la función de control del canal paquetes de datos (PDChCF: Packet Data Channel Control Function) proporciona un HARQ.

La BS puede utilizar hasta cuatro canales ARQ independientes por lo tanto puede tener cuatro paquetes codificados de reconocimiento en un tiempo asignado. Cuando el móvil recibe el subpaquete, éste lo decodifica basándose en sub-paquetes recibidos anteriormente.

3.2.2 Estructura del enlace de subida

En la figura 3.6 se muestra la estructura del enlace de subida del sistema CDMA2000 EV-DV.

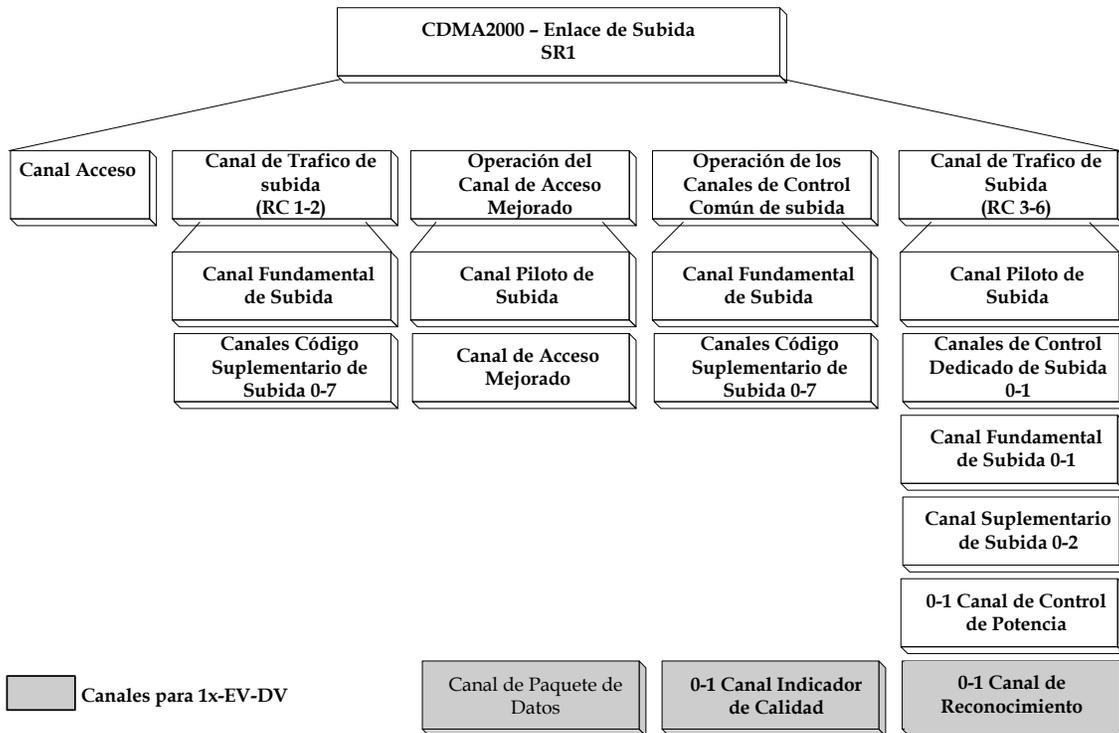


Figura 3.6 Estructura del enlace de subida del sistema CDMA2000 EV-DV

En el enlace de subida la tasa de transmisión es de 1.8 Mbps con la adición de canales:

- **Canal de reconocimiento (ACKCh: Acknowledgement Channel)**

Este canal transporta mensajes del móvil a la BS, que informan cuando la transmisión acertó (ACK= bit 0) o cuando la transmisión fracasó (NAK=1) después de haber sido decodificados los subpaquetes transmitidos por el PDCH.

- **Canal indicador de calidad (CQICH: Channel Quality Indication Channel)**

Éste canal transporta la información del móvil sobre la calidad de la señal sobre el PDCH, ésta información se utiliza por la BS para determinar los niveles de potencia y las tasas de transmisión de los datos [3].

- **Canal de paquete de datos (PDCh: Packet Data Channel)**

Este canal tienen una duración de 10ms y puede transmitir en 192, 408, 792, 1560, 3096, 4632, 6168, 9240, 12312, 15384, y 18432 paquetes de bits. Opera de 6.4 Kbps a 1.8432 Mbps.

3.3 CDMA2000 3X

De acuerdo con 3GPP2 revisión del estándar C.S0002, el sistema CDMA2000-3x utiliza tres portadoras con un ancho de banda de 1.25 MHz cada una como se muestra en la figura 3.7 [2]. Los aspectos que considera el estándar son los siguientes [3]:

- Opera con una tasa de bits de 2 Mbps.
- Utiliza códigos convolucionales y turbo códigos.
- Utiliza como técnica de modulación QPSK [9].

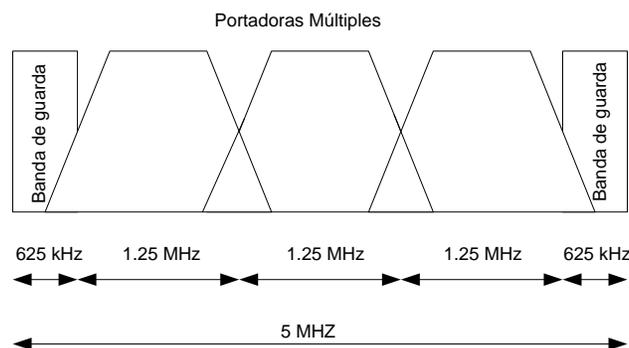


Figura 3.7 Portadoras de CDMA2000 3x

Los servicios basados en 3x operan a tasas de transmisión de 144 kbps para alta movilidad vehicular máxima, 384 kbps para movilidad vehicular promedio y 2 Mbps para transmisión vehicular fija para peatones, los cuales se encuentren cerca de las estaciones base. Este servicio de datos se puede realizar por conmutación de circuitos o por conmutación de paquetes. Para la conmutación por circuitos se encuentran las siguientes tasas de transmisión:

- Para conexiones de modems de acceso telefónico se encuentra de 32kbps a 64 kbps.
- Para el acceso a la red digital de servicios integrados (ISDN: Integrated Services Digital Network) utiliza hasta 144 kbps.
- Para conexión a videoconferencias se encuentra de 64kbps a 384 kbps.

Para el servicio de paquetes, como servicios multimedia y otros servicios de la red de paquetes de datos públicos (PPDN) como Internet, opera con un rango de 64 kbps a 2 Mbps. CDMA2000 3x soporta 256 códigos Walsh con una ganancia de dispersión alta de 256 y una baja de 4. Asimismo utiliza turbo códigos para la codificación del canal y puede soportar (data rate)tasas de transmisión a más de 1Mbps. En cuanto a la tasa de dispersión es de 3.68 Mchips por segundo.

Para el servicio de voz CDMA2000 3x utiliza en el enlace de bajada las RC1, RC3 y RC7, opera con portadoras múltiples en donde cada portadora cuenta con una ancho de banda de 1.25 MHz a una tasa de chip de 1.2288 Mcps; y con dispersión directa en donde utiliza un ancho de banda de 5 MHz con una tasa de chip de 3.6864 Mcps. En cambio para el enlace de subida sólo opera con dispersión directa.

REFERENCIAS

- [1] Marcus L. Roberts, Michael A. Temple, Robert F. Mills, And Richard A. "Evolution Of The Air Interface Of Cellular Communications Systems Toward 4G Realization", IEEE Communications Surveys & Tutorials, 1st Quarter 2006, Volume 8, No. 1
- [2] Leonhard Korowajszuk, Bruno de Souza Abreu Xavier, "Designing CDMA2000 Systems", John Wiley & Sons LTD, 2004
- [3] Sandeep Agrawal, Ira Acharya, Suhel Goel, "Inside 3G Gíreles Systems: The 1xEV-DV Technology", TATA Consultancy Services, March 2003
- [4] TIA/EIA-856-A, "cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification", April 2004
- [5] Juha Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House, 2000
- [6] Adam Rosenberg, "Signaling With SS7: CDMA capacity and quality optimization", Downloaded from Digital Engineering Library McGraw-Hill.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ENLACE DE SUBIDA PARA SERVICIOS DE VOZ EN CDMA2000

Los sistemas de telefonía móvil basados en el estándar CDMA2000 soportan servicios de voz y datos en la misma portadora, en este capítulo realizamos una evaluación para el enlace de subida considerando servicios de voz.

En este capítulo se describen los parámetros involucrados para poder realizar el estudio de la capacidad para el servicio de voz, como son pérdidas por trayectoria, los desvanecimientos lentos, la transferencia de llamada e interferencias producidas por los usuarios que se encuentran dentro del cluster.

Es importante realizar este estudio, ya que los sistemas de telefonía basados en CDMA son limitados por la interferencia, afectando en la capacidad del sistema con una cierta calidad de servicio.

Con base a este estudio, se realiza una comparación de la capacidad de voz de un sistema CDMA basado en IS-95 con CDMA2000.

4.1 Capacidad del enlace de subida para servicio de voz

Todos los sistemas tienen sus limitaciones, por ejemplo TDMA es limitado en tiempo y FDMA limitado en frecuencia, mientras que CDMA está limitado por la interferencia. Nos referimos a capacidad al número total de usuarios que puede soportar un sistema sin que se vea afectada la calidad del servicio.

La capacidad en los sistemas con CDMA se incrementa por diversos factores como son: el factor de actividad de voz, la sectorización de las celdas y el efecto de carga, disminuyendo la interferencia introducida por otros usuarios en la misma celda y en las celdas vecinas [1], [2]. A continuación se describen cada uno de los factores que permiten incrementar la capacidad en los sistemas con CDMA, empezando por describir la capacidad en una sola celda.

4.1.1 Capacidad en una sola celda

Una red consiste de un número de móviles que se comunican con más de una BS, la cual esta conectada con una MSC. Para el análisis de la capacidad comenzamos con el estudio de una celda.

Para una BS, en lo referente al control de potencia en el enlace de subida, todas las señales son recibidas al mismo nivel de potencia. Para N usuarios, cada demodulador de la BS procesa una señal que está compuesta por la señal deseada con una potencia S y $(N-1)$ señales interferentes con las mismas potencias. Así la SNR nos da como resultado:

$$SNR = \frac{S}{(N-1)S} = \frac{1}{N-1} \quad (4.1)$$

En la figura 4.1 se ejemplifica la ecuación (4.1). Otra medida de gran importancia que se involucra para el cálculo de la capacidad es la E_b/N_o , la cual se obtiene con la ecuación (4.2)

$$E_b/N_o = \frac{S/R}{(N-1)S/W} = \frac{W/R}{N-1} \quad (4.2)$$

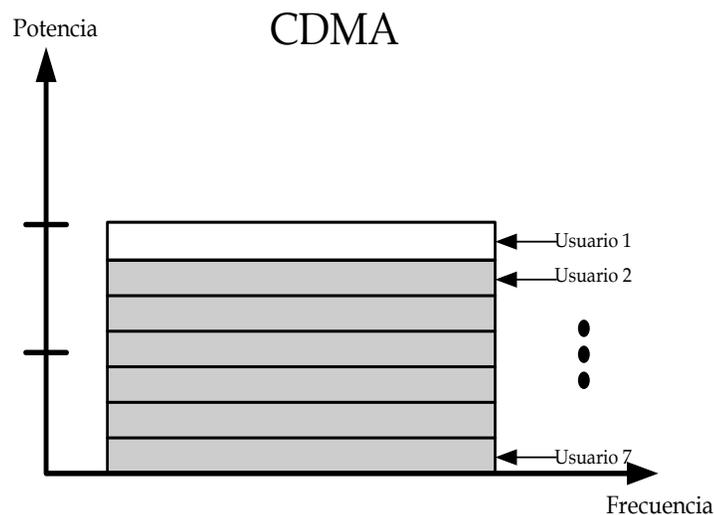


Figura 4.1 En CDMA, la potencia total de interferencia en banda de frecuencia es igual a la suma de las potencias de cada usuario. Si estos 7 usuarios ocupan la misma banda de frecuencia y cada uno es controlado en potencia al mismo nivel, la SNR nos da como resultado un $1/6$ para cada usuario.

La ecuación (4.2) ignora el ruido de fondo, la inclusión de este ruido en la ecuación (4.2) da como resultado la ecuación (4.3)

$$E_b/N_o = \frac{W/R}{(N-1) + (\eta/S)} \quad (4.3)$$

De la ecuación (4.3) el término (η/S) se considera despreciable quedando de la siguiente forma:

$$E_b/N_o = \frac{W/R}{(N-1)} \quad (4.4)$$

Despejando N de la ecuación (4.4), se puede obtener la capacidad en términos del número de usuarios que soporta la celda [2]:

$$N = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_o} \quad (4.5)$$

De acuerdo a la ecuación (4.5) observamos que la capacidad depende de la ganancia de procesamiento (W/R) de manera directa, es decir, si ésta aumenta, la capacidad se incrementa, debido a que la ganancia de procesamiento indica el rechazo a la interferencia. De igual forma si la E_b/N_o disminuye, aumenta la capacidad [1], [2].

4.1.2 Efecto de la carga

Para comprender el efecto de la carga se muestra en la figura 4.2, una celda A con sus respectivos usuarios, así mismo en las celdas vecinas se encuentran usuarios que están controlados en potencia por sus respectivas estaciones bases, produciendo interferencia a la celda A, a este efecto se le conoce como efecto de carga, el cual está expresado por:

$$F = \frac{1}{1+f} \quad (4.6)$$

Donde: f = es el factor de carga, que toma valores de 0 a 1. Para cuando se considera una sola celda $f=0$, este es el caso ideal.

Si a la ecuación (4.4) se le adiciona el factor de carga, queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+f} \right) \quad (4.7)$$

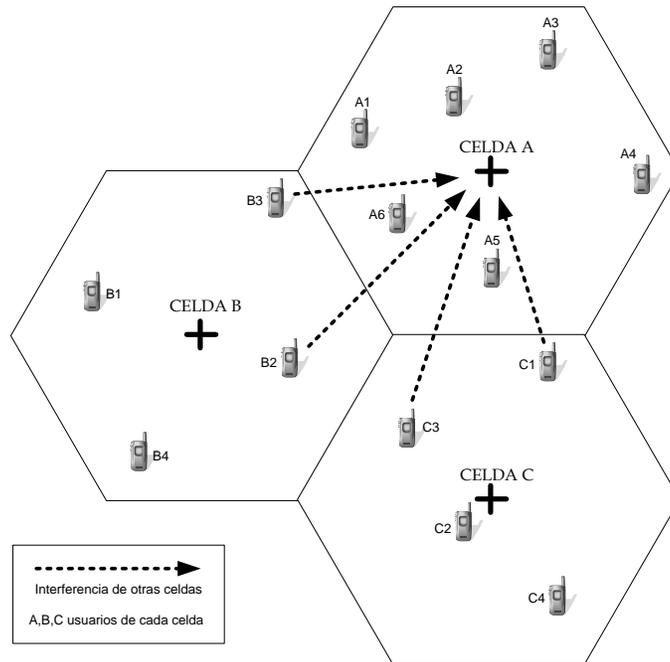


Figura 4.2 Interferencia producida por usuarios de la celdas vecinas.

4.1.3 Efectos de sectorización

La interferencia que producen los usuarios que se encuentran en otras celdas puede ser disminuida, en el caso de celdas sectorizadas utilizando antenas direccionales, por lo tanto solo reciben señales que se encuentran dentro del lóbulo principal del patrón de radiación, un ejemplo sería para cuando se tiene una celda dividida en tres sectores de 120° cada uno, recibiendo solo aquellas señales que se encuentren dentro de este sector, como se muestra en la figura 4.3 [1]. Al sectorizar una celda disminuye el efecto de carga, por ejemplo para cuando la celda se divide en tres sectores, se tiene una ganancia de sectorización (g) de 3. De igual forma si a la ecuación (4.7) se le adiciona la ganancia de sectorización queda expresada por:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+f} \right)^g \quad (4.8)$$

Cuando se tiene una celda sin sectorizar normalmente se utilizan antenas omnidireccionales, lo cual produce un incremento en la interferencia, disminuyendo la capacidad.

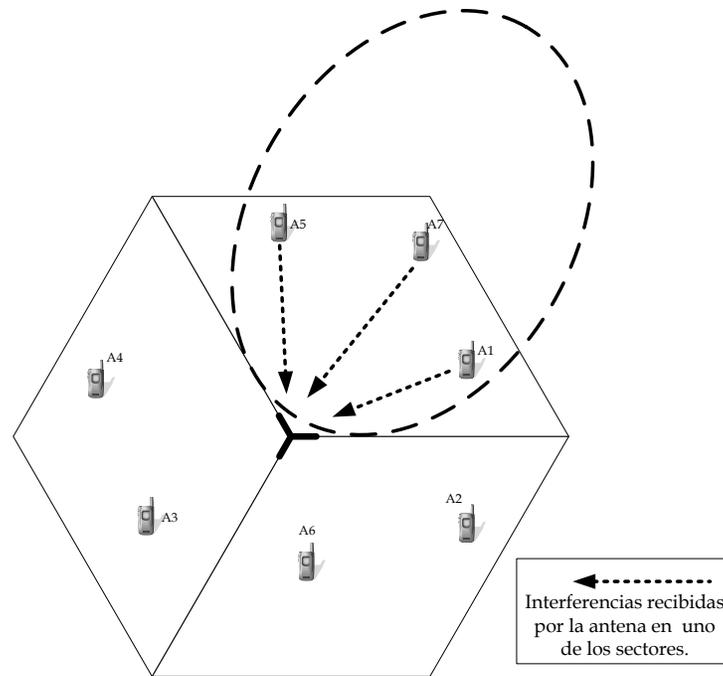


Figura 4.3 Celda sectorizada

4.1.4 Efectos de la actividad de voz

La ecuación (4.2) considera que todos los usuarios transmiten información el 100% del tiempo, en la practica se sabe que no ocurre esto, mediante el uso de los codificadores de voz "vocoders", se monitorea la actividad de voz, y no transmite información en los periodos de no actividad, dando como consecuencia que la potencia total transmitida y la interferencia se reduzcan.

Se han realizado estudios y se ha obtenido estadísticamente, que un usuario habla entre el 40% y el 50% del tiempo. Adicionando el factor de actividad de voz (α), a la ecuación (4.8), se tiene [2]:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{(N-1)} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+f} \right) g \left(\frac{1}{\alpha} \right) \quad (4.9)$$

Si despejamos N de la ecuación (4.9) obtenemos la capacidad en función del número de usuarios simultáneos por celda, quedando la siguiente expresión:

$$N = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_o} \left(\frac{1}{1+f} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right)^g \quad (4.10)$$

De esta ecuación se pueden obtener varias conclusiones respecto a la capacidad en CDMA [1]:

- La capacidad o el número de usuarios simultáneos N es directamente proporcional la ganancia de procesamiento del sistema.
- La capacidad aumenta si el valor de f disminuye.
- La capacidad es inversamente proporcional al valor requerido de E_b/N_o , el cual garantiza un buen desempeño en la BER ó en la FER. Si el valor de la E_b/N_o , mejora el desempeño de error, pero la capacidad se verá disminuida.
- El factor de actividad es aproximadamente 0.4. La capacidad puede aumentarse por una cantidad que es inversa al factor de actividad.
- El sectorizar una celda disminuye la interferencia. El uso de g sectores proporciona una ganancia aproximada de g .

4.2 Ambiente de simulación

En esta parte del capítulo se describe el proceso realizado para evaluar la capacidad del enlace de subida para el servicio de voz del sistema CDMA2000, así como también una comparativa con el sistema IS-95.

Para realizar esta evaluación se emplea el uso de simulaciones, ya que éstas son la imitación de un proceso del mundo real o del comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo. La conducta de un sistema en el tiempo, puede estudiarse desarrollando un modelo de simulación, en algunos casos, el modelo puede ser desarrollado mediante métodos matemáticos, sin embargo, en la vida real los sistemas resultan ser más complejos, que resultan imposibles de resolverse matemáticamente. Por esta razón se procede al uso de simulaciones por computadora, que permiten obtener datos que estiman la medida del desempeño del sistema [5].

Existen dos tipos de simulaciones las estáticas y las dinámicas. Para realizar esta evaluación, empleamos simulaciones dinámicas, ya que con estas, es posible observar el movimiento del usuario durante una llamada. Este tipo de simulación permite incluir transferencia de llamada, observar la correlación de las señales debido los desvanecimientos y la movilidad. En cambio en las simulaciones estáticas no se considera la dinámica del usuario durante su llamada, desde el punto de vista de movilidad [5].

Las simulaciones se realizan en un ambiente macrocelular de 19 celdas hexagonales, considerando antenas omnidireccionales, así como también los usuarios se encuentran distribuidos uniformemente en la celda central y la duración de su llamada esta dada por una variable aleatoria con distribución exponencial negativa.

Una de las consideraciones de importancia para la realización de esta simulación es que se considera un control de potencia perfecto, esto es, que la potencia de transmisión del móvil permite compensar las pérdidas de trayectoria y los desvanecimientos por obscurecimientos hacia la estación base del conjunto activo que tiene la mínima atenuación. La transferencia de llamada se realiza con un algoritmo simplificado de umbrales estáticos.

4.2.1 Trazado del Cluster¹¹

Como se mencionó anteriormente, esta simulación se realiza en un ambiente macrocelular, cada celda con un radio de 2 km. Para determinar las coordenadas de las BS del cluster se siguió las siguientes relaciones:

$$y = \frac{\sqrt{3}}{2}R \quad y \quad x = \frac{1}{2}R \quad (4.11)$$

Donde:

R= Radio de la celda

En la figura 4.4 se muestra el trazado del cluster para 19 celdas con sus respectivas coordenadas de las BS, mostrando las coordenadas obtenidas de la ecuación (4.5).

¹¹ Se le denomina cluster a un conjunto de celdas.

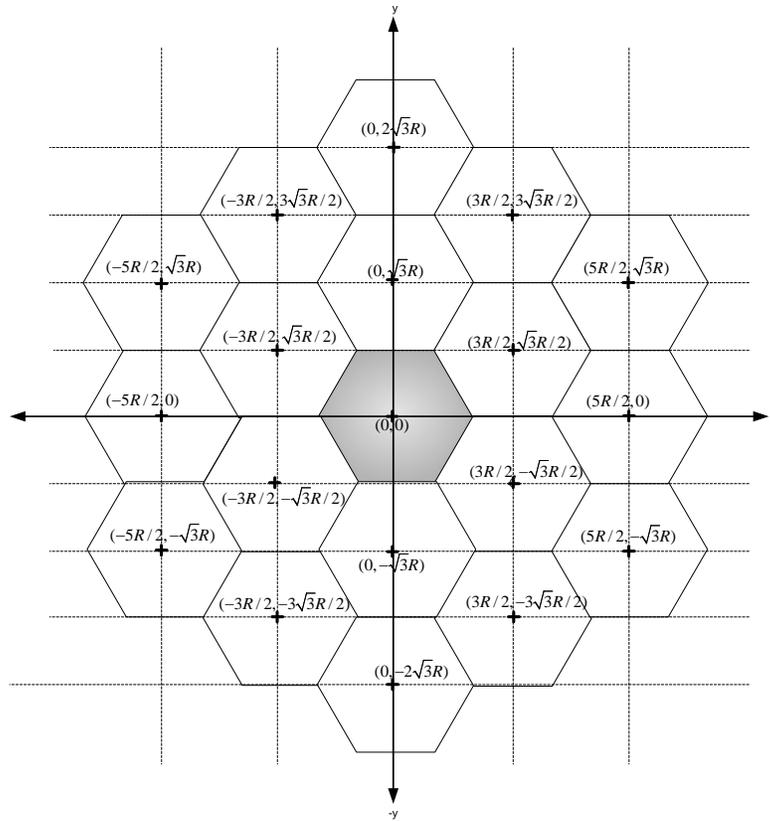


Figura 4.4 Trazado del cluster

4.2.2 Generación de variables aleatorias

Para poder describir, comprender y analizar de una manera precisa el comportamiento de los sistemas de telefonía móvil, se utilizan modelos probabilísticos (variables aleatorias, procesos aleatorios), los cuales se describen en términos estadísticos.

Por medio de variables aleatorias es posible describir la posición de los usuarios, la movilidad de los mismos, los cuales utilizan una variable aleatoria con distribución uniforme, así como los desvanecimientos por obscurecimientos se describen mediante un proceso aleatorio Gaussino en dB y la duración de la llamada se describe mediante una variable aleatoria con distribución exponencial negativa con una media de 120 seg.

Para generar estas variables aleatorias, primero es necesario describir la función de distribución acumulativa (cdf) y la función de densidad de probabilidad (pdf).

Como se requiere una variable aleatoria continua con una distribución exponencial negativa es necesario realizar la siguiente transformación, mediante la técnica de función inversa:

1. Determinar la CDF de la variable aleatoria (Ver Apéndice C):

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{1}{120}x\right) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

2. Igualar la cdf con una variable aleatoria U con distribución uniforme entre cero y uno.

$$F_X(x) = P(X \leq x) = 1 - \exp(-\lambda x) = U \quad \text{si } x \geq 0$$

3. Resolver la ecuación $F_X(x)=U$ para X en términos de U. Para la distribución exponencial negativa la solución es:

$$1 - \exp(-\lambda X) = U \Rightarrow \exp(-\lambda X) = 1 - U$$

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U) \text{ generador de V.A con distribución exponencial negativa} \quad (4.12)$$

En la figura 4.5 se observa cdf y la pdf de variables aleatorias con distribución exponencial negativa, tanto de manera teórica y la generada mediante una simulación utilizando la ecuación (4.12). Como se puede ver en la figura, la técnica utilizada para generar variables aleatorias con distribución exponencial negativa, es prácticamente igual a la teórica.

Se da la situación en la que es necesario generar una variable aleatoria Gaussiana X, con cualquier media $\mu_x=b$ y cualquier varianza $\sigma_x^2=a^2$, se puede utilizar la siguiente transformación:

$$X = aY + b$$

Donde:

Y= Variable aleatoria Gaussiana con media 0 y varianza 1.

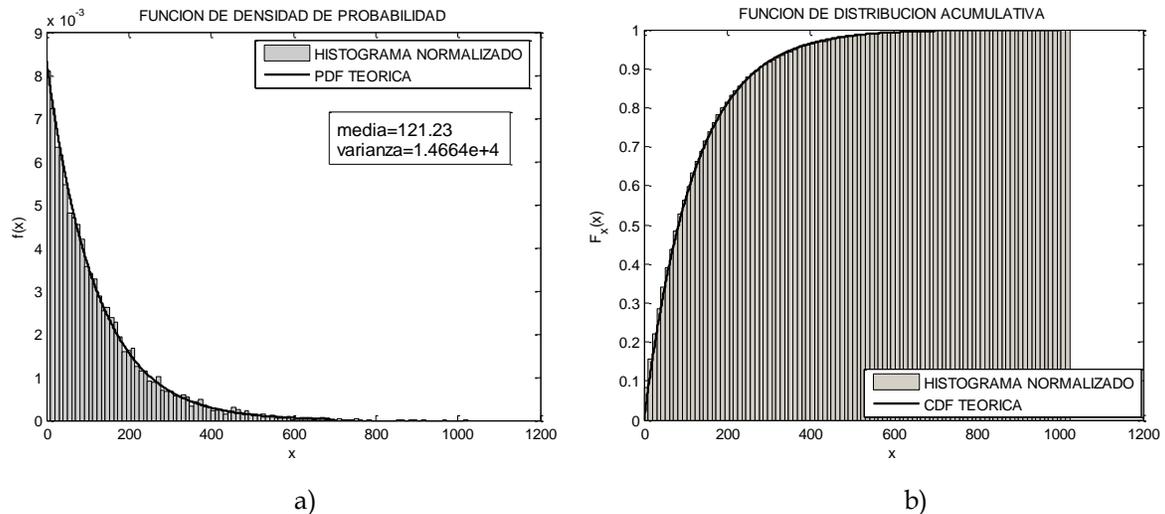


Figura 4.5 a) pdf y b) cdf de variables aleatorias con distribución exponencial negativa

4.2.3 Modelo de movilidad

El movimiento que realizan los usuarios durante una llamada es parte esencial en el análisis de los sistemas de telefonía móvil, ya que su comportamiento afecta en el desempeño del sistema, debido a que durante el movimiento se generan los cambios en el ambiente, los cuales se manifiestan como variaciones aleatorias en la señal recibida afectando su valor.

El modelo de movilidad puede ser analítico o por simulación y dependiendo del tipo de movilidad a utilizar van a depender los resultados que se obtengan. Los modelos analíticos son los que se realizan bajo consideraciones simples de la movilidad del usuario, las cuales permiten obtener expresiones matemáticas respecto al desempeño del sistema [5].

Para realizar la evaluación utilizamos los modelos de movilidad ya que estos describen el comportamiento del móvil de una forma más detallada, el modelo utilizado para esta simulación es el vehicular.

Este modelo se aplica en escenarios urbanos y suburbanos, el cual requiere que el tamaño de las celdas sea grande. Es un modelo de movilidad pseudoaleatorio con una trayectoria semidirigida y velocidad constante, la cual es de 35 km/hr [8].

Como se plantea al principio de la sección 4.2 los usuarios se generan de manera aleatoria en la celda central, los cuales inician su trayectoria de manera uniforme en un intervalo de 0° a 360° . La dirección cambia cada vez que se actualiza la posición del móvil ($t=100\text{ms}$), con una cierta probabilidad (0.2), teniendo un ángulo máximo de cambio de 45° como se muestra en la figura 4.6.

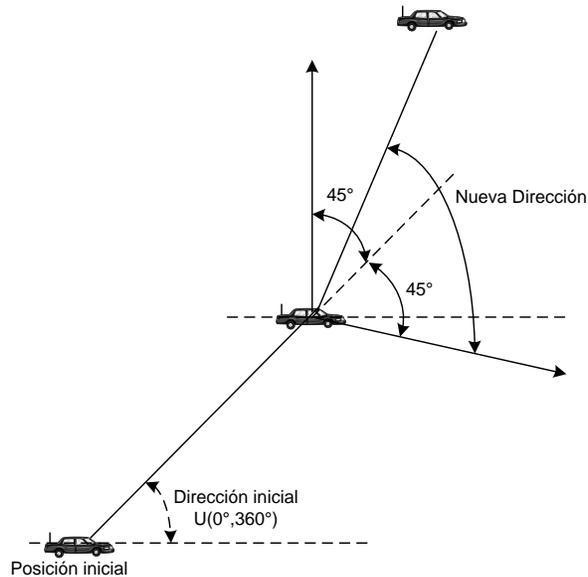


Figura 4.6 Modelo de movilidad para un ambiente vehicular.

En la figura 4.7 se puede observar el patrón de movilidad que tienen varios usuarios en una celda con las características del modelo descrito en el párrafo anterior.

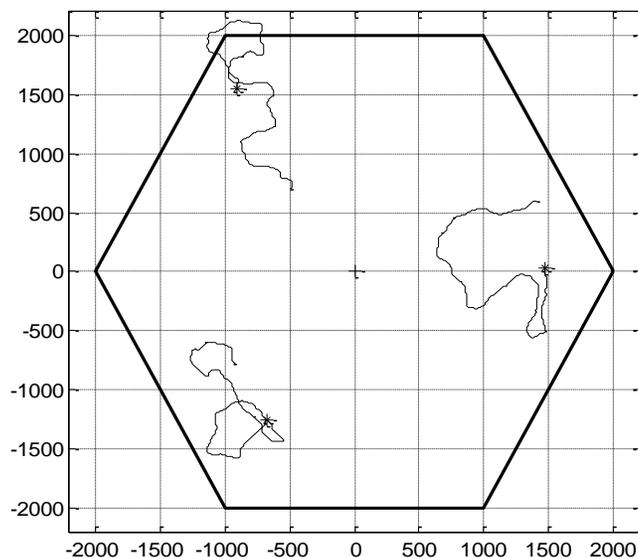


Figura 4.7 Movilidad de 3 usuarios dentro de una celda.

4.2.4 Modelo de pérdidas de propagación

Cuando una señal viaja del transmisor al receptor esta sufre alteraciones, daños que son conocidos como pérdidas de propagación. Existen muchos modelos de predicción que son usados para predecir las perdidas por trayectoria. Estos modelos tienen como parámetro crítico la distancia entre el transmisor y el receptor, es decir pueden diferenciarse en otros parámetros como altura de la antena, el ambiente, pero estos son dependientes siempre de la distancia.

La potencia de la señal también se ve afectada cuando el receptor atraviesa, obstáculos que bloquean la trayectoria de la señal, dando como consecuencia que la potencia de la señal se vea disminuida. Este efecto es mejor conocido como desvanecimientos lentos, los cuales pueden ser modelados mediante una distribución log-normal [10]

4.2.4.1 Modelo de pérdidas por trayectoria IMT-2000.

Los modelos de pérdidas por trayectoria están diseñados para predecir la potencia recibida a una cierta distancia entre el transmisor y el receptor, considerando la frecuencia portadora, alturas de antenas, ganancias y el ambiente en el que se desarrolla. Para la realización de la simulación nos basamos en el modelo de pérdidas por trayectoria del IMT-2000 para ambientes vehiculares, el cual se expresa mediante la siguiente ecuación [3]:

$$Lp = 40(1 - 4 \times 10^{-3} \Delta h_b) \log_{10}(d) - 18 \log_{10}(\Delta h_b) + 21 \log_{10}(f) + 80 \quad [dB] \quad (4.13)$$

Donde:

d=Distancia el transmisor y el receptor (km)

Δh_b = Altura promedio de la estación base (m)

f= Frecuencia de portadora (MHz)

En la figura 4.8 se muestran los parámetros que intervienen en la ecuación (4.13).

Como se estableció en la sección anterior el cálculo de las pérdidas por trayectoria es importante para determinar el valor de la E_c/I_o .

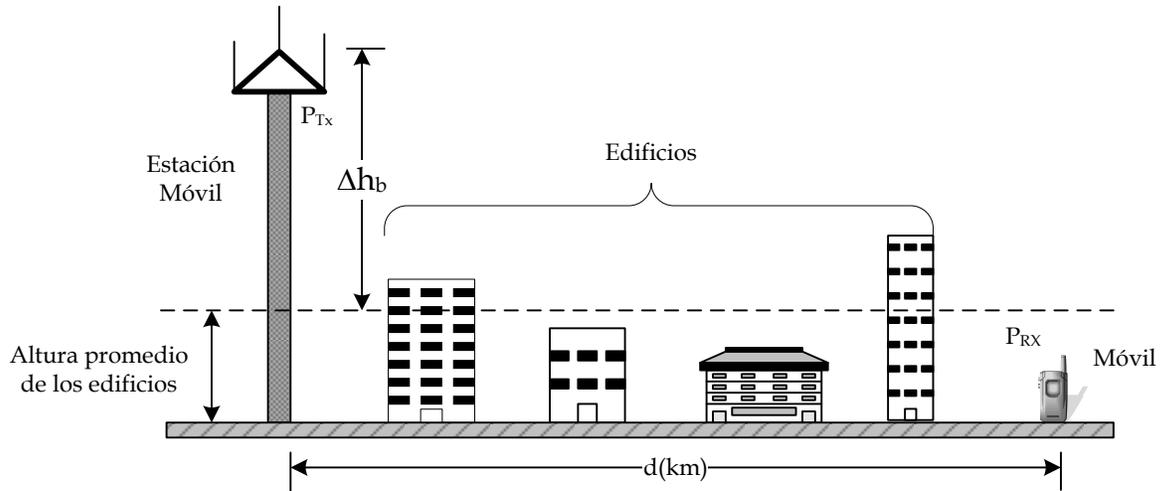


Figura 4.8 Parámetros que considera el modelo del IMT-2000 para un ambiente vehicular

Para la simulación se consideró una $\Delta h_b = 15\text{m}$, una $f = 2000\text{ MHz}$, la distancia varia según la ubicación del móvil y la BS que se este considerando como se muestra en la figura 4.9.

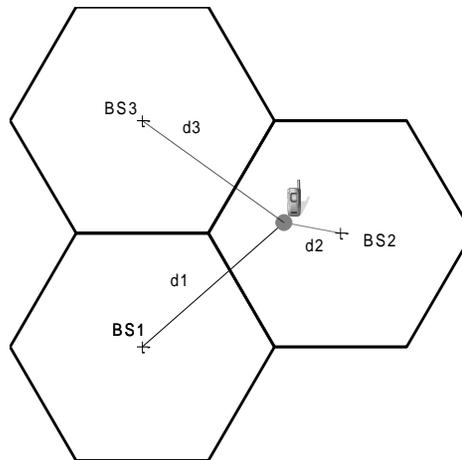


Figure 4.9 Distancias del móvil a las diferentes estaciones base.

4.2.4.2 Desvanecimientos correlacionados

Otro aspecto importante para predecir las pérdidas de propagación son los desvanecimientos cuyos valores son aleatorios. Estos son descritos mediante una variable aleatoria log-normal para condiciones estáticas [7]:

$$F = 10^{\frac{x}{10}} \quad (4.14)$$

Donde:

X = variable aleatoria Gaussiana con media ($\mu_x=0$) igual cero y desviación estándar σ_x en dB la cual cambia según el ambiente de operación.

Para el caso del modelo del IMT-2000 la desviación estándar toma un valor de 10 dB [3]. Así como también se considera que los desvanecimientos son correlacionados, debido a que el usuario se mueve, por lo tanto es necesario incluir un modelo que considere la correlación espacial¹². Para considerar el efecto de la correlación espacial, se utiliza un proceso Gaussiano $X(t)$ con media cero y función de autocorrelación exponencial¹³ (ver Apéndice D) para modelar los desvanecimientos en dB [7].

$$E\{X(d_1)X(d_2)\} = \sigma^2 \exp\left(\frac{-|d_1-d_2|}{d_c}\right) \quad (4.15)$$

Donde:

σ = Desviación estándar en dB

$|d_1-d_2| = d_m$ es la distancia entre dos posiciones del móvil

d_c = distancia de decorrelación¹⁴ (depende del ambiente para IMT-2000 vehicular es de 20 m)

Si el móvil se desplaza a una velocidad (m/s), entonces la función de autocorrelación espacial se puede expresar en términos del tiempo:

$$E\{X(t_1)X(t_2)\} = \sigma^2 \exp\left(\frac{-v|t_1-t_2|}{d_c}\right) \quad (4.16)$$

Con la finalidad de comprender la diferencia entre un proceso que considera la correlación entre las muestras y uno que no, en la figura 4.10 se representan las muestras de un proceso Gaussiano de ruido blanco con su función de autocorrelación, mientras que en la figura 4.11 se presenta el proceso aleatorio de ruido Gaussiano con muestras correlacionadas. En la figura 4.11 se observa que los cambios son suaves en comparación con los de la figura 4.10, esto se debe a la correlación que existe entre las muestras.

¹² Se refiere a la **autocorrelación** que existe en los desvanecimientos de la señal conforme el móvil se desplaza de una posición a otra.

¹³ Obtenida a partir de estudios de propagación.

¹⁴ La distancia decorrelación es la distancia a partir de la cual la señal ya no son correlacionadas.

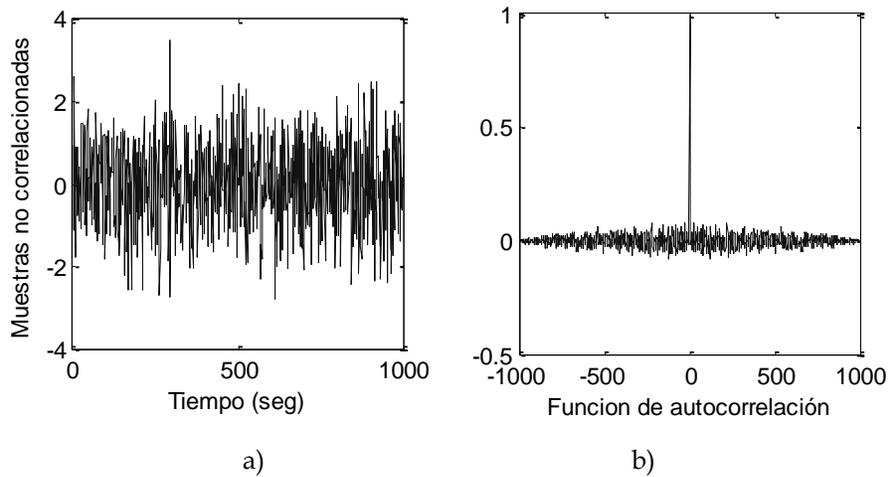


Figura 4.10 a) Proceso Gaussiano no correlacionado b) Función de autocorrelación

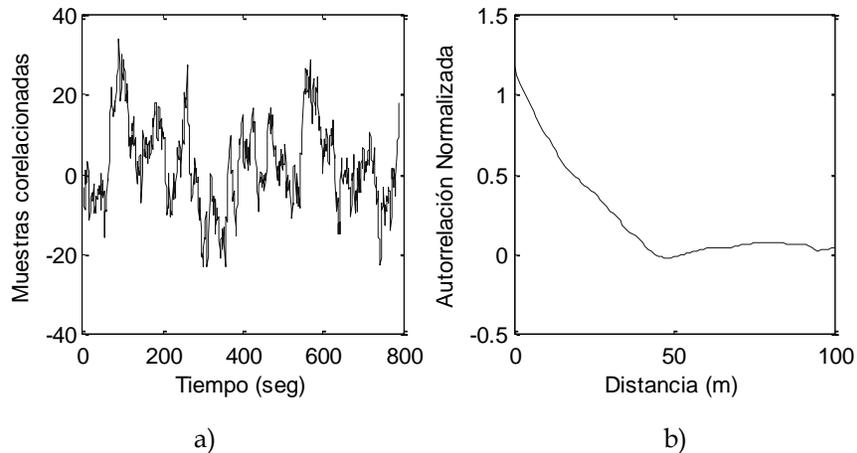


Figura 4.11 a) Proceso Gaussiano correlacionado b) Función de autocorrelación

Una vez que se tienen las pérdidas por trayectoria y los desvanecimientos correlacionados es posible obtener las pérdidas totales producidas en cada punto donde el móvil éste, estas se obtienen con la siguiente expresión:

$$\beta_{dB} = -Lp_i + \chi_i \quad (4.17)$$

Donde:

Lp_i = Pérdidas por trayectorias de una celda i

χ_i = Desvanecimientos de una celda i

Expresando la ecuación (4.17) de forma lineal:

$$\beta = 10^{-Lp_i/10} 10^{z_i/10} = \frac{10^{z_i/10}}{10^{Lp_i/10}} \quad (4.18)$$

En la figura 4.12 se pueden ver las atenuaciones totales para la celda central, la celda 6 que se ubica en el primer anillo y la celda 10 que esta en el segundo durante los primeros 30 seg de una llamada.

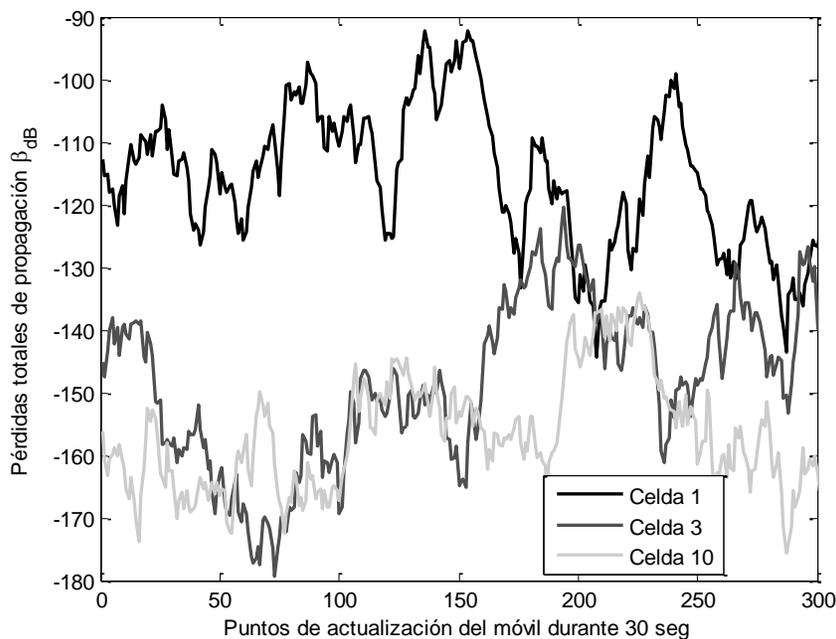


Figura 4.12 Atenuaciones totales durante los primeros 30 seg de una llamada.

4.2.4 Calculo de la intensidad del canal piloto (E_c/I_o)

El cálculo del la E_c/I_o es parte fundamental para identificar la BS que controla al móvil y atender los eventos de la transferencia de llamada. Como se muestra en la figura 4.13 el móvil j estima la E_c/I_o del canal piloto que corresponde a la BS k por medio de la siguiente expresión:

$$\left(\frac{E_c}{I_o} \right)_k = \frac{\phi_{pilot} S_{BS} PL_{j,k}(\theta_{j,k}, d_{j,k}, F_{j,k})}{I_{TOTAL}} G_p \quad (4.19)$$

Donde:

ϕ_{pilot} = Fracción de la potencia total de la BS k asignada al canal piloto. Es igual para todos los pilotos del sistema (0.20%) [6].

S_{BS} = Potencia total de la BS k asignada al canal piloto. Esta es la misma para todas las BS del sistema

$PL_{j,k}(\theta_{j,k}, d_{j,k}, F_{j,k})$ = Pérdidas por trayectoria de la BS k al usuario j en función del ángulo ($\theta_{j,k}$), la distancia ($d_{j,k}$) y los desvanecimientos lentos ($F_{j,k}$).

G_p = Ganancia de procesamiento.

I_{TOTAL} = Interferencia total.

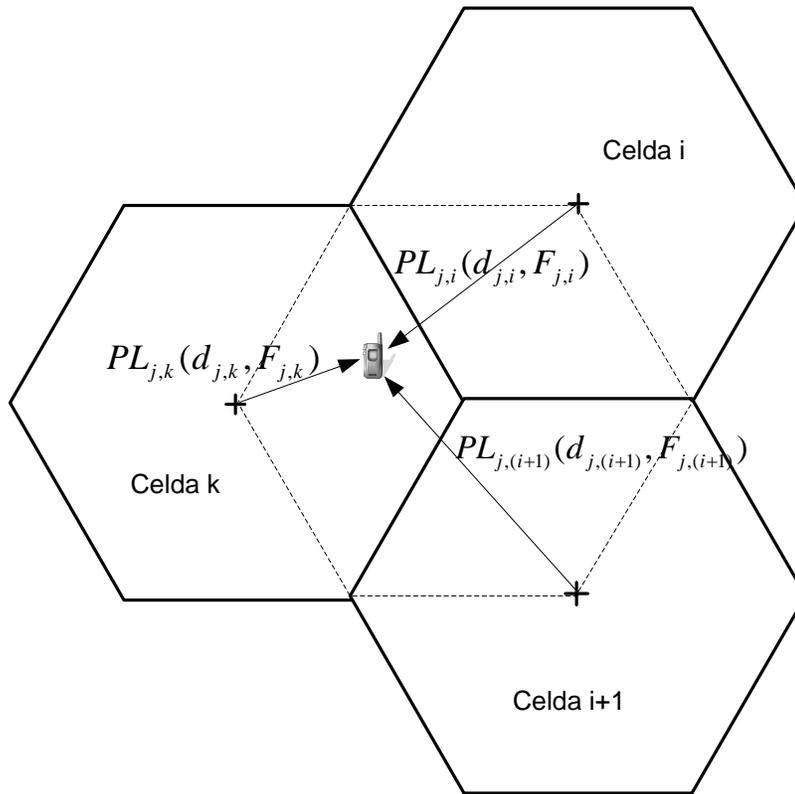


Figura 4.13 Pérdidas por trayectorias en enlace de bajada.

La interferencia total tiene dos componentes: la propia de la celda y la del resto de las celdas:

$$\begin{aligned}
 I_{TOTAL} &= I_{propia,k} + \sum_{i \neq k} I_{otra,i} \\
 I_{propia,k} &= I_{OH,k} + I_{Tráfico,k} \\
 I_{otra,i} &= I_{OH,i} + I_{Tráfico,i}
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

Donde:

$I_{propia,k}$ = Interferencia de la propia celda

$I_{otra,k}$ = Interferencia de la celda i , con $i \neq k$.

$I_{OH,k}$ = Interferencia debido a los canales de control (en nuestro caso solo el del piloto) de la celda k , menos el piloto en cuestión.

$I_{tráfico,k}$ = Interferencia generada por los canales de tráfico de la celda k .

$I_{OH,i}$ = Interferencia debida a los canales de control de la celda i .

$I_{tráfico,i}$ = Interferencia generada por los canales de tráfico de la celda i .

Al inicio de una llamada se estima el valor de E_c/I_o de las 19 celdas y estas se actualizan en cada movimiento del móvil. Cabe aclarar que para este trabajo no se están sectorizando las celdas, por lo cual el factor de $\theta_{j,k}$ de la ecuación (4.20) es omitido.

En la figura 4.14 se muestra gráficamente el comportamiento que tiene la E_c/I_o durante los primeros 30 segundos de una llamada; se muestra la E_c/I_o para la celda central, la celda 6 que se ubica en el primer anillo y la celda 10 que esta en el segundo. Como se puede observar en la figura el comportamiento que tiene la E_c/I_o es completamente aleatorio durante la llamada debido a las pérdidas y desvanecimientos, en base a estos valores que toman las BS se puede saber quien controla la llamada.

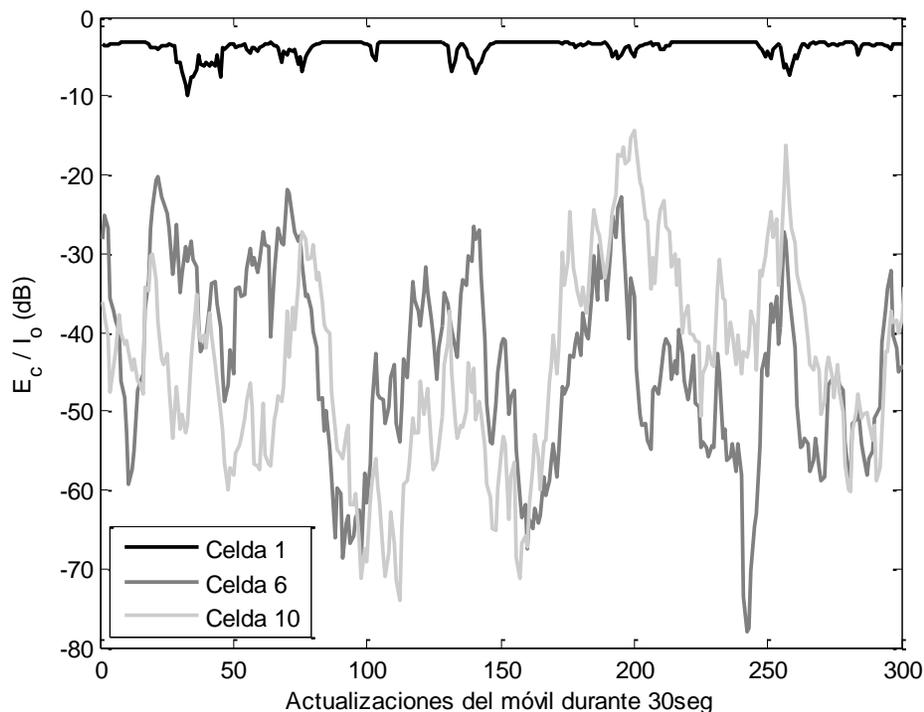


Figura 4.14 Valores que toma la E_c/I_o durante una llamada

Para el cálculo de la E_c/I_o fue necesario obtener las pérdidas por trayectoria y los desvanecimientos, de acuerdo al modelo de propagación descrito previamente.

4.2.5 Algoritmo de transferencia de llamada

En el capítulo 1 se describió el algoritmo para la transferencia de llamada para IS-95 y en el capítulo 2 se describió el algoritmo para la transferencia de llamada para CDMA2000. En esta sección lo que se va a mostrar es la descripción de un algoritmo de transferencia de llamada, al cual denominamos simplificado, debido a que solo considera pilotos del conjunto activo y no activo; y no toma en consideración retardos

El algoritmo simplificado de transferencia de llamada consiste:

1.- Al inicio de la llamada, el móvil determina todos los canales piloto del sistema, cuyas intensidades sean $E_c/I_o > T_ADD$.

a) Si el número de pilotos que exceden T_ADD es mayor a 3, que es el número máximo de canales piloto que son permitidos, entonces sólo se agregan aquellos que tienen las mayores intensidades.

b) En caso contrario se agrega el ó (los) pilotos(s) que exceden T_ADD .

2.- Ya que se tiene inicializado el conjunto activo y cada vez que el móvil actualiza su posición se monitorean las intensidades:

a) Si uno ó varios canales piloto del conjunto activo decaen del valor T_DROP , se inicializa su temporizador. En caso de que un temporizador de algún piloto expire con $T_TROP=2$ seg, entonces se remueve del conjunto activo. Si hay más de un piloto en el cual su temporizador ha expirado entonces se remueve el de menor intensidad. El temporizador se deshabilita si algún piloto excede T_DROP .

b) Si algún canal piloto que no se encuentre en el conjunto activo excede T_ADD y si el número de pilotos en el conjunto activo es menor a 3, entonces se agrega éste al conjunto activo. En caso de que exista más de un canal piloto que exceda T_ADD , sólo se agrega el de mayor intensidad.

En cambio si el conjunto activo se encuentra lleno, entonces se verifica si existe algún temporizador activado. Si hay alguno se tiene que hacer el cambio por aquel que tenga el mayor tiempo. Si en algún momento el conjunto activo queda sin pilotos, la llamada se considera pérdida debido a que no existen pilotos que controle la llamada [4].

En la figura 4.15 se muestra el comportamiento que tiene la E_c/I_o de la celda 3 en las primeras actualizaciones de movimiento que tiene el usuario. Se puede observar como en un punto el piloto de esa estación base es agregado al conjunto activo, siempre y cuando exista lugar disponible o algún piloto que tenga un temporizador iniciado. Después el valor de la E_c/I_o comienza a decaer hasta ser menor que el T_DROP y se inicializa el temporizador, como se observa en la figura para este caso en cuestión, la E_c/I_o no vuelve a incrementarse, por lo tanto después del tiempo del temporizador el piloto es expulsado del conjunto activo y pasa a ser del conjunto no activo.

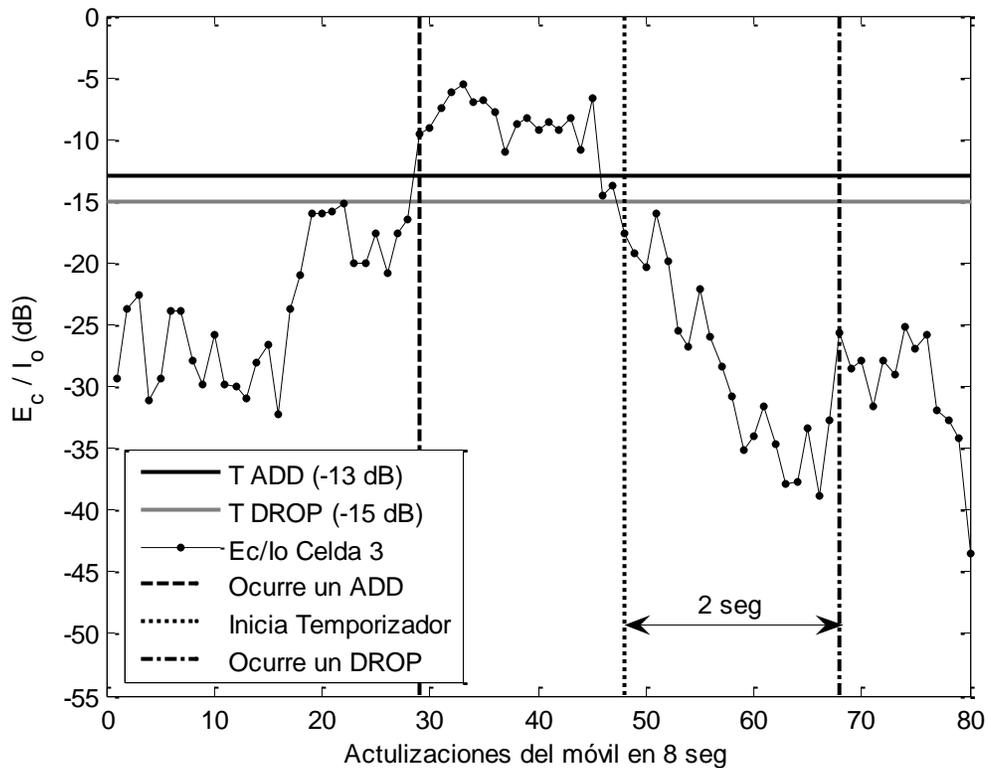


Figura 4.15 Eventos de transferencia de llamada para una celda

4.3 Evaluación de la capacidad en el enlace de subida

En esta sección se describe el análisis de la interferencia para el enlace de subida y el como se evalúa la capacidad del mismo, ya que como se sabe, los sistemas de CDMA están limitados por la interferencia y esto repercute en la capacidad, ya que lo que se requiere es disminuir esta interferencia para incrementar la capacidad.

4.3.1 Análisis de la interferencia del enlace de subida

La distribución de la interferencia de N_s usuarios de voz se puede obtener a partir de la distribución de interferencia causada por un solo usuario en una celda, realizando la convolución de las interferencias generadas. La pdf de la interferencia generada en cada una de las celdas del sistema, se obtiene con la simulación dinámica ya que considera las variables aleatorias que se generan para la posición del móvil, así como también para la movilidad, desvanecimientos y duración de llamada.

Ahora para obtener la distribución de la potencia de interferencia total generada por los usuarios que son controlados por la BS 1, considerando que existe un móvil en cada celda nos apoyamos en la simetría de las celdas.

De este modo se observa que la pdf de la interferencia generada en la celda 1, por un móvil en la celda k, es la misma que pdf causada en la celda k por un móvil que se encuentra en la celda 1.

En la figura 4.16 se aprecia la simetría que existe, en donde se observa a un móvil que se encuentra en la celda 1 que es controlado en potencia por la misma BS de esa celda.

De igual forma se observan usuarios que se encuentran ubicados en otras celdas, los cuales mantienen la misma simetría respecto al móvil que se encuentra en la celda 1.

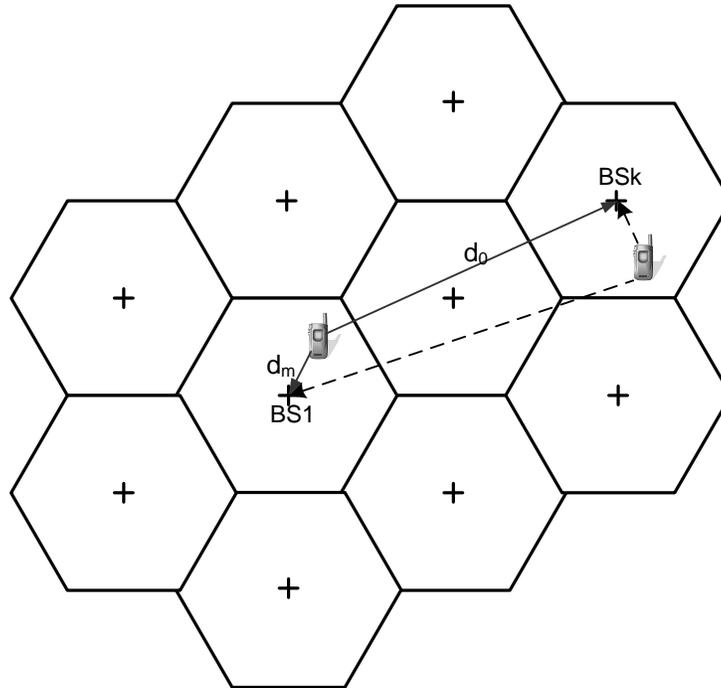


Figura 4.16 Geometría del enlace de subida.

Así, simulando un gran número de llamadas para un solo usuario que se encuentra en la celda 1, se obtienen las pdf de la interferencia que éste ocasiona en otras celdas, siempre y cuando sea controlado en potencia por la celda 1.

De este modo cuando un móvil de la celda 1 es controlado en potencia por su BS, genera interferencia en las estaciones base restantes, por lo cual la interferencia generada en la BSk se obtiene de la siguiente forma:

1. Sustituyendo $\Delta h_b = 15m$, $f=2000MHz$ en la ecuación la ecuación (4.13) obtenemos:

$$L_p = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d) \quad [dB] \quad (4.21)$$

2. Con la ecuación (4.21) y los desvanecimientos $X(t)$ se obtiene la interferencia generada en la BSk

$$\begin{aligned} \frac{I(d_o, d_m)}{S} &= \left(\frac{10^{X_o(t)/10}}{10^{128.1/10} d_o^{37.6/10}} \right) \left(\frac{d_m^{3.76/10} 10^{128.1/10}}{10^{X_m(t)/10}} \right) \\ &= \left(\frac{10^{X_o(t)/10}}{10^{X_m(t)/10}} \right) \left(\frac{d_m}{d_o} \right)^{3.76} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Donde:

$X_o(t)$ = Los desvanecimientos generados del móvil a la BSk.

$X_m(t)$ = Los desvanecimientos generados del móvil a la BS1.

d_m = Es la distancia de la BS1 al móvil.

d_o = Es la distancia de la BSk al móvil.

En la figura 4.17 se muestra la interferencia que introduce un usuario de la celda 3 a los usuarios de la celda 1.

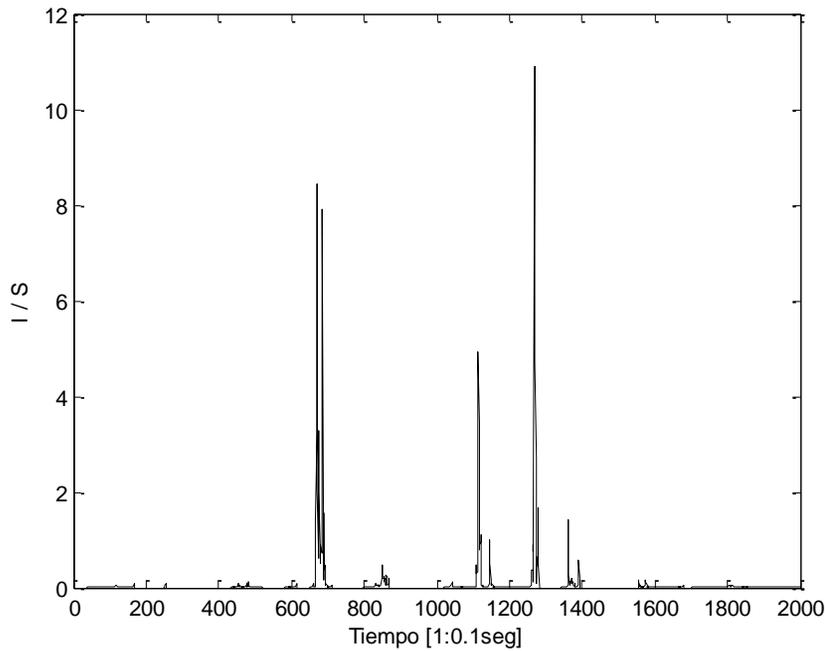


Figura 4.17 Interferencia de la celda 3 que afecta a la celda 1

4.3.2 Capacidad del enlace de subida

En el enlace de subida para evaluar la capacidad, primero se obtiene la probabilidad de degradación (outage) del sistema la cual depende del número de usuarios que contenga cada celda. Considerando una condición de degradación (outage), cuando la relación de la E_b/N_o es menor 7 dB [2].

En el enlace de subida la relación E_b/N_o se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{W/R}{\sum_{i=1}^{N_s-1} x_i + (I/S) + (\eta/S)} \quad (4.23)$$

Donde:

N_s = Es el número de usuarios de voz que se encuentran por celda.

I = Interferencia total producida por usuarios de celdas vecinas.

S = Potencia recibida de la señal deseada.

W/R = Ganancia de procesamiento.

η = Ruido de fondo

x_i = Potencia normalizada que se presenta como interferencia de N_s-1 usuarios que se encuentran en la celda deseada. Esta potencia está caracterizada por una variable aleatoria binomial con la siguiente distribución [2]:

$$x_i = \begin{cases} 1; & \text{con probabilidad } \alpha \\ 0; & \text{con probabilidad } 1-\alpha \end{cases}$$

Donde:

α = Factor de actividad de la voz.

Por lo tanto la probabilidad de degradación queda expresada de la siguiente forma:

$$P_{out} = P \left[\frac{E_b}{N_o} < \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{req} \right] = P \left(\sum_{i=1}^{N_s-1} x_i + \frac{I}{S} > \frac{W/R}{(E_b/N_o)_{req}} - \frac{\eta}{S} \right) \quad (4.24)$$

Como esta expresión dependerá de las distribuciones de las variables aleatorias x_i e I y si todas estas son mutuamente independientes considerando que $I/S=x_k$; por lo tanto la expresión para obtener la probabilidad de degradación queda expresada por la siguiente expresión [2]:

$$P_{out} = \sum_{k=0}^{N_s-1} \binom{N_s-1}{k} \alpha^k (1-\alpha)^{N_s-1-k} P \left(x > \frac{W/R}{(E_b/N_o)_{req}} - \frac{\eta}{S} - k \right) \quad (4.25)$$

Donde:

$$P \left(x > \frac{W/R}{(E_b/N_o)_{req}} - \frac{\eta}{S} - k \right) = \int_{I_T}^{\infty} p(x|N_s) dx \quad (4.26)$$

$$I_T = \frac{W/R}{(E_b/N_o)_{req}} - \frac{\eta}{S} - k \quad (4.27)$$

4.4 Resultados obtenidos

En las secciones anteriores, se ha descrito el procedimiento para evaluar la capacidad, en base a esa metodología, en esta parte del capítulo se explican los resultados que obtuvimos en la simulación, para IS-95 y CDMA2000 finalizando con una comparativa de la capacidad para ambos estándares.

4.4.1 Capacidad para el enlace de subida de los estándares IS-95 y CDMA2000

Como se vió en la sección 4.3.2 para realizar la evaluación de la capacidad es necesario conseguir las funciones de densidad de probabilidad de la interferencia total que es causada en el celda central cuando hay usuarios en todo el sistema que son controlados por otras celdas. En la figura 4.18 se muestra la pdf para N_s usuarios, como se puede observar conforme aumenta el numero de usuarios la pdf se va ampliando, este comportamiento lo que nos dice es que entre mas usuarios se tengan en el sistema mas interferencia se tiene. Para la obtención de estos resultados se considero un $\alpha=0.43$ que es el factor de actividad de voz para IS-95

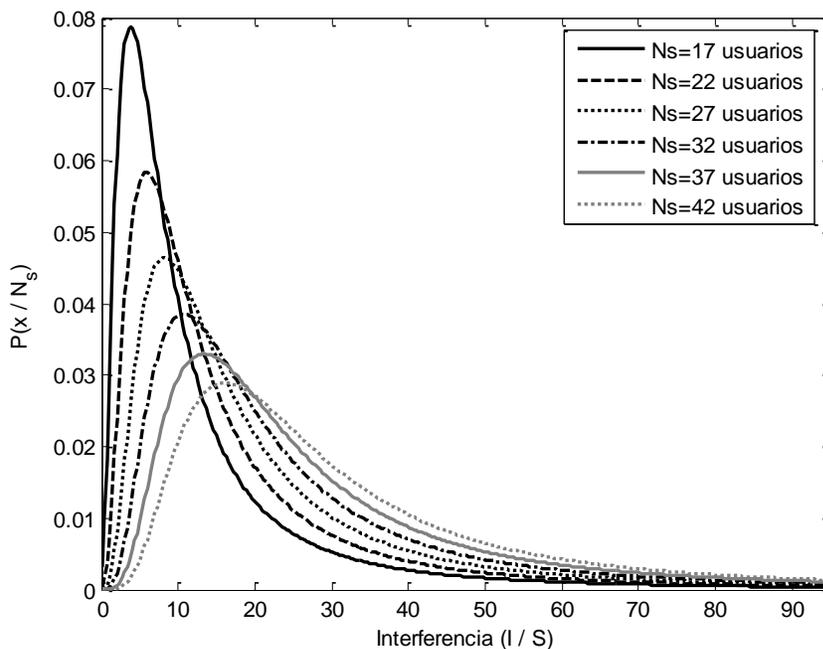


Figura 4.18 Ejemplos de pdf de la interferencia

En la figura 4.19 se muestra una comparativa de las pdf de las interferencias totales para IS-95 y CDMA2000 en el figura podemos observar que para la misma cantidad de usuarios se tiene, que CDMA2000 tiene una menor interferencia que IS-95, por ejemplo si se considera una $I_T=20$ obteniendo el área bajo la curva para $P(x/N_s)$ de los dos sistemas tenemos se puede observar que para IS-95 se obtiene un área mayor que para CDMA2000, dando como resultado que para el mismo valor de I_T se tiene mas interferencia en IS-95 que en CDMA2000.

Con la obtención de estas pdf es posible estimar la probabilidad de degradación descrita en la ecuación (4.25), cabe destacar que para la obtención de estos resultados se utilizaron los parámetros mostrados en la tabla 4.1 [2], [9]

Estándar	E_b/N_o (dB)	α
IS-95	7	0.43
CDMA2000	4	0.6

Tabla 4.1 Parámetros considerados para la capacidad

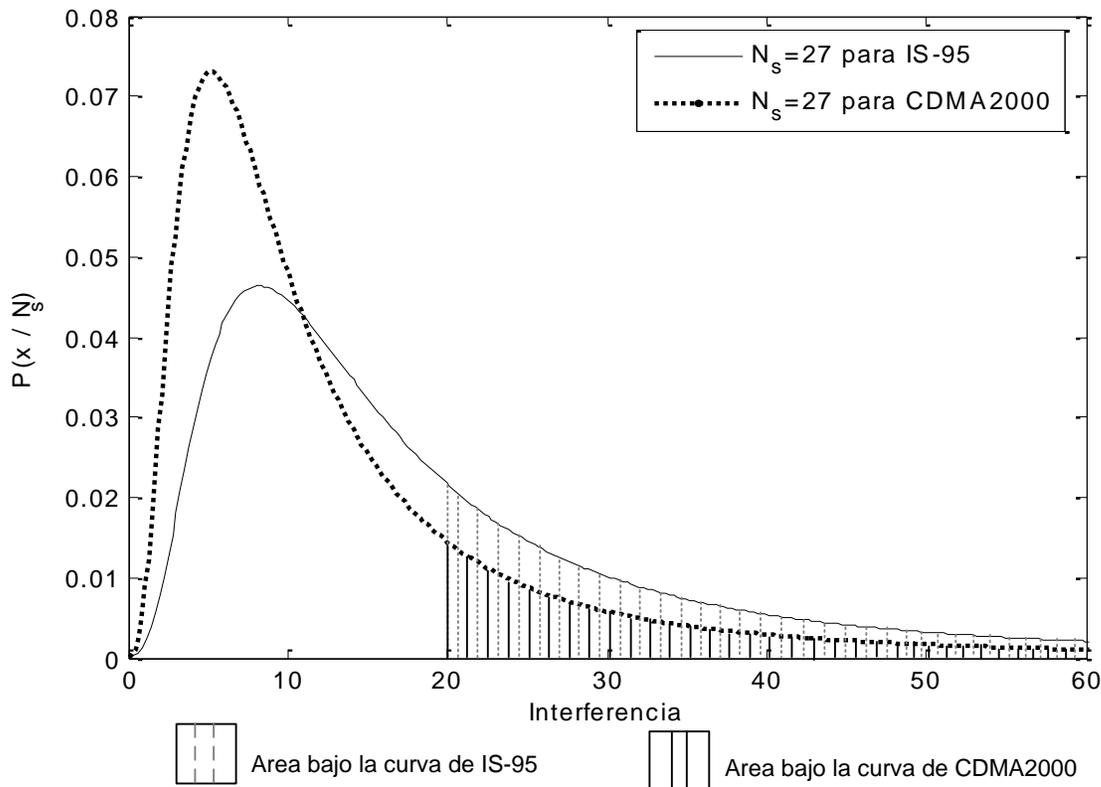


Figura 4.19 Comparativa de las pdf de interferencias para IS-95 y CDMA2000

En la figura 4.20 se muestran los resultados obtenidos de la probabilidad de degradación para los estándares de IS-95 y CDMA2000.

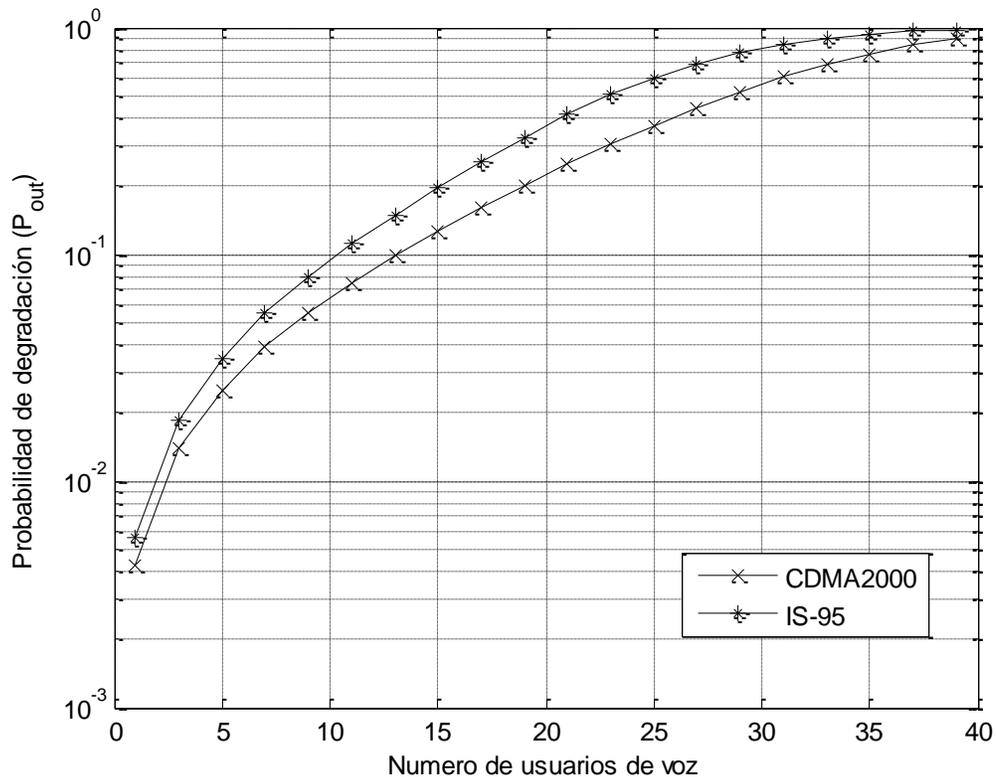


Figura 4.20 Probabilidad de fallo de los sistemas IS-95 y CDMA2000 para usuarios de voz

De los resultados obtenidos, se puede observar que se tiene una probabilidad de degradación del 13% para 15 usuarios de voz para CDMA2000 mientras que para IS-95 para el mismo número de usuarios se tiene el 20%, esto quiere decir que la capacidad para IS-95 es menor, ya que para el mismo número de usuarios su probabilidad de degradación es mas alta. Ahora tomando una probabilidad de degradación de 20%, se tiene que IS-95 soporta 15 usuarios de voz y para CDMA2000 soporta 19, lo cual nos reafirma que CDMA2000 tiene una capacidad más alta.

REFERENCIAS

- [1] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House, 1998.
- [2] K.S. Gilhousen, I.M. Jacobs, R. Padovani, A.J. Viterbi, L.A. Weaver and C.E. Wheatley, "On the Capacity of a Cellular CDMA system", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 40, No. 2, pp. 303-312, May 1991.
- [3] Vijay K. Garg and Joseph E. Wilkes, "Principles and applications of GSM", Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Págs. 266-278
- [4] Sarath Kumar and Sanjiv Nanda, "An Access Scheme for High Speed Packet Data Service on IS-95 based CDMA", in Proc. Advances in Wireless Communications, pp. 241-252, 1998.
- [5] Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson and David M. Nicol, "Discrete-Event System Simulation", 3era. Edición, Prentice Hall, 2001.
- [6] Saleh Faruque, "Cellular Mobile System Engineering", Artech House Boston, Edición 1996, págs. 89-125.
- [7] M. Gudmundson, "Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio System", Electronic Letters, Vol. 27, No.23, págs 2145-2146, Noviembre de 1991.
- [8] TR 101 112 v3.2.0, "Selectio Procedures for the choice of Radio Transmisión Technology of the UMTS", en University of Würzburg, Technical Report No. 261, 2000.
- [9] Sarkar S, "Reverse link capacity for cdma2000", Vehicular Technology Conference, 2001, IEEE VTS 53rd, Volume 4, 6-9 May 2001, págs 2397-2401,
- [10] T.S Rappaport," Wireless Communications Principles and Practice", Prentice Hall PTR, 2002

CONCLUSIONES

Para el desarrollo de este trabajo se consideró como base el estándar IS-95, conocer sus principales características como control de potencia, estructura de los enlaces y transferencia de llamada, estas características nos sirvieron para conocer las mejoras que incorpora CDMA2000, permitiendo así la integración de servicios de voz y datos en la misma portadora, ofreciendo como ventaja un aumento en la capacidad del sistema y proporcionar tasa de datos más altas.

Las mejoras que incorpora CDMA2000 son la implementación de canales lógicos para incrementar la capacidad del sistema, utilizar diversidad de transmisión en el enlace de bajada y un control de potencia rápido.

Para poder realizar la evaluación de la capacidad para servicios de voz para CDMA2000 fue necesario también evaluar la capacidad para el estándar IS-95, de esta forma es posible comparar los dos estándares y observar mejor la ventaja que tiene CDMA2000 con respecto a IS-95 en cuanto a la capacidad en el enlace de subida para servicios de voz.

Esta evaluación fue realizada mediante simulaciones dinámicas ya que era necesario ver los efectos de movilidad del usuario, el algoritmo de transferencia de llamada y el control de potencia, en lo que se refiere a este último fue considerado perfecto, es decir, la potencia de transmisión del móvil compensa las pérdidas de trayectoria y los desvanecimientos correlacionados producidos por la estación base.

Los factores que cambiaron para las simulaciones en IS-95 y CDMA2000 fueron: el factor de actividad de voz y la E_b/N_0 que son requeridas para hacer posible el cálculo de la probabilidad de degradación, la cual es necesaria para observar la capacidad del sistema.

Con los resultados obtenidos se observa que el estándar CDMA2000 presenta un mejor desempeño que IS-95, ya que tomando 21 usuarios, CDMA2000 tiene una probabilidad de fallo de 25.11% y para IS-95 presenta 41.68%, por lo tanto es más probable que CDMA2000 soporte a los 21 usuarios sin afectar la calidad de la llamada, a diferencia de IS-95.

Comparando la capacidad desde el punto en el cual se mantiene fija la probabilidad de degradación con un 10% tenemos que el estándar IS-95 puede soportar 10.3 usuarios y para CDMA2000 13.1, como se puede ver el estándar CDMA2000 presenta una mejor capacidad en comparación con IS-95.

De los resultados obtenidos podemos concluir que el estándar CDMA2000 muestra un mejor desempeño, tomando en cuenta que esta simulación son para las peores condiciones de interferencia., ya que no se ha considerando sectorización.

Cuando se utiliza sectorización se disminuye la interferencia debido a que se utilizan antenas directivas permitiendo solo la recepción de las señales que se encuentran dentro de su patrón de radiación. Como un trabajo futuro para observar mejor el desempeño que presenta CDMA2000 seria sectorizar para disminuir la interferencia y así incrementar la capacidad del sistema

APENDICES

APÉNDICE A

Para generar secuencias de códigos Walsh como se estudió en el capítulo la 1 ahora se va a suponer que tres usuarios desean enviar un mensaje por separado [1]. Los mensajes son:

$$m_1 = [+1 \quad -1 \quad +1] \quad m_2 = [+1 \quad +1 \quad -1] \quad m_3 = [-1 \quad +1 \quad +1]$$

A cada usuario se le asigna un código Walsh:

$$w_1 = [-1 \quad +1 \quad -1 \quad +1]$$

$$w_2 = [-1 \quad -1 \quad +1 \quad +1]$$

$$w_3 = [-1 \quad +1 \quad +1 \quad -1]$$

- a) ¿Cuál sería el mensaje que se envía?
- b) ¿Cómo se recuperan los mensajes de cada usuario en el receptor?

El mensaje de cada usuario es dispersado con su respectivo código Walsh, cabe aclarar que para este caso se tiene un factor de dispersión de 4, es decir que de un bit que entra se divide en cuatro símbolos.

Para el primer mensaje la señal dispersada sería $m_1(t) w_1(t)$:

M₁(t)	1				-1				1			
M₁(t)	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
W₁(t)	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
M₁(t) w₁(t)	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1

Para el segundo mensaje la señal dispersada sería $m_2(t) w_2(t)$:

M₂(t)	1				1				-1			
M₂(t)	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
W₂(t)	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
M₂(t) w₂(t)	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1

Para el tercer mensaje la señal dispersada sería $m_3(t) w_3(t)$:

$M_3(t)$	-1				1				-1			
$M_3(t)$	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
$W_3(t)$	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
$M_3(t) w_3(t)$	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1

En la figura A-1 se muestra el proceso anterior gráficamente. Después de que ya se tienen las señales dispersadas para los tres mensajes, estas señales se combinan para formar una sola señal y esta es $C(t)$:

$$C(t) = m_1(t)w_1(t) + m_2(t)w_2(t) + m_3(t)w_3(t) \quad (A.1)$$

El resultado de $C(t)$ sería:

$C(t)$	-1	-1	-1	3	-1	-1	3	-1	-1	3	-1	-1
--------	----	----	----	---	----	----	---	----	----	---	----	----

$C(t)$ es el mensaje que se envía por el transmisor en una simple banda de RF. El receptor intercepta $C(t)$ y separa la información, es decir, $C(t)$ es multiplicado por el código Walsh asignado a cada usuario:

$C(t) w_1(t)$	1	-1	1	3	1	-1	-3	-1	1	3	1	-1
$C(t) w_2(t)$	1	1	-1	3	1	1	3	-1	1	-3	-1	-1
$C(t) w_3(t)$	1	-1	-1	-3	1	-1	3	1	1	3	-1	1

Después el receptor suma todos los valores durante cada periodo de bit, dando como resultado $M_1(t)$, $M_2(t)$, y $M_3(t)$.

$C(t) w_1(t)$	1	-1	1	3	1	-1	-3	-1	1	3	1	-1
$M_1(t)$				4			-4			4		
$C(t) w_2(t)$	1	1	-1	3	1	1	3	-1	1	-3	-1	-1
$M_2(t)$				4			4			-4		
$C(t) w_3(t)$	1	-1	-1	-3	1	-1	3	1	1	3	-1	1
$M_3(t)$				-4			4			4		

Mediante un umbral de decisión aplicado a $M_1(t)$, $M_2(t)$, y $M_3(t)$, se obtienen los mensajes que fueron enviados por cada usuario. Este umbral de decisión esta dado por la siguiente regla:

$$\begin{aligned} \tilde{m}(t) &= 1 && \text{si } M(t) > 0 \\ \tilde{m}(t) &= -1 && \text{si } M(t) < 0 \end{aligned} \tag{A.2}$$

Aplicando la regla de la ecuación A-2 se obtiene:

$\tilde{m}_1(t)$	1		-1		1	
$\tilde{m}_2(t)$	1		1		-1	
$\tilde{m}_3(t)$	-1		1		-1	

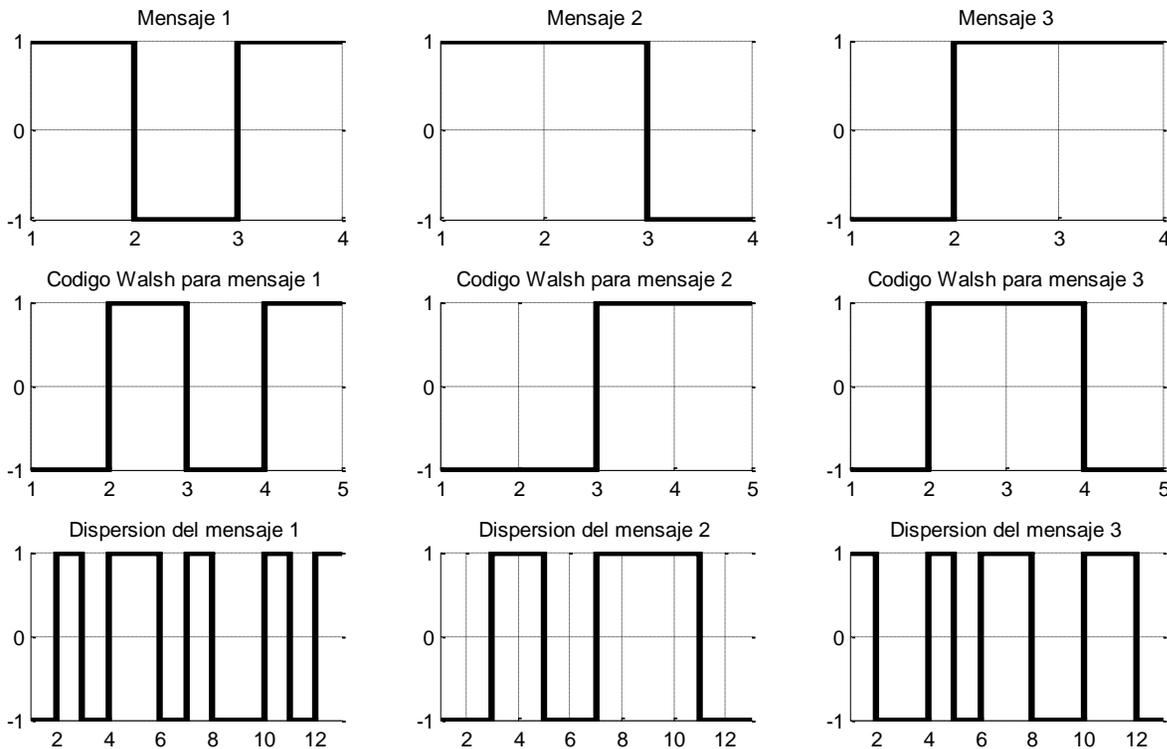


Figura A-1 Representación grafica de la canalización.

REFERENCIAS

[4] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House, 1998.

$p_6(t)$	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1
$M_2(t) p_6(t)$	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1

Después de que ya se tienen las señales dispersadas para los tres mensajes, como se sabe estas señales se combinan para formar una sola señal y esta es $C(t)$:

$$C(t) = m_1(t)p_0(t) + m_2(t)p_3(t) + m_3(t)p_6(t) \tag{B.1}$$

El resultado de $C(t)$ sería:

$C(t)$	3	-3	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-3	1	3	-1	1	3	1	1	-3	-1
--------	---	----	----	---	---	---	----	----	---	----	---	----	---	---	----	---	---	---	---	----	----

$C(t)$ es el mensaje que se envía por el transmisor en una sola banda de RF. El receptor capta $C(t)$ y separa la información, es decir, $C(t)$ se multiplica por el código de PN asignado a cada usuario:

$C(t)p_0(t)$	3	3	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-3	-1	-3	-1	1	3	1	1	3	1
$C(t)p_3(t)$	3	3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	3	1	3	-1	-1	-3	1	-1	-3	-1
$C(t)p_6(t)$	-3	-3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	3	-1	3	1	1	3	1	-1	3	-1

Después el receptor suma todos los valores durante cada periodo de bit, dando como resultado $M_1(t)$, $M_2(t)$, y $M_3(t)$.

$C(t)p_0(t)$	3	3	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-3	-1	-3	-1	1	3	1	1	3	1
$M_1(t)$							7								-9						7

$C(t)p_3(t)$	3	3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	3	1	3	-1	-1	-3	1	-1	-3	-1	
$M_2(t)$							7							7								-9

$C(t)p_6(t)$	-3	-3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	3	-1	3	1	1	3	1	-1	3	-1	
$M_3(t)$															7							7

Mediante un umbral de decisión que es aplicado a $M_1(t)$, $M_2(t)$, y $M_3(t)$, se obtienen los mensajes que fueron enviados por cada usuario. Este umbral de decisión viene dado por la siguiente regla:

$$\begin{aligned} \tilde{m}(t) &= 1 && \text{si } M(t) > 0 \\ \tilde{m}(t) &= -1 && \text{si } M(t) < 0 \end{aligned} \tag{B.2}$$

Aplicando la regla de la ecuación B-2 se obtiene:

$\tilde{m}_1(t)$	1		-1		1	
$\tilde{m}_2(t)$	1		1		-1	
$\tilde{m}_3(t)$	-1		1		-1	

En la figura B-1 se muestra el proceso anterior gráficamente.

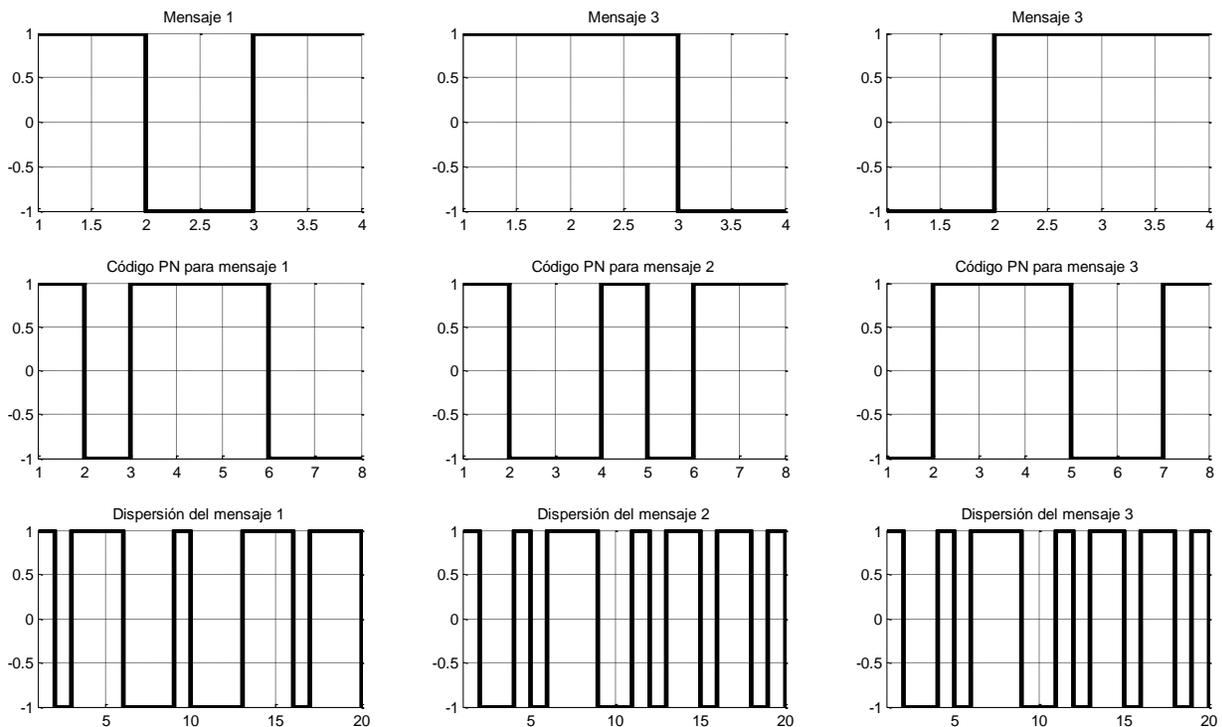


Figura B-1 Representación grafica de la canalización.

REFERENCIAS

- [1] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House, 1998.

APÉNDICE C

Obtención de la función de distribución acumulativa (cdf)

La cdf para una cualquier variable aleatoria continua X esta determina por la siguiente expresión.

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{u=-\infty}^x f(u) du \quad (\text{C.1})$$

Para el caso de una variable aleatoria exponencial negativa se define como:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} 1 - \exp(-\lambda x) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (\text{C.2})$$

Donde $\lambda > 0$ es el parámetro de la variable aleatoria exponencial negativa.

Obtención de la función de densidad de probabilidad (pdf)

La PDF para cualquier variable aleatoria X esta dada por la siguiente expresión:

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x) \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{C.3})$$

Continuando con el caso de una variable aleatoria exponencial negativa:

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda x) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (\text{C.4})$$

Los promedios estadísticos (media y varianza) de una variable aleatoria exponencial negativa son:

$$E(X) = \mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx = \frac{1}{\lambda}$$

$$Var(X) = \sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f_x(x) dx = \frac{1}{\lambda^2}$$
(C.5)

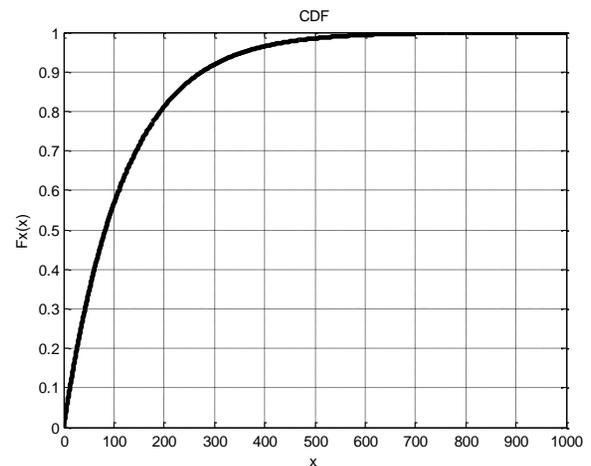
Para nuestra evaluación necesitamos variables aleatorias exponenciales negativas con una media de 120 segundos, teniendo la media podemos despejar λ de la ecuación (C.5):

$$E(X) = \mu_x = \frac{1}{\lambda} = 120 \quad \therefore \quad \lambda = \frac{1}{120}$$

Una vez que tenemos λ , la sustituimos en las ecuaciones (C.2 y (4.5) quedando de la siguiente forma:

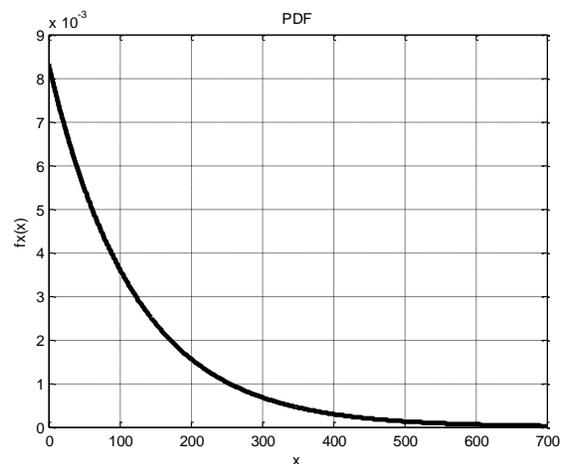
cdf

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{1}{120}x\right) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$



pdf

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{120} \exp\left(-x/120\right) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$



APÉNDICE D

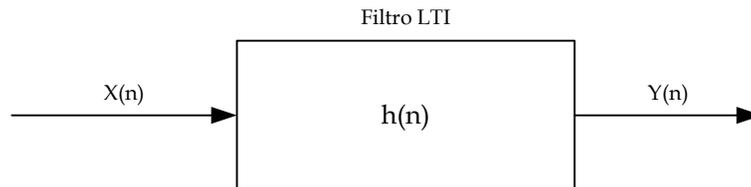
Procedimiento para generar un proceso estocástico Gaussiano estacionario con función de autocorrelación exponencial.

Para generar un proceso $Y(n)$ con una autocorrelación $r_{xx}(\ell)$, se genera un proceso $X(n)$ de ruido blanco de varianza 1, forma que:

$$r_{xx}(\ell) = \delta(\ell)$$

Luego este proceso X se hace pasar por un filtro LTI cuya respuesta al impulso $h(n)$ cumpla con la relación:

$$h(\ell) * h^*(-\ell) = r_{yy}(\ell)$$



La función de autocorrelación exponencial para el proceso de salida está definida por siguiente expresión:

$$r_{yy}(\ell) = \sigma^2 a^{|\ell|}$$

Para encontrar la respuesta al impulso requerida del filtro, es más fácil realizarlo en el dominio de la frecuencia:

$$\mathfrak{T}\{r_{yy}(\ell)\} = S_{yy}(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} r_{yy}(l) e^{-j\omega l} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sigma^2 a^{|l|} e^{-j\omega l} = \frac{\sigma^2}{1+ae^{j\omega}} + \frac{\sigma^2}{1-ae^{j\omega}} - \sigma^2 =$$

$$\frac{\sigma^2(1-a^2)}{(1-ae^{-j\omega})(1-ae^{j\omega})}$$

$$S_{yy}(\omega)H(\omega) = H(\omega)^*(\omega)$$

Donde:

$$H(\omega) = \frac{\sigma\sqrt{1-a^2}}{1-ae^{-j\omega}} = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$

$$Y(\omega) = X(\omega)\sigma\sqrt{1-a^2} + Y(\omega)ae^{-j\omega}$$

$$y(0) = \sigma\sqrt{1-\exp(-2d/d_c)}x(0) \quad \text{para } n=0$$

$$y(n) = \sigma\sqrt{1-\exp(-2d/d_c)}x(n) + \exp(-d/d_c)y(n-1) \quad \text{para } n > 0$$

El filtro descrito por $H(\omega)$ se utiliza para generar el proceso de salida $y(n)$ con la correlación deseada a partir del proceso de ruido blanco Gaussiano $x(n)$.

$$Y(\omega) = X(\omega)\sigma\sqrt{1-a^2} + Y(\omega)ae^{-j\omega}$$

Calculando la transformada inversa de Fourier:

$$y(n) = \sigma\sqrt{1-a^2}x(n) + ay(n-1)$$

Donde:

$$a = \exp\left(-\frac{d}{d_c}\right) = \exp\left(-\frac{vT}{d_c}\right)$$

$$d = vT$$

d es la separación entre las muestras en metros

v es la velocidad al cual se toman las muestras de la señal

d_c es la distancia de decorrelación

De esta forma la ecuación anterior en forma discreta queda:

$$y(0) = \sigma\sqrt{1-\exp(-2d/d_c)}x(0) \quad \text{para } n=0$$

$$y(n) = \sigma\sqrt{1-\exp(-2d/d_c)}x(n) + \exp(-d/d_c)y(n-1) \quad \text{para } n > 0$$

Donde:

$x(n)$ es el proceso de ruido blanco Gaussiano de varianza 1 a la entrada del filtro,
 $y(n)$ es el proceso de salida con la autocorrelación deseada $r_{yy}(l)$ con una distancia de correlación d_0 y una desviación estándar σ .