

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



CICeSE

DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA

DEPARTAMENTO DE
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA
CDMA EN BASE AL ESQUEMA DE MODULACIÓN
EMPLEADO PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS
EN MÉXICO**

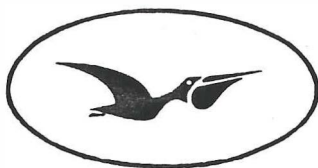
TESIS

que para cubrir parcialmente los **requisitos** necesarios para
obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** presenta:

GUILLERMINA MONTIEL ALMAZÁN

Ensenada, Baja California, México. Noviembre de 1998.

TK
5103
.2
.M65
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



CICSE

DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA

**DEPARTAMENTO DE
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA
CDMA EN BASE AL ESQUEMA DE MODULACIÓN
EMPLEADO PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS
EN MÉXICO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

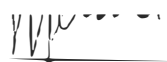
GUILLERMINA MONTIEL ALMAZÁN

Ensenada, Baja California, México. Noviembre de 1998.

RESUMEN de la Tesis de **Guillermina Montiel Almazán**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO en CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, México. Noviembre de 1998.

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA
EN BASE AL ESQUEMA DE MODULACIÓN EMPLEADO PARA
COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN MÉXICO**

Resumen aprobado por:


Dr. Fco. Javier Mendieta Jiménez
Director de tesis

México se encuentra en un proceso de apertura y modernización de telecomunicaciones en el cual las comunicaciones inalámbricas juegan un papel fundamental. Para impulsar el desarrollo de la telefonía básica, la COFETEL (Comisión Federal de Telecomunicaciones) efectuó de Octubre de 1997 a Mayo de 1998 el proceso de licitación de las bandas de frecuencias para la prestación del servicio inalámbrico fijo (AIF) y móvil (PCS). Debido a los costos de las frecuencias para proveer servicios es necesario diseñar sistemas que sean eficientes espectralmente. La eficiencia espectral de un sistema de comunicación celular depende principalmente de la opción de esquema de acceso múltiple. Actualmente existe un debate sobre cual esquema de acceso, CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) o TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo), proporciona mayor capacidad para la tecnología AIF, lo cual es clave para el operador. Por tal motivo, el objetivo principal de este trabajo es realizar el estudio de la eficiencia espectral del sistema CDMA, considerando el estándar IS-95 (Estándar Interino-95) para la tecnología AIF en México. Para llevar a cabo el objetivo se desarrolló una metodología detallada y explícita para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95, considerando el estándar IS-95, aplicada a la tecnología AIF, en la cual se involucra el proceso de la planeación del enlace para la obtención del E_b/N_0 , y se consideran los factores necesarios que permiten analizar la eficiencia espectral del sistema en una región particular. En base a la metodología se desarrolló un programa de computadora, que puede ser utilizado como una herramienta que hace posible el análisis de la eficiencia espectral según el escenario planteado de una manera práctica, sistemática, y rápida, permitiendo realizar una toma de decisiones adecuada en el diseño de la red. La metodología y programa se aplicaron en un caso de estudio de un escenario real, incorporándose una comparación con el sistema TDMA. Los resultados obtenidos indican que la mejor eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95 se obtiene con una relación E_b/N_0 igual a 6 dB, tipo de celda sectorizada 120° y con el menor radio de celda. La eficiencia espectral del sistema CDMA es mayor a la del sistema GSM, y puede representar un menor costo, aunque eso depende de la demanda de tráfico de la zona. Por sus ventajas en capacidad se espera que en los próximos años CDMA tenga mayor penetración en el mercado y pueda ser la tecnología de mayor utilización.

Palabras clave: Eficiencia espectral, CDMA, Acceso Inalámbrico Fijo.

ABSTRACT of the Thesis of **Guillermina Montiel Almazán**, presented as a partial requirement to obtain the degree of MASTER in SCIENCES in ELECTRONICS and TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, Mexico. November 1998.

**SPECTRAL EFFICIENCY STUDY FOR THE CDMA SYSTEM
BASED ON THE MODULATION SCHEME USED FOR
WIRELESS COMMUNICATIONS IN MEXICO**

Mexico is in the process of aperture and modernization for telecommunications in which wireless communications play a fundamental role. To help push forward in the development of basic telephony the COFETEL (Comisión Federal de Telecomunicaciones) conducted, from October 1997 to May 1998, the legislation for frequency bands utilized in fixed (WLL) and mobile (PCS) wireless services. Due to the cost associated with the use of this of frequencies and equipment to provide service, it is necessary to design spectral efficient systems. The spectral efficiency of cellular communications systems depends mainly on the multiple access scheme that is being used. Nowadays there is a debate over which access scheme, CDMA (Code Division Multiple Access) or TDMA (Time Division Multiple Access), provides more capacity for WLL technology, that being a key issue for the operator. Considering this, the main objective for this work is to conduct a study on the spectral efficiency of the CDMA system, taking into account the IS-95 (Interim Standard-95) for WLL in Mexico. To realize this objective a detailed and explicit methodology was created to determine the spectral efficiency of the CDMA system considering the IS-95 standard applied to WLL technology; this involves the link budget to obtain the E_b/N_0 and also includes the necessary factors that allow for the analysis of the spectral efficiency of a system in a particular region. Based on this methodology, a computer program was developed to be used as a tool during the decision making of the network in the design stage, it provides for a fast, practical and systematic analysis of the spectral efficiency in a given scenario. The methodology and test program was applied to a real life case study with the results presented; a TDMA system study is included for comparison. The results obtained show that the CDMA system gets a better spectral efficiency for a E_b/N_0 equal to 6 dB with a 120° sectored cell and with the smallest cell radius. The spectral efficiency of a CDMA system is greater than the GSM standard. It could performs a lower cost, although depends on the traffic demand of the zone. It is expected that CDMA will have deeper penetration, being the most widely used technology in the market in the coming years.

Keywords: Spectral efficiency, CDMA, Wireless Local Loop.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con mi más profundo respeto, admiración y cariño:

A mis amados padres
Brígida Almazán de Montiel
Ignacio Montiel Pérez

Quienes con su infinito amor, apoyo incondicional y confianza han contribuido nuevamente a la realización de una meta más.

Gracias por compartir conmigo su enorme sabiduría y su inmenso amor.

Gracias por haberme dado la oportunidad de elegir mi propio destino.

Gracias por guiarme con cariño, por enseñarme los valores y principios necesarios para llegar a ser mejor.

Pero sobre todo gracias a Dios y a ustedes por permitirme ser parte de sus vidas.

Con admiración y cariño a
Cecilia A. Castañeda de Vázquez (=)
Víctor Vázquez Jaimes (=)

Por haberme querido de tal manera que me dejaron el mejor recuerdo de todos.

Gracias donde quiera que se encuentren.

Con agradecimiento a
Víctor Vázquez Castañeda

Por estar cerca de mi cuando te necesito, por apoyarme y quererme así como soy.

Pero sobre todo por ser el mejor de los hermanos.

Con mucho amor a
Héctor Gómez Gutiérrez

Por todo el apoyo y amor que he recibido de ti durante todo este tiempo, por quererme y respetarme, por ser siempre tan auténtico e inteligente, pero sobre todo gracias por enseñarme que la vida y la felicidad van más allá de todo lo material. Te quiero.

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS** por el don de la vida, por todo lo que me sigue dando sin merecerlo y por no olvidarse de mí.

Al Dr. Fco. Javier Mendieta J., director de esta tesis, por brindarme su amistad, y por las facilidades brindadas y apoyo durante el desarrollo de la tesis, sin las cuales este trabajo no hubiera podido ser posible.

Al Dr. Arturo Serrano S., director de esta tesis, por la dirección de este trabajo, por su amistad, apoyo incondicional y sus invaluable consejos.

A los miembros del comité de tesis, Dr. Jesús Favela V., y M.C. Ernesto Quiroz M., por su amistad, consejos y valiosas aportaciones para la realización de este trabajo.

A los investigadores y técnicos del Depto. de Electrónica y Telecomunicaciones por los conocimientos y experiencias que me transmitieron durante la maestría. Especialmente al Ing. Rodolfo Castañeda y al Dr. Arturo Arvizu (Don gato), gracias por su amistad.

A las secretarias del Depto. de Electrónica y Telecomunicaciones y de la Dirección General Bety, Rubí, Eva, Cecy, Maricela Rosy y Claudia por su ayuda y apoyo incondicional, y por toda la lata que soportaron de mí, gracias a todas.

A todos mi compañeros y amigos de generación, especialmente a Alicia Morales, Salvador Ojeda (Choco), Iván Melgarejo (pollito), Angel Andrade (tu si que hablas rápido) y Eduardo Álvarez por lo momentos felices que pasamos, así como a los amigos de

generaciones anteriores y posteriores, especialmente a Edith García, Rosy Chavez, Erica Ruíz, Marlenne Angulo, Marco Turrubiates, Arlette Alvaréz, Milka Acosta y Susana Padilla gracias por su amistad y por los momentos compartidos.

Al CONACyT, por brindarme el apoyo económico para realizar estos estudios.

Al CICESE, por permitirme realizar mis estudios de maestría.

CONTENIDO

	Página
Capítulo I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes	1
I.2 Motivación del trabajo	3
I.3 Objetivo	4
I.4 Metas del trabajo	5
I.5 Organización del trabajo	6
Capítulo II. ACCESO INALÁMBRICO FIJO	8
II.1 Introducción	8
II.2 Concepto del sistema AIF y características	9
II.3 Arquitectura del sistema AIF	11
II.4 Aspectos técnicos	14
II.4.1 Ambiente de propagación de radio	15
II.4.1.1 Atenuación relacionada con la distancia	16
II.4.1.2 Desvanecimiento lento	17
II.4.1.3 Desvanecimiento rápido	18
II.4.2 Diferencias entre el sistema fijo y el sistema móvil	21
II.4.3 Esquemas de Acceso Múltiple	23
II.4.3.1 CDMA	25
II.4.3.2 TDMA	28
II.5 Aspectos regulatorios en México	31
II.5.1 Bandas de frecuencias	33
II.5.2 Regiones de servicio	38
II.5.3 Tecnologías celulares	38
II.5.4 Tecnologías propietarias	40
Capítulo III. SISTEMA CDMA IS-95	42
III.1 Introducción	42
III.2 Aspectos del enlace de radio	43
III.2.1 El sistema CDMA	43
III.2.2 Enlace aéreo CDMA	46
III.2.2.1 Enlace de bajada	47
III.2.2.2 Enlace de subida	49
III.2.3 Códigos	51
III.2.3.1 Código Walsh	52
III.2.3.2 Código PN largo	53

CONTENIDO (Continuación)

	Página
III.2.3.3 Código PN corto	53
III.2.4 Control de potencia CDMA	53
III.2.5 Modulación	59
Capítulo IV. EFICIENCIA ESPECTRAL DE UN SISTEMA CELULAR	64
IV.1 Introducción	64
IV.2 Definición de eficiencia espectral	64
IV.3 Cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA	66
IV.4 Factores que intervienen en la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA	70
IV.4.1 Obtención del E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace basándose en la predicción de propagación	71
IV.4.1.1 Modelos de predicción de propagación	73
IV.4.1.2 Clasificación de las zonas	75
IV.4.1.3 Planeación del enlace basado en el modelo de predicción Hata	76
IV.4.2 Número de usuarios por celda por canal de tráfico (M)	81
IV.4.3 Clasificación de las celdas por su dimensión	88
IV.4.4 Forma de la celda	90
IV.4.5 Grado de servicio	91
Capítulo V. DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA IS-95	94
V.1 Introducción	94
V.2 Algoritmo para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA estándar IS-95	95
V.2.1 Rutina para la obtención del E_b/N_0	96
V.2.2 Rutina para el cálculo de la eficiencia espectral	100
V.3 Descripción del programa	108
Capítulo VI. CASO DE ESTUDIO	124
VI.1 Introducción	124
VI.2 Planeación del Enlace	125
VI.3 Eficiencia Espectral	127
VI.3.1 Capacidad de canales de voz por celda	132
VI.3.2 Capacidad de Erlangs/celda	138

CONTENIDO (Continuación)

	Página
VI.3.3 Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km ²] en función del E _b /N ₀	139
VI.3.4 Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km ²] en función del radio de la celda	141
VI.3.5 Eficiencia espectral [llamadas·hora/Km ²]	142
VI.3.6 Eficiencia espectral [usuarios/Km ² ·MHz]	145
VI.3.7 Capacidad de usuarios en toda la red inalámbrica	147
VI.3.8 Propuesta de diseño de la red para el escenario de estudio	149
VI.4 Comparación de CDMA IS-95 con TDMA GSM	151
VI.4.1 Eficiencia espectral	152
VI.4.2 Capacidad de usuarios en toda la red inalámbrica	155
VI.4.3 Número de estaciones base requeridas para una demanda de tráfico	156
Capítulo VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	160
VII.1 Conclusiones	160
VII.2 Aportaciones	164
VII.3 Recomendaciones	165
LITERATURA CITADA	167
APÉNDICE A. LISTADO DEL PROGRAMA	172
GLOSARIO	172



LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. a) Arquitectura AIF con conexión directa a la RTPC. b) Arquitectura AIF conectando las EB's con CCM.	12
2. a) Ejemplo de una trayectoria difractada. b) Ejemplo de una trayectoria reflejada.	18
3. Ambiente típico de propagación con sombreado y multitrayectoria.	21
4. Diferencia en interferencia cuando se emplean antenas direccionales.	22
5. Diagramas de los esquemas de acceso FDMA, TDMA y CDMA.	24
6. Técnica de modulación y demodulación de espectro extendido.	27
7. Estructura de una trama TDMA.	29
8. Regiones geográficas para el servicio AIF en México.	38
9. Estructura del enlace aéreo CDMA.	46
10. Canal de tráfico CDMA del enlace de bajada.	48
11. Canal de tráfico CDMA del enlace de subida.	51
12. Ilustración del problema de interferencia cerca-lejos.	55
13. Control de potencia en el enlace de subida.	57
14. Modulador QPSK del sistema CDMA.	61
15. Desempeño de la tasa de error de la modulación QPSK con FEC 1/3.	63
16. Altura de la antena de la estación base.	79
17. Planeación de un enlace de radio.	81
18. Espectro de señal recibida deseada con interferencia: (a) señal de entrada en el receptor y (b) señal de salida después de la desexpansión.	83
19. Interferencia por celdas vecinas.	86
20. (a) Celda sectorizada 120°. (b) Celda omnidireccional.	88
21. Tipos de celda por su forma.	91
22. Diagrama general a bloques del programa.	96
23. Diagrama de flujo de la rutina para la obtención del E_b/N_0 .	99
24. Continuación del diagrama de flujo de la rutina para la obtención del E_b/N_0 .	100
25. Diagrama de flujo de la rutina para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA (primera parte).	103
26. Continuación del diagrama de flujo de la rutina para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA (segunda parte).	105
27. Continuación del diagrama de flujo de la rutina para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA (tercera parte).	107
28. Pantalla con el menú principal.	109
29. Menú "Zona".	110
30. Ventana para asignar la altura de la estación base.	111
31. Ventana para asignar la altura de la antena de la estación del subscriptor.	111
32. Ventana para asignar el radio de la celda.	112
33. Ventana para asignar la potencia radiada efectiva (ERP).	113

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura	Página
34. Ventana para asignar la tasa de información de usuario.	113
35. Ventana verificar el E_b/N_0 obtenido de la planeación del enlace.	114
36. Ventana para asignar el área de cobertura total del sistema.	114
37. Menú "Forma de celda".	115
38. Menú "Ancho de banda total".	115
39. Ventana para elegir tipo de celda.	116
40. Ventana para asignar el factor de interferencia entre celdas vecinas (β).	117
41. Ventana para asignar el factor de precisión de control de potencia (α).	117
42. Ventana para asignar el factor de actividad de voz (v).	118
43. Ventana de consulta para obtener la eficiencia espectral del sistema CDMA en otros términos.	119
44. Ventana de resultados (opción 1).	120
45. Submenú para elegir el tiempo de duración promedio de llamada.	121
46. Ventana para asignar la carga de tráfico por subscritor (Erlangs/subscritor).	121
47. Ventana de resultados (opción 2).	123
48. Capacidad de canales de voz/celda en función del E_b/N_0 .	133
49. Capacidad de canales de voz/celda en función del factor de precisión de control de potencia.	135
50. Capacidad de canales de voz/celda en función del factor de interferencia entre celdas vecinas.	136
51. Capacidad de canales de voz/celda en función del factor de actividad de voz.	137
52. Capacidad de Erlangs/celda en función del E_b/N_0 .	138
53. Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km ²] en función del E_b/N_0 .	140
54. Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km ²] en función del radio de la celda.	141
55. Capacidad de llamadas·hora/celda en función del tiempo de duración promedio de llamada.	143
56. Eficiencia espectral [llamadas·hora/Km ²] en función del radio de la celda.	144
57. Capacidad de usuarios·hora/celda.	145
58. Eficiencia espectral [usuarios/Km ² ·MHz] en función del radio de la celda	146
59. Capacidad de usuarios en toda la red.	148
60. Comparación de eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km ²] entre CDMA IS-95 y GSM.	153
61. Comparación de la capacidad de usuarios en la red entre CDMA IS-95 y GSM.	155
62. Comparación del número de Estaciones Base requeridas por GSM y CDMA IS-95 en un área de 1000 Km ² . (a) Ancho de banda asignado de 5 MHz, y (b) ancho de banda asignado de 15 MHz.	157

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
I. Frecuencias propuestas para la tecnología AIF.	35
II. Comparación de los servicios de IS-95 y GSM.	39
III. Características de los sistemas IS-95, GSM y D-AMPS.	40
IV. Características de las tecnologías propietarias aplicadas para AIF.	41
V. Características principales del sistema CDMA IS-95.	44
VI. Potencias de salida de la unidad del subscritor de las especificaciones del estándar CDMA IS-95.	59
VII. Modelos de predicción de pérdidas por trayectoria de propagación.	74
VIII. Valores típicos de la pendiente de atenuación en función de la zona.	80
IX. Tipos de celdas y su dimensión del radio.	90
X. Área y población de las zonas.	125
XI. Comparación de resultados obtenidos por Qualcomm y por el programa en la planeación del enlace para una zona urbana densa.	126
XII. Capacidad de CDMA IS-95 en el escenario inicial urbano denso.	128
XIII. Capacidad de CDMA IS-95 en escenarios alternos respecto al caso inicial.	131
XIV. Diseño de la red para atender una demanda de 595 subcriptores/Km ² .	150
XV. Capacidad por celda de CDMA IS-95 y GSM.	153
XVI. Capacidad de canales de voz/celda de CDMA IS-95 y GSM.	157

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA EN BASE AL ESQUEMA DE MODULACIÓN EMPLEADO PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN MÉXICO

Capítulo I. INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

La demanda de comunicaciones de cualquier tipo, en cualquier lugar y en cualquier momento en esta era de la información esta llevando a la tecnología y sus aplicaciones hacia nuevos y drámaticos logros. Por lo que, actualmente en el mundo las compañías de telecomunicaciones han puesto énfasis en las comunicaciones inalámbricas debido a que representan una alternativa económica y eficiente para ofrecer servicio telefónico, ya sea en la forma del conocido teléfono móvil o mediante la aplicación de servicios inalámbricos fijos.

México se encuentra en estos momentos en un proceso de apertura y modernización en las telecomunicaciones, cuyo continuo desarrollo tecnológico ha provocado que surjan nuevos proveedores de servicios inalámbricos y por lo tanto un escenario de competencia. La COFETEL (Comisión Federal de Telecomunicaciones) efectuó de Octubre de 1997 a Mayo de 1998 el proceso de licitación de las bandas de frecuencias para la prestación competitiva del servicio inalámbrico fijo y móvil. Con esta licitación se dará un fuerte impulso al desarrollo de servicios inalámbricos básicos de acceso local explotando el gran potencial de esta tecnología.

El espectro de frecuencias al ser un recurso limitado, debe de ser explotado eficientemente por los proveedores de servicios. Debido a los elevados costos de las frecuencias y de las licencias para proveer servicios de comunicación, es necesario diseñar sistemas que sean espectralmente eficientes. La utilización óptima del espectro electromagnético es un factor crítico en el éxito de los sistemas de comunicaciones inalámbricos. Para realizar un uso eficiente del espectro, una variedad de técnicas han sido propuestas o actualmente están siendo implementadas en los sistemas de comunicaciones móviles, sin embargo, la eficiencia espectral de un sistema de comunicación celular depende principalmente de la selección del esquema de acceso múltiple [Garg *et al*, 1996]. Los esquemas de acceso múltiple permiten compartir el espectro de frecuencias entre un grupo numeroso de usuarios.

En la actualidad existe un debate sobre cual esquema de acceso, CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) o TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo), es el más apropiado para la tecnología Acceso Inalámbrico Fijo (AIF), este debate está enfocado primordialmente en cual de los dos esquemas de acceso puede proporcionar mayor eficiencia para una asignación de espectro dado, lo cual es clave para el operador AIF [Webb, 1998]. Conocer cual de estos sistemas permite tener una mejor eficiencia espectral ha despertado un gran interés en los diseñadores de equipo y en los operadores de servicio.

La elección apropiada para un caso específico de alguna de estas dos tecnologías de acceso va a depender de varios factores tecnológicos, regulatorios y económicos. Para poder determinar cual de estas dos tecnologías satisfacen los requerimientos de servicio en una población en particular es necesario realizar estudios de eficiencia espectral donde se involucren todos los factores que permitan llevar a cabo una toma de decisiones adecuada. Una medida precisa de la eficiencia espectral nos habilita para estimar la capacidad del sistema de comunicación celular y nos permite determinar a un estándar como una medida de referencia mínima.

1.2 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

En base lo anterior, este trabajo de tesis se desarrolló debido a la necesidad de los operadores del servicio AIF y PCS (Servicios de Comunicación Personal) principalmente de México de contar con estudios comparativos de eficiencia espectral entre las tecnologías actualmente disponibles de acceso al canal CDMA y TDMA, que permitan mostrar una estimación la capacidad de los sistemas.

De manera general las motivaciones que se tienen para desarrollar este trabajo son:

- El desarrollar una metodología detallada y explícita que permita el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA estándar IS-95 (Estándar Interino-95, de sus siglas en inglés Interim Standard-95) aplicada a la tecnología AIF, considerando los

factores necesarios (zona, planeación del enlace, área de cobertura, etc.), que permita analizar la eficiencia espectral del sistema en una región en particular.

- El elaborar un programa en base a la metodología desarrollada que sirva como una herramienta que haga posible el análisis de la eficiencia espectral del sistema según el escenario planteado de una manera práctica, sistemática, rápida y confiable.
- El desarrollar un caso de estudio práctico donde se aplique la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA empleando el programa realizado.

De esta manera se validará el trabajo desarrollado en esta tesis. Asimismo, incorporar una comparación con el sistema TDMA (GSM) que permita ayudar a definir la tecnología más adecuada desde el punto de vista económico y de capacidad para una región en particular. Para el operador del servicio AIF es de vital importancia obtener la máxima capacidad (eficiencia espectral) al menor costo posible, y esto depende principalmente de la elección del esquema de acceso múltiple (CDMA o TDMA).

I.3 OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es realizar el estudio de la eficiencia espectral del sistema CDMA, considerando el estándar IS-95, para la tecnología de Acceso Inalámbrico Fijo en México.

1.4 METAS DEL TRABAJO

Para llevar a cabo el objetivo de la tesis se plantearon las siguientes metas u objetivos particulares:

- Estudio de la tecnología AIF y su relación al entorno regulatorio en México.
- Estudio del esquema de acceso CDMA, estándar IS-95, específicamente la interfaz de radio.
- Estudio de la definición de eficiencia espectral aplicada a los sistemas celulares, y del cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA.
- Desarrollo de una metodología detallada y explícita para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA considerando el estándar IS-95, aplicada a la tecnología AIF, en la cual se involucra el proceso de la planeación del enlace para la obtención del E_b/N_0 , y se consideran los factores necesarios que permitan analizar la eficiencia espectral del sistema en una región en particular.
- Desarrollo de un programa de computadora en base a la metodología propuesta que sirva como herramienta para el análisis de la eficiencia espectral del sistema según el escenario planteado de una manera práctica, sistemática, rápida y confiable, y que además permita generar escenarios alternos variando los diferentes factores que intervienen en el cálculo de la eficiencia espectral, permitiendo realizar una toma de decisiones adecuada en el diseño de la red para un caso de estudio en particular.
- Realizar un caso de estudio práctico donde se aplique la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA empleando el programa desarrollado, en

donde, además se incorpore una comparación con el sistema TDMA (GSM) que permitirá ayudar a definir la tecnología más adecuada desde el punto de vista económico y de capacidad para una región en particular.

I.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo de tesis incluye 7 capítulos y esta organizado de la siguiente forma. En el capítulo 2 se presenta una descripción de el sistema AIF, sus características, su arquitectura, el ambiente de propagación de radio en AIF incluyendo las diferencias entre un sistema móvil y un sistema AIF, y los esquemas de acceso múltiple CDMA y TDMA. Asimismo, se describen los aspectos regulatorios en México, incluyendo las regiones de servicio, y las bandas de frecuencias licitadas para la tecnología AIF. También se incluye la descripción de las principales tecnologías celulares y propietarias que pueden ser empleadas en las bandas de frecuencia antes mencionadas.

El capítulo 3 contiene la descripción y los aspectos básicos del funcionamiento del enlace de radio del sistema CDMA IS-95. Algunos de estos aspectos como modulación, codificación, etc., ayudan a definir el diseño del sistema por lo que son parte fundamental en la eficiencia espectral.

En el capítulo 4 se define el concepto de la eficiencia espectral de un sistema celular, así como, el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA. También se describen los fundamentos teóricos de los factores que intervienen en la metodología desarrollada para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA estándar IS-95.

En el capítulo 5 se realiza la descripción del algoritmo que detalla la metodología desarrollada para el cálculo de la eficiencia espectral a través de un diagrama de flujo. Asimismo, se presenta el programa basado en el algoritmo (metodología), en donde se muestran las diferentes pantallas (menús de diálogo y de resultados) del mismo.

En el capítulo 6 se presenta el desarrollo de un caso de estudio práctico donde se aplica la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA empleando el programa realizado. Este caso de estudio se basa en los parámetros de un análisis realizado por la compañía Qualcomm. Este estudio permite validar los resultados obtenidos en esta tesis. Cabe mencionar, que debido a que la tecnología AIF todavía no esta implementada en México se consideran los parámetros del análisis realizado por Qualcomm en la ciudad de Chicago. Este caso de estudio se puede considerar como una base para realizar el análisis de otros escenarios en zonas, urbana densa, urbana, suburbana y rural, que se puedan presentar en diferentes regiones de México. Además, se incorpora una comparación con el sistema TDMA estándar GSM, que permitirá ayudar a definir cual de las tecnologías (CDMA o TDMA) es la más adecuada desde el punto de vista económico y de capacidad para una región en particular.

El capítulo 7 presenta las conclusiones del trabajo, así como, las aportaciones que se hacen con el desarrollo de esta tesis y algunas recomendaciones que podrían ser realizadas para trabajos futuros.

Posteriormente se presentan las referencias a la literatura en la cuál se fundamentó el trabajo.

Capítulo II. ACCESO INALÁMBRICO FIJO

II.1 INTRODUCCIÓN

La tecnología de Acceso Inalámbrico Fijo (AIF, del inglés Wireless Local Loop - WLL) ofrece llevar servicios de telefonía de alta calidad a muchas personas que hoy en día carecen de este servicio y ello a un costo competitivo, esto permite un desarrollo más rápido de los países en su red telefónica existente [Salgado, 1997].

La economía de los sistemas de acceso inalámbrico era considerada solamente competitiva para las poblaciones de subscriptores rurales pero ahora las tecnologías de AIF son competitivas en precios en toda una amplia gama de segmentos de mercado, incluyendo tasas elevadas de tráfico en escenarios urbanos densamente poblados. Además, la evolución tecnológica hace posible que el acceso inalámbrico fijo sea una opción más para:

- Compañías de larga distancia. Representando una alternativa de acceso competitivo y una rápida implementación.
- Nuevos operadores de telefonía. Representando un rápido retorno sobre la inversión y menor costo de implementación que por líneas de cobre.
- Operadores de telefonía celular. Incluyendo servicios de datos y voz con calidad similar a la ofrecida por la red fija, incluyendo RDSI.
- Operadores de línea alámbrica. Proporcionando cobertura rural y suburbana más rápida a un menor costo.

Desde el punto de vista de los operadores de servicio, los beneficios clave de un AIF son los bajos costos de inversión, el rápido lanzamiento de redes y bajos costos de mantenimiento. Además, el proceso de construcción de un sistema AIF no requiere de un conocimiento preciso de la localización del usuario, lo que agrega flexibilidad a la planeación y lanzamiento del sistema. Las redes AIF tienen la capacidad de funcionar como un centro de comunicaciones en tiempos de desastre, o bien pueden ser utilizados como sistemas de respaldo para las redes alámbricas existentes [Garg *et al.*, 1996].

La tecnología de AIF esta ganando popularidad en países en desarrollo donde existe una gran demanda en el servicio telefónico. AIF es ideal para iniciar un sistema telefónico en áreas rurales o en desarrollo, ya que puede irse adaptando a las necesidades actuales eliminando muchos de los problemas y costos inherentes de los sistemas alámbricos.

Por lo anterior, para los operadores celulares, la tecnología de AIF representa una alternativa para obtener ingresos adicionales brindando una buena calidad de servicios de voz y datos similar a la de una red fija.

II.2 CONCEPTO DEL SISTEMA AIF Y CARACTERÍSTICAS

Un sistema acceso inalámbrico fijo es una tecnología de radio frecuencia que hace una conexión desde un conmutador local o desde un punto de distribución en la red fija hacia un número de casas [Webb, 1998]. Este sistema de AIF hace uso del radio como

medio para proporcionar un servicio telefónico local confiable, flexible y económico en lugar del tradicional servicio alámbrico [Garg *et al.*, 1996].

El artículo 3º de la Ley Federal de Telecomunicaciones define al acceso inalámbrico como el servicio de enlace bidireccional entre una red pública de telecomunicaciones y el usuario final para la transmisión conmutada de signos, señales, escritos, imágenes, voz, sonidos o información de cualquier naturaleza, que utiliza el recurso numérico regulado por el Plan Técnico Fundamental de Numeración vigente [COFETEL, 1997].

En algunas ocasiones AIF es nombrado de diferentes formas, como: telefonía inalámbrica fija, acceso de radio fijo y sistema celular fijo.

Caractestísticas

El acceso inalámbrico fijo se ha vuelto una realidad debido a los costos efectivos y/o limitaciones de otras tecnologías. AIF se ha diseñado para proporcionar servicios y conectar a clientes residenciales o pequeños comercios, cubriendo áreas de difícil acceso o que se encuentran densamente pobladas.

El sistema AIF tiene las siguientes características:

- Calidad de voz igual o mejor que la tecnología alámbrica.
- Funcionalidad semejante a una línea alámbrica, incluyendo tono de llamada con los beneficios de ser inalámbrico.

- Proporciona servicios de voz y datos, incluso RDSI dependiendo del sistema.
- Rápida implementación y desarrollo en comparación a la actual red alámbrica.
- Buen desempeño de la red con suficiente capacidad para manejar tráfico futuro y un gran número de subscriptores, así como altas densidades de tráfico (erlangs por subscriptor) utilizando un mínimo ancho de banda (eficiencia del espectro).
- Grado de servicio (GOS) similar al servicio alámbrico.
- Incluye autenticación para evitar su uso fraudulento, logrando privacidad y seguridad en la transmisión.
- Costos competitivos de la infraestructura de una red AIF iguales o menores a una red alámbrica [Lucent, 1997].

II.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA AIF

Existen dos configuraciones típicas para establecer un sistema de acceso inalámbrico fijo:

1. Una conexión directa a la red telefónica pública conmutada (RTPC, del inglés Public Switched Telephone Network -PSTN), proporcionada por una adecuada capacidad existente en la oficina central de conmutación (OC). Con este tipo de configuración, las estaciones bases (EB) son conectadas con la oficina central de conmutación y esta continúa para proporcionar las funciones de base de datos y tarificación, así como el plan de numeración y el progreso de tonos (véase figura 1(a)).

2. Las estaciones base son conectadas a un centro de conmutación móvil (CCM, del inglés Mobile Switching Center - MSC), el cual las interconecta a la oficina central (véase figura 1 (b)).

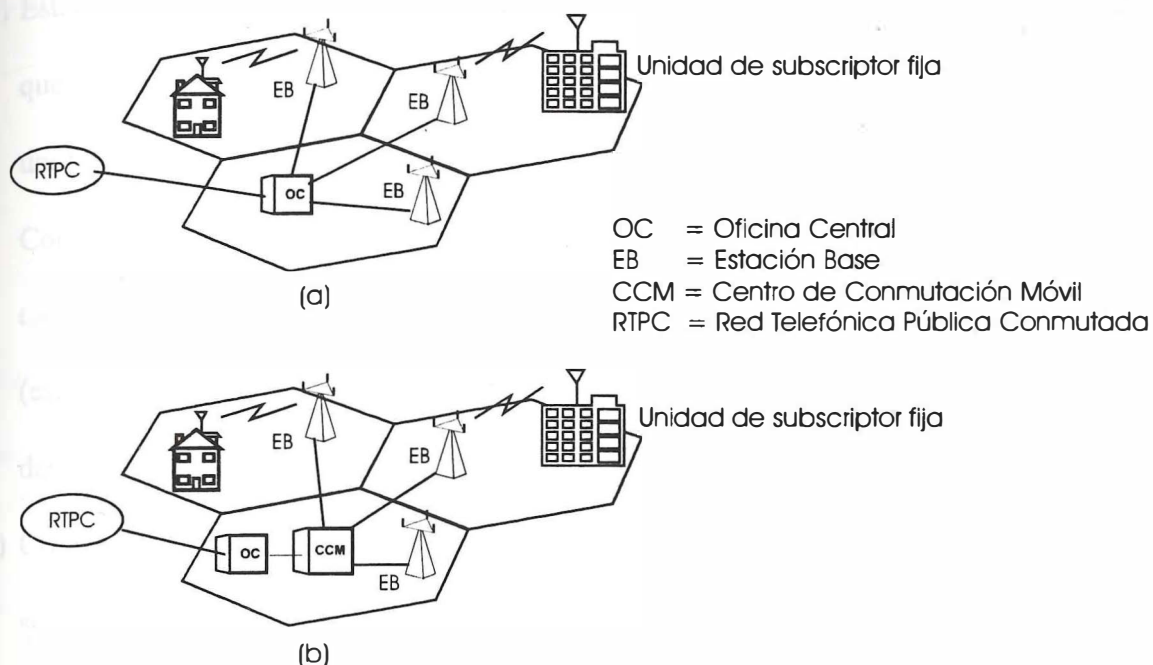


Figura 1. a) Arquitectura AIF con una conexión directa a la RTPC. b) Arquitectura AIF conectando las EB's con CCM.

Existen tres componentes principales que integran el sistema AIF: una unidad de subscriptor fija, una estación base (EB) y un centro de conmutación móvil (CCM) [Garg *et al.*, 1996] y sus funciones básicas son las siguientes:

- a) Unidad de subscriptor fija. Unidad física del lado del usuario que se comunica a la estación base (EB) a través de un canal de radio frecuencia. Esta compuesta de una unidad de control, un transceptor y un sistema de antena. Utilizando una antena de

ganancia alta en el techo, pudiendo ser asegurada la línea de vista hacia la EB y la calidad de transmisión y la cobertura puede ser maximizada. Por lo que a través de estas unidades móviles, los usuarios finales obtienen el servicio.

b) Estación base (EB). También conocida como sitio de la celda (cell site). Es el equipo que se encarga de comunicar al centro de conmutación móvil (CCM) con todas las unidades de subscritor fija que se encuentren dentro de la cobertura del sistema. Contiene funciones de hardware y software requeridas para la comunicación sobre los canales de radio. Es responsable de los procedimientos para el proceso de la llamada (establecimiento, terminación y servicios al subscritor) junto con la compresión y descompresión de audio.

c) Centro de conmutación móvil (CCM). Es una central de telefonía pública dedicada al servicio de telefonía celular y se compone de dos sistemas: un sistema de conmutación y un sistema de procesamiento de datos. Su principal función es el manejo y control de los demás elementos del sistema como son las estaciones base y las unidades de subscritor fija. Algunas de las funciones que realiza son:

- Establecimiento y supervisión de llamadas en las que intervienen los subscritores.
- Elaboración, procesamiento y almacenaje de la información relativa a su propio funcionamiento, así como, información referente al resto de los elementos del sistema.

- Desempeña las actividades de conmutación.
- Controla las funciones de inscripción, autenticación y administración del subscriptor.
- Contiene una base de datos fija para almacenar y administrar la información del subscriptor (identificación del subscriptor, duración, origen/terminación y destino de la llamada, información).

La red telefonía Pública Conmutada (RTPC) a pesar de que no forma parte de esta arquitectura, al funcionar como interconexión con la red inalámbrica, es considerada como parte para su operación.

II.4 ASPECTOS TÉCNICOS

Los sistemas AIF son sistemas de radio y para comprenderlos mejor es necesario conocer algunas cuestiones asociadas con la radio propagación, el sistema de radio y los métodos de acceso. La propagación es crítica para lograr de manera confiable el enlace con el subscriptor. El diseño del sistema de radio es crítico para asegurar un desempeño óptimo con un costo mínimo, en el cual, el esquema de acceso es uno de los factores clave entre las diferentes tecnologías [Webb, 1998].

II.4.1 Ambiente de propagación de radio

La propagación de las señales de radio juegan un papel importante en los sistemas de AIF. Es el medio por el cual las señales son transmitidas tanto de las estaciones base como de las unidades de subscritor fijas. La propagación que pueda ser alcanzada limita el rango de la estación base, requiriendo más celdas cuando la estación base no puede brindar una señal satisfactoria a todos los subcriptores. La propagación en los sistemas móviles es complicada debido al movimiento del usuario, probablemente dentro de edificios y áreas sombreadas (obstruídas) de la señal de radio. Mientras que, en la propagación de AIF es substancialmente menos complicada, aunque, algunos de los fenómenos que afectan la propagación de radio móvil tienen un impacto en los sistemas AIF [Webb, 1998].

Debido a que las condiciones de propagación en los enlaces de radio (o radio propagación) limitan el área que puede ser cubierta por un transmisor y el enlace de radio hacia y desde la unidad de subscritor fija es un canal de comunicación variable, en los sistemas de ambiente inalámbrico se considera que las pérdidas por trayectoria experimentadas cuando la señal es transmitida a través del canal esta afectada por tres distintos fenómenos:

- Atenuación relacionada con la distancia (distance-related attenuation).
- Desvanecimiento lento (slow fading).
- Desvanecimiento rápido (fast fading).

II.4.1.1 Atenuación relacionada con la distancia

La atenuación relacionada con la distancia simplemente expresa el efecto de atenuación que la señal sufre por la pérdida de potencia a medida que se incrementa la distancia desde el transmisor hacia el receptor. La caída de la potencia de la señal es causada por el esparcimiento de la señal fuera del transmisor hacia la superficie de la celda. El área de la superficie es proporcional a el radio al cuadrado; por esto, la potencia de la señal es proporcional a $1/d^2$, donde d es la distancia desde el transmisor a el receptor. Esto quiere decir que la potencia recibida decae con la distancia a una tasa de 20 dB/década, esto es típico en la propagación en el espacio libre (libre de obstrucciones).

Se ha visto en la práctica, que en las mediciones de canales de radio móvil, la potencia de la señal decrece más rápidamente que $1/d^2$. Los valores frecuentemente usados en la predicción de propagación radio móvil son $1/d^{3.5}$ o $1/d^4$, dependiendo del modelo usado [Webb, 1998]. Por lo que frecuentemente la pendiente de pérdida de propagación es considerada en 40 dB/década ($\gamma = 4$) en sistemas celulares (fijo a móvil). En el caso de los sistemas AIF (fijo a fijo) la mayoría de los enlaces tienen una trayectoria de propagación vía directa línea de vista (del inglés, line-of-sight -LOS-), por lo que, la pendiente de pérdida de propagación es considerada en 20 dB/década ($\gamma = 2$) [Garg *et al.*, 1996].

II.4.1.2 Desvanecimiento lento

El desvanecimiento lento (también conocido como sombreo) es un fenómeno radio móvil donde la onda de radio puede ser parcialmente bloqueada o absorbida cuando el móvil pasa detrás de una construcción. Durante el período en que el móvil se encuentra detrás de la construcción, la señal recibida es reducida. Cuando el usuario esta en movimiento pasará detrás de una secuencia de construcciones, causando que la señal se reduzca en potencia o se desvanezca de manera relativamente lenta. Éste fenómeno no es directamente aplicable en sistemas AIF, porque el receptor no se encuentra en movimiento. Sin embargo, los receptores instalados donde la trayectoria del transmisor esta siendo sombreada, estan permanentemente en desvanecimiento lento. Considerando las pérdidas en la señal debidas al desvanecimiento permite planear cuales subscriptores que estan siendo obstruídos estan habilitados para recibir suficiente señal basandose en la difracción y reflexión (veáse figura 2). Si una señal que es recibida vía una reflexión en un sistema AIF, típicamente esta cerca de 15 dB más débil que si fuera recibida vía una trayectoria directa. Si el uso de reflexiones es necesaria en algunas áreas, es necesario considerar este margen en la planeación de las pérdidas por trayectoria [Webb,1998].

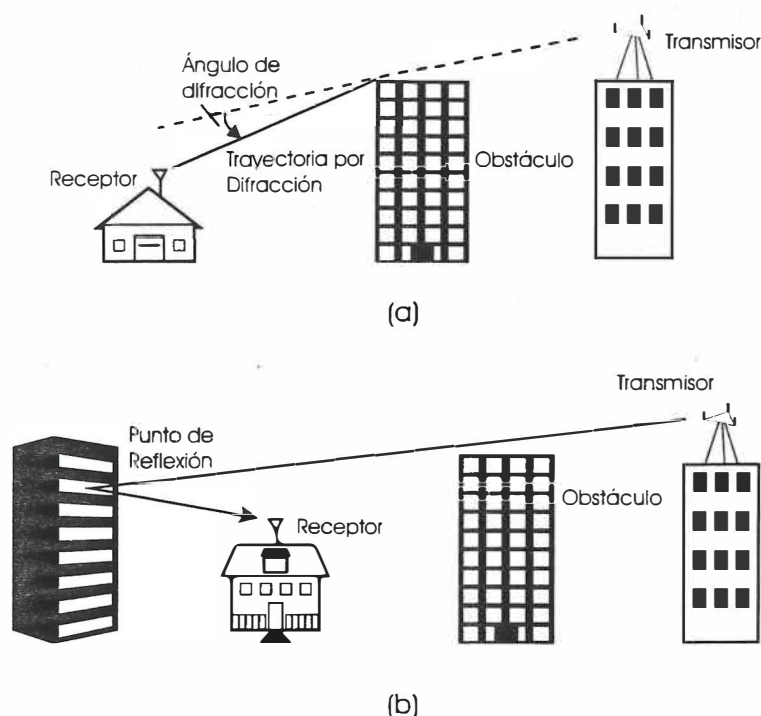


Figura 2. a) Ejemplo de una trayectoria difractada. b) Ejemplo de una trayectoria reflejada.

II.4.1.3 Desvanecimiento rápido

El desvanecimiento rápido es otro fenómeno radio móvil. Es causado al producirse no una, sino múltiples trayectorias entre el transmisor y receptor, distintas todas entre sí. Éste fenómeno de multitrayectorias resulta por el movimiento del usuario. Varias componentes multitrayectoria de la señal transmitida arriban al receptor al mismo tiempo, cada una con diferente retardo, y por lo tanto, diferente corrimiento en fase. Estas componentes se combinan constructiva o destructivamente para producir un corrimiento en fase aleatorio. Esto causa cambios rápidos en la energía de la señal efecto conocido como desvanecimiento rápido, y frecuentemente llamado desvanecimiento Rayleigh [Rappaport

et al., 1997; Garg *et al.*, 1996]. Esto es, porque si cada componente multitrayectoria en la señal recibida es independiente entonces la función de densidad de probabilidad (PDF) de su envolvente es Rayleigh, de ahí que el canal en sistemas radio móviles lleve ese nombre [Steele, 1992]. Una explicación matemática del desvanecimiento Rayleigh puede ser consultada en [Steele, 1992].

Como se muestra en la figura 3, el móvil recibe varias señales, una directamente de la estación base vía trayectoria con línea de vista y otra reflejada de alguna construcción. Entonces, el móvil observa una señal que es compuesta de dos señales. La señal reflejada ha viajado una trayectoria ligeramente más larga que la señal directa y está ligeramente más retardada comparada con la señal directa. Como resultado del retardo la fase de la señal reflejada difiere de la señal transmitida. La diferencia de fase es relacionada con la diferencia de la distancia multiplicada por la velocidad de la luz (dado el retardo en la señal) multiplicada por la frecuencia de transmisión.

En los sistemas de AIF el desvanecimiento rápido es considerado menos relevante. Típicamente, donde hay una trayectoria LOS, existe poco desvanecimiento rápido (mejorado por el uso de antenas direccionales) porque todas las señales reflejadas tienden a ser mucho más débiles que la señal LOS. Únicamente donde la trayectoria principal está obstruida el desvanecimiento rápido puede ser un problema. Este aspecto tiene que ser considerado durante la instalación del equipo receptor, es importante montar el equipo de manera que haya poco desvanecimiento. Incluso los estándares como IS-95 y GSM

utilizados en sistemas AIF tienen técnicas para combatir el desvanecimiento por multitrayectoria tales como diversidad, ecualización, codificación de canal e intercalamiento de los datos.

Para los sistemas AIF, es posible considerar un canal AWGN (del inglés, Additive White Gaussian Noise) a diferencia de los sistemas móviles. Este tipo de canal podría considerarse irrealizable en sistemas de AIF, pero esto no es así, principalmente porque es posible tener una trayectoria con línea de vista (LOS) y sin multitrayectorias. Aún cuando existe desvanecimiento por multitrayectoria, pero el móvil se encuentra estacionario y no existen otros objetos en movimiento cercanos a él, el canal móvil puede ser considerado como Gaussiano con los efectos de desvanecimiento representados por las pérdidas por trayectoria. [Steele, 1992].

Con un canal Gaussiano la relación señal a ruido del sistema es mejor que en el canal Rayleigh, por lo tanto, la tasa de error de bit (BER) tiende a disminuir. Esto es necesario en los sistemas AIF para mantener una calidad de voz similar a los sistemas alámbricos.

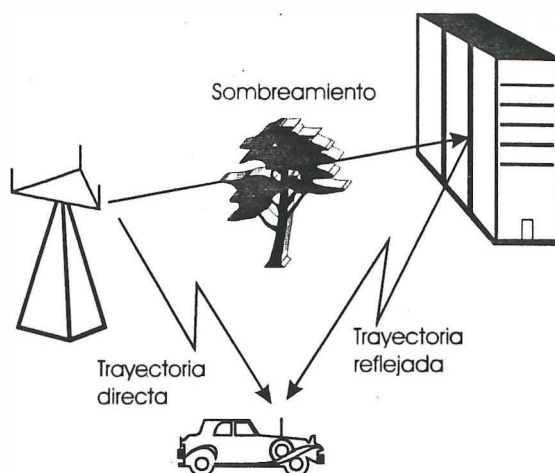


Figura 3. Ambiente típico de propagación con sombreadamiento y multitrayectoria.

II.4.2 Diferencias entre un sistema fijo y un sistema móvil

Debido a la naturaleza del medio de comunicaciones inalámbrico, existen ciertas ventajas para implementar un sistema de AIF en lugar de un sistema móvil, algunas diferencias han sido mencionadas anteriormente [Garg *et al.*, 1996; Webb, 1998]. Estas ventajas son las siguientes:

- En un sistema AIF se tiene una trayectoria de propagación de origen fijo a fijo y no fijo a móvil. Entonces, considerando que la mayoría de los enlaces en AIF son vía directa línea de vista (LOS), las pérdidas por trayectoria de propagación son menores, esto significa que la pendiente de pérdida de propagación tiende a ser menor.
- En un sistema AIF la señal recibida experimenta menos desvanecimiento que en un sistema fijo a móvil, esto es mejorado por el uso de antenas direccionales en ambos

extremos (tanto en la estación base como en la unidad del subscriptor), entonces las señales reflejadas tienden a ser mucho más débiles en comparación con la señal LOS, y también la unidad del subscriptor de AIF es menos susceptible a la interferencia causada por otras estaciones base (véase figura 4).

■ Como consecuencia del punto anterior, para un sistema AIF, es posible tener una reducción en relación E_b/N_0 , lo cual proporciona un incremento en la capacidad del sistema.

■ En un sistema AIF no ocurren los handoffs (transferencia de llamadas) debido a que es un enlace fijo a fijo. Asimismo, el enlace aéreo permanece sin cambio después de la instalación del equipo. El diseño del sistema AIF es mucho más simple que el de un sistema móvil.

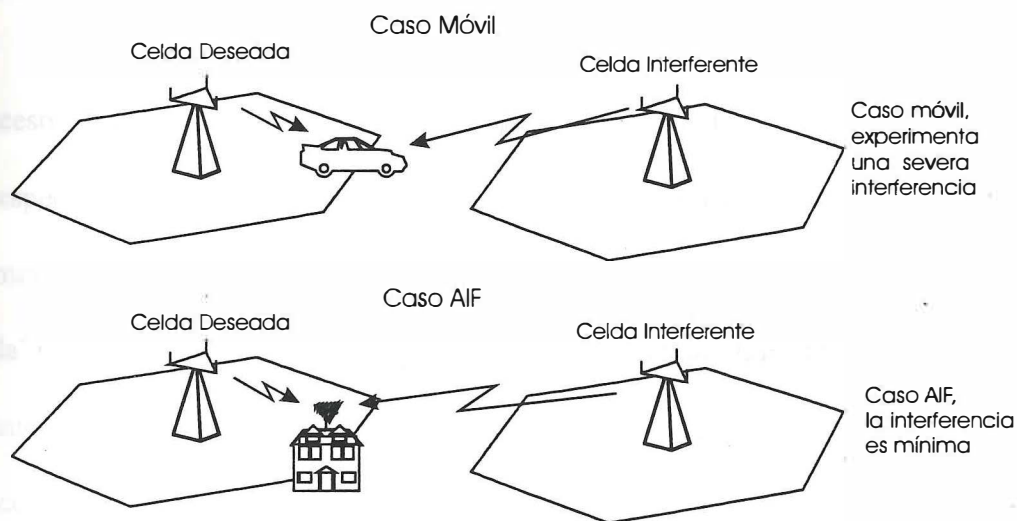


Figura 4. Diferencia en interferencia cuando se emplean antenas direccionales.

11.4.3 Esquemas de acceso múltiple

El objetivo de las técnicas de acceso múltiple es combinar señales de diferentes transmisores sobre un medio de transmisión común de forma simultánea, de tal manera que en los receptores, los diferentes canales puedan ser separados sin interferencia mutua [Mehrotra, 1994], (véase figura 5).

Los esquemas de acceso múltiple son de gran importancia, porque son la principal diferencia entre las tecnologías AIF. La decisión de los operadores de servicio acerca de que tecnología adoptar estará influenciada por el esquema de acceso al canal, lo cual, afecta en el uso eficiente del ancho de banda asignado. Existen tres tipos básicos de esquemas de acceso múltiple:

- Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), en el cual, los usuarios comparten el espectro de radio en el dominio de la frecuencia. La frecuencia es dividida en un número de portadoras de frecuencia (canales) y cada usuario en particular es asignado a cada una de ellas mientras permanece la conversación. Las bandas de guarda son mantenidas entre señales adyacentes para minimizar un traslape entre canales.
- Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), en el cual, los usuarios comparten el espectro de radio en el dominio del tiempo. Cada usuario accesa a toda la frecuencia pero sólo un periodo corto de tiempo, esto quiere decir que cada usuario en particular es asignado en diferente ranura de tiempo.

- Acceso múltiple por división de código (CDMA), en el cual, cada usuario accesa a todo el canal de frecuencia todo el tiempo pero distinguiéndose las transmisiones a través de un código particular.

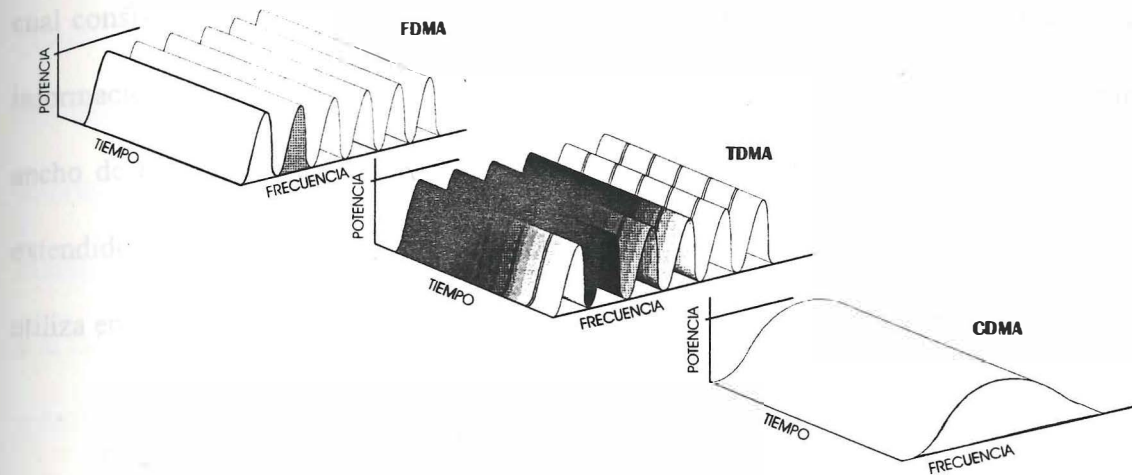


Figura 5. Diagramas de los esquemas de acceso FDMA, TDMA y CDMA.

Las tecnologías AIF tienen disponibles para su uso los diferentes esquemas de acceso. En la actualidad los esquemas de acceso principalmente empleados por los sistemas celulares digitales son TDMA y CDMA. A continuación se describe más ampliamente la operación básica tanto de TDMA como de CDMA ya que en la actualidad existe un debate importante sobre cual de las técnicas de acceso es la mejor [Webb, 1998].

II.4.3.1 CDMA

El esquema de acceso múltiple por división de código (CDMA) esta basado en la técnica de comunicaciones Espectro Extendido (EE, del inglés Spread Spectrum - SS), la cual consiste en expandir el ancho de banda y potencia de la señal transmitida (señal de información) sobre un espectro o banda de frecuencias mucho más grande que el mínimo ancho de banda requerido para transmitir la señal. Entre todas las técnicas de espectro extendido, la implementación de Secuencia Directa (DS) es la más común y es la que se utiliza en el estándar IS-95 empleado para la tecnología celular PCS y AIF.

El esquema CDMA de secuencia directa (DS-CDMA) esta basado en la expansión y desexpansión directa de los datos de la señal en banda base por medio de secuencias pseudo-ruido (PN) o códigos PN. Es importante que cada uno de los usuarios tengan un código diferente y estos códigos deben de ser ortogonales. El código no puede ser reusado en la misma área de servicio (celda). La señal de información es modulada (multiplicada) por el código digital, en donde, la tasa de bit del código (llamada tasa de chip) es mucho más grande que la tasa de bit de la información [Garg *et al.*, 1997]. En este sistema, al expandir el ancho de banda de la señal por el factor de la tasa de chip permite disminuir la densidad espectral de potencia de la señal por ese mismo factor (el promedio total de la potencia de la señal es el mismo que antes de la expansión) [Gibson, 1996].

En la figura 6 se observa el mecanismo de la expansión y desexpansión de la señal de información. La expansión se realiza por medio de una compuerta OR exclusiva (sumador módulo 2 o XOR), en donde, la primera entrada (A) representa los datos que son generados por el usuario y que son transmitidos con una cierta tasa de bit (R_b) teniendo un espectro de potencia angosto. La segunda entrada (B) representa la secuencia PN o código con una velocidad de transmisión (R_c o tasa de chip) más rápida que la tasa de bit de la información y con un espectro de potencia más amplio. La señal resultante (C) de la multiplicación de cada bit por el código, es una señal expandida con una tasa de datos igual a la tasa de chip, debido a su espectro de potencia de banda amplia, pero con una amplitud más baja debido a que la energía total es constante.

La desexpansión del espectro en secuencia directa es un proceso para recuperar la señal de información de la señal compuesta de EE. Esto se realiza por medio de otra compuerta XOR donde la señal expandida entra en la primera entrada (A) de la compuerta y en la segunda entrada (B) se aplica una secuencia PN idéntica a la utilizada en la expansión de la señal de información. A la salida (C) se recupera la señal de datos original, este proceso de recuperación sólo es válido cuando la secuencia PN es la misma tanto en el proceso de expansión como en la desexpansión [Faruque, 1996; Webb, 1998]. Las señales recibidas son extraídas del ruido de fondo por el receptor en el cual la señal recibida es correlacionada con una copia original del código. Cuando la señal deseada es interceptada por un receptor que no tiene el código de secuencia correcto, esta señal aparentará estar

ruidosa. Todo el otro ruido o señales con códigos que no corresponden con el código del receptor son simplemente filtradas.

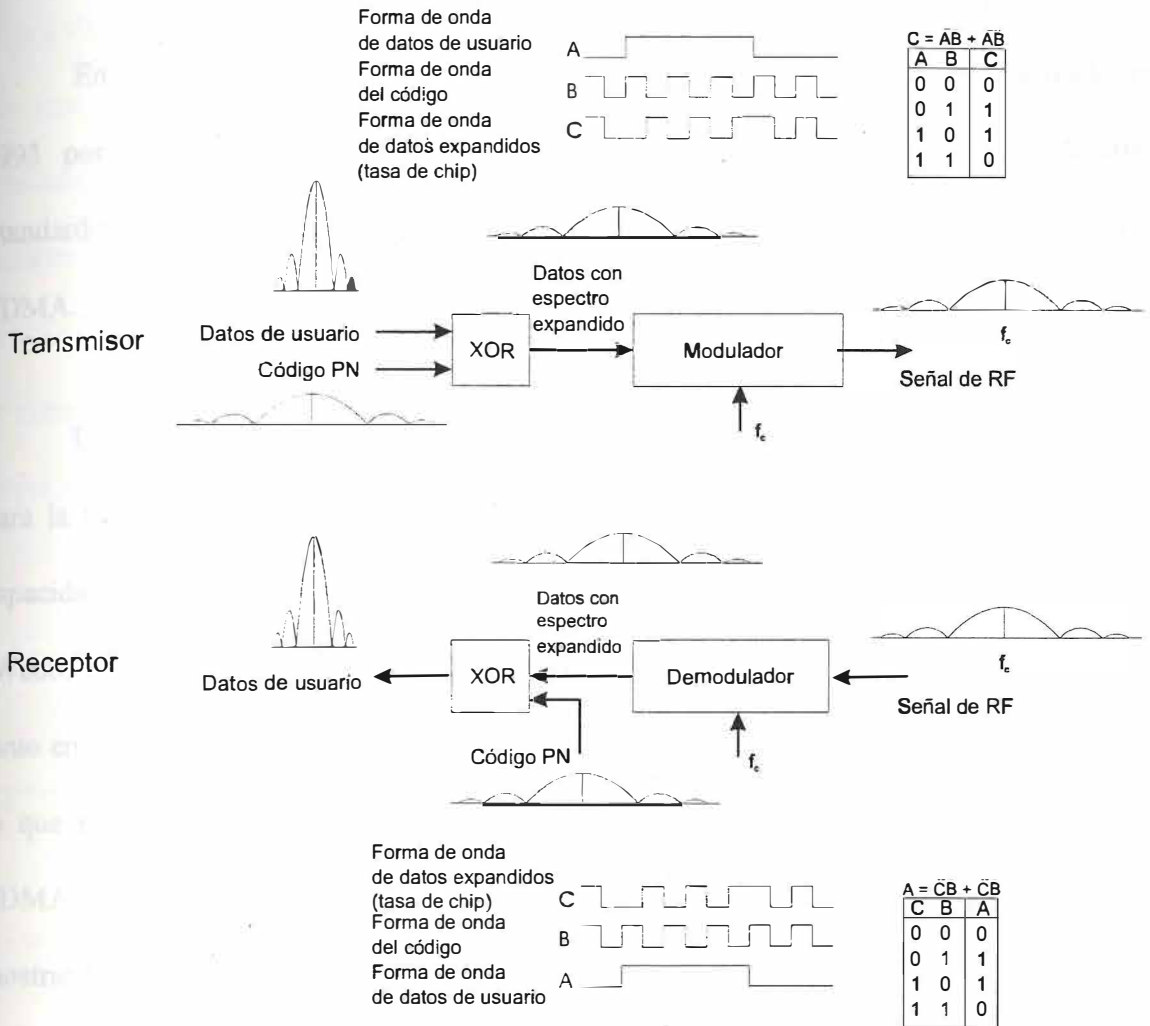


Figura 6. Técnica de modulación y demodulación de espectro extendido.

Una de las mayores ventajas de un sistema EE es la tolerancia a la interferencia (ruido), ya que durante el proceso de desexpansión se tiene una ganancia de procesamiento

(G_p). En los sistemas AIF CDMA, la habilidad para tolerar la interferencia es usada para permitir que más usuarios envíen sus transmisiones en el mismo canal con respecto a los sistemas móviles.

En 1989 Qualcomm propone un protocolo CDMA, el cual fue estandarizado en 1993 por la TIA (Telecommunications Industry Association) como IS-95 (Interim Standard-95-basado en CDMA), representando una alternativa a los sistemas celulares TDMA.

En la actualidad existe un debate sobre cual esquema de acceso es el más apropiado para la tecnología AIF, enfocado a cual esquema de acceso puede proporcionar mayor capacidad para una asignación de espectro dado, lo cual es clave para el operador AIF [Webb, 1998]. Asimismo, las ventajas teóricas de CDMA han generado un gran interés tanto en los diseñadores de equipo como en los proveedores de servicio [Garg, 1996]. Por lo que resulta de gran importancia realizar estudios comparativos entre las tecnologías TDMA y CDMA, como el cálculo de la eficiencia espectral desarrollado en esta tesis, mostrando una estimación de la capacidad de éstos sistemas.

II.4.3.2 TDMA

En TDMA los usuarios comparten el espectro de radio en el dominio del tiempo. Un usuario individual es asignado a una ranura de tiempo. Esto significa que cada usuario

tiene acceso a un ancho de banda amplio pero solamente durante un corto período de tiempo. En los sistemas de radio celular TDMA, diferentes usuarios comparten el tiempo en una portadora de frecuencia común para comunicarse con la estación base. Cada usuario utiliza una ranura de tiempo cíclicamente repetitiva, así que un canal se puede pensar como una ranura de tiempo particular que reocurre en cada trama, donde N ranuras de tiempo conforman una trama. Los sistemas TDMA transmiten datos con un método de almacenamiento y ráfaga, por lo tanto la transmisión para cada usuario no es continua. Esto implica que, a diferencia de los sistemas FDMA los cuales pueden acomodar FM analógico, se deben de utilizar datos digitales y modulación digital con TDMA. La transmisión de varios usuarios es intercalada hacia una estructura de trama repetitiva (véase figura 7).

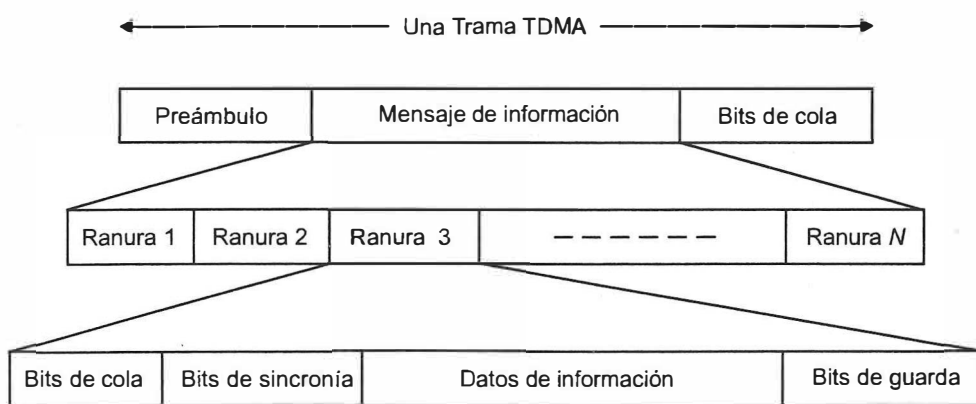


Figura 7. Estructura de una trama TDMA.

Cada trama consiste de un preámbulo, un mensaje de información. En TDMA/TDD, la mitad de las ranuras de tiempo en la trama del mensaje de información serán utilizados para los canales del enlace de bajada (estación base a móvil) y la mitad para

los canales del enlace de subida (móvil a estación base). En los sistemas TDMA/FDD, una estructura de trama similar o idéntica es utilizada sólo para la transmisión de subida o de bajada, pero las frecuencias de la portadora son diferentes para el enlace de subida y de bajada.

Una trama TDMA, el preámbulo más bits direccionados a la estación correspondiente. El preámbulo proporciona identificación, control, señalización y sincronización que utilizan tanto la estación base como los subscriptores para identificarse uno del otro. Los tiempos de guarda son utilizados para permitir la sincronización de los receptores entre las diferentes ranuras y tramas. Los diferentes estándares inalámbricos de TDMA tienen diferentes estructuras de trama TDMA [Rapaport, 1996]. Algunos de estos estándares como GSM, IS-54 y PDC utilizan FDD, y los sistemas sin hilos (del inglés cordless) DECT, CT2 y PHS utilizan TDD. TDMA es usualmente combinada con FDMA, ya que el ancho de banda total disponible es subdividido en diferentes portadoras de frecuencia que son reusadas en diferentes celdas. Dentro de las características de TDMA se incluyen las siguientes:

- TDMA comparte una sola frecuencia de portadora con varios usuarios, donde cada usuario utiliza ranuras de tiempo sin que se traslapen. El número de ranuras de tiempo depende de varios factores, tal como técnicas de modulación, ancho de banda disponible, etc.

- Las transmisiones de datos para los usuarios de un sistema TDMA no es continuo, pero ocurre en ráfagas. El resultado de esto, es un bajo consumo de baterías ya que el transmisor del subscriptor puede ser apagado cuando no este en uso (lo cual ocurre la mayor parte del tiempo).

II.5 ASPECTOS REGULATORIOS EN MÉXICO

La Ley Federal de Telecomunicaciones manifiesta que entre sus objetivos se encuentra el promover un desarrollo eficiente de las telecomunicaciones. En donde sea fomentada una sana competencia entre los diferentes prestadores de servicios de telecomunicaciones a fin de que éstos se presten con mejores precios, diversidad y calidad en beneficio de los usuarios.

En México, el servicio telefónico público muestra todavía rezagos importantes, inclusive en comparación con países con un nivel de desarrollo similar. La actual densidad telefónica es de poco menos de 10 líneas por cada 100 habitantes y se concentra en las principales ciudades. La calidad de servicio telefónico local no es aún completamente satisfactoria. Recientemente se han empezado a ofrecer nuevas aplicaciones y servicios, aunque todavía en forma incipiente. En este sentido cabe señalar que en el Programa de Desarrollo del Sector Comunicaciones y Transportes 1995-2000, se han definido para la Telefonía Básica los siguientes objetivos:

- Lograr una mayor cobertura y penetración del servicio telefónico, para aumentar la productividad de la economía en su conjunto y brindar más oportunidades de desarrollo en el país.
- Elevar la calidad y aumentar la diversidad de los servicios, con precios accesibles, en beneficio de un mayor número de usuarios.

Para lograr estos objetivos, el plan establece entre las estrategias el “impulsar la incorporación de nuevas tecnologías que permitan elevar la calidad: diversificar los servicios; procurar que los precios reflejen los costos; y, aprovechar adecuadamente, la capacidad instalada”. Asimismo en el Plan se define como una línea de acción, el optimizar y dar transparencia a la asignación de espectro radioeléctrico para prestar el servicio telefónico local con nuevas tecnologías, mediante procedimientos de licitación pública [SCT, 1996].

Considerando que existe un gran potencial de que la telefonía inalámbrica permita un rápido desarrollo en el corto plazo en la oferta de servicios de telefonía y en general de telecomunicaciones locales, la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) efectuó a través de la COFETEL (Comisión Federal de Telecomunicaciones) el proceso de licitación para bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico de uso determinado en las cuales se puede prestar servicios de acceso inalámbrico fijo y móvil.

II.5.1 Bandas de frecuencias

En México, la asignación de bandas de frecuencias para servicio de acceso local inalámbrico es conveniente por las siguientes razones [SCT, 1996]:

- La prestación de servicios de acceso local inalámbrico reduce los trabajos de obra civil, así como los tiempos de instalación de líneas y permite dar cobertura del servicio telefónico a sectores que tradicionalmente han carecido del mismo. La gran flexibilidad que tienen los sistemas inalámbricos les permite a los operadores iniciar la recuperación de las inversiones en tiempos más cortos que con las tecnologías alámbricas.
- Al contrario de los prestadores de servicio que utilizan tecnologías alámbricas, los prestadores de servicios con tecnologías inalámbricas, al hacer la planeación de la red, no necesitan tener una garantía de que los subscriptores potenciales vayan a querer tener la conexión a ese operador. Los operadores inalámbricos pueden ajustar sus planes de servicio en función de las condiciones cambiantes de mercado logrando que la oferta de servicio se ajuste a la demanda con gran precisión, tanto en ubicación como en el tipo y número de servicios que se requieren. Adicionalmente con gran flexibilidad se puede añadir capacidad y servicios adicionales donde y cuando los subscriptores lo requieran.

Por lo tanto las bandas deben de ser utilizadas, aprovechadas y explotadas al máximo en el territorio nacional para prestar servicios similares a la telefonía alámbrica

existente, sin que esto constituya una limitación para que se puedan prestar otros servicios. Asimismo, el área de cobertura que deben de cubrir los sistemas inalámbricos en zonas urbanas densas, urbanas, suburbanas y rurales dependerá del alcance de sus celdas el cual a su vez esta determinado por condiciones de propagación y capacidad de manejo de tráfico.

Para la asignación de bandas de frecuencias de uso determinado en las cuales se puedan prestar servicios de acceso local inalámbrico, México se ha apegado a las disposiciones contenidas en el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencia del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), y a las recomendaciones hechas por la CITEL (Comisión Internacional de Telecomunicaciones).

Las bandas que la CITEL ha recomendado a los países miembros para destinar aplicaciones de AIF incluyen las siguientes: banda celular (824-849/869-894 MHz), las bandas PCS (1850-1910/1930-1990 MHz) y la banda especializada (3.4-3.7 GHz). En la tabla I se puede observar las diferentes bandas del espectro que actualmente son utilizadas o propuestas para los servicios AIF, así como las bandas adoptadas por México [Salgado, 1997].

Tabla I. Frecuencias propuestas para la tecnología AIF.

Frecuencias	Tecnologías principales	Adoptada en México	Comentarios
400-500 MHz	IS-54 ¹	Sí	Ninguno
800-900 MHz	AMPS, IS-54, IS-95 ² , y GSM ³	No	En algunos países los sistemas celulares fijos operan en esta banda. Pero este espectro designado a movilidad está muy competido y tradicionalmente se ha tenido que hacer una elección entre el servicio fijo y el servicio móvil.
1850-1910 1930-1990 MHz	IS-54, IS-95, y GSM en sus versiones PCS	Sí	Ninguno
1910-1930 MHz	DECT ⁴	Licitación en proceso	Tecnología sin hilos con poca cobertura recomendada para zonas urbanas
3.4-3.7 GHz	Propietarias: Nortel, Tadiran, Lucent y DSC	Sí	Ninguno

¹IS-54.- Estándar Interino-54 (Interim Standard-54) basado en TDMA, conocido como Sistema Telefónico Móvil Avanzado Digital (D-AMPS: Digital Advanced Mobile Phone System).

²GSM.- Sistema Global para comunicaciones móviles.

³IS-95.- Estándar Interino-95 (Interim Standard 95) basado en CDMA.

⁴DECT.- Telecomunicaciones Sin hilos Europeo Digital (Digital European Cordless Telecommunications).

Banda de 400 MHz

La banda de los 400 MHz, por ser la de más bajas frecuencias, y por lo tanto los rangos de propagación son más largos. Esta banda en la actualidad se presenta como una de las herramientas principales para atender las obligaciones del Servicio Universal telefónico para las zonas rurales extensas y zonas dispersas. En México, se subastó una banda de frecuencias (en dos porciones) con un ancho de banda de 3 MHz. Se ha dispuesto que entre las bandas de 440-450 MHz se localice al enlace de subida (unidad del subscriptor fija a estación base) y entre las bandas de 485-495 MHz el enlace de bajada que corresponde de la

estación base a la unidad del subscriptor. La subasta abarcó las regiones 1, 2, 3, 5 y 8. La tecnología basada en la normativa IS-54/IS-136 es una tecnología de modalidad dual (digital/analógica) y tiene la capacidad de brindar servicios en esta banda.

Banda 1850-1910 / 1930-1990 MHz

En América, la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) ha recomendado la adopción del espectro para PCS en las bandas 1850-1910 MHz (enlace de subida) / 1930-1990 MHz (enlace de bajada) tanto para aplicaciones de fijas como móviles. Las tecnologías celulares digitales como IS-54, IS-95, y GSM aplicadas en sus versiones PCS se adaptan para brindar servicios a entornos urbanos, suburbanos y rurales. Las características principales de estos tres estándares son mostradas en la sección 2.5.3.

En México fueron subastadas para 9 regiones cuatro bandas de frecuencias, con un ancho de banda de 30 MHz (15 MHz para cada enlace) y dos con un ancho de banda de 10 MHz (5 MHz para cada enlace). Las frecuencias subastadas son 1850-1865/1930-1945 MHz, 1870-1885/1950-1965 MHz, 1865-1870/1945-1950 MHz y 1885-1990/1965-1970 MHz. Es importante mencionar que estos anchos de banda son los que se consideran en esta tesis para el estudio de la eficiencia espectral para CDMA (IS-95) y su comparación con TDMA (GSM).

Banda 3.4-3.7 GHz

Las tecnologías especializadas en la banda de 3.4 y 3.7 GHz utilizan parámetros del sistema que se han escogido para proporcionar una combinación apropiada de enlace, servicios, calidad de voz y de costos. Estas tecnologías se caracterizan por alcanzar un grado de confiabilidad que asegura el margen de ganancia del enlace a prueba de los efectos por multirayectorias y desvanecimientos, al mismo tiempo que la funcionalidad del sistema proporciona los medios para una segunda línea telefónica corriente o para servicios de datos a 64 Kb/seg y para velocidades RDSI (Red Digital de Servicios Integrados) de 144 Kb/seg [Salgado 1997].

En México, se subastaron para las 9 regiones cuatro bandas de frecuencias con un ancho de banda de 50 MHz (8 sub-bandas en pares de 25 MHz para cada enlace) intercaladas con una separación de 100 MHz, lo cual permite cuatro operadores por región. Las frecuencias licitadas son 3.4-3.425/3.5-3.525 GHz, 3.425-3.450/3.525-3.550 GHz, 3.450-3.475/3.550-3.575 GHz, y 3.475-3.5/3.575-3.6 GHz. El ámbito entre las frecuencias 3.6 y 3.7 GHz se mantiene reservado. En América, al menos cuatro de los principales proveedores multinacionales de equipos de telecomunicaciones (Notel, Taridan, DSC y Lucent) tienen productos AIF con capacidad de funcionar en la banda de 3.4-3.7 GHz.

II.5.2 Regiones de servicio

Como se mencionó anteriormente, el proceso del otorgamiento de concesiones para el uso, aprovechamiento y explotación de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico para la prestación de servicios de AIF y móvil involucra a 9 regiones del país [Salgado, 1997]. Por lo tanto la COFETEL consideró adoptar una división geográfica del país, la división por regiones se puede observar en la figura 8.



Figura 8. Regiones geográficas para el servicio AIF en México.

II.5.3 Tecnologías celulares

En la actualidad hay tres estándares digitales: IS-95 basado en CDMA, GSM, y D-AMPS basados en TDMA, aunque los dos estándares más fuertes y más difundidos en el mundo son IS-95 y GSM [Webb, 1998]. Los estándares DCS1800 (Sistema Celular Digital) y PCS1900 (Servicios de Comunicación Personal) simplemente son variantes de

GSM operando en diferentes frecuencias. Mientras que el estándar ANSI J-STD-008 (American National Standard Institute Joint-Standard-008) es una variante del estándar IS-95 y opera en la banda de frecuencias PCS. Existen factores importantes para la aplicación de las tecnologías celulares en el acceso inalámbrico fijo como: buena cobertura, excelente inmunidad a errores en el canal y una gran economía de escala [Webb, 1988]. En la tabla II se muestran algunos parámetros de los servicios que trabajan con los estándares IS-95 y GSM.

Tabla II. Comparación de los servicios de IS-95 y GSM.

Servicios	IS-95	GSM
Telefonía	Sí, con calidad de voz igual a GSM o ligeramente mejor	Sí, con calidad de voz ligeramente inferior a la línea alámbrica
Compatibilidad con RDSI	No	Sí
Fax	Sí, utilizando un modem	Sí
Datos	Superior a 9.6 Kb/seg	Superior a 9.6 Kb/seg
Servicios suplementarios	Rango amplio	Rango amplio
Múltiples líneas	No	No

A continuación en la tabla III se listan las principales características de los estándares D-AMPS, IS-95, y GSM [Gibson, 1996; Garg *et al.*, 1996].

Tabla III. Características de los sistemas IS-95, GSM y D-AMPS.

Características	IS-95	GSM	D-AMPS
Tecnología de acceso	CDMA	TDMA	TDMA
Banda de frecuencia (MHz): ■ Celular ■ PCS	824-849/869-894 1850-1910/1930-1990	890-915/935-960 1850-1910/1930-1990	824-849/869-894 1850-1910/1930-1990
Ancho de banda de portadora	1250 KHz	200 KHz	30 KHz
Duplexaje	FDD	FDD	FDD
Número de canales por portadora	Variable	8	3
Modulación	QPSK/BPSK	GMSK	$\pi/4$ QPSK
Tasa de bit de la portadora (Kb/seg)	1228.8	270.8	48.6
Codificación de voz	QCELP ¹	RPE-LTP ²	VSELP ³
Tasa de bit neta (Kb/seg)	(Tasa var: 9.6, 4.8, 2,1)	13	7.95
Codificador de canal	Convolucional tasa 1/2 (bajada) y 1/3 (subida) + CRC	Convolucional tasa 1/2 + CRC	Convolucional tasa 1/2 + CRC
Tasa de bit de voz + codificación de canal (Kb/seg)	Tasa var: 19.2, 9.6, 4.8, 2.4	22.8	13
Duración de la trama (ms)	20	4.6	40
E_b/N_0 operacional (dB)	6	9	16
Radio de celda máxima (Km ²)	50	35	20

¹ QCELP.- Qualcomm code excited linear prediction.

² RPE-LPT.- Regular pulse excited-long term prediction..

³ VSELP.- Vector sum excited linear prediction.

* Nota.- El área de cobertura de estos sistemas, en zonas urbanas, suburbanas y rurales, depende del alcance de sus celdas el cual a su vez está determinado por condiciones de propagación y capacidad de manejo de tráfico.

II.5.4 Tecnologías propietarias

Las tecnologías propietarias están definidas como diseños específicos para AIF.

Cuatro compañías han diseñado equipos de telecomunicaciones con capacidad para funcionar en la banda de 3.4-3.7 GHz, estas compañías son: Nortel Proximity I, Tadirán Multigain, DSC Airspan y Lucent Airloop. Estas tecnologías, tienen un precio más elevado

que las tecnologías celular o sin hilos (cordless) y no son estándares abiertos [Webb, 1998]. Estas tecnologías son más caras que la celular o la sin hilos. Las tecnologías propietarias generalmente comparten las siguientes características que no se encuentran disponibles en otras tecnologías:

- Ofrecen un rango amplio de servicios, incluyendo RDSI.
- Operan en bandas de frecuencia superiores de 2 GHz.
- Proporciona una excelente calidad de voz.

En la tabla IV, se resumen las características principales de las diferentes tecnologías propietarias que existen para AIF en las bandas de 3.4-3.7 GHz.

Tabla IV. Comparación de las tecnologías propietarias aplicadas para AIF.

Características y servicios	Nortel	Taridan	DSC	Lucent
Esquema de acceso	TDMA	TDMA	CDMA	CDMA
Telefonía	Sí, buena calidad de voz	Sí, buena calidad de voz	Sí, buena calidad de voz	Sí, buena calidad de voz
RDSI	Para el futuro	Para el futuro	Sí	Sí
Fax	Sí	Sí	Sí	Sí
Datos	Superior a 64 Kb/seg	Superior a 32 Kb/seg	Superior a 114 Kb/seg	Superior a 128 Kb/seg
Servicios Suplementarios	Rango amplio	Rango amplio	Rango amplio	Rango amplio
Múltiples líneas	2 líneas	1 a 4 líneas	2 líneas	2 a 8 líneas
Rango (radio)	15 Km	6 Km	5 Km	4 Km
Capacidad de tráfico por celda en 1 MHz	10	8	8.5	5.75

Como podemos observar, las cuatro tecnologías proporcionan un buen rango de servicios básicos, incluyendo buena calidad de voz, fax y datos.

Capítulo III. SISTEMA CDMA IS-95

III.1 INTRODUCCIÓN

La compañía Qualcomm propuso en 1989 un sistema de radio CDMA para aplicaciones de telefonía celular digital. El sistema reusa la misma frecuencia en todas las celdas para incrementar la capacidad. Este sistema fue estandarizado en 1993 por la TIA (Telecommunications Industry Association) como sistema CDMA IS-95. El estándar CDMA IS-95 esta basado en la tecnología de espectro extendido de secuencia directa. Asimismo, la versión de CDMA IS-95 en la banda PCS ha sido especificada por la ANSI (American National Standards Institute) como el estándar J-STD-008 [Jaffery, 1996].

Este estándar digital fue desarrollado como una alternativa para los sistemas celulares TDMA. El estándar IS-95 ha ganado popularidad en los Estados Unidos y distintas regiones del mundo. El estándar IS-95 promete tener una gran demanda por la ventaja en el incremento de la capacidad del sistema en comparación con otros sistemas celulares. El estándar IS-95 especifica solamente la interfaz aérea, permitiendo a los fabricantes de equipo el diseño de la red de manera apropiada [Webb, 1998]. El estándar IS-95 es interoperable con el estándar AMPS (estándar modo dual). La unidad del suscriptor es de banda dual, ya que puede operar en las bandas celular y PCS.

III.2 ASPECTOS DEL ENLACE DE RADIO

III.2.1 El sistema CDMA

El sistema IS-95 opera en la banda de 800 MHz utilizando duplexaje por división de frecuencia (FDD) con 25 MHz en cada dirección. El enlace de subida (unidad de subscritor a estación base) y el enlace de bajada (estación base a unidad de subscritor) emplean las bandas de frecuencias de 824-849 MHz y de 869-894 MHz, respectivamente. En su versión PCS, las bandas de frecuencias son de 1850-1910 MHz para el enlace de subida y de 1930-1990 para el enlace de bajada. Las diferencias entre IS-95 celular y su versión PCS son mínimas, principalmente difieren en el plan de frecuencias y en el procesamiento de llamada para identificar a la unidad del subscritor. Ambos sistemas están basados en funciones idénticas de modulación y procesamiento de la señal, y potencialmente pueden ofrecer el mismo rango de servicios.

Los canales CDMA están definidos en términos de una frecuencia RF y una secuencia de código. Sesenta y cuatro funciones Walsh son usadas para identificar los canales del enlace de bajada, mientras que un código largo PN con diferentes corrimientos de tiempo es usado para identificar los canales del enlace de subida. Las características principales del sistema CDMA se muestran en la tabla V.

Tabla V. Características principales del sistema CDMA IS-95.

Modulación	QPSK
Tasa de chip	1.2288 Mcps
Tasa nominal de datos	9600 b/seg
Ancho de banda de canal	1.25 MHz
Codificación de canal	Convolutacional
Códigos de usuarios diferentes	4.398×10^{12}

El sistema CDMA utiliza control de potencia y activación de voz para minimizar la interferencia mútua [Garg *et al.*, 1997]. La tecnología soporta dos conjuntos de tasas de transmisión, cada una soportada por un diferente codificador de voz. Dentro de cada conjunto de tasas, el codificador de voz y su tasa de transmisión son variables y son dependientes de la actividad de voz del usuario. Esto es, el conjunto de tasa 1 soporta tasas de datos de 9.6 Kb/seg, 4.8 Kb/seg, 2.4 Kb/seg y 1.2 Kb/seg. El conjunto de tasa 2 soporta tasas de datos de 14.4 Kb/seg, 7.2 Kb/seg, 3.6 Kb/seg y 1.8 Kb/seg. Cada 20 ms, el codificador de voz genera una tasa diferente dependiendo de la actividad de voz. Esta variabilidad dinámica en tasas de transmisión incrementa la capacidad del canal. El codificador de voz del conjunto de tasa 2 ofrece calidad de voz alámbrica [Jaffery, 1996]. Con la disminución de la tasa de datos, los circuitos de control de potencia reducen la potencia del transmisor para alcanzar la misma tasa de bit de error (BER). Un control de potencia preciso junto con los circuitos de actividad de voz, es crítico para evitar una potencia excesiva de la señal en el transmisor que es responsable en la interferencia completa en el sistema.

Un intercalador de tiempo con lapsos de 20 ms es usado con codificación y control de error para superar el desvanecimiento por multitrayectorias y el sombreado. El intercalamiento de bloques de información sirve para no tener un número grande de errores consecutivos, esta aleatoriedad de errores de datos contribuye a un mejor desempeño del sistema de codificación. Además, en el sistema CDMA es incorporado un tipo de receptor llamado receptor RAKE, el cual es una técnica de diversidad que también contrarresta el fenómeno de multitrayectorias y mejora el desempeño del sistema. El receptor RAKE explota el tiempo de retardo de multitrayectoria en el canal y combina las replicas retardadas de la señal transmitida. El receptor RAKE consiste de un banco de correlacionadores, el cual correlaciona a una componente de multitrayectoria particular de la señal deseada. El receptor RAKE extrae la energía de la señal de cada multitrayectoria y entonces las suma, aumentando el nivel de la señal recibida y mejorando la calidad del enlace [Rappaport, 1996; Gibson, 1996].

Los sistemas CDMA prácticos están diseñados para un valor de $E_b/N_0 = 6$ dB, es posible operar de manera efectiva en este nivel de E_b/N_0 gracias al robusto diseño del sistema en cuanto codificación [Garg *et al.*, 1997].

III.2.2 Enlace aéreo CDMA

El enlace aéreo CDMA esta basado en el enlace de subida (unidad del subscritor a EB) y en el enlace de bajada (EB a unidad del subscritor), separados por una cierta frecuencia como se muestra en la figura 9. El enlace de bajada esta compuesto de cuatro diferentes canales: canal piloto, canal de localización, canal de sincronía y canal de tráfico. El enlace de subida esta basado en dos diferentes canales: canal de acceso y canal de tráfico.

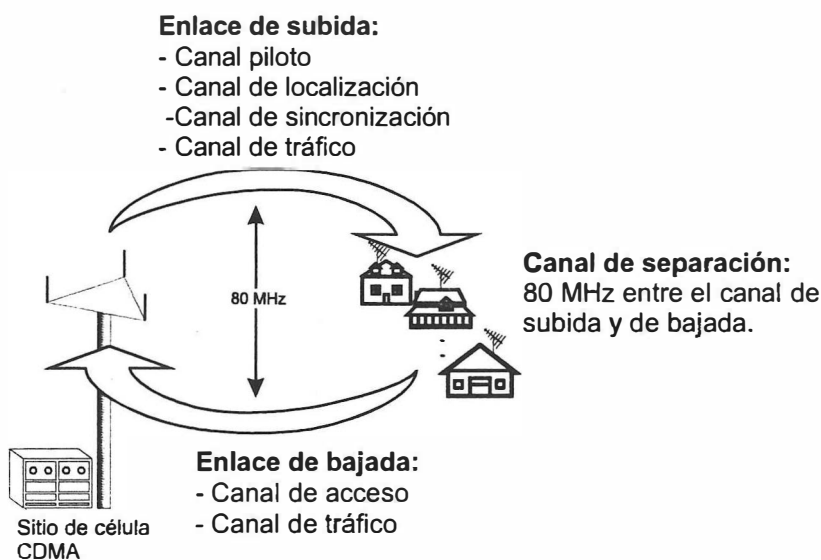


Figura 9. Estructura del enlace aéreo CDMA.

Brevemente, el protocolo del enlace es como sigue:

- La unidad del subscritor adquiere la fase, el tiempo, y la potencia de la señal a través del canal piloto.

- El equipo del subscriptor se sincroniza a través del canal de sincronía.
- La unidad del subscriptor obtiene los parámetros del sistema a través del canal de localización.
- La unidad del subscriptor y la estación base se comunican sobre los canales de tráfico durante la conversación.
- La unidad del subscriptor y la estación base se comunican a través de los canales de acceso y de localización durante la adquisición del sistema y la localización [Faruque, 1996].

III.2.2.1 Enlace de bajada

En el enlace de bajada los canales se transmiten en grupos de 64 canales. La información de cada canal es expandida por una apropiada función Walsh a una tasa de chip fija de 1.2288 Mcps y entonces los datos entran a un sumador módulo 2 (compuerta XOR) para ser modulados con un par de secuencias PN en cuadratura a la misma tasa de chip. La función de esta secuencia PN corta ($2^{15}-1 = 32,767$ códigos) es para proporcionar una identificación única de la estación base dado que un canal puede ser reusado en otra celda. El canal piloto se asigna siempre al código Walsh de canal número cero. Si el canal de sincronía está presente se le otorga el código Walsh de canal número 32, este canal opera a una tasa de datos fija de 1200 b/seg. Cuando los canales de localización están presentes, se les asigna el código Walsh de canal de número 1 al 7. Los códigos Walsh de canal restantes se usan para los canales de tráfico (voz y datos) del enlace de bajada. Como se mencionó

anteriormente, la tasa de datos en los canales de tráfico es variable y esta depende del conjunto de tasa de datos. En la figura 10, se muestra el diagrama a bloques del canal de tráfico del enlace de bajada.

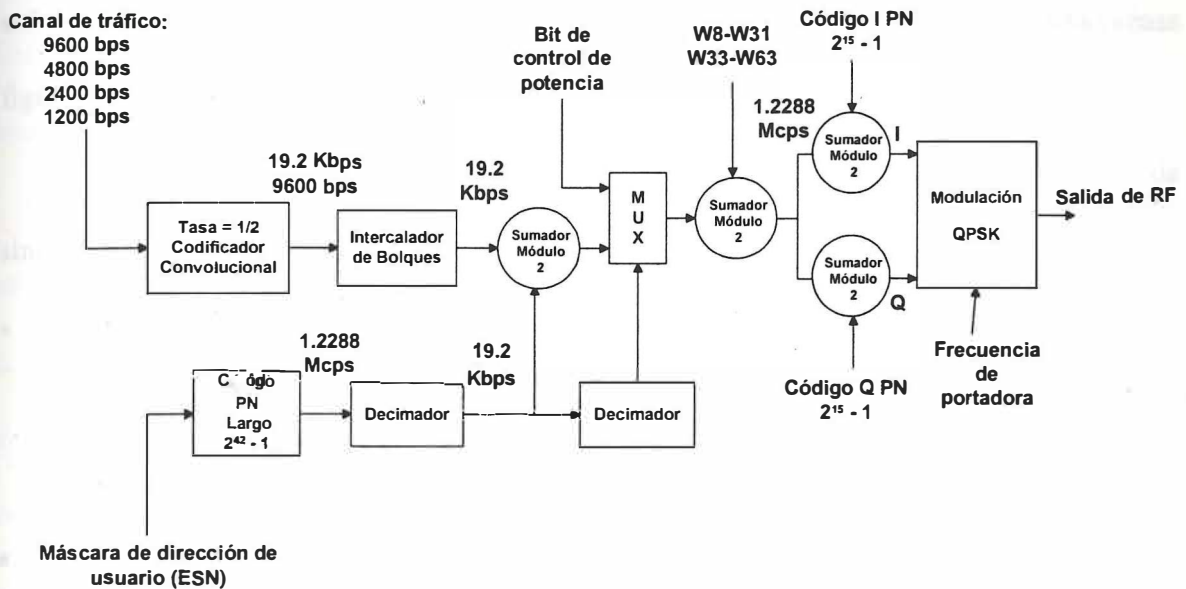


Figura 10. Canal de tráfico CDMA del enlace de bajada.

Ya que la duración de trama es fija a 20 ms, el número de bits por trama varía de acuerdo a la tasa de tráfico. Al realizarse la codificación de canal convolucional con tasa de codificación de 1/2, la tasa de tráfico se duplica resultando tasas de 2400 a 19,200 símbolos/seg. El intercalamiento es desempeñado sobre bloques de 20 ms (192 bits a 9600 b/seg). Un código PN largo de $2^{42}-1$ (4.398×10^{12}) es generado conteniendo el número serial electrónico de usuario (ESN) incrustado en la máscara del código largo de la unidad del subscriptor. Los datos mezclados son multiplexados con la información de control de potencia. La señal multiplexada permanece a 19,200 b/seg y es cambiada a 1.2288 Mcps por el código Walsh W_i asignado a el i -ésimo canal de tráfico de usuario. La señal es

expandida a 1.2288 Mcps por señales con secuencia binaria pseudoaleatoria en cuadratura. Todos los canales que son agrupados en secuencias de 64 canales, son combinados para dar canales sencillos I y Q. Las señales son aplicadas a moduladores en cuadratura, y las señales resultantes son sumadas para formar una señal QPSK, la cual es amplificada (véase figura 10) [Garg *et al.*, 1997].

A continuación se resumen las funciones principales de los canales piloto, de sincronía y de localización:

- El canal piloto se transmite todo el tiempo para proporcionar una referencia de tiempo y fase a la unidad del subscriptor. Además, proporciona potencia en la señal para la adquisición del canal por la unidad del subscriptor.
- El canal de sincronía proporciona información de tiempo a la unidad de subscriptor para sincronización, además proporciona el tiempo del sistema y la identificación de la red. También proporciona la tasa de datos del canal de localización.
- El canal de localización es utilizado para transmitir mensajes de encabezado del sistema y parámetros de acceso, localizar las unidades subscriptor, y asignar canal de tráfico a la unidad del subscriptor [Faruque, 1996].

III.2.2.2 Enlace de subida

Los canales del enlace de subida son el canal de acceso y los canales de tráfico. Los canales de tráfico se transmiten en grupos de 62 canales y existen hasta 32 canales de acceso si se utilizan múltiples portadoras, es posible asignar 64 canales de tráfico a uno de

acceso. El canal de acceso es usado por la unidad del subscriptor para iniciar una llamada con la estación base y para responder a los mensajes del canal de localización, además se utiliza para realizar petición de canal de tráfico, y tener acceso al sistema. La tasa de acceso es fija a 4800 b/seg. Todas las unidades de subscriptor que accedan al sistema de radio comparten la misma asignación de frecuencia. Cabe mencionar que en el sistema CDMA todas las celdas reusan todas las frecuencias, es decir, se tiene un reuso de frecuencia igual a 1. Cada canal de acceso es identificado por una secuencia distinta de código PN largo, teniendo un número de acceso, un número de canal de localización asociado con el canal de acceso, la identificación de la estación base y el corrimiento PN para el canal CDMA de bajada. Cada unidad de subscriptor utiliza un corrimiento de tiempo diferente en el código PN; por tanto un sistema de radio puede decodificar correctamente la información de una unidad de subscriptor individual. Los datos transmitidos en el canal de subida son agrupados en grupos de 20 ms. Todos los datos en el canal de subida son codificados convolucionalmente (tasa de codificación de $1/3$), intercalados en bloques, y modulados por símbolos de modulación transmitidos por cada 6 símbolos de código (modulan con 6 bits). El símbolo de modulación es una de las 64 formas de onda mutuamente ortogonales que son generadas utilizando las funciones Walsh. Ya que seis símbolos de código son modulados como uno de los 64 símbolos para la transmisión, la tasa de transmisión de símbolos de modulación es fija a 4800 símbolos de modulación por seg. ($28800/6=4800$). Esto resulta en una tasa de chip Walsh de 307.2 Kcps ($64 \cdot 4800=307.2$). Este proceso puede ser visto en la figura 11, donde se muestra el canal de tráfico de subida.

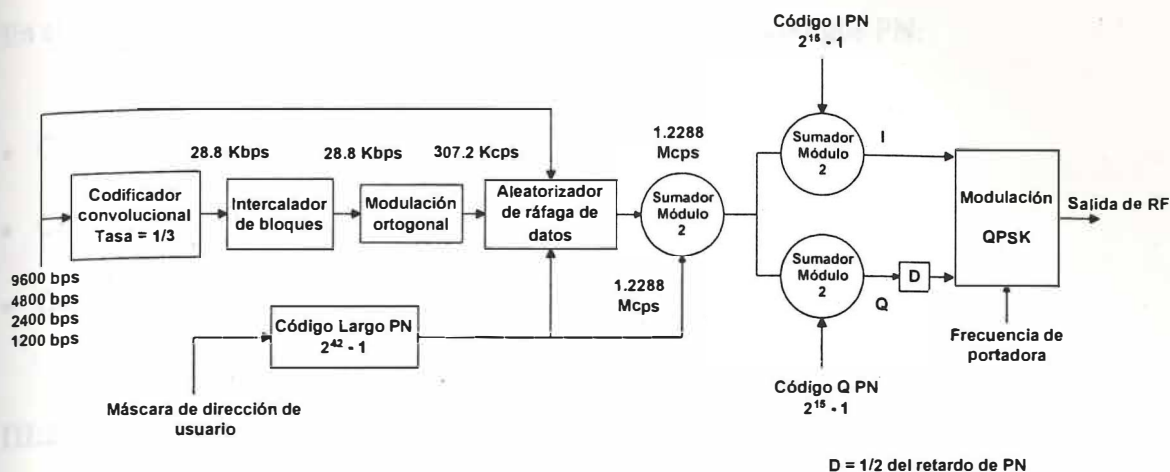


Figura 11. Canal de tráfico CDMA del enlace de subida.

Las tasas de transmisión de datos de los canales de tráfico del enlace de subida son las mismas que para el enlace de bajada. La tasa de expansión de la secuencia de código PN largo es fija a 1.2288 Mcps [Garg *et al.*, 1997].

III.2.3 Códigos

Como se mencionó en el capítulo anterior, en los sistemas CDMA los códigos PN o secuencias PN se utilizan para desarrollar las siguientes tareas:

- Expandir el ancho de banda de los datos del usuario en un ancho de banda de transmisión más grande.
- Distinguir las señales de los diferentes usuarios que están utilizando el mismo ancho de banda de transmisión en el esquema de acceso.

En el estándar CDMA IS-95 existen tres diferentes tipos de códigos PN:

- Código Walsh.
- Código PN largo.
- Código PN corto.

III.2.3.1 Código Walsh

El código Walsh es un conjunto de 64 códigos ortogonales y su propósito es:

1. Expandir el canal de bajada sobre un ancho de banda de 1.25 MHz;
2. Proporcionar una identificación única para cada usuario.

La tasa de chip o tasa de código de un código Walsh es de 1.2288 megachips por segundo (Mcps).

Los cuatro diferentes tipos de canales en el enlace de bajada están designados como sigue:

- Canal piloto, le corresponde el código Walsh número cero (W0);
- Canal de localización, le corresponden los códigos Walsh del 1 al 7 (W1 al W7), cuando los canales de localización no están presentes, pueden entonces, ser usados como canales de tráfico.
- Canal de sincronía, le corresponde el código Walsh número 32 (W32).
- Canales de tráfico; les corresponden del W8 al W31 y del W33 al W63.

III.2.3.2 Código PN largo

El código PN largo es generado de un registro de corrimiento de 42 bit teniendo $2^{42} - 1 = 4.398 \times 10^{12}$ códigos diferentes. Estos códigos son usados para:

1. Intercalar los datos en banda base en el enlace de bajada.
2. Expandir los datos en banda base en el enlace de subida.

El código Walsh no es utilizado en el enlace de subida para expandir los datos. Sin embargo, los códigos PN son usados para distinguir las señales de diferentes usuarios. La tasa de chip del código PN es de 1.2288 Mcps.

III.2.3.3 Código PN corto

El código PN es generado de un par de registros de corrimiento de 15 bits teniendo una cuadratura par de $2^{15} - 1 = 32,767$ códigos. Estos códigos son utilizados para identificar las estaciones base. La tasa de chip del código PN es de 1.2288 Mcps [Faruque, 1996].

III.2.4 Control de potencia CDMA

En un sistema DS-CDMA, el control de potencia es una necesidad vital para su operación. La capacidad del sistema CDMA es limitada por la interferencia ya que los usuarios (móviles) están compartiendo la misma banda de frecuencia al mismo tiempo, y la interferencia co-canal es inherentemente fuerte, asimismo, la potencia de la señal recibida

será diferente para los diferentes usuarios, resultando en interferencia cerca-lejos. La interferencia cerca-lejos se refiere a la relación del nivel de la señal recibida de un usuario cerca al nivel de la señal recibida de un usuario que se encuentra lejos. Un simple usuario excediendo el límite de la potencia de transmisión inhibiría la comunicación de todos los otros usuarios. La interferencia cerca-lejos degrada el desempeño (BER), reduce la capacidad, y causa pérdida de llamadas. Este problema puede ser examinado por medio de la figura 12 (a) [Faruque 1996; Gibson, 1996].

Si los usuarios transmitieran de dos distancias diferentes a la misma potencia, la relación de las señales recibidas en la estación base será:

$$\frac{RSL_1}{RSL_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^\gamma \quad (1)$$

donde:

RSL_1 = nivel de la señal recibida de la unidad del subscriptor 1.

RSL_2 = nivel de la señal recibida de la unidad del subscriptor 2.

d_1 = distancia entre la unidad del subscriptor 1 y la estación base.

d_2 = distancia entre la unidad del subscriptor 2 y la estación base.

γ = pendiente de pérdida por trayectoria de propagación.

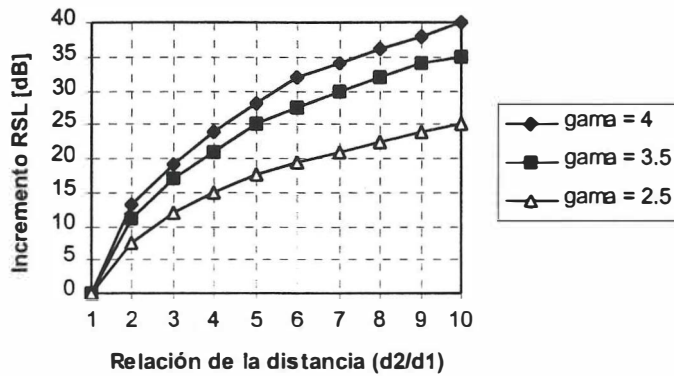
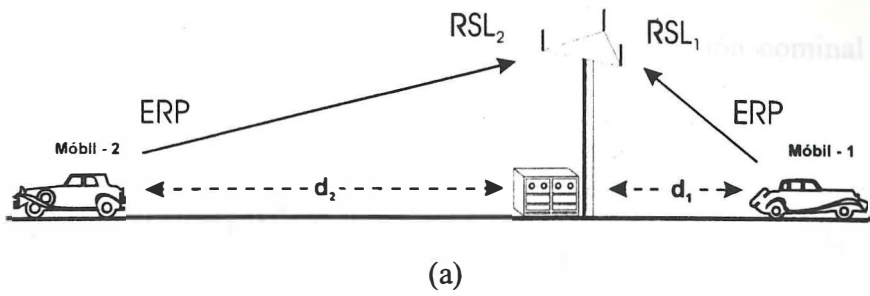


Figura 12. Ilustración del problema de interferencia cerca-lejos.

La ecuación (1) implica que si $d_2 \neq d_1$ el nivel de la señal recibida será diferente para cada unidad del subscriptor dependiendo del ambiente de propagación y de las distancias respectivas. Esto se ilustra en la figura 12 (b) para varios ambientes de propagación. Por ejemplo, si $d_2 = 4 d_1$ y $\gamma = 4$ (típica del ambiente urbano denso), el RSL_1 de la unidad del subscriptor 1 será 256 veces (24 dB) más fuerte que el RSL_2 de la unidad del subscriptor 2, y el receptor de la estación base no podrá recuperar RSL_2 . Por tanto, la potencia de transmisión de cada unidad del subscriptor tiene que ser controlada para que su potencia recibida en la estación base sea constante a un nivel predeterminado

independientemente de la distancia. Entonces, el objetivo del control de potencia en la unidad del subscritor es para producir una potencia de recepción nominal de todas las unidades de subscritor en una celda o sector dados.

El sistema de control de potencia no compensa únicamente las variaciones del nivel de potencia de la señal debidas a las variaciones en la distancia entre la estación base y la unidad del subscritor, sino que también compensa las fluctuaciones típicas del nivel de la señal de un canal inalámbrico (desvanecimiento lento y rápido). EL control en el sistema CDMA IS-95 es un proceso de tres pasos:

1. Control de potencia de lazo abierto en el enlace de subida.
2. Control de potencia de lazo cerrado en el enlace de subida.
3. Control de potencia en el enlace de bajada.

El control de potencia de lazo abierto en el enlace de subida se realiza ajustando la potencia transmitida de la unidad del subscritor para que el nivel de la señal recibida en la estación base sea constante independientemente de la distancia; esto se muestra conceptualmente en la figura 13, donde cada unidad de subscritor calcula las pérdidas por trayectoria relativas y compensa las pérdidas ajustando su potencia de transmisión.

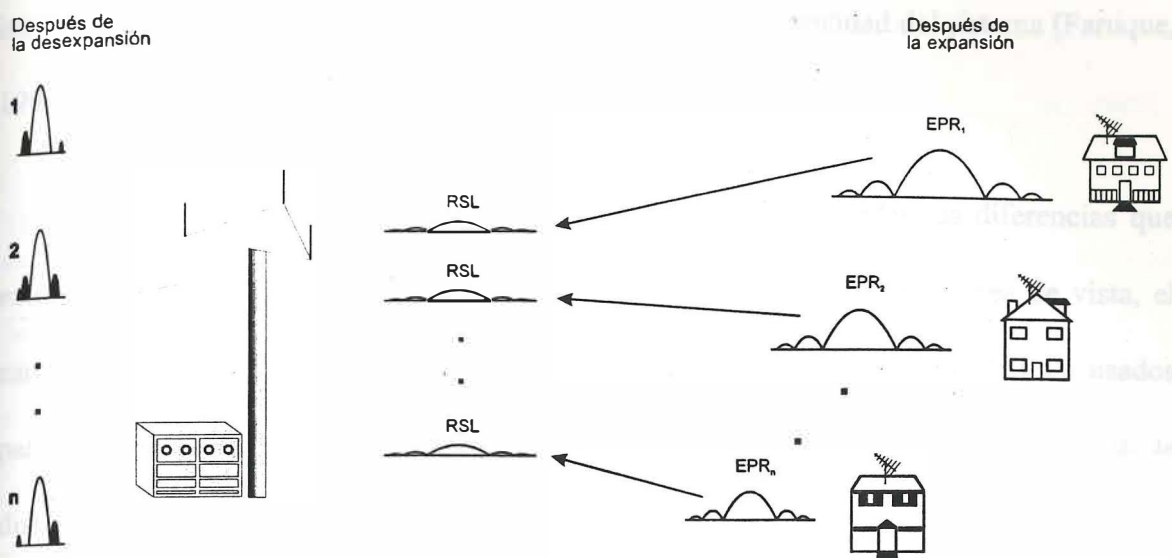


Figura 13. Control de potencia en el enlace de subida.

El control de potencia de lazo cerrado en el enlace de subida se realiza por medio de un comando de subir o bajar potencia originado por la estación base. Un bit de control de potencia es insertado dentro de la cadena de datos codificados de bajada cada 1.25 ms, esto puede verse ilustrado en la figura 10. Después de recibir este comando desde la estación base, la unidad del suscriptor responde ajustando la potencia por cantidades de ± 0.5 dB ('1' para bajar potencia y '0' para subir potencia).

En el control de potencia en el enlace de bajada, la estación base controla su potencia de transmisión para que una cierta unidad de suscriptor reciba potencia extra para superar el desvanecimiento, interferencia, y mejorar la tasa de error. En este mecanismo, la estación base minimiza el nivel de potencia de transmisión necesaria hasta que la unidad del suscriptor se lo indique para alcanzar una buena calidad de servicio. Esto reduce la

interferencia co-canal en otras celdas, lo cual incrementa la capacidad del sistema [Faruque, 1996].

En el caso de AIF la situación es menos problemática dadas las diferencias que existen con el canal móvil. En particular, donde existe una trayectoria línea de vista, el canal será relativamente estable, y los sistemas de control de potencia pueden ser usados para ajustar exactamente el nivel de potencia al nivel requerido, esto se facilita ya que la distancia entre el subscriptor y la estación base es fija, y por tanto conocida [Webb, 1998].

Requerimientos de potencia

Las tecnologías celulares están limitadas en cobertura y en capacidad. La planeación del enlace es parte fundamental en la obtención del límite de cobertura, ya que el requerimiento de E_b/N_0 se debe de cumplir tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada. Los sistemas celulares como CDMA IS-95, se ven limitados en el enlace de subida, por los niveles de potencia que maneja la unidad del subscriptor [Webb, 1998]. Las especificaciones CDMA IS-95, tanto celular como PCS, soportan en conjunto un rango de potencias de salida del equipo del subscriptor que van desde 6.3 mW (8 dBm) como potencia mínima a 6.3 W (38 dBm) como potencia máxima. En la tabla VI se muestran los diferentes niveles de potencia de la unidad del subscriptor. La potencia transmitida de la unidad del subscriptor es ajustada y controlada por la estación base, en incrementos y decrementos de ± 0.5 dB. El monitoreo que realiza la estación base ajusta el transmisor de

la unidad del subscritor para fijar la potencia mínima necesaria para alcanzar una transmisión confiable, y además, para minimizar la interferencia co-canal [Garg *et al.*, 1997].

Tabla VI. Potencias de salida de la unidad del subscritor de las especificaciones del estándar CDMA IS-95.

Nivel de potencia	CDMA IS-95 Celular		CDMA IS-95 PCS	
	Potencia mínima	Potencia máxima	Potencia mínima	Potencia máxima
I	1.25 W (31 dBm)	6.3 W (38 dBm)	0.63 W (28 dBm)	2.0 W (33 dBm)
II	0.5 W (27 dBm)	2.5 W (34 dBm)	0.20 W (23 dBm)	1.0 W (30 dBm)
III	0.2 W (23 dBm)	1.0 W (30 dBm)	63 mW (18 dBm)	0.5 W (27 dBm)
IV			20 mW (13 dBm)	0.25 W (24 dBm)
V			6.3 mW (8 dBm)	0.13 W (21 dBm)

III.2.5 Modulación

El esquema de modulación empleado en el sistema CDMA IS-95 es QPSK (Transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria). El canal de bajada utiliza QPSK y el de subida OQPSK (QPSK de compensación). QPSK es una forma de modulación digital de modulación angular de amplitud constante. QPSK es un esquema de modulación M-ario, en donde $M = 4$, los sistemas M-ario disminuyen el ancho de banda necesario pero incrementan el nivel de potencia requerida en la recepción, es decir, cambian eficiencia en potencia por eficiencia en ancho de banda. Con QPSK son posibles cuatro fases de salida para una sola frecuencia de la portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Ya que la entrada digital a un modulador digital QPSK es una señal binaria, para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada. Con dos bits, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10, 11. En consecuencia, con QPSK, los datos de entrada binarios se

combinan en grupos de dos bits llamados dibits. Cada código dibit generará una de las cuatro fases de entrada posibles. Por tanto, para cada dibit de dos bits introducidos al modulador, ocurre un sólo cambio de salida. Así que, la razón de cambio en la salida, es la mitad de la razón de bit de entrada, esto quiere decir, que el ancho de banda requerido es igual a la tasa de bit entre dos ($R_b/2$), por tanto la eficiencia de ancho de banda (bps/Hz) de QPSK es igual a 2 [Tomasi, 1996].

En la figura 14 se muestra el diagrama a bloques del modulador QPSK del sistema CDMA. Las señales I y Q de cada canal (tráfico o control) entran a un sumador módulo 2 (XOR) con una secuencia de ruido pseudoaleatoria I y Q (código PN corto). Para el sistema CDMA, las señales I y Q son idénticas, pero las secuencias PN I y Q son diferentes. Las señales banda base I y Q son entonces moduladas por las señales portadoras I y Q. El bit I modula una portadora que esta en fase con el oscilador de referencia, y el bit Q modula una portadora que esta 90° fuera de fase o en cuadratura con la portadora de referencia, posteriormente las señales son combinadas, la señal resultante es amplificada, y enviada a la antena [Garg *et al.*, 1997].

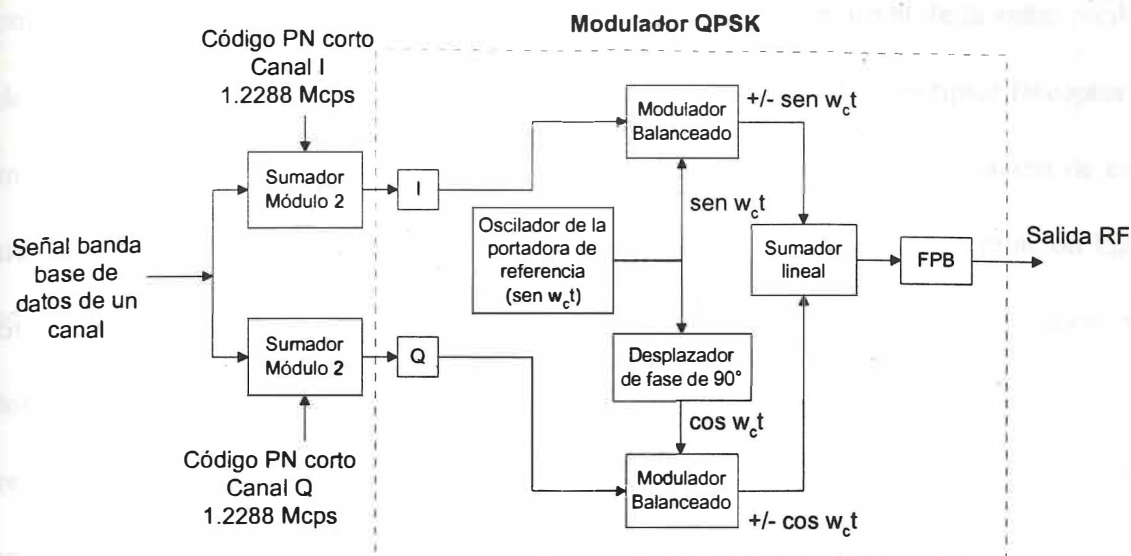


Figura 14. Modulador QPSK del sistema CDMA.

La modulación QPSK de compensación (Offset QPSK), es una forma modificada de QPSK en donde las formas de onda de los bits en los canales I y Q se compensan o se cambian en fase entre sí por la mitad del tiempo de bit [Tomasi, 1996]. La tasa de error de bit (BER) y la eficiencia de ancho de banda son las mismas para OPSK y para OQPSK.

Desempeño de tasa de error (BER)

El desempeño de tasa de error de bit de los sistemas inalámbricos, depende en gran medida del ambiente de propagación, de ahí que los sistemas sean diseñados para contrarrestar los fenómenos de desvanecimiento típicos del canal inalámbrico, el cual es modelado como un cierto tipo de canal (AWGN, Rayleigh). Como se mencionó anteriormente en la sección II.4.1, para la tecnología de acceso inalámbrico fijo es posible

considerar un canal AWGN. Se asume que en la estación base el nivel de la señal recibida de cada subcriptor es la misma y que la interferencia vista de cada subcriptor (receptor) es modelada como ruido gaussiano. Cada método de modulación y de codificación de canal tiene una relación que define la tasa de error de bit como una función de la relación E_b/N_0 . Si se conoce el desempeño de los métodos de codificación usados en las señales, y la tolerancia a los errores de la voz digitalizada y los datos, se puede definir la mínima relación E_b/N_0 para una operación adecuada del sistema. Si se mantiene la operación a este mínimo E_b/N_0 , se puede obtener un desempeño aceptable en el sistema. En el caso del sistema CDMA IS-95, típicamente se maneja una relación $E_b/N_0 = 6$ dB [Garg *et al.*, 1997].

Como se mencionó anteriormente el desempeño de tasa de error esta directamente relacionada por el esquema de modulación y de codificación de canal, por tanto, es posible relacionar la tasa de error de bit codificado (BER_c) con la tasa de error de bit no codificado (BER_u) como:

$$BER_c = m(BER_u)^n \quad (2)$$

donde, m (bits de información) y n (bits codificados) estan dados por la codificación de canal (para IS-95 se tiene un FEC con tasa de codificación de 1/3), y el BER_u no codificado esta dado por el esquema de modulación [Faruque, 1996].

El desempeño de tasa de error en función de la relación E_b/N_0 con la modulación QPSK sobre un canal AWGN se puede aproximar como:

$$P_b \cong \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (3)$$

donde:

E_b = energía de bit.

N_0 = densidad espectral de potencia de ruido.

Se considera que la densidad espectral del potencia de ruido consiste tanto del ruido térmico como de la interferencia [Garg *et al.*, 1997]. En la gráfica de la figura 15, se muestra el desempeño de la tasa de error en función de la relación E_b/N_0 considerando las ecuaciones (2) y (3).

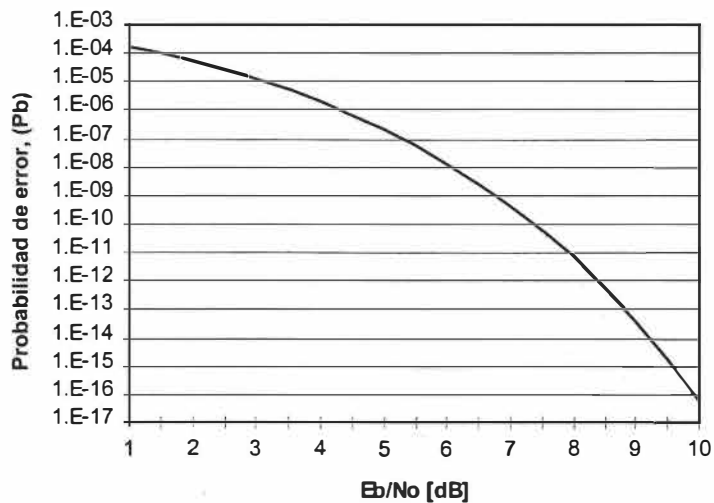


Figura 15. Desempeño de la tasa de error de la modulación QPSK con FEC 1/3.

Para la transmisión de voz digital se debe de tener un valor requerido de E_b/N_0 con el cual se obtenga una tasa de error de bit (BER) de 10^{-3} o mejor [Garg *et al.*, 1996].

Capítulo IV. EFICIENCIA ESPECTRAL DE UN SISTEMA CELULAR

IV.1 INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del espectro de frecuencias es un problema muy importante en los sistemas de comunicación celular. Debido a los altos costos que implica la adquisición de las frecuencias y de las licencias para proveer servicios de comunicación, es necesario tener una utilización óptima del espectro, ya que es un factor crítico en el éxito de los sistemas inalámbricos. Por lo cual, es necesario diseñar sistemas que sean eficientes espectralmente. Para hacer uso eficiente del espectro, un número de técnicas han sido propuestas o actualmente están siendo implementadas en los sistemas inalámbricos (celular, PCS, AIF). Sin embargo, el principal factor que determina la eficiencia espectral del sistema de comunicación celular es el esquema de acceso múltiple (FDMA, TDMA, CDMA). Una medida precisa de la eficiencia espectral permite estimar la capacidad del sistema de comunicación celular y permite también determinar a un estándar como una medida de referencia mínima [Garg *et al.*, 1996].

IV.2 DEFINICIÓN DE EFICIENCIA ESPECTRAL

En el diseño de sistemas de comunicaciones inalámbricas, generalmente existen varios objetivos tales como, bajo costo de operación, tamaño pequeño del equipo, una alta confiabilidad del sistema, y una gran capacidad. En el diseño de los sistemas celulares la

arquitectura del sistema tiene un amplio arreglo de opciones en teorías de técnicas de comunicación, tales como, compresión de datos, modulación, codificación de canal y acceso múltiple. Aunque todos los estándares actuales tienen como meta en común el soportar a tantos usuarios como sea posible con el espectro de radio frecuencia disponible, todos estos estándares están basados en diferentes compromisos decisivos para la arquitectura del sistema. Ya que nuevas aplicaciones pueden tener diferentes características de usuario (tráfico y movilidad), ambientes de propagación (desvanecimiento y pérdidas), restricciones del sistema (tamaño y potencia), y requerimientos de desempeño (retardo y tasa de error), nuevos compromisos del sistemas son necesarios para llegar a lograr el mejor diseño.

Para comparar diferentes diseños o estándares, se define una figura de mérito llamada eficiencia espectral [Yue, 1996]. Esta figura de mérito evalúa la eficiencia de los sistemas celulares. Asimismo, existe otro término que es también utilizado para evaluar la eficiencia de los sistemas celulares: la eficiencia del canal. Para sistemas de comunicaciones convencionales donde el espectro no es reusado, estas dos eficiencias son proporcionales. Sin embargo, en sistemas celulares donde los canales son reusados, estas dos eficiencias son diferentes.

Por lo que, la eficiencia del canal está definida como el máximo número de canales que pueden ser proporcionados por un ancho de banda espectral asignado [Lee, 1993; Murota, 1985].

Para sistemas de comunicaciones celulares la eficiencia espectral esta definida como la carga de tráfico transportado por un ancho de banda asignado para servir en una determinada área, o carga de tráfico por unidad de espectro por unidad de área, expresada en Erlangs/MHz·Km² [Garg, *et al* 1996; Murota, 1985].

Otras definiciones de eficiencia espectral usadas en sistemas celulares son: el máximo número de llamadas que pueden ser atendidas en una área dada [llamadas/Km²] [Lee, 1993], y el número de usuarios servidos por MHz por Km² [usuarios/MHz·Km²] [Dababneh, 1994]. Estas dos maneras de expresar la eficiencia espectral y/o la capacidad del sistema son de utilidad para una comprensión e interpretación más clara de los resultados. Estos resultados, ayudarán a tener una visión mas amplia de la capacidad del sistema CDMA IS-95 para comunicaciones inalámbricas. Logrando así hacer una comparación entre las diferentes tecnologías existentes y por lo tanto tomar la decisión más adecuada.

IV.3. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA

La eficiencia espectral (η) de un sistema CDMA en comunicaciones celulares esta expresada en Erlangs/MHz·Km², y se define como:

$$\eta = \frac{(\text{Trafico ofrecido por el sistema})}{(\text{Ancho de banda total})(\text{Area de cobertura total})} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\text{Trafico ofrecido por (canales de voz / celda)}}{(W)(A_c)} \quad (5)$$

A partir del tráfico ofrecido, se incluye en la ec. (5) el tráfico total transportado a través del sistema correspondiente al número de canales de voz y con un cierto grado de servicio (GOS o probabilidad de bloqueo). Escencialmente, la fórmula de tráfico empleada es la Erlang B [Garg *et al.*, 1996].

$$\eta = \frac{\text{Trafico transportado por (canales de voz / celda)}}{(W)(A_c)} \quad (6)$$

donde:

η = eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km²].

W = ancho de banda total del sistema en un sentido [MHz].

A_c = área de cobertura de una celda [Km²].

El tráfico transportado esta en función de la probabilidad de bloqueo y del número de canales de voz por celda en el sistema.

La ecuación (6) esta basada en el número de canales de voz por celda, los cuales se obtienen dependiendo del tipo de celda como:

- Celda Omnidireccional:

$$\text{Canales de voz/celda} = (M)(\text{Canales de tráfico efectivo}) \quad (7)$$

- Celda Sectorizada:

$$\text{Canales de voz/sector} = (M/3)(\text{Canales de tráfico efectivo}) \quad (8)$$

donde el número de canales de tráfico efectivo (portadoras) en el sistema se obtiene como:

$$\text{Canales de tráfico efectivo} = [(W/B) - 1] \quad (9)$$

donde: $B = 1.25 \text{ MHz}$

El ancho de banda que es restado en la ec. (9), es debido a que el ancho de banda de un canal es utilizado para bandas de guarda entre portadoras. El ancho de banda de canal (B) en el sistema CDMA IS-95 es igual a 1.25 MHz. En CDMA todos los canales de tráfico que hay en el sistema son reusados en cada celda (CDMA tiene un factor de reuso de frecuencia igual a uno) [Garg *et al.*, 1996]. El número de usuarios por celda por canal de tráfico (M) se calcula como:

$$M = \frac{G_p}{(E_b/N_o)} \cdot \frac{1}{1 + \beta} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{v} \cdot \lambda \quad (10)$$

donde:

M = número de usuarios por celda por canal de tráfico.

G_p = ganancia de procesamiento = B_c/R_b .

B_c = tasa de chip.

R_b = tasa de bit.

β = factor de interferencia entre celdas vecinas.

α = factor de precisión de control de potencia.

v = factor de actividad de voz.

λ = factor de mejoramiento de interferencia.

E_b/N_o = relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido.

Reacomodando la ecuación (6) incluyendo el número de celdas de todo el sistema, tenemos que la eficiencia espectral del sistema es:

$$\eta = \frac{(\text{Trafico total transportado en Erlangs / celda})(\text{Num de celdas})}{(\text{Area de cobertura total en Km}^2)(\text{Ancho de banda total en MHz})} \quad (11)$$

De las ecuaciones anteriores para el cálculo de la eficiencia espectral se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. La eficiencia espectral no depende del ancho de banda del sistema (W), sino que depende principalmente del ancho de banda de canal (B), del área de cobertura total, y de M (número de usuarios por celda por canal de tráfico). No por mucho ancho de banda el sistema será más eficiente, sino que la eficiencia espectral consiste en el máximo aprovechamiento que se le de al recurso del espectro.
2. La calidad de la voz depende de la relación E_b/N_0 ya que se obtiene un desempeño de error en base al esquema de modulación usado en el sistema de comunicación celular.
3. Si un esquema de modulación puede ser diseñado para trabajar correctamente con valores de E_b/N_0 bajos, entonces más canales estan disponibles en una celda y la eficiencia es mejorada.
4. La relación entre el ancho de banda del sistema W y la cantidad del tráfico transportado en el sistema no es lineal, p.e., para un incremento dado en W (aumento en número de canales), el incremento en el tráfico transportado es mayor que el incremento en W .

5. La eficiencia espectral también depende de la probabilidad de bloqueo (GOS), ya que afecta el número de Erlangs. Este concepto típicamente es considerado del 2 %.
6. La eficiencia espectral se calcula para una área de cobertura determinada considerando las características de propagación de la zona, asimismo, las celdas se consideran de un tamaño uniforme.
7. La obtención de la eficiencia espectral en términos de llamadas/Km², es apartir del tiempo de duración promedio de una llamada, con el cual, se obtiene el número de llamadas·hora/Km². Por otro lado, para obtener la capacidad de usuarios/MHz Km²·se requiere reconocer el tráfico por usuario (Erlangs/usuario), con lo cual, se obtiene el número promedio de llamadas por usuario en la hora de mayor ocupación [Garg *et al.*, 1996; Faruque, 1996].

IV.4 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA

En el cálculo de la eficiencia espectral descrito en la sección IV.3, se puede observar que diferentes factores se encuentran involucrados en el resultado de esta figura de mérito. En esta sección se describen los factores que intervienen en la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral, representada en forma de algoritmo en el capítulo V. Estos factores son: la, planeación del enlace para la obtención del E_b/N_0 , el cual afecta directamente a M (número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo), aspectos en cuanto a la clasificación del tamaño y forma de las celdas y aspectos de tráfico.

IV.4.1 Obtención del E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace basándose en la predicción de propagación

La relación E_b/N_0 determina la calidad de una señal digital, por lo que es uno de los factores más importantes que influyen en la eficiencia espectral de un sistema celular. En la sección III.2.5 figura 15 se puede observar como la relación E_b/N_0 afecta directamente la probabilidad de error del sistema por lo tanto, es necesario conocer su valor para saber si el enlace de radio cumple con el margen de calidad establecido en el diseño del sistema. Para el estándar IS-95 el nivel de E_b/N_0 requerido para un desempeño satisfactorio en la operación del sistema es de 6 dB.

La relación de energía por bit a la densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_0) que mide la calidad de la señal de radio digital se calcula como [Faruque, 1996]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{RSL / r_b}{N_0} = \frac{RSL}{r_b N_0} \quad (12)$$

donde:

E_b = Energía de bit (J/bit).

N_0 = Densidad espectral de ruido (W/Hz).

r_b = Tasa de bit (bps).

RSL = Nivel de la señal recibida (W).

Mientras que la densidad espectral de ruido se obtiene como:

$$N_0 \text{ (dB)} = 10 \log(KT) + NF \quad (13)$$

$$N_0 \text{ (dB)} = -204 + NF \quad (14)$$

donde:

K = Constante de Boltzman (1.3805×10^{-23} J/K).

T = Temperatura absoluta (290 K).

NF = Figura de ruido del receptor (dB).

Entonces, la ecuación (12) expresada en decibels queda como sigue:

$$E_b/N_0 \text{ (dB)} = RSL - 10 \log(r_b) - 10 \log(N_0) \quad (15)$$

$$E_b/N_0 \text{ (dB)} = RSL - 10 \log(r_b) + 204 - NF \quad (16)$$

La figura de ruido del receptor (NF) proporciona una estimación de la degradación de la señal debido al ruido generado dentro del receptor [Mehrotra, 1994; Tomasi 1996]. El valor de la figura de ruido del receptor en los equipos CDMA IS-95 es del orden de 5 dB, éste valor es típico en los equipos de Qualcomm (principal productor de equipos CDMA IS-95). El valor del nivel de la señal de recepción RSL se estima utilizando la planeación del enlace basado en las pérdidas por trayectoria de propagación que son obtenidas de los modelos de predicción. Esto hace posible predecir la relación señal a ruido del sistema celular.

IV.4.1.1 Modelos de predicción de propagación

La predicción de propagación es un proceso de caracterización ambiental y de estudios de propagación donde el nivel de la señal recibida (RSL) es determinada como una función de la distancia. Los modelos de predicción ayudan a determinar cuantas estaciones base se requieren para satisfacer las demandas de cobertura de una cierta área.

La cobertura de una celda principalmente depende de ciertos parámetros que pueden ser definidos por el usuario tales como potencia de transmisión, altura de la antena, localización de la antena y directividad de la antena. Existen otros parámetros que afectan la cobertura total de la señal RF que no son definidos por el usuario que varían de lugar en lugar y que son difíciles de predecir. Algunos de estos parámetros son: ambiente de propagación, cerros, vegetación y construcciones que afectan la cobertura de la señal RF. Debido a estos parámetros en la práctica una celda es altamente irregular en un ambiente de multitrayectorias.

Como consecuencia, diferentes modelos de predicción de pérdidas por trayectoria han sido desarrollados en años recientes [Faruque, 1996]. En la tabla VII, se muestra una comparación con algunos de los diferentes modelos y sus características [Garg *et al.*, 1996]. Los modelos de propagación más utilizados actualmente, y que incluyen la mayoría de los factores antes mencionados que afectan a la señal RF, son los modelos Okumura-Hata y Walfisch-Ikegami. Estos modelos están basados en extensos datos experimentales y

análisis estadísticos que habilitan el cálculo del nivel de la señal recibida en un medio de propagación dado. La precisión de estos modelos depende de diferentes variables como:

- Datos de elevación del terreno.
- Factores de desorden (factores de corrección debido a edificios, vegetación, agua, etc.).
- Altura de antena, patrón de la antena, potencia radiada efectiva (ERP).
- Patrón de distribución de tráfico.
- Planeación de frecuencia (factor de reuso de frecuencia).

Tabla VII. Modelos de predicción de pérdidas por trayectoria de propagación.

Modelo	Frecuencia (MHz)	Zona	Distancia entre EB y EM (Km)	Altura de la antena EB (m)	Altura de la antena EM (m)	Comentarios
Okumura	100 a 3000	Urbana, suburbana y rural	1 a 100	30 a 200	3 a 10	Modelo basado en gráficas, lo cual, es poco práctico y difícil de programar.
Hata	150 a 2000	Urbana densa, urbana, suburbana y rural	1 a 20	30 a 200	1 a 10	Este modelo formula ecuaciones basándose en el modelo Okumura, por lo que es factible su programación. Además se adapta a todas las zonas.
Walfisch-Ikegami	800 a 2000	Urbana densa	0.02 a 5	4 a 50	1 a 3	Se requiere conocer la altura promedio de los edificios, la distancia entre ellos, y el ancho y ángulo de la calle.
Sakagmi-Kuboi	450 a 2200	Urbana densa	0.5 a 10	20 a 100	-	Se requiere conocer la altura promedio de los edificios, y el ancho y ángulo de la calle.
Ibrahim	168 a 900	Urbana	2 a 10	-	1 a 3	Se requiere conocer factor de urbanización.
Lee	900	Urbana, suburbana y rural.	No requerida	-	-	Aplicable sólo en la banda celular.

Es importante mencionar que no existe un modelo de predicción de pérdidas de propagación que sea universalmente aplicable en todas las situaciones. La exactitud de un modelo particular en un ambiente dado depende de que haya concordancia entre los parámetros requeridos por el modelo y los disponibles por el área respectiva [Garg *et al.*, 1996].

IV.4.1.2 Clasificación de las zonas

El tipo de zona a la cual se va a dar cobertura juega un papel importante que se considera en todos los modelos de predicción, debido a que define el ambiente de propagación de la señal (pendiente de pérdida de propagación). La propagación de las señales de radio en áreas con construcciones está fuertemente influenciada por la zona, en particular por el tamaño, tipo y densidad de las construcciones. Se puede observar en la tabla VII, que no todos los modelos de predicción pueden ser aplicados en cualquier tipo de zona, ya que en su mayoría se encuentran restringidos a un cierto tipo de zona. Para estudios de propagación, las diferentes zonas se encuentran clasificadas de la siguiente forma [Garg *et al.*, 1996; Faruque, 1996]:

1. Urbana densa. Áreas dominadas por edificios altos y otras estructuras comerciales (ciudades grandes).
2. Urbana. Mezcla de áreas de edificios altos y áreas abiertas (ciudades medianas o pequeñas).
3. Suburbana. Áreas residenciales y de comercios, áreas abiertas y parques.
4. Rural. Áreas abiertas grandes con casas, granjas y bosques.

IV.4.1.3 Planeación del enlace basado en el modelo de predicción Hata

El diseño de un enlace de radio para la cobertura de una celda es un proceso en el cual la pérdida por trayectoria hipotética es derivada por un conjunto de parámetros físicos tales como la potencia radiada efectiva (ERP), la altura de las antenas, la distancia y la zona entre otros. Esto muestra que la planeación de un enlace es específico del sitio y que hay un conjunto único de parámetros de diseño en un ambiente de propagación dado para el cual el enlace RF es tolerante a los fenómenos como atenuación y multitrayectoria [Faruque, 1996]. La pérdida por trayectoria representa la atenuación de la señal como una cantidad positiva medida en dB, está definida como la diferencia (en dB) entre la potencia transmitida efectiva y la potencia recibida [Rappaport, 1996].

En esta tesis se utiliza el modelo de predicción Hata como parte de la metodología para el diseño de un enlace de radio, lo cual nos permite calcular el nivel de la señal recibida (RSL) en un medio de propagación dado. El modelo Hata ha sido elegido porque los rangos de sus parámetros tales como: frecuencia, altura de la antena de la EB y EM, y radio de la celda (o distancia) resultan adecuados para aplicaciones AIF, además, a diferencia de otros modelos de predicción [véase tabla VII] el modelo Hata es aplicable para diferentes zonas, tanto urbana densa, urbana, suburbana como rural obteniendo una buena aproximación según [Faruque, 1996]. Asimismo, en 1991 el modelo Hata fue actualizado extendiendo su rango de frecuencias hacia las bandas de 2000 MHz, por lo que

es aplicable en bandas PCS y AIF. Además es uno de los modelos de predicción más utilizados actualmente, lo cual, indica cierta confiabilidad.

Modelo Hata

El modelo Hata fue actualizado en 1991, por el Centro Cooperativo Europeo para Investigación Científica y Técnica [EUROSCOST, 1991] extendiendo su rango de frecuencias a 2000 MHz. En el modelo Hata se desarrollaron fórmulas empíricas para describir los datos gráficos por Okumura para la predicción de pérdidas por trayectoria de propagación [Hata, 1980]. Este modelo es aplicable en diferentes zonas con ciertos rangos en los parámetros de entrada y es válido para un terreno casi uniforme. La fórmula general de pérdidas por trayectoria del modelo Hata esta dada por:

$$L_p \text{ (dB)} = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) + C_0 \quad (17)$$

donde:

L_p = Pérdidas por trayectoria, dB.

f = Frecuencia, MHz ($150 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ MHz}$).

d = Distancia o radio de la celda, Km ($1 \text{ Km} \leq d \leq 20 \text{ Km}$).

h_b = Altura de la estación base, m ($30 \text{ m} \leq h_b \leq 200 \text{ m}$).

h_m = Altura de la estación fija, m ($1 \text{ m} \leq h_m \leq 10 \text{ m}$).

C_1 = 69.55 para $150 \text{ MHz} \leq f \leq 1000 \text{ MHz}$,

$$= 46.3 \text{ para } 1500 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ Mhz.}$$

$$C_2 = 26.16 \text{ para } 150 \text{ MHz} \leq f \leq 1000 \text{ MHz,}$$

$$= 33.9 \text{ para } 1500 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ MHz.}$$

$$C_0 = 0 \text{ para zona urbana,}$$

$$= 3 \text{ para zona urbana densa.}$$

$a(h_m)$ es el factor de corrección por la altura de la antena de la estación móvil y es calculado como:

- Urbana: $a(h_m) = [1.1 \log(f) - 0.7]h_m - [1.56 \log(f) - 0.8] \text{ dB}$
- Urbana densa: $a(h_m) = 3.2 [\log(11.75 h_m)]^2 - 4.97 \text{ dB}$

Para obtener las pérdidas por trayectoria en las zonas suburbana y rural, la fórmula general de Hata es modificada como:

- Suburbana: $L_p \text{ (dB)} = L_p(\text{Urbana}) - 2 [\log(f/28)]^2 - 5.4 \text{ dB}$
- Rural: $L_p \text{ (dB)} = L_p(\text{Urbana}) - 4.78 [\log(f)]^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \text{ dB}$

El modelo Hata al estar basado en el modelo Okumura considera parámetros relacionados con el terreno, que son evaluados para determinar los factores de corrección que se involucran en las ecuaciones de acuerdo a la zona, entre los parámetros se incluye la altura de la antena de la estación base (h_b). Esta es calculada sobre el nivel promedio del suelo en un intervalo de 3 a 15 Km en dirección hacia el receptor (véase figura 16) [Garg *et al.*, 1996].

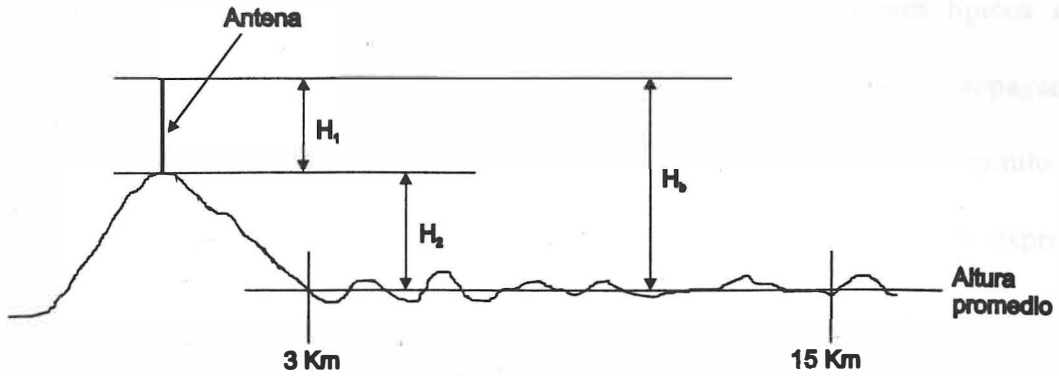


Figura 16. Altura de la antena de la estación base.

La ecuación (17) puede ser expresada como:

$$L_p \text{ (dB)} = L_0 + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) \quad (18)$$

o más conveniente como:

$$L_p \text{ (dB)} = L_0 \text{ (dB)} + 10\gamma \log(d) \quad (19)$$

La ecuación (19) muestra que el modelo Hata exhibe características de pérdida por trayectoria lineales como una función de la distancia, asimismo, describe la ecuación de una línea recta, donde:

$$L_0 \text{ (dB)} = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + C_0 \quad (20)$$

L_0 es nombrada la intercepción y γ es la pendiente de pérdida de propagación que depende de la altura de la antena, aproximada como:

$$\gamma = [44.9 - 6.55 \log(h_b)] / 10 \quad (21)$$

Diferentes resultados experimentales indican que existen valores típicos de la pendiente de pérdida por trayectoria dependiendo de la zona (ambiente de propagación), como se muestra en la tabla VIII [Faruque, 1996]. Como se mencionó en el capítulo II, la pendiente de pérdida por trayectoria o exponente de pérdida por propagación, expresa el efecto que sufre la señal por la pérdida de potencia a medida que se incrementa la distancia desde el transmisor y el receptor.

Tabla VIII. Valores típicos de la pendiente de atenuación en función de la zona.

Zona	Pendiente de atenuación (γ)
Urbana densa	4 (40 dB/dec)
Urbana	3.5 (35 dB/dec)
Suburbana	3 (30 dB/dec)
Rural	2.5 (25 dB/dec)

El nivel de la señal recibida (RSL) se calcula considerando las pérdidas por trayectoria obtenidas por el modelo Hata, quedando entonces definida como:

$$RSL = ERP - L_p \quad (22)$$

Sustituyendo L_p de la ecuación (19) se tiene que:

$$RSL = ERP - L_0 \text{ (dB)} + 10\gamma \log(d) \quad (23)$$

donde:

d = distancia o radio de la celda.

ERP = potencia radiada afectiva (para antenas dipolo).

En la figura 17 se puede observar la planeación de un enlace, el cual involucra las diferentes variables de la ecuación (23). Se considera el enlace de subida (unidad del subscriptor a la estación base), debido a que los sistemas CDMA IS-95 como se mencionó anteriormente, se ven limitados en su cobertura por los niveles de potencia que maneja la unidad del subscriptor.

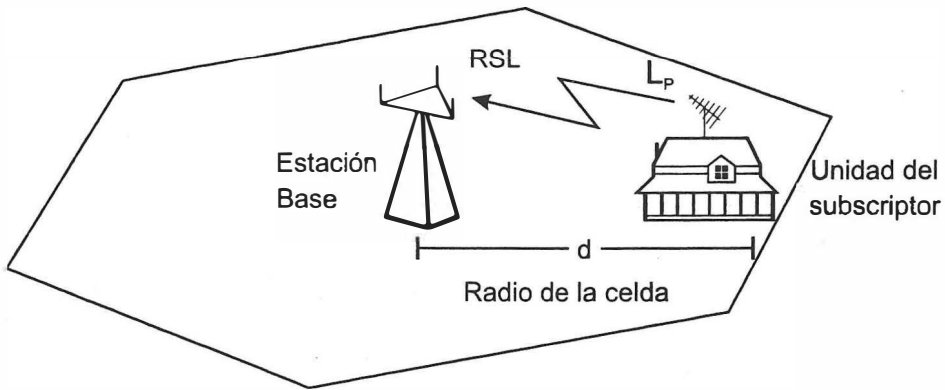


Figura 17. Planeación de un enlace de radio.

Sustituyendo el RSL en la ecuación (16), tenemos que, el E_b/N_0 se obtiene finalmente como:

$$E_b/N_0 = ERP - L_0 \text{ (dB)} + 10\gamma \log(d) - 10 \log(r_b) + 204 - NF \quad (24)$$

IV.4.2 Número de usuarios por celda por canal de tráfico (M)

El número de usuarios por celda por canal de tráfico (M) es el factor principal que determina la eficiencia espectral (capacidad) del sistema CDMA, ya que, como se

mencionó anteriormente en la sección IV.3, M determina la capacidad de canales de voz por celda.

El número de usuarios M depende principalmente de la ganancia de procesamiento (G_p), y de la relación E_b/N_0 , esta relación es expresada como:

$$M = \frac{G_p}{(E_b / N_0)} \quad (25)$$

Como se mencionó en la sección II.4.3.1, una de las principales ventajas de un sistema CDMA (espectro extendido) es la robustez a la interferencia. La ganancia de procesamiento G_p de un sistema califica el grado de rechazo de la interferencia (véase figura 18). La ganancia de procesamiento del sistema es la relación del ancho de banda de la señal expandida a la tasa de bit de información (señal no expandida) y esta dada como:

$$G_p = \frac{B_c}{R_b} \quad (26)$$

donde:

B_c = Tasa de chip (1.2288 Mcps).

R_b = Tasa de bit de información (variable, ver sección III.2.1).

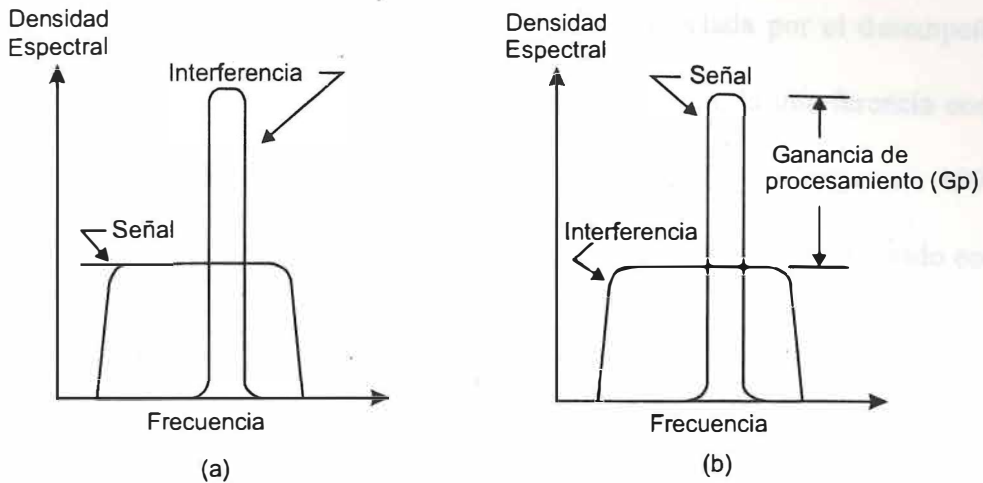


Figura 18. Espectro de señal recibida deseada con interferencia: (a) señal de entrada en el receptor y (b) señal de salida después de la desexpansión.

Típicamente la ganancia de procesamiento para sistemas de espectro expandido se encuentra entre 20 y 60 dB. Con un sistema CDMA (EE), el nivel de ruido es determinado por el ruido térmico y por la interferencia. Para un usuario la interferencia es procesada como ruido. En la práctica el sistema CDMA-IS-95 es típicamente diseñado para una relación $E_b/N_0 = 6$ dB.

El límite del número de usuarios M mostrado en la ecuación (25) es teórico, sin embargo, dadas las limitaciones prácticas en el diseño del sistema de radio CDMA, es difícil acomodar muchos usuarios en una simple celda como lo da la ecuación (25). La capacidad por celda CDMA depende de muchos factores. Se puede observar en la ecuación (25) que el límite superior de la capacidad teórica de un canal CDMA ideal libre de ruido ($M = G_p/0.69$) es limitado por la ganancia de procesamiento (G_p). En un sistema real, la capacidad por celda CDMA es mucho menor que el valor del límite superior teórico. La

capacidad de usuarios por celda por canal de tráfico es afectada por el desempeño de la modulación en el receptor, la precisión del control de potencia, la interferencia con celdas cercanas y otros efectos que actualmente están siendo descubiertos [Garg *et al.*, 1997]. Por tanto, el número de usuarios por celda por canal de tráfico es entonces, expresado como:

$$M = \frac{G_p}{(E_b/N_o)} \cdot \frac{1}{1+\beta} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{v} \cdot \lambda \quad (27)$$

donde:

M = número de usuarios por celda por canal de tráfico.

G_p = ganancia de procesamiento = B_c/R_b .

B_c = tasa de chip = 1.2288 Mcps.

R_b = tasa de bit nominal para IS-95 = 9600 bps.

β = factor de interferencia entre celdas vecinas (0.4 a 0.55).

α = factor de precisión de control de potencia (0.5 a 0.9).

v = factor de actividad de voz (0.45 a 1).

λ = factor de mejoramiento de interferencia en el caso de celda sectorizada, es igual a 2.55.

E_b/N_o = relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido.

Como se puede observar M se encuentra afectada por ciertos factores que influyen en la eficiencia espectral del sistema, a continuación se describen estos factores.

Es importante recordar que el sistema CDMA utiliza las mismas frecuencias en todas las celdas, lo cual es conocido como factor de reuso igual a 1, esto implica que las mismas frecuencias son usadas en celdas adyacentes (esto no es posible en los sistemas celulares basados en FDMA y TDMA) lo cual genera interferencia (interferencia co-canal) pero no de manera excesiva ya que esto esta contemplado en el sistema [Garg *et al.*, 1997; Kohn *et al.*, 1995].

Como se mencionó en el párrafo anterior, las transmisiones CDMA en celdas vecinas utilizan la misma portadora de frecuencia y por lo tanto causan interferencia, esta interferencia es tomada en cuenta introduciendo el factor β en la ecuación (26). Esta modificación reduce el número de usuarios en la celda, ya que, la interferencia de otros usuarios en otras celdas es agregada a la interferencia generada por los otros usuarios en la celda del usuario [Garg *et al.*, 1997]. La relación de interferencia desde las otras celdas relativa a la misma celda (β), depende de la sectorización de la celda y del número de hileras de celdas alrededor de la misma (véase figura 19). Como resultado, el número total de hileras en un sistema juega un papel vital en la relación de interferencia y por tanto en la capacidad del sistema. Actualmente se considera una estructura de 10 hileras para el análisis de la interferencia [Lee *et al.*, 1997]. El rango típico de β es de 0.4 a 0.55. Para el caso de AIF en donde el uso de antenas direccionales en la estación base y en la unidad del subscriptor mejoran la señal y reducen la interferencia, el factor β típico se ha visto que tiene un valor de 0.5 [Webb, 1998].

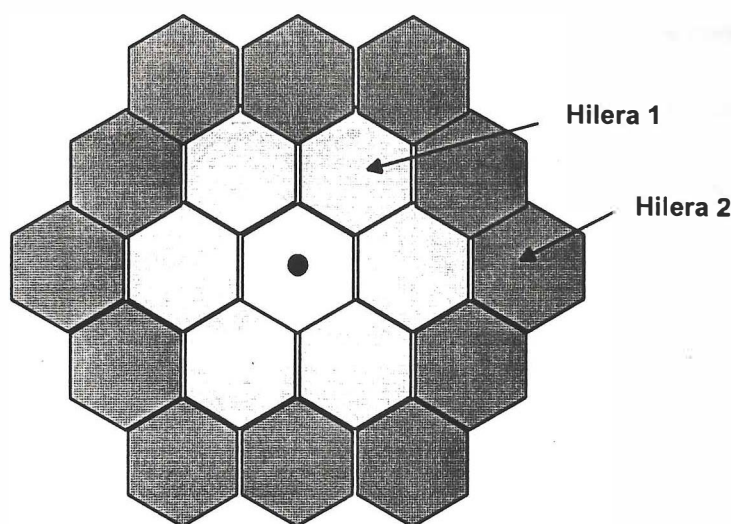


Figura 19. Interferencia por celdas vecinas.

Como se mencionó en la sección III.2.4, el control de potencia en el sistema CDMA es de suma importancia para un buen desempeño del sistema, y afecta el número de usuarios por canal, esto es representado por el factor de precisión de potencia α . El rango típico de α es de 0.5 a 0.9 [Garg. *et al.*, 1997]. Para el caso de la tecnología AIF, el control de potencia se realiza de una manera más sencilla que en el caso móvil, ya que la potencia no está variando constantemente por el movimiento del subscriptor, y puede permanecer fija hasta que un nuevo usuario se agregue o un usuario ya existente salga del sistema, por lo que no necesariamente el control de potencia es continuo. Por tal motivo, esto hace que aumente en gran medida la precisión del control de potencia en el sistema. De cualquier forma este control de potencia debe de ser preciso, ya que si no fuera así existiría interferencia entre los subscriptores y por lo tanto habría una degradación en la capacidad del sistema. El factor α típico se ha visto que tiene un valor de 0.85 [Lee *et al.*, 1997].

El sistema CDMA puede tomar la condición natural de la conversación humana, esto es, de estudios experimentales se ha encontrado que, típicamente en una conversación de voz full-duplex (al mismo tiempo y en ambas direcciones) el ciclo de actividad de la voz es en promedio de menos del 50 %, el resto de el tiempo los usuarios están escuchando o haciendo pausa. Como en CDMA los usuarios están compartiendo el mismo canal de radio, cuando los usuarios asignados al canal no están hablando todos los otros usuarios en el canal de radio CDMA se benefician con menos interferencia [Lee, 1993]. Con CDMA es posible reducir la tasa de transmisión cuando no hay habla, reduciendo substancialmente la interferencia para otros usuarios. Por lo tanto, como la detección de actividad de voz es empleada, la capacidad del sistema celular CDMA, en términos de números de usuarios que son servidos simultáneamente por el mismo sistema, puede aproximadamente ser doblada [Khno *et al.*, 1995; Salmasi, 1993]. El ciclo de actividad de voz es representado por el factor de actividad de voz v y tiene un rango típico de 0.45 a 1. Asimismo, se ha visto que en el diseño de los sistemas prácticos se considera comúnmente un factor de actividad de voz (v) de 0.45. El sistema CDMA es la tecnología que únicamente puede tomar ventaja de este fenómeno [Garg *et al.*, 1997].

Si en la estación base (celda) se utilizan antenas direccionales más que antenas omnidireccionales, entonces, la celda es sectorizada con A sectores (véase figura 20). Las antenas usadas en cada celda radian dentro de un sector de $360^\circ/A$, donde, A representa el número de sectores. Cuando se utilizan antenas direccionales en la estación base, la sectorización típica en la celda es de 120° ($360^\circ/3$), por tal motivo la interferencia vista es

dividida por tres, por que en promedio cada sector de la estación base esta captando la tercera parte de los subscriptores. De esta manera, la capacidad teórica soportada de usuarios por celda por canal es incrementada por un factor de tres. Este factor de mejoramiento de interferencia que se da al emplear celdas sectorizadas es representado por la variable λ en la ecuación (26). El valor típico del factor de mejoramiento λ es de 2.55 [Salmasi, 1993; Garg *et al.*, 1997].

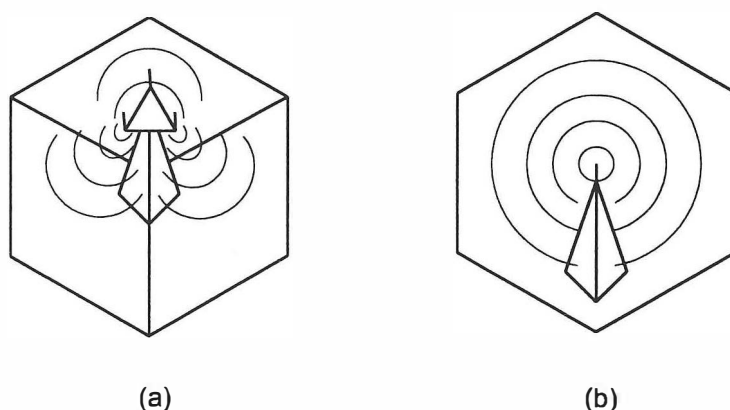


Figura 20. (a) Celda sectorizada 120°. (b) Celda omnidireccional.

IV.4.3 Clasificación de las celdas por su dimensión

Existe otro factor importante que se involucra en el cálculo de la eficiencia espectral del sistema y es el radio de la celda, ya que con el radio de la celda se determina el área de cobertura de la celda. Asimismo, el nivel de la señal recibida (RSL) que forma parte del criterio de diseño utilizado para la cobertura de una celda esta en función de la distancia. La cobertura alcanzada por la señal es frecuentemente considerada como una medida importante para la calidad de la red.

Desde el punto de vista de un operador, la meta principal es proporcionar cobertura de radio por la red celular alcanzado una alta capacidad de tráfico manteniendo una aceptable calidad de servicio [Macario, 1996]. Para minimizar los costos y el tiempo de puesta en marcha del sistema, los operadores de AIF necesitan asegurarse que utilizarán el menor número de celdas como sea posible para proporcionar la cobertura requerida, por lo que esté, es otro punto relevante para notar la importancia de determinar un apropiado tamaño de celda [Webb, 1998]. Por tanto el tamaño de la celda depende de dos aspectos principales:

- Se debe tener un radio de celda dentro del cual haya una calidad de transmisión de la señal satisfactoria, es decir, la señal de recepción debe de tener un nivel adecuado, lo cual se ve afectado por condiciones de propagación. El máximo radio de una celda es limitado por la potencia generada por la unidad del subscriptor [Mehrotra, 1994].
- Otro aspecto que limita el tamaño de la celda es la capacidad de manejo de carga de tráfico generada por un cierto número de subscriptores. Si hay más subscriptores de los que pueden ser soportados en la estación base, el tamaño de la celda tiene que ser reducida.

Los dos aspectos antes mencionados se encuentran relacionados con la zona a la cual se le dará cobertura. De acuerdo a lo anterior, existen clasificaciones en cuanto a la dimensión del radio de celda para los sistemas celulares, las cuales consideran la zona de operación para determinar un rango de valores típico [Macario, 1996; Huuderman, 1997].

Por lo que, las celdas se clasifican como se muestra en la tabla IX:

Tabla IX. Tipos de celdas y su dimensión del radio.

Tipo de celda	Radio de celda [Km]
Microcelda: Zona urbana densa	de 1 a 3
Macrocela: Zona urbana	de 1 a 5
Celda grande: Zonas suburbana y rural	de 5 a 50

En la tabla anterior el tipo de celdas con radio menor a 1 Km empleadas en sistemas móviles PCS no han sido consideradas, asimismo, las celdas de tipo picoceldas y nanoceldas con radios de pocos metros empleadas usualmente en aplicaciones en interiores para redes de datos inalámbricas y en sistemas sin hilos (DECT) tampoco han sido consideradas.

IV.4.4 Forma de celda

Como se mencionó en la sección anterior el área de celda requiere ser conocida para el cálculo de la eficiencia espectral. La fórmula para determinar el área de la celda depende de la forma de celda. La forma de la celda depende de diferentes parámetros como: ERP, patrón de radiación de la antena, y ambientes de propagación. Tradicionalmente, una celda práctica se asume que será irregular teniendo un nivel de señal recibida (RSL) regular. Por otro lado, la celda analítica, generalmente usada para planeación e ingeniería, es una aproximación de una celda práctica y se asume como un hexágono perfecto. También se ha

definido una celda ideal como un círculo perfecto [Faruque, 1996]. Éstos tres tipos de formas de celdas se pueden observar en la figura 21.

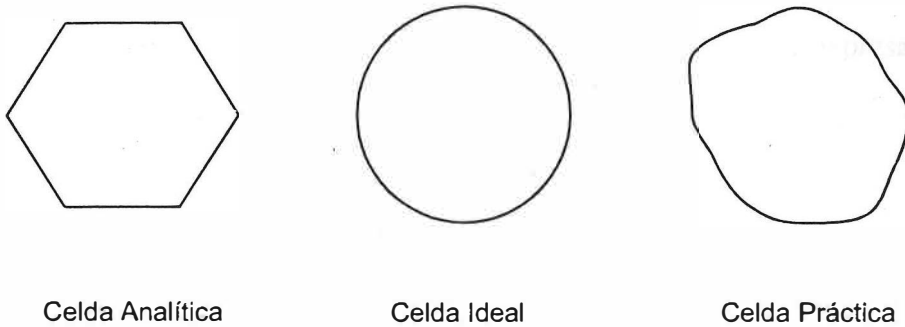


Figura 21. Tipos de celda por su forma.

Con un radio de celda determinado, el área de celda [Km^2] es calculada según su forma como:

- Celda circular: Área de celda = $\pi (\text{radio de celda})^2$
- Celda hexágonal: Área de celda = $2.6 (\text{radio de celda})^2$

IV.4.5 Grado de servicio

Otro parámetro del cual depende la eficiencia espectral del sistema es el grado de servicio (GOS), ya que con la fórmula de tráfico se determina la carga de tráfico ofrecido en Erlangs por celda y posteriormente la carga de tráfico transportado por celda. El grado de servicio también conocido como probabilidad de bloqueo está definido como una medida de congestión, la cual está especificada como la probabilidad de que una llamada esté

siendo bloqueada (para la fórmula Erlang B), o la probabilidad de que una llamada este siendo retardada más allá de una cierta cantidad de tiempo (para la fórmula Erlang C) [Rappaport, 1996]. Esto es, el GOS está definido como una medida de insuficiencia del número de canales disponibles para los subscriptores. En la práctica, es expresado como la porción de llamadas permitidas para fallar durante la hora de mayor ocupación (hora pico) dado por un número limitado de canales. Típicamente en el servicio radio celular, el diseño del sistema está usualmente basado en un grado de servicio de 0.02 (2%) esto indica que un subscriptor encontrará en promedio un canal disponible el 98% del tiempo durante la hora de mayor ocupación del sistema. La fórmula de tráfico que comunmente es empleada es la Erlang B (conocida también como la fórmula de llamadas bloqueadas rechazadas) [Mehrotra, 1993].

La fórmula B de Erlang, con la cual se puede obtener el tráfico por celda aparece es [Bellamy, 1982]:

$$B = \frac{A^C}{C! \sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!}} \quad (28)$$

donde:

B = probabilidad de bloqueo o GOS.

A = tráfico ofrecido (Erlangs).

C = número de canales (o troncales).

Es importante señalar que dado que se conoce el número de canales C , es difícil despejar de la fórmula el tráfico ofrecido A en función del grado de servicio B , por lo cual este proceso se realiza recurriendo a tablas. Esto es, conociendo el tráfico ofrecido por celda [Erlangs/celda], es posible obtener la carga de tráfico transportado por la celda como:

$$\text{Tráfico transportado [Erlangs/celda]} = [1 - \text{GOS}] \cdot \text{tráfico ofrecido} \quad (29)$$

Capítulo V. DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA IS-95

V.1 INTRODUCCIÓN

El programa desarrollado tiene como propósito contribuir con el objetivo principal de este trabajo de tesis que es el estudio de la eficiencia espectral del sistema CDMA, considerando el estándar IS-95, para la tecnología de Acceso Inalámbrico Fijo en México. Existen diferentes factores que intervienen en el cálculo de la eficiencia espectral del sistema celular como: zona, área de cobertura, GOS, etc. (ver sección IV.4), cada uno de estos factores afecta de manera directa la eficiencia espectral del sistema dependiendo de un escenario planteado en particular. Al variar alguno de estos factores es necesario realizar un nuevo cálculo de la eficiencia espectral. Por tanto, parte fundamental de este trabajo de tesis es la creación de un programa que sea utilizado como una herramienta que haga posible el análisis de la eficiencia espectral del sistema según el escenario planteado (ya sea, densamente urbano, urbano, suburbano o rural) de una manera práctica, sistemática, rápida y confiable, en donde además es posible generar escenarios alternos variando los diferentes factores involucrados, permitiendo realizar una toma de decisiones adecuada en el diseño de la red (número de EB's, tipo de celda, E_b/N_0 , etc.) para un caso de estudio en particular. Tener un diseño adecuado de la red, basado en la eficiencia espectral, va a permitir explotar la capacidad máxima del sistema, esto significa que, se va a obtener la mayor capacidad de subscriptores, aprovechando el recurso del espectro asignado al menor

costo. El obtener la máxima capacidad del sistema (eficiencia espectral) al menor costo posible, es de vital importancia para el operador del servicio AIF, y esto depende principalmente de la elección del esquema de acceso múltiple (CDMA, TDMA).

En este capítulo se describe la metodología desarrollada por medio de un algoritmo, el cual es utilizado en el programa para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA estándar IS-95, con aplicación en servicios de acceso inalámbrico fijo. El algoritmo es desarrollado a partir de la descripción realizada en el capítulo IV sobre el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA, así como de los factores que intervienen en la metodología aplicada en este trabajo para su cálculo. Asimismo, se realiza la descripción del programa de cómputo, el cual permite aplicar la metodología utilizada.

V.2 ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DEL SISTEMA CDMA ESTÁNDAR IS-95

El algoritmo que describe la metodología desarrolla y que es aplicado en el programa para la obtención de la eficiencia espectral del sistema CDMA, estándar IS-95, está basado en dos etapas principalmente. La primera etapa es una rutina que obtiene la relación E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace basándose en la predicción de propagación del modelo Hata, esto es, para asegurar que el enlace de radio cumple con el margen de calidad establecido en el estándar IS-95. Por otro lado, la segunda etapa del programa es una rutina

que calcula la eficiencia espectral a partir de ciertos parámetros obtenidos en la primera etapa y otros que son introducidos.

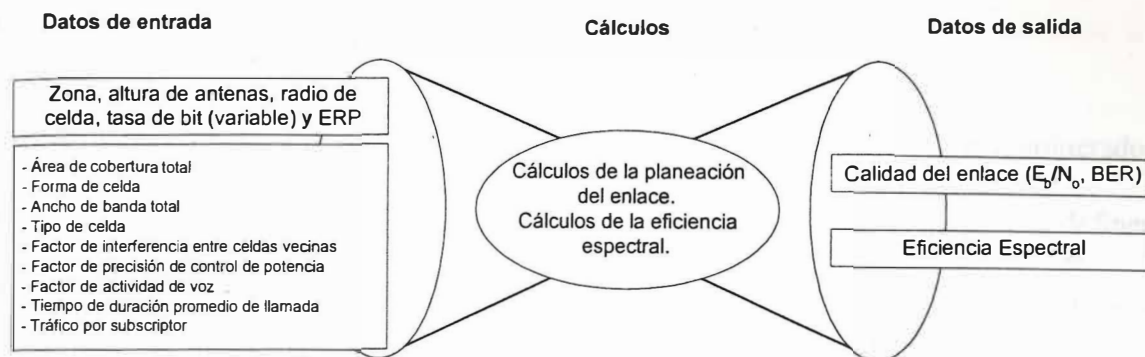


Figura 22. Diagrama general a bloques del programa.

En el diagrama general a bloques del programa (véase figura 22) se pueden observar todos aquellos factores que intervienen en el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA. Este diagrama incluye los datos de entrada que definen el escenario, los cálculos de la planeación del enlace y de la eficiencia espectral, mientras que los datos de salida resumen los resultados del análisis. En las siguientes secciones se describe de manera más detallada cada una de las rutinas principales del programa.

V.2.1 Rutina para la obtención del E_b/N_0

Como se mencionó anteriormente, la primera etapa del algoritmo obtiene el E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace basándose en la predicción de propagación del modelo

Hata, para asegurar que el enlace de radio cumple con el margen de calidad establecido en el estándar IS-95. En las figuras 23 y 24 se presenta el diagrama de flujo de la rutina para la obtención del E_b/N_0 , cabe mencionar que el análisis de esta rutina se definió anteriormente en la sección IV.4.1.

En la rutina para el cálculo de la obtención del E_b/N_0 se encuentran involucrados ciertos parámetros requeridos por el modelo de predicción de propagación Hata que definen parte del escenario de estudio. Los valores de los parámetros respetan el rango establecido por el modelo Hata para asegurar un funcionamiento correcto del modelo. Cabe recordar que la banda de frecuencia que se contempla es la de 1900 MHz. El algoritmo comienza con la elección del tipo de zona para la operación del sistema, dependiendo del tipo de zona (ya sea urbana densa, urbana, suburbana o rural), se define un cierto ambiente de propagación al que le corresponde un valor de la pendiente de pérdida por trayectoria γ (ver tabla IX). El siguiente paso se asigna las alturas de las antenas, tanto para la estación base (h_b) como para la estación móvil (h_m , en este caso es la unidad de subscriptor fija). Después se procede a asignar el radio de la celda, el valor del radio de la celda dependerá de la clasificación de las celdas por su dimensión (ver sección IV.4.3 tabla X), esta clasificación de celdas considera la zona de operación para determinar un rango de valores de radio típico. Para el sistema IS-95, la distancia máxima de operación entre la estación base y la unidad de subscriptor fija es de 50 Km (este valor es en condiciones favorables en el ambiente de propagación de la señal) y el radio de celda mínimo que se considera es de 1 Km, esto es debido al valor mínimo en el rango de operación del modelo Hata. Enseguida

se asigna el valor de la potencia radiada efectiva (ERP), su valor se encuentra dentro del rango que existe en las especificaciones del estándar IS-95 para los niveles de potencia que maneja la unidad del subscriptor (ver sección III.2.4). Posteriormente se asigna el valor de la tasa de bit de datos. Como se mencionó en la sección III.2.1, existen dos conjuntos de tasas de datos, donde la tasa nominal es de 9600 bps (r_b). La variabilidad dinámica en tasas de transmisión incrementa la capacidad del canal.

Es necesario conocer los parámetros anteriores para calcular las pérdidas por trayectoria (L_p). Entonces, después de haber introducido estos datos se continua con el cálculo de las pérdidas por trayectoria por medio del modelo Hata (ver sección IV.4.1.3). En base a las pérdidas por trayectoria obtenidas se calcula el RSL (nivel de la señal recibida). El resultado obtenido del cálculo del nivel de la señal recibida se verifica que pase el umbral de RSL mínimo de la tecnología CDMA IS-95. Para IS-95, el nivel mínimo requerido de la señal recibida en el peor caso es de aproximadamente -125 dBm. Con el valor del nivel de la señal recibida y considerando la tasa de bit de datos (R_b) asignada anteriormente es posible calcular el E_b/N_0 (ver sección IV.4.1.3). Enseguida, se verifica que el E_b/N_0 sobrepase el margen de calidad de 6 dB establecido por el sistema CDMA IS-95. Después de verificar que el margen de calidad del E_b/N_0 cumpla con el establecido en el estándar IS-95, se calcula la tasa de error de bit (BER) del sistema en base al esquema de modulación y de la codificación de canal (ver sección III.2.5). Para mantener un buen desempeño en el sistema la tasa de error de bit permitida en el algoritmo es considerada de 1×10^{-3} (para

comunicación de voz). Después de verificar el desempeño de la tasa de error de bit, se continua con los cálculos de la segunda etapa del algoritmo.

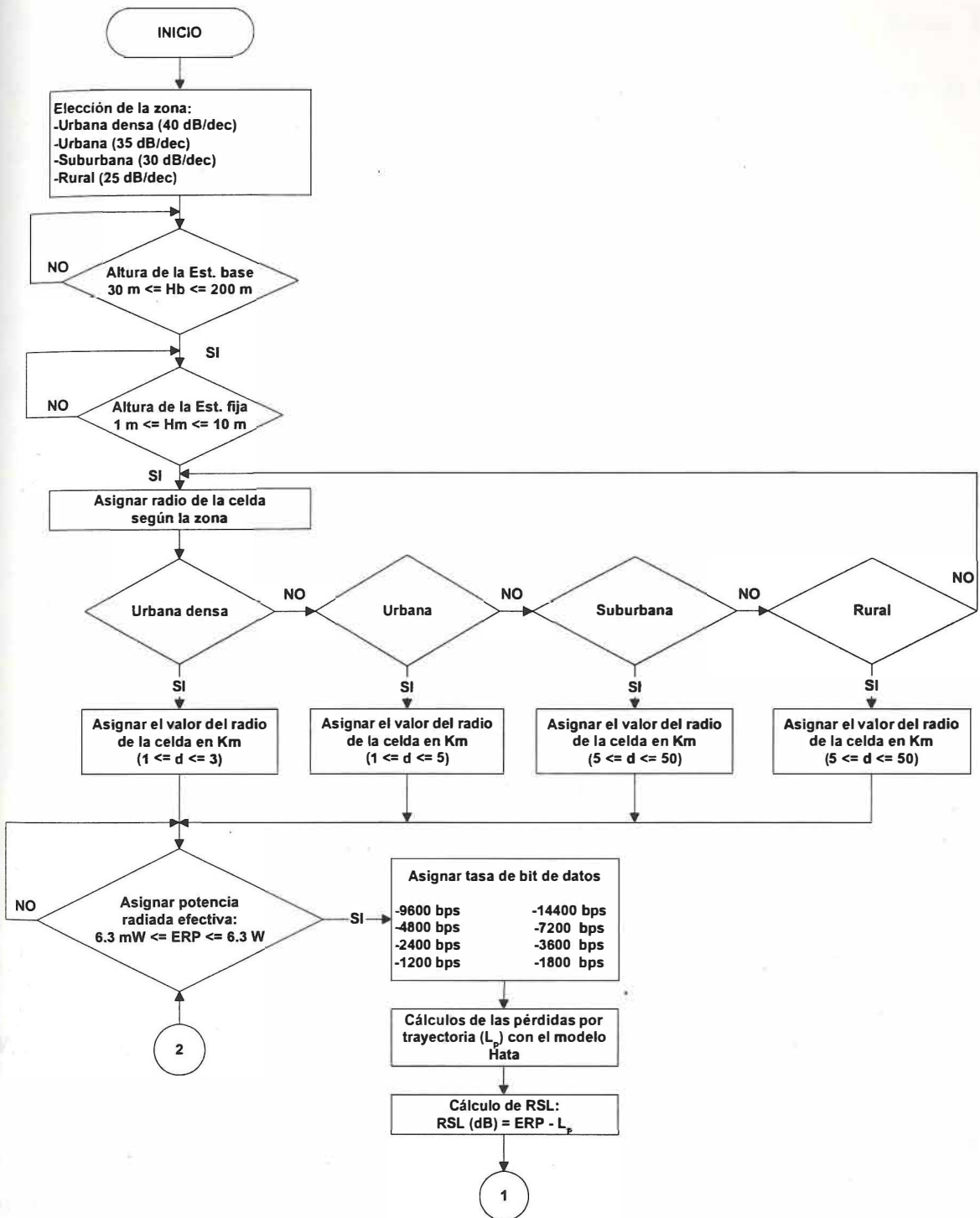


Figura 23. Diagrama de flujo de la rutina para la obtención del E_b/N_0 .

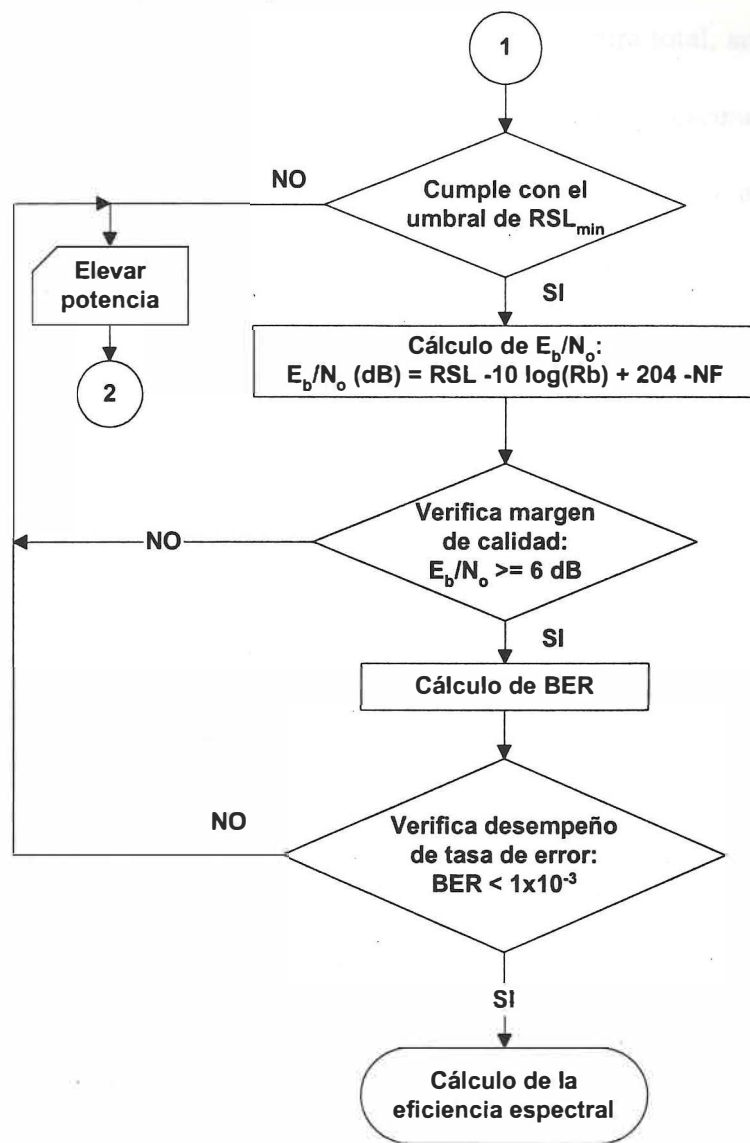


Figura 24. Continuación del diagrama de flujo de la rutina para la obtención del E_b/N_0 .

V.2.2 Rutina para el cálculo de la eficiencia espectral

Como se mencionó anteriormente, la segunda etapa del algoritmo calcula la eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95 a partir del E_b/N_0 obtenido de la planeación

del enlace, otro parámetro que también se considera de la rutina anterior es el radio de celda, que aunado con otros parámetros como: área de cobertura total, ancho de banda total disponible por el sistema, tipo de celda, etc., terminan de definir el escenario de estudio. En las figuras 25, 26 y 27, se presenta el diagrama de flujo de la rutina del cálculo de la eficiencia espectral, el cual se basa en la definición expresada en la sección IV.3.

Esta rutina empieza al ser asignada el área de cobertura total en Km^2 , esta cobertura abarca la red celular en la zona de operación del sistema. El siguiente paso, es seleccionar la forma de la celda, esta forma de celda puede ser circular (ideal) o hexagonal (analítica). Como se mencionó en la sección IV.4.4, la forma de la celda afecta directamente en el área de cobertura de la celda, ya que dependiendo de la forma de celda seleccionada, se utiliza la fórmula correspondiente para calcular el área de la celda con el radio de celda determinado. Es importante recordar que tanto la forma de celda circular como la forma de celda hexagonal son una aproximación de una celda real que por las características de propagación y del terreno tiene una forma irregular. Frecuentemente, el análisis se realiza con celdas hexagonales. Después, se obtiene el número de celdas en el sistema, el cual se calcula a partir del área de cobertura total y el área de celda. También es importante mencionar que la celdas del sistema se consideran de un tamaño uniforme. Posteriormente, se elige el ancho de banda total del sistema (W) en base a las frecuencias en la banda de 1900 MHz, que pueden ser utilizadas para la tecnología AIF, bajo el estándar IS-95 en México. El ancho de banda total se considera de un sólo sentido, esto significa, que si la licencia es de 30 MHz o 10 Mhz, el ancho de banda que se considera es solo de 15 MHz o

de 5 MHz respectivamente. Con el ancho de banda total del sistema (W), y el ancho de banda del canal (o portadora) de 1.25 MHz para el estándar IS-95, se calcula el número de canales de tráfico efectivo del sistema.

Posteriormente, se selecciona el tipo de celda, ya sea omnidireccional o sectorizada. En un sistema CDMA IS-95, se tiene mayor número de usuarios por celda por canal de tráfico en una celda sectorizada que una omnidireccional, esto es debido a que en el cálculo del número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo (M) (ver sección IV.4.2) se incluye un factor λ para el caso de una celda sectorizada y por lo tanto se tiene una mejor eficiencia espectral del sistema. También, en una celda sectorizada la interferencia es reducida. Comúnmente en los sistemas típicos CDMA, se emplean celdas sectorizadas debido a que la eficiencia espectral del sistema se ve incrementada. El siguiente paso, es asignar los valores de los factores que intervienen en M (ver sección IV.4.2), estos factores son: β (interferencia entre celdas vecinas) tiene un rango de 0.4 a .55 y su valor típico es de 0.5; α (precisión de control de potencia) tiene un rango de 0.5 a 0.9 y su valor práctico es de 0.85; ν (actividad de voz) tiene un rango de 0.45 a 1 y su valor típico es de 0.45. El valor de la ganancia de procesamiento del sistema esta en función de la relación de ancho de banda de la señal expandida a la tasa de información. En caso de haberse elegido anteriormente el tipo de celda sectorizada, se incluye el factor λ (mejoramiento de interferencia en caso de celda sectorizada), cuyo valor típico es de 2.55.

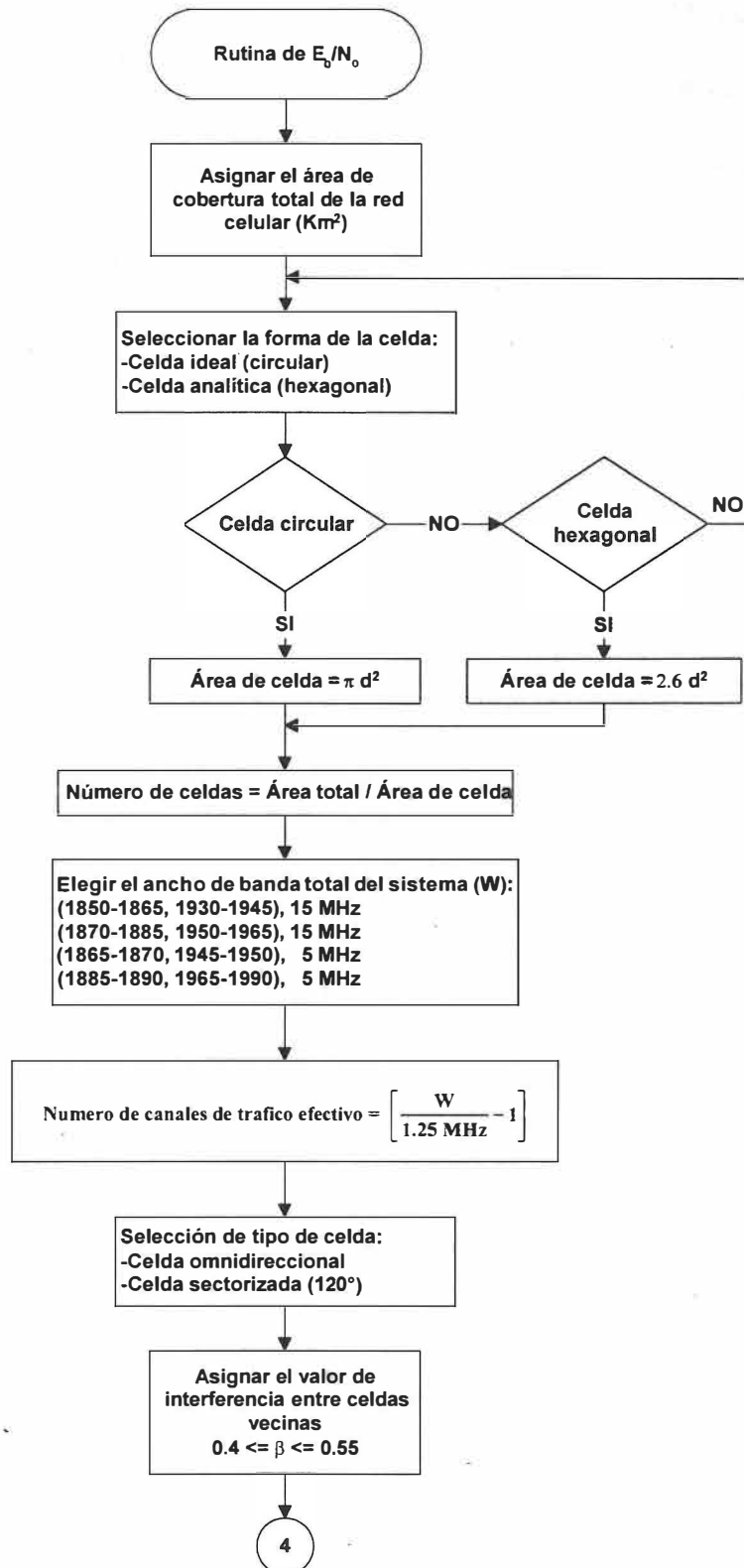


Figura 25. Diagrama de flujo de la rutina para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA (primera parte).

Después de asignar todos los parámetros que intervienen en M (número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo), se calcula finalmente M . Con el valor obtenido de M y el número de canales de tráfico efectivo calculado anteriormente se obtiene el número de canales de voz, ya sea por celda o sector según sea el caso. Enseguida se obtiene la carga de tráfico ofrecido [Erlangs/celda]. El tráfico ofrecido se obtiene empleando las tablas de Erlang B con un GOS del 2% (ver sección IV.4.5) y el respectivo número de canales de voz (por celda o sector). Se considera un GOS el 2% ya que típicamente en el servicio radio celular el diseño del sistema está usualmente basado en un grado de servicio del 2%. Posteriormente, se calcula en base al tráfico ofrecido en Erlangs/celda y al GOS, la carga de tráfico transportado por celda [Erlangs/celda] (véase figura 26).

Finalmente, con los resultados obtenidos de tráfico transportado por celda [Erlangs/celda] y del número de celdas del sistema, así como con los valores asignados del área de cobertura total [Km^2] y el ancho de banda total disponible por el sistema [MHz], se tienen los elementos necesarios y se realiza el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95, que está expresada en [$\text{Erlangs} \cdot \text{MHz} / \text{Km}^2$] (véase figura 27).

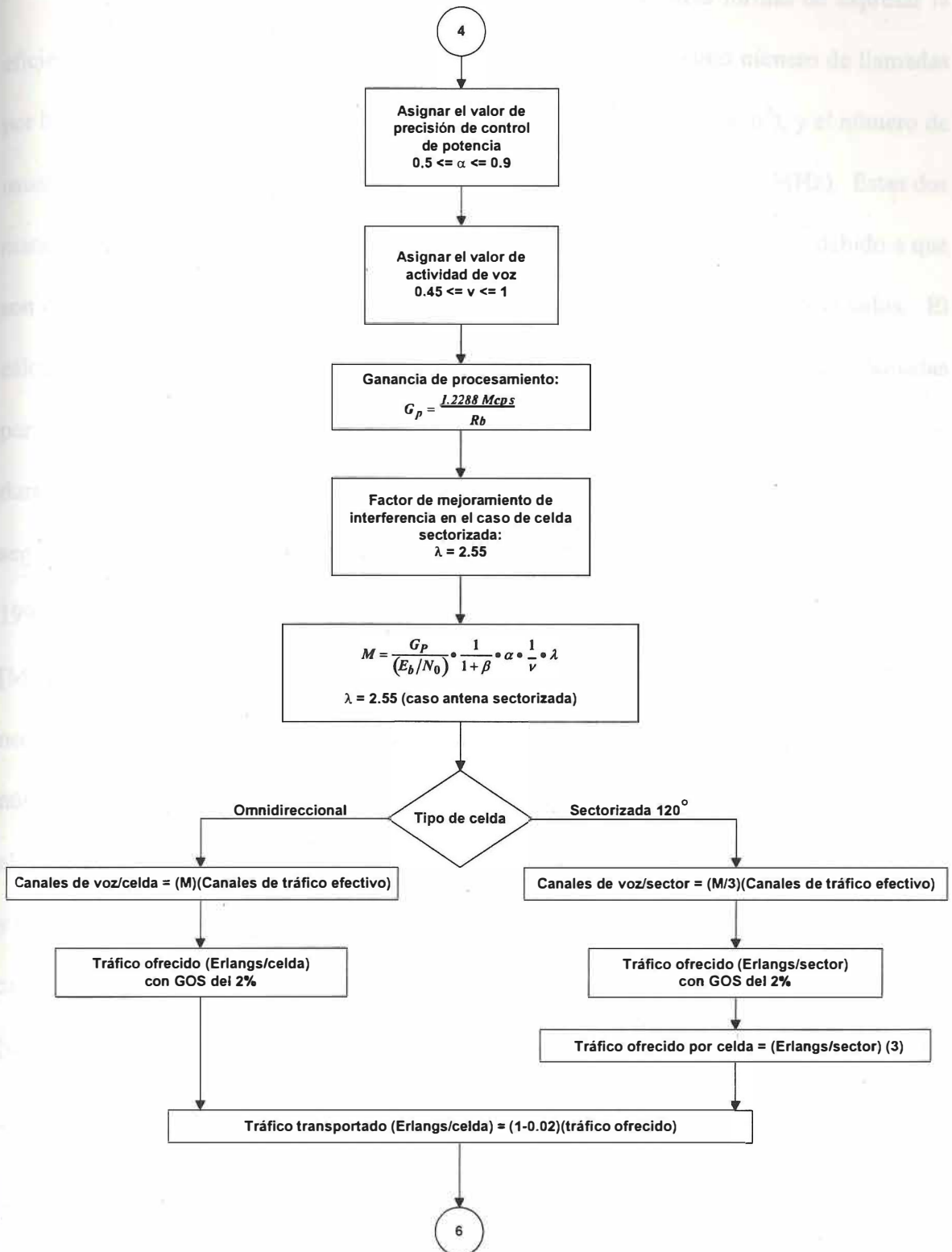


Figura 26. Continuación del diagrama de flujo de la rutina para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA (segunda parte).

El algoritmo también incluye la posibilidad de calcular otras formas de expresar la eficiencia espectral y/o la capacidad del sistema, estas son: el máximo número de llamadas por hora que pueden ser atendidas en una área dada (llamadas por hora/ Km^2), y el número de usuarios por Km^2 servidos por un ancho de banda asignado (usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$). Estas dos maneras de expresar la eficiencia del sistema se han incorporado en esta tesis, debido a que son de gran utilidad para una comprensión e interpretación más clara de los resultados. El cálculo del número de llamadas/ Km^2 se basa en el resultado de la capacidad de llamadas por hora/celda y del tiempo de duración promedio de una llamada (t). El tiempo de duración promedio de una llamada varía típicamente dentro de un rango de 120 seg. a 180 seg., este valor depende de acuerdo al tipo de subscriptor (comercio u hogar) [Faruque, 1996], siendo el de 140 seg. el que se recomienda como tiempo de duración uniforme [Mehrotra, 1993]. Por otro lado, para el cálculo del número de usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$ es necesario conocer la carga de tráfico por usuario (Erlangs/usuario), con la cual se calcula el número promedio de llamadas por usuario durante la hora de mayor ocupación. Según algunos datos típicos indican que la carga de tráfico por subscriptor varía entre 0.01 Erlangs y 0.09 Erlangs [Webb, 1998]. En base a el número promedio de llamadas por usuario y a la capacidad de llamadas por hora/celda, se obtiene la capacidad de usuarios por hora/celda (véase figura 27), resultado en el cual se basa el cálculo del número de usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$.

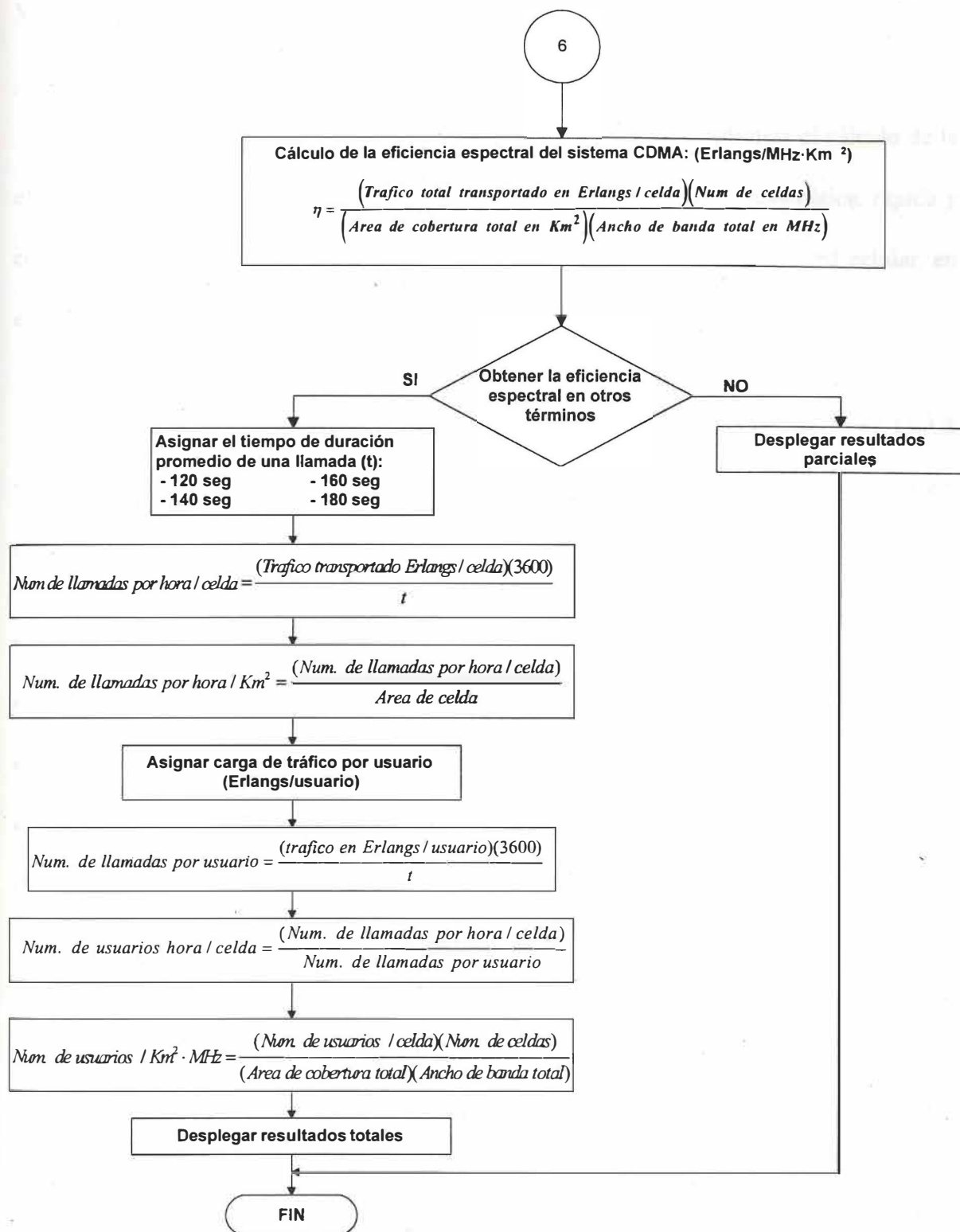


Figura 27. Continuación del diagrama de flujo de la rutina para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA (tercera parte).

V.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Este programa fue desarrollado como una herramienta que optimiza el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95 de una manera práctica, sistemática, rápida y confiable, apoyando para tomar la mejor decisión en cuanto al diseño de la red celular, en este caso, con aplicación principalmente en la tecnología AIF.

En la realización de este programa se utilizó el lenguaje de programación MATLAB versión 4.2c.1. Los requerimientos del equipo de cómputo necesarios para su instalación son los siguientes:

- Computadora PC 486 o mejor.
- 8 MB de memoria RAM o más.
- Sistema Operativo Windows 3.11, 95.
- 170 KB de espacio libre en disco duro.
- Lenguaje de programación MATLAB versión 4.2c.1 o más reciente.

El algoritmo y funcionamiento del programa fueron descritos de manera detallada en la sección anterior (sección V.2). Por lo que, a continuación solamente se mostrará en forma de pantallas el funcionamiento del programa. Subsecuentemente se presentan las diferentes pantallas generadas con los menús y las ventanas correspondientes para introducir los parámetros que son requeridos en el algoritmo para calcular la eficiencia del

sistema CDMA, así como las ventanas donde son desplegados los resultados obtenidos. En general los pasos que sigue el programa son los siguientes:

1. Definición del escenario de estudio mediante los parámetros de entrada.
2. Cálculos de la planeación del enlace.
3. Cálculos de la eficiencia espectral.
4. Despliegue de los resultados del análisis.

En la figura 28, se muestra la pantalla con el menú principal, en donde se encuentran activas las opciones “Acceso Múltiple” y “Glosario”. El menú “Acceso Múltiple” tiene como función determinar el esquema de acceso múltiple CDMA, de esta forma, automáticamente el programa considera las características del estándar IS-95, mientras que el menú “Glosario” activa automáticamente un archivo de texto que tiene como función presentar algunos conceptos relacionados con las variables involucradas en el programa. El propósito de este glosario es apoyar al usuario que utilice el programa, en el caso de tener desconocimiento de algún término o abreviatura empleadas en el programa.

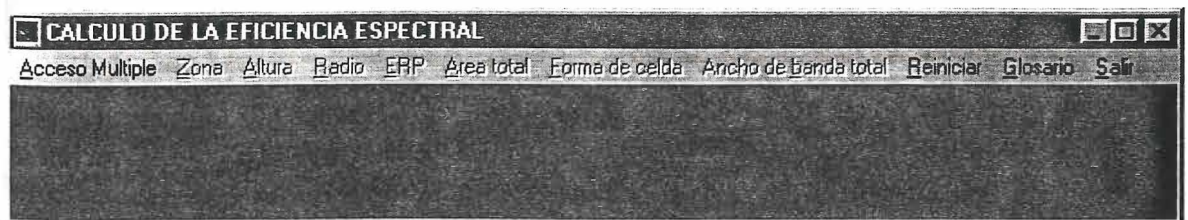


Figura 28. Pantalla con el menú principal del programa.

Después de seleccionar el esquema de acceso múltiple CDMA se activa el menú “Zona” (véase figura 29), en el cual se elige un tipo de zona, este menú contiene los cuatro tipos de zona para la operación del sistema. Seleccionando una de las zonas se define el ambiente de propagación, que le corresponde.

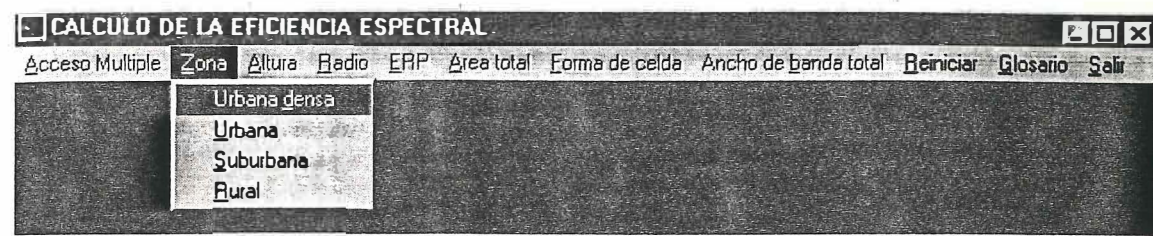


Figura 29. Menú “Zona”.

Después de haber seleccionado la zona, se continua con la asignación de los parámetros de operación del sistema. El menú “Altura” es uno de estos parámetros, al seleccionar este menú automáticamente es activada la ventana en donde se asigna el valor de la altura de la estación base (véase figura 30), enseguida y de la misma manera se activa la ventana de la altura de la estación móvil, en este caso se trata de un equipo de subscritor fijo. Los rangos que se emplean de las alturas se encuentran dentro de los valores permidos por el modelo de predicción Hata.

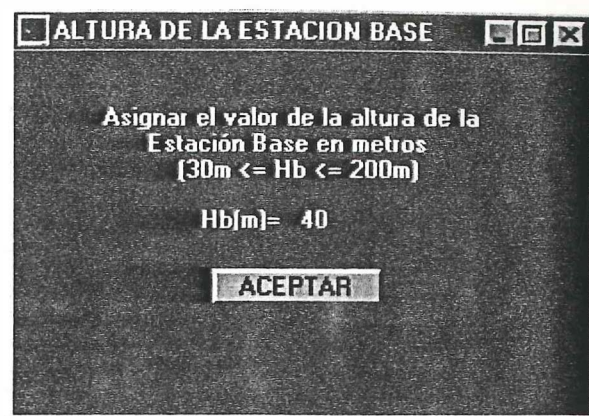


Figura 30. Ventana para la asignar la altura de la estación base.

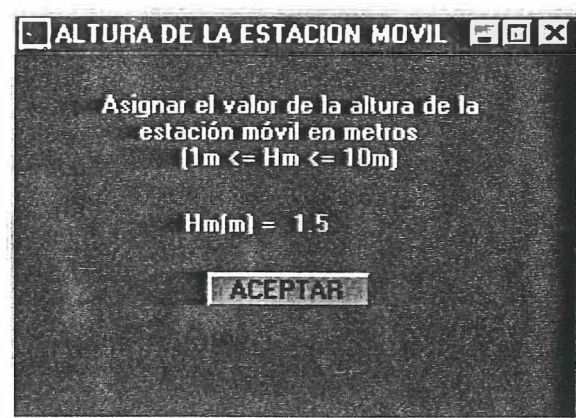


Figura 31. Ventana para asignar la altura de la antena de la estación del subscriptor.

Enseguida, se activa el menú "Radio", el cual presenta una ventana para asignar el valor del radio de la celda (véase figura 32). El rango de valores para el radio de la celda que se presenta en esta ventana, dependerá de la zona de operación del sistema que se haya determinado anteriormente.

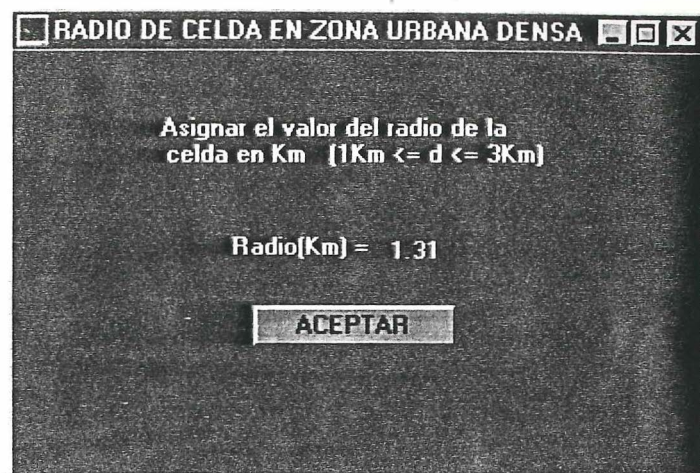


Figura 32. Ventana para asignar el radio de la celda.

Después de haber seleccionado el radio de celda, se activa el menú “ERP” (véase figura 33), el cual presenta una ventana donde se asigna el valor de la potencia radiada efectiva (ERP), su valor se encuentra dentro del rango que existe en las especificaciones del estándar IS-95 para los valores de potencia que maneja la unidad del subscriptor.. Una vez que es introducido el valor de la potencia radiada efectiva, aparece inmediatamente una ventana donde es asignado el valor de la tasa de bit de información (r_b) (véase figura 34), y el programa continua con el proceso para calcular el E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace basándose en la predicción de propagación del modelo Hata. El programa verifica que el valor del E_b/N_0 sobrepase el margen de calidad de la señal de 6 dB establecido por el sistema IS-95, después se verifica también que la tasa de error del sistema calculada en función del E_b/N_0 sea menor a 1×10^{-3} . Enseguida, el resultado del E_b/N_0 del enlace es mostrado en una ventana (véase figura 35), donde el usuario del programa puede verificar el valor y aceptarlo, o sino tiene la opción de variar la potencia realizando nuevamente el

cálculo de el E_b/N_0 . El E_b/N_0 es un factor importante debido a que afecta directamente a la capacidad del sistema.

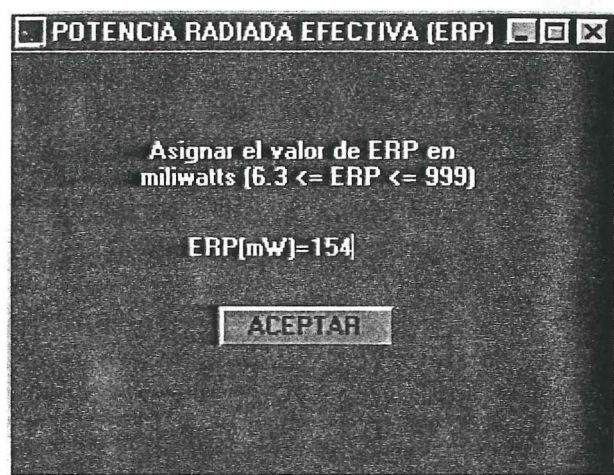


Figura 33. Ventana para asignar la potencia radiada efectiva (ERP).



Figura 34. Ventana para asignar la tasa de información de usuario.

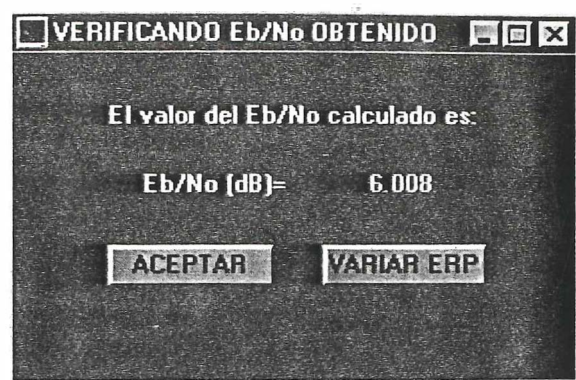


Figura 35. Ventana para verificar el E_b/N_0 obtenido de la planeación del enlace.

Posteriormente, se activa el menú “Área”, en donde se asigna el área de cobertura total (Km^2) que abarca la red celular en la zona de operación del sistema como se muestra en la figura 36.

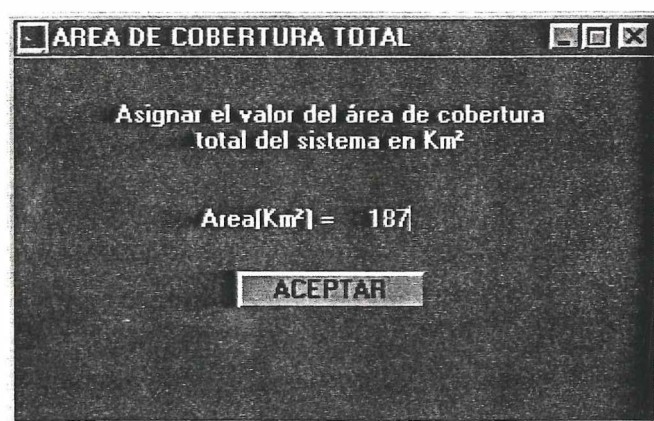


Figura 36. Ventana para asignar el área de cobertura total del sistema.

Después de que se tiene el área total, se activa el menú “Forma de celda” como se observa en la figura 37, en el cual se tiene la opción de elegir entre una celda circular (ideal) y una celda hexagonal (analítica). Con frecuencia los análisis son realizados con las celdas

hexagonales. Dependiendo de la forma de celda seleccionada, el programa aplicará la fórmula correspondiente para calcular el área de la celda. Posteriormente, el programa realiza el cálculo del número de celdas en base al área de celda y al área de cobertura total.

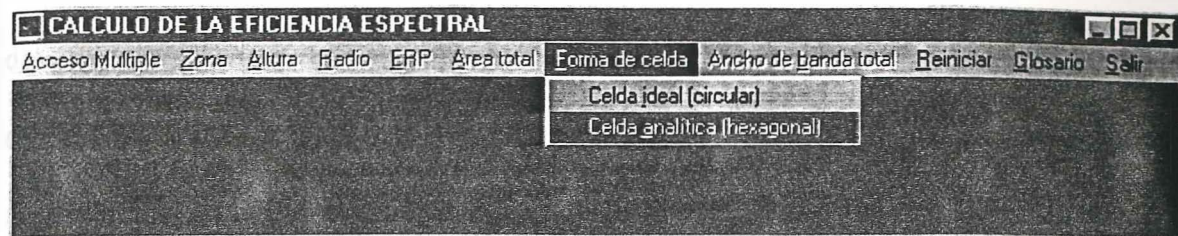


Figura 37. Menú "Forma de celda".

El siguiente paso es seleccionar el ancho de banda total del sistema (considerando un sentido). En la figura 38 se presenta el menú "Ancho de banda total", el cual tiene como opciones 4 sub-bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas en México para la tecnología AIF, en este caso bajo el estándar IS-95. Estas bandas incluyen segmentos de ancho de banda en un sentido de 5 MHz y de 15 MHz.

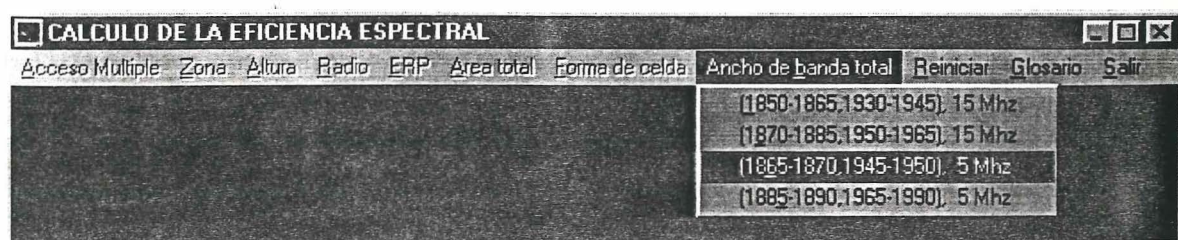


Figura 38. Menú "Ancho de banda total".

Después de asignar el ancho de banda, el programa calcula el número de canales de tráfico efectivo y prosigue con el cálculo del número de usuarios por celda por canal de tráfico (M), por lo que se van presentando las ventanas correspondientes para introducir los valores de los parámetros que intervienen en este cálculo. Primero se presenta la ventana donde se selecciona el tipo de celda (véase figura 39), ya sea, celda omnidireccional o celda sectorizada 120° (tres sectores). De esta elección depende el valor del factor de mejoramiento de interferencia λ , el cual es de 2.55 en el caso de ser celda sectorizada.

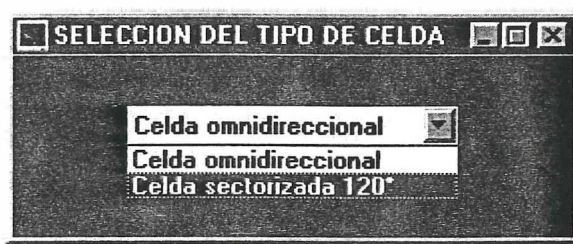


Figura 39. Ventana para elegir tipo de celda.

Enseguida de haber seleccionado el tipo de celda se activa la ventana para asignar el valor del factor de interferencia entre celdas vecinas (β). El rango de β se encuentra entre 0.4 y 0.55, y el valor práctico utilizado para el caso de AIF es de 0.5 (véase figura 40).

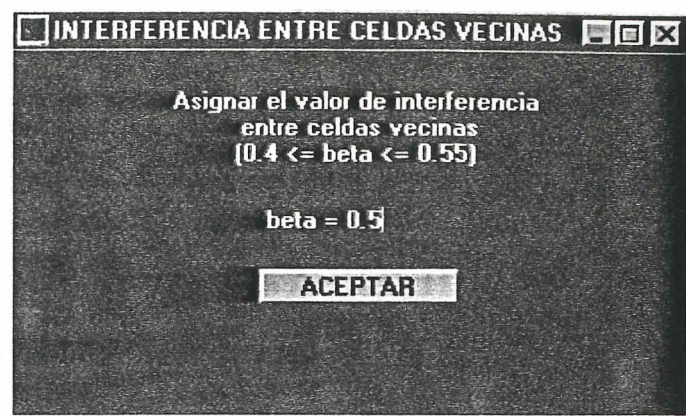


Figura 40. Ventana para asignar el factor de interferencia entre celdas vecinas (β).

El siguiente paso es asignar el valor del factor de precisión de control de potencia (α), el cual tiene un rango que varía desde 0.5 hasta 0.9 y su valor práctico es de 0.85. La ventana correspondiente a este factor se muestra en la figura 41.

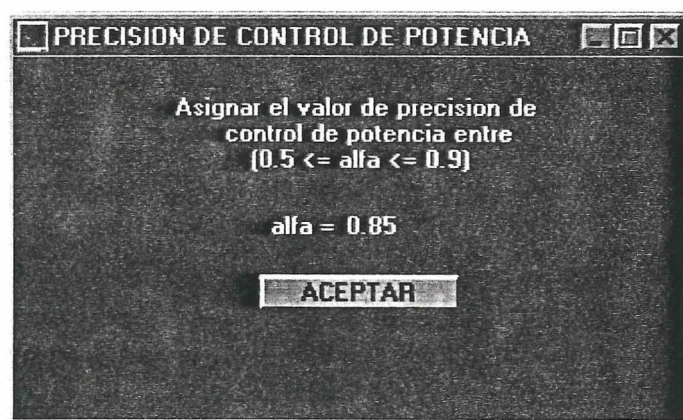


Figura 41. Ventana para asignar el factor de precisión de control de potencia (α).

En la figura 42 se muestra la ventana en donde se asigna el valor del factor de actividad de voz (v) que viene siendo el último de los parámetros que intervienen en el

cálculo del número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo (M), este factor tiene un rango práctico de 0.45 a 1. Se ha visto que en el diseño de los sistemas prácticos se considera comúnmente un factor de actividad de voz de 0.45.

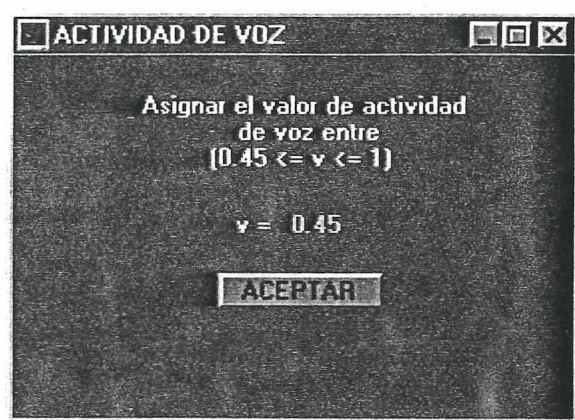


Figura 42. Ventana para asignar el factor de actividad de voz (v).

Una vez que el programa obtiene el número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo (M), continúa con los calculos para obtener el número de canales de voz por celda y posteriormente el tráfico transportado por celda (ver figura 26), con el cual se obtiene la eficiencia espectral del sistema CDMA [$\text{Erlangs/MHz} \cdot \text{Km}^2$] para el escenario planteado. Posteriormente el programa presenta una ventana (véase figura 43) en la que se pregunta si se desea obtener la eficiencia espectral en términos de llamadas por hora/ Km^2 y de usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$. Si la respuesta es "No", el programa automáticamente despliega en una ventana los resultados obtenidos del caso de estudio (véase figura 44), junto con los parámetros que determinan el escenario planteado. En esta ventana de resultados se

encuentran los resultados obtenidos de la función para la planeación del enlace, y los de la función para el cálculo de la eficiencia espectral, como se muestran a continuación:

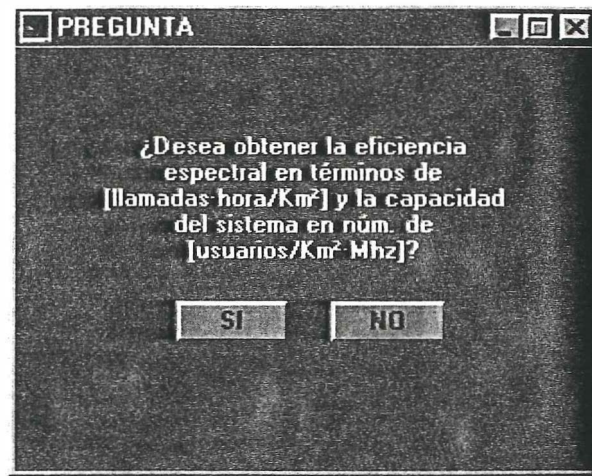


Figura 43. Ventana de consulta para obtener la eficiencia espectral del sistema CDMA en otros términos.

1. Función para la obtención del E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace.

- Pérdidas por trayectoria (dB).
- E_b/N_0 .
- Desempeño de tasa de error del sistema (BER).

2. Función para el cálculo de la eficiencia espectral.

- Número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo (M).
- Canales de voz por celda o sector.
- Tráfico transportado [Erlangs/celda].
- Eficiencia espectral del sistema CDMA [Erlangs/MHz·Km²].

RESULTADOS	
Esquema de acceso múltiple:	CDMA
Zona:	Urbana densa
Altura de la Estación Base (m):	40
Altura de la Estación Móvil (m):	1.5
Radio de celda (Km):	1.31
ERP (Watts):	0.154
Pérdidas por trayectoria (dB):	143.3
Eb/No (dB):	6.008
Probabilidad de error:	1.329e-008
Área de cobertura total del sistema (Km²):	187
Forma de la celda:	Hexagonal
Área de la celda (Km²):	4.462
Número de celdas:	42
Ancho de banda total del sistema (MHz):	5
Número de canales:	3
Tipo de celda:	Sectorizada 120°
Tasa de bit de datos	1.44e+004
Factor de interferencia entre celdas vecinas	0.5
Factor de precisión de control de potencia:	0.85
Factor de actividad de voz:	0.45
Capacidad de usuarios:celda/canal de tráfico:	69
Canales de voz/sector:	69
Grado de servicio:	0.02
Tráfico ofrecido por sector (Erlangs/sector):	58.18
Tráfico transportado por celda (Erlangs/celda):	171

EFICIENCIA ESPECTRAL TOTAL DEL SISTEMA
 (Erlangs/MHz Km²): 7.683

CANCELAR

Figura 44. Ventana de resultados (opción 1).

Por otro lado, si se desea obtener la eficiencia espectral en términos de llamadas por hora/Km² y en usuarios/Km²·MHz, el programa presenta una ventana (véase figura 45) en la cual se tiene que elegir el tiempo de duración promedio de llamada, en esta ventana se encuentran cuatro opciones que están dentro del rango típico de el tiempo de duración promedio de llamada, estas opciones tienen los siguientes valores: 120 seg., 140 seg., 160 seg., y 180 seg. Con esta variable, el programa realiza el cálculo del número de llamadas por hora por celda, y tomando en cuenta el área de la celda obtenida anteriormente, realiza el cálculo de la eficiencia espectral en términos de llamadas por hora/Km².

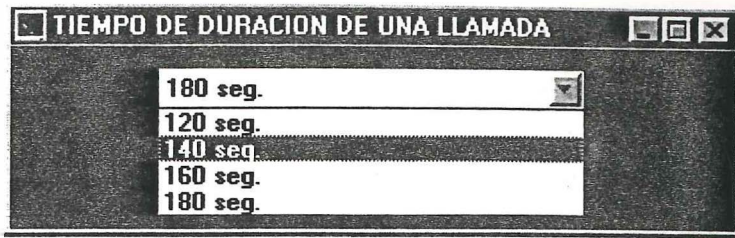


Figura 45. Submenú para elegir el tiempo de duración promedio de llamada

Después el programa calcula el número de usuarios por hora/celda, para lo cual se requiere conocer la carga de tráfico por suscriptor (Erlangs/subscriptor), por lo tanto el programa presenta una ventana para asignar el valor de este parámetro (ver figura 46). Según algunos datos prácticos, la carga de tráfico por suscriptor varía entre 0.01 Erlangs y 0.09 Erlangs. Con el valor de la carga de tráfico por suscriptor, el programa obtiene el número promedio de llamadas por suscriptor durante la hora mayor ocupación, y junto con el número de llamadas por hora/celda se calcula la capacidad de usuarios por hora/celda. En base a este resultado el programa calcula la eficiencia espectral en términos de usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$.

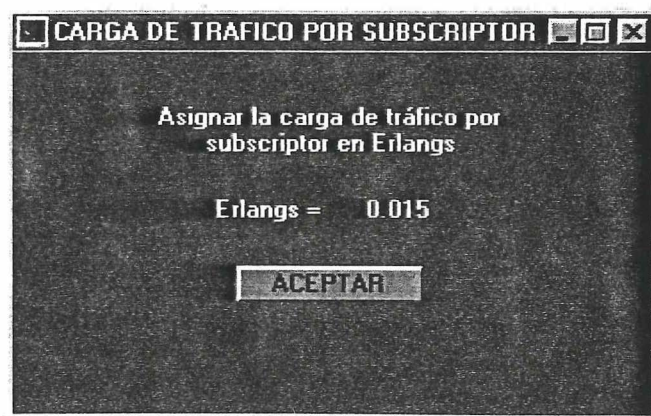


Figura 46. Ventana para asignar la carga de tráfico por suscriptor (Erlangs/subscriptor).

Finalmente el programa presenta en una ventana los resultados obtenidos del caso de estudio (véase figura 47), incluyendo también los parámetros de entrada que definieron el escenario. Entre los resultados principales del cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA se encuentran:

1. Función para la obtención del E_b/N_0 a partir de la planeación del enlace.

- Pérdidas por trayectoria (dB).
- E_b/N_0 .
- Desempeño de tasa de error del sistema (BER).

2. Función para el cálculo de la eficiencia espectral.

- Número de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo (M).
- Canales de voz por celda o sector.
- Tráfico transportado [Erlangs/celda].
- Eficiencia espectral del sistema CDMA [Erlangs/MHz·Km²].
- Capacidad del sistema de llamadas por hora/celda.
- Eficiencia espectral en términos de llamadas por hora/Km²].
- Capacidad del sistema de usuarios por hora/celda (por consiguiente, la capacidad de usuarios en toda la red).
- Eficiencia espectral del sistema en términos de usuarios/Km²·MHz.

En base a los resultados obtenidos con el programa que optimiza el cálculo de la eficiencia

RESULTADOS		EFICIENCIA ESPECTRAL TOTAL DEL SISTEMA (Erlangs/MHz·Km²): 7.683	
Esquema de acceso múltiple:	CDMA	Tiempo de duración promedio de una llamada (seg):	140
Zona:	Urbana densa	Número promedio de llamadas por usuario:	0.3857
Altura de la Estación Base (m):	40	Número de llamadas hora/celda:	4390
Altura de la Estación Móvil (m):	1.5	Capacidad del sistema (llamadas hora/Km²):	985.7
Radio de celda (Km):	1.31	Capacidad del sistema (usuarios hora/celda):	1.14e+004
ERP (Watts):	0.154	Eficiencia espectral del sistema (usuarios/Km²·MHz):	512.2
Pérdidas por trayectoria (dB):	143.3		
Eb/No (dB):	6.008		
Probabilidad de error:	1.329e-008		
Área de cobertura total del sistema (Km²):	187		
Forma de la celda:	Hexagonal		
Área de la celda (Km²):	4.462		
Número de celdas:	42		
Ancho de banda total del sistema (MHz):	5		
Número de canales:	3		
Tipo de celda:	Sectorizada 120°		
Tasa de bit de datos	1.44e+004		
Factor de interferencia entre celdas vecinas	0.5		
Factor de precisión de control de potencia:	0.85		
Factor de actividad de voz:	0.45		
Capacidad de usuarios celda/canal de tráfico:	69		
Canales de voz/sector:	69		
Grado de servicio:	0.02		
Tráfico ofrecido por sector (Erlangs/sector):	58.18		
Tráfico transportado por celda (Erlangs/celda):	171		

CANCELAR

Figura 47. Ventana de resultados (opción 2).

espectral del sistema CDMA, se tiene la posibilidad de realizar un análisis completo del caso de estudio que se plantea, ya que variando los datos de entrada (E_b/N_0 , radio de celda, tipo de celda, etc.) es posible generar diferentes escenarios, los cuales permiten observar el comportamiento de la eficiencia espectral del sistema para el caso de estudio. Mediante los resultados desplegados de los diferentes escenarios se pueden realizar gráficas nuevas que hacen posible analizar los cambios en la eficiencia espectral, de tal manera que se puede determinar el diseño de la red que obtenga la eficiencia espectral más satisfactoria de acuerdo a las necesidades del operador de servicio AIF.

Capítulo VI. CASO DE ESTUDIO

VI.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el desarrollo de un caso de estudio de un escenario real donde se aplica la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA empleando el programa realizado. Este estudio se basa en los parámetros de un análisis realizado por la compañía Qualcomm en la ciudad de Chicago [Qualcomm, 1995]. Este estudio presenta resultados de la planeación del enlace y capacidad de la tecnología CDMA IS-95 para PCS, los cuales son comparados en las secciones VI.2 y VI.3 con los resultados obtenidos mediante el programa realizado en esta tesis, incorporando el cálculo de la eficiencia espectral. De esta forma es posible validar el trabajo desarrollado en esta tesis.

En este capítulo también se incorpora una comparación del sistema CDMA IS-95 con el sistema TDMA estándar GSM, basada en el caso de estudio antes mencionado. Esta comparación con el sistema GSM permitirá ayudar a definir cual de las dos tecnologías es la más adecuada desde el punto de vista tanto económico como de capacidad para una región en particular.

El análisis asume una población uniforme y un terreno plano dentro de cada una de las cuatro zonas (urbana densa, urbana, suburbana y rural) que presenta el área de Chicago. El área de cada una de las zonas y su población son mostradas en la tabla X.

Tabla X. Área y población de las zonas.

Zona	Área [Km ²]	Población [miles]
Urbana densa	187	1589
Urbana	775	1873
Suburbana	2956	4296
Rural	14757	614
Total	18675	8363

VI.2 PLANEACIÓN DEL ENLACE

Un factor crítico para determinar la planeación del capital de un sistema celular es la planeación del enlace de la tecnología. La planeación del enlace determina directamente el área máxima de la celda en cada ambiente de propagación para un desarrollo inicial (véase sección IV.4.3). Como se ha mencionado anteriormente, la planeación del enlace es importante para la obtención del E_b/N_0 , ya que este impacta en la capacidad del sistema. Debido a la capacidad disponible de las tecnologías inalámbricas digitales, la mayoría de las aplicaciones celulares, PCS y AIF limitan una cobertura inicial para rangos típicos de tasas de penetración y carga de tráfico.

Qualcomm considera la zona urbana densa como un caso base de estudio para la planeación del enlace, el cual nos proporciona los parámetros que hacen posible la comparación con el programa en la parte donde se realiza la planeación del enlace basándose en la predicción de propagación. Los parámetros y los resultados de esta comparación se muestran en la tabla XI.

Tabla XI. Comparación de resultados obtenidos por Qualcomm y por el programa en la planeación del enlace para una zona urbana densa.

	Qualcomm	Programa
■ Parámetros :		
Frecuencia	1900 MHz	1900 MHz
Altura de antena de Est. Base	40 m	40 m
Altura de antena de Est. Móvil	1.5 m	1.5 m
Radio de celda	1.27 Km	1.27 Km
Tasa de datos	14,400 bps	14,400 bps
ERP	23 dBm (200 mW)	23 dBm (200 mW)
Figura de ruido	5 dB	5 dB
■ Resultados :		
Pérdidas por trayectoria	141.8 dB	142.3 dB
E_b/N_0	7.3 dB	7.9 dB

La tabla XI muestra que las pérdidas por trayectoria obtenidas por el modelo de predicción de propagación Hata utilizado para la planeación del enlace en el programa para el cálculo de la eficiencia espectral no difieren mucho de las pérdidas obtenidas físicamente en el estudio realizado por Qualcomm, la diferencia que existe es de 0.5 dB, esto indica que la predicción de las pérdidas por trayectoria en este escenario tiene un valor cercano al real. Teniendo conocimiento de que las pérdidas predichas difícilmente serán exactamente iguales a las pérdidas reales, las posibles causas de la diferencia en el resultado podrían ser:

1. Variaciones en el contorno del terreno.
2. El modelo Hata ignora efectos de ancho y ángulos de calles, y distancias entre edificios, los cuales ayudan a determinar pérdidas por difracción.
3. La pendiente de pérdida por trayectoria de 40 dB/dec (valor típico) considerada por el ambiente de propagación de la zona urbana densa, podría variar en el ambiente del escenario real.

Por otro lado, la diferencia entre el E_b/N_0 requerido por Qualcomm y el obtenido por el programa es de 0.6 dB, lo cual puede ser debido a la diferencia que existe en las pérdidas por trayectoria, y a consideraciones prácticas (p.e. desvanecimientos) tomadas en cuenta por Qualcomm.

VI.3 EFICIENCIA ESPECTRAL

Para realizar el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA estándar IS-95 en un escenario específico, consideramos nuevamente un escenario analizado por Qualcomm para la zona urbana densa en la ciudad de Chicago en el que obtienen resultados de la capacidad de IS-95, los cuales pueden ser comparados con los resultados obtenidos por el programa de esta tesis en base al cálculo de la eficiencia espectral del sistema para el escenario planteado. Asimismo, se presentan también algunos escenarios alternos, aplicables a la tecnología AIF, con resultados obtenidos por medio del programa, los cuales muestran como puede variar la eficiencia espectral del sistema.

El escenario asume una red configurada con un sistema de 42 celdas hexagonales para cubrir una área de 187 Km^2 . Para evaluar la capacidad se asume una carga de tráfico uniforme en todas las celdas. Los parámetros considerados de manera inicial son:

- Altura de la antena de la EB de 40 m.
- Altura de la antena de la EM de 1.5 m.
- Área de la celda de 4.45 Km^2 , lo que implica un radio de celda de 1.31 Km.

- Ancho de banda total de 10 MHz (5 MHz para cada enlace).
- ERP igual a 170 mW (22.3 dBm).
- Un E_b/N_0 requerido igual a 6.4 dB, con celda sectorizada 120°.
- Carga de tráfico por subscritor de 0.015 Erlangs.

Los resultados del análisis de Qualcomm comparados con los resultados obtenidos por el programa se presentan a continuación en la tabla XII.

Tabla XII. Capacidad de IS-95 en el escenario inicial urbano denso.

	Qualcomm	Programa
Altura de antena de la EB (m)	40	40
Altura de antena de la EM (m)	1.5	1.5
Radio de celda (Km)	1.31	1.31
ERP	170 mW	170 mW
Figura de ruido (dB)	5	5
Tasa de datos (bps)	14,400	14,400
E_b/N_0 (dB)	6.4	6.41
Tasa de error de bit (BER)	nc	3.6×10^{-9}
Tipo de celda	Sect. 120°	Sect. 120°
Ancho de banda total asignado (MHz)	5	5
Área de cobertura total (Km ²)	187	187
Forma de celda	hexagonal	hexagonal
Área de celda (Km ²)	4.45	4.45
Número de celdas	42	42
Factor de interferencia entre celdas vecinas	nc	0.4*
Factor de precisión de control de potencia	nc	0.9*
Factor de actividad de voz	nc	0.45*
Factor mejoramiento de interferencia para celda sectorizada	nc	2.55
Usuarios por celda por canal de tráfico	nc	71
Canales de voz/celda	nc	213
GOS	nc	2 %**
Tráfico transportado por celda (Erlangs/celda)	177	176.6
Eficiencia espectral total del sistema (Erlangs/MHz·Km²)	nc	7.935
Tiempo de duración de una llamada (seg.)	nc	140**
Número de llamadas hora/celda	nc	4542
Capacidad del sistema en (llamadas por hora/Km ²)	nc	1018
Carga de tráfico por usuario (Erlangs)	0.015	0.015
Capacidad (usuarios por hora/celda)	11,800	11,780
Capacidad de usuarios en toda la red	495,600	494,760
Eficiencia espectral del sistema (usuarios/Km ² ·MHz)	nc	529

nc - Valor no conocido.

*Valores ideales.

**Valores típicos.

De la comparación que se realizó en la tabla XII entre los resultados del análisis de Qualcomm y los obtenidos en el programa podemos observar que, el E_b/N_0 empleado por Qualcomm en el escenario real analizado y el obtenido en el programa tienen una mínima diferencia. Por otra parte, el resultado obtenido por el programa en la capacidad de usuarios por hora por celda tiene una diferencia de 20 usuarios respecto al dato que se tiene del estudio de Qualcomm, esta diferencia es debido a la diferencia mínima que existe entre los resultados del tráfico transportado por celda. En base a esta comparación podemos afirmar que los resultados de la estimación que presenta el programa son muy cercanos a los resultados presentados por Qualcomm. Es importante mencionar que la eficiencia espectral del sistema en este escenario es de 7.935 Erlangs de tráfico transportado por cada MHz en cada Km^2 [Erlangs/MHz· Km^2]. También es importante aclarar que para los resultados obtenidos por el programa se consideraron valores ideales en los factores de interferencia entre celdas vecinas, precisión de control de potencia, y actividad de voz, por lo que a continuación se presentan algunos escenarios alternos a este caso inicial (tabla XII) en los cuales se muestran resultados considerando valores prácticos en los factores antes mencionados.

Escenarios alternos

La utilización del programa como una herramienta de apoyo da la posibilidad de variar los parámetros, con lo cual es posible generar escenarios alternos respecto al escenario inicial, esto es con la finalidad de mostrar como varía la eficiencia espectral del

sistema, y de esta manera colaborar para la elección de un diseño óptimo. Para la tecnología CDMA IS-95 es recomendado que el valor de la relación E_b/N_0 se encuentre entre 6 dB y 7 dB, debido a esto es que entre los escenarios alternos que se presentan en la tabla XIII se incluyen escenarios con un E_b/N_0 de estos valores, además se incluye el escenario inicial con E_b/N_0 igual a 6.4 dB pero considerando valores prácticos en los factores de interferencia entre celdas vecinas, precisión de control de potencia, y actividad de voz. Es importante mencionar que el E_b/N_0 de estos escenarios cumple con el margen de calidad del sistema CDMA IS-95 (6 dB).

En la tabla XIII podemos observar cuatro diferentes escenarios generados que podrían ser empleados para la tecnología AIF. Los resultados obtenidos con ayuda del programa muestran en el primer escenario ($E_b/N_0 = 6.41$ dB) que la eficiencia espectral tiene una disminución de 1 Erlang/MHz·Km² con respecto al caso inicial (tabla XII), esto es debido como se mencionó anteriormente, a que en los escenarios planteados en esta tabla son considerados valores prácticos en los factores de interferencia entre celdas vecinas, precisión de control de potencia y actividad de voz, para tener unos resultados más aproximados a los que se tienen en la práctica.

Tabla XIII. Capacidad de IS-95 en escenarios alternos respecto al caso inicial.

	Programa			
Altura de antena de la EB (m)	40	40	40	40
Altura de antena de la EM (m)	1.5	1.5	1.5	1.5
Radio de celda (Km)	1.31	1.31	1.31	1.31
ERP	170 mW	154 mW	154 mW	195 mW
Figura de ruido (dB)	5	5	5	5
Tasa de datos (bps)	14,400	14,400	14,400	14,400
E_b/N_0 (dB)	6.41	6.0	6.0	7.0
Tasa de error de bit (BER)	3.6×10^{-9}	1.3×10^{-8}	1.3×10^{-8}	$< 1 \times 10^{-9}$
Tipo de celda	Sect. 120°	Sect. 120°	Omni.	Sect. 120°
Ancho de banda total asignado (MHz)	5	5	5	5
Área de cobertura total (Km ²)	187	187	187	187
Forma de celda	hexagonal	hexagonal	hexagonal	hexagonal
Área de celda (Km ²)	4.45	4.45	4.45	4.45
Número de celdas	42	42	42	42
Factor de interferencia entre celdas vecinas	0.5*	0.5*	0.5*	0.5*
Factor de precisión de control de potencia	0.85*	0.85*	0.85*	0.85*
Factor de actividad de voz	0.45*	0.45*	0.45*	0.45*
Factor mejoramiento de interferencia para celda sectorizada	2.55	2.55	1	2.55
Usuarios por celda por canal de tráfico	63	68	27	54
Canales de voz/celda	189	207	81	162
GOS	2 %	2 %	2 %	2 %
Tráfico transportado por celda (Erlangs/celda)	154.3	171.04	68.25	129.4
Eficiencia espectral total del sistema (Erlangs/MHz·Km²)	6.931	7.683	3.066	5.811
Tiempo de duración de una llamada (seg.)	140	140	140	140
Número de llamadas hora/celda	3968	4398.3	1755.1	3326
Capacidad del sistema en (llamadas por hora/Km ²)	889.2	985.74	393.4	745.5
Carga de tráfico por usuario (Erlangs)	0.015	0.015	0.015	0.015
Capacidad (usuarios por hora/celda)	10,290	11,403	4550	8624
Capacidad de usuarios en toda la red	432,180	478,926	191,112	362,208
Eficiencia espectral del sistema (usuarios/Km ² ·MHz)	462.1	512	204	387

*Valores típicos.

Es posible notar que el mejor resultado de la eficiencia espectral para el sistema CDMA IS-95 se presenta con un E_b/N_0 igual a 6 dB con celda sectorizada, teniendo un resultado de 7.683 Erlangs de tráfico transportado por celda por cada MHz en cada Km² [Erlangs/MHz·Km²], representando un incremento en la capacidad de usuarios por hora por celda de 1,113 usuarios más respecto al primer escenario con un E_b/N_0 de 6.41 dB, con lo se tiene un incremento 46,746 usuarios en la capacidad de toda la red. Otro aspecto

importante de señalar es que si se comparan los escenarios con celda sectorizada y con celda omnidireccional considerando el mismo E_b/N_0 de 6 dB, podemos observar que con la celda sectorizada se tiene una eficiencia espectral 2.5 veces mayor.

En los siguientes puntos se muestran gráficas realizadas en base a los resultados obtenidos por el programa para el cálculo de la eficiencia espectral tomando en cuenta el escenario urbano denso antes mencionado con un área de cobertura de 187 Km². Estas gráficas muestran el comportamiento de los parámetros que más influyen en la eficiencia espectral del sistema, tales como E_b/N_0 , factor de interferencia entre celdas vecinas, factor de precisión de control de potencia, factor de actividad de voz, radio de la celda y tipo de celda, e indican como varía la eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95. En las gráficas son considerados anchos de banda asignados para el sistema de 5 y 15 MHz, ya que estos son los anchos de banda que los operadores en México pueden emplear para brindar el servicio de AIF (Acceso Inalámbrico Fijo) en la banda de 1900 MHz.

VI.3.1 Capacidad de canales de voz por celda

La capacidad de canales de voz/celda esta directamente relacionada con la capacidad de usuarios por celda por canal de tráfico (M), la cual esta en función de los siguientes parámetros: E_b/N_0 , factor de interferencia entre celdas vecinas (β), factor de precisión de control de potencia (α), factor de actividad de voz (ν), tasa de bit de datos (R_b) y tipo de celda. A continuación se muestra en las figuras 48, 49, 50, y 51 como varía la

capacidad de canales de voz/celda con respecto al E_b/N_0 , α , β , y ν . En estas figuras se están considerando tanto celda sectorizada como omnidireccional, así como una tasa de bit de 14,400 bps, la cual fue establecida en este caso de estudio.

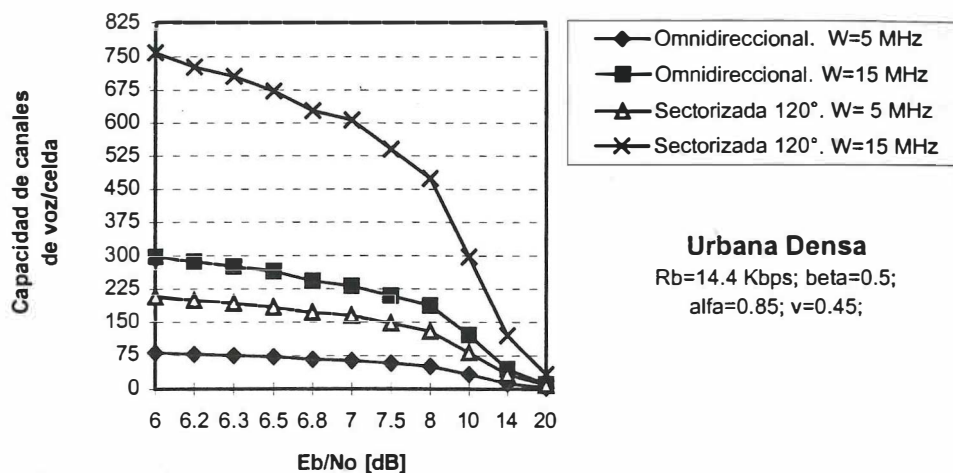


Figura 48. Capacidad de canales de voz/celda en función del E_b/N_0 .

En la figura 48 podemos observar la variación que sufre la capacidad de canales de voz/celda con respecto a la relación de energía de bit a ruido (E_b/N_0), en esta gráfica los parámetros β , α , y ν se fijan en su valor práctico. Los resultados indican que la capacidad de canales de voz/celda se ve incrementada a medida que el E_b/N_0 disminuye, llegando al límite de la capacidad cuando se tiene un $E_b/N_0 = 6$ dB. También esta capacidad es modificada dependiendo del tipo de celda que se emplee, con celda sectorizada 120° y un E_b/N_0 de 6 dB se tienen 759 canales de voz/celda con un ancho de banda de 15 MHz, mientras que con una celda omnidireccional se tienen 297 canales de voz/celda, esto significa que la celda sectorizada proporciona 2.55 veces más de capacidad de canales de

voz/celda. Esta misma proporción se da al tener un ancho de banda total de 5 MHz, ya que con celda sectorizada 120° y un E_b/N_0 de 6 dB se tienen 207 canales de voz/celda, y con celda omnidireccional resultan 81 canales de voz/celda.

Es importante mencionar que para tener una buena capacidad en el sistema es recomendable que el E_b/N_0 se encuentre entre el rango de 6 a 7 dB, la capacidad de canales de voz por celda es 1.25 veces mayor con el E_b/N_0 de 6 dB, sin embargo, cabe recordar que un E_b/N_0 mayor dará una mejor calidad del enlace.

Por otra parte, en la figura 49 se muestra la capacidad de canales de voz/celda en función de el factor de precisión de control de potencia (α). Estos resultados fueron obtenidos considerando el E_b/N_0 de 6 dB el cual brinda la máxima capacidad, y podría aplicarse en un escenario urbano denso para el servicio AIF. El factor de interferencia entre celdas vecinas (β), y el factor de actividad de voz (v) conservan su valor práctico.

En la figura 49 podemos observar que la capacidad de canales de voz por celda se incrementa cuando se tiene una buena precisión en el control de potencia. En el caso ideal donde α es igual a 0.9 la capacidad de canales de voz/celda con celda sectorizada y un ancho de banda de 15 MHz es de 804, mientras que para una celda omnidireccional la capacidad es de 319 canales de voz/celda.

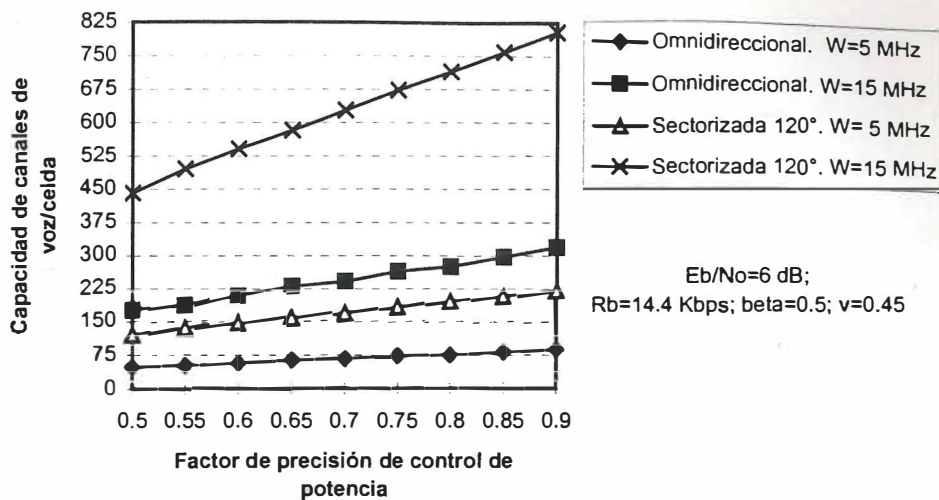


Figura 49. Capacidad de canales de voz/celda en función del factor de precisión de control de potencia.

En la realidad el valor práctico del factor de precisión de control de potencia es de 0.85, con el que se obtiene 759 canales de voz/celda para el caso de celda sectorizada con 15 MHz de ancho de banda, esto representa una disminución de 45 canales de voz/celda. De esta manera se comprueba la importancia que tiene este factor en el funcionamiento del sistema CDMA.

Otro de los factores que influyen en la capacidad de canales de voz/celda es el factor de interferencia entre celdas vecinas (β). En la figura 50 se observa como al incrementar β disminuye la capacidad de canales de voz/celda. En estos resultados se considera nuevamente un E_b/N_0 de 6 dB, así como los valores prácticos de α y v .

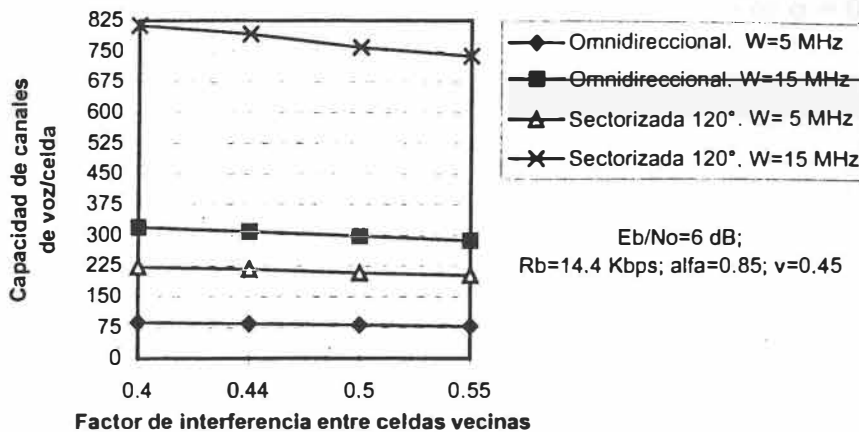


Figura 50. Capacidad de canales de voz/celda en función del factor de interferencia entre celdas vecinas.

En la figura 50 podemos notar como la capacidad de canales de voz/celda es reducida a medida que el factor de interferencia entre celdas vecinas aumenta, esto se ve reflejado tanto en celdas omnidireccionales como en celdas sectorizadas. En el caso de celda sectorizada con un ancho de banda de 15 MHz y con un factor de interferencia entre celdas vecinas (β) de 0.55, el número de canales de voz/celda es de 738, así mismo, para el caso práctico de $\beta = 0.5$ se tiene una capacidad de 759 canales de voz por celda, mientras que para el mejor caso, cuando se tiene la mínima interferencia y β es igual a 0.4, se incrementa la capacidad a 813 canales de voz/celda. Estos resultados demuestran como en los sistemas prácticos ($\beta = 0.5$) se sacrifica número de usuarios por canal de tráfico efectivo (M) para que la interferencia que se genera entre usuarios de celdas vecinas no afecte el desempeño del sistema.

Finalmente, en la figura 51 se muestra como influye el factor de actividad de voz en la capacidad de canales de voz/celda. Los resultados obtenidos en esta figura siguen

considerando un $E_b/N_0 = 6$ dB, así como los valores prácticos tanto de $\alpha = 0.85$ como de $\beta = 0.5$.

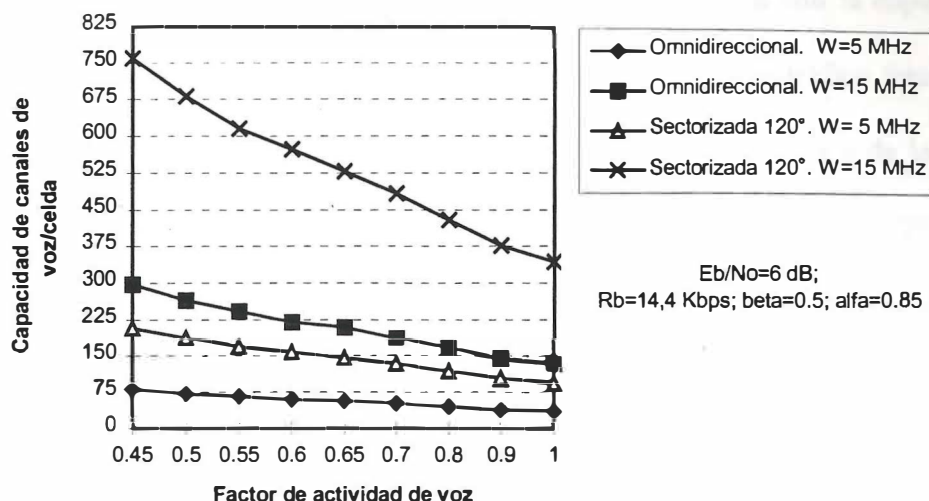


Figura 51. Capacidad de canales de voz/celda en función del factor de actividad de voz.

Se puede observar como al aumentar el factor de actividad de voz la capacidad de canales de voz/celda tiende a disminuir. Si recordamos que estudios experimentales han encontrado que típicamente, en una conversación de voz bidireccional, el ciclo de trabajo de la voz de cada usuario es del 45% ($\nu = 0.45$), la capacidad de canales de voz/celda en este caso, considerando celda sectorizada con un ancho de banda de 15 MHz es de 759. Mientras que para un ancho de banda de 5 MHz se tienen 207 canales de voz/celda. Así mismo, cuando se considera $\nu = 1$ (100%) se tiene un decremento de 2.2 veces en la capacidad de canales de voz/celda, de ahí la importancia de considerar este factor en el cálculo de la capacidad de usuarios por celda por canal de tráfico efectivo (M).

VI.3.2 Capacidad en Erlangs/celda

La capacidad en [Erlangs/celda] esta directamente relacionada con la capacidad de canales de voz/celda analizada en el punto anterior, ya que la carga de tráfico transportado en Erlangs depende del número de canales de voz que se tengan por celda y de la formula de tráfico, en este caso, Erlang B con un GOS (probabilidad de bloqueo) del 2%. En la figura 52 se muestra cuantos Erlangs/celda se pueden tener en función del E_b/N_0 utilizando celda omnidireccional o sectorizada para la zona urbana densa. Los resultados se muestran para anchos de banda de 5 y 15 MHz en un sentido. Para los factores α , β , y ν se consideran su valor práctico, asimismo, la tasa de bit utilizada es la del caso de estudio.

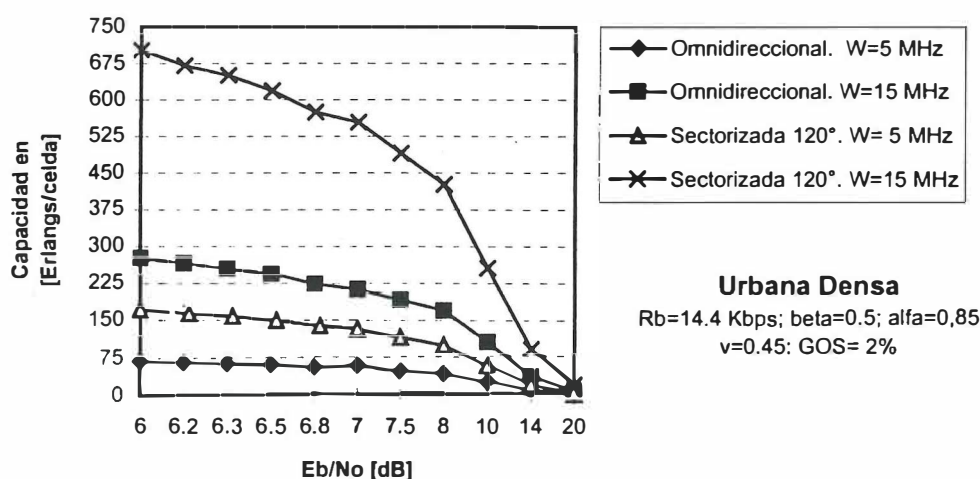


Figura 52. Capacidad en Erlangs/celda en función del E_b/N_0 .

Los resultados de la figura 52 indican que hay una mayor capacidad de Erlangs/celda en celdas sectorizadas. Esto es porque al utilizar este tipo de celda en la red inalámbrica existe

un factor de mejoramiento de interferencia (λ), lo cual permite incrementar el número de usuarios por canal de tráfico efectivo (M), además de que se reusan todos los canales de tráfico por sector. Asimismo, se observa como la capacidad de Erlangs/celda se ve incrementada al reducir el E_b/N_0 , con esto se puede notar que existe un compromiso entre la capacidad y la relación E_b/N_0 , ya que si se desea una alta capacidad de Erlangs/celda en el sistema se deberá de comprometer la calidad de la señal para que sea en este caso de 6 dB. Cabe recordar que para el estándar IS-95 el margen de calidad aceptable de la señal es de 6 dB.

VI.3.3 Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km²] en función del E_b/N_0

Existen varios factores que influyen en la obtención de la eficiencia espectral. Uno de los factores principales que afectan directamente en la eficiencia espectral es el E_b/N_0 , ya que varía dependiendo del escenario establecido, en este caso, urbano denso. En la figura 53 se muestra la eficiencia espectral del sistema IS-95 en función del E_b/N_0 . Cabe recordar que la eficiencia espectral cambia dependiendo de la zona, ya que los parámetros son específicos del diseño de la red para cada lugar. Para este caso se utiliza un radio de celda de 1.31 Km y área de cobertura total de 187 Km². En los resultados obtenidos en la figura 53 se consideran anchos de banda de 5 y 15 MHz con celda omnidireccional y sectorizada.

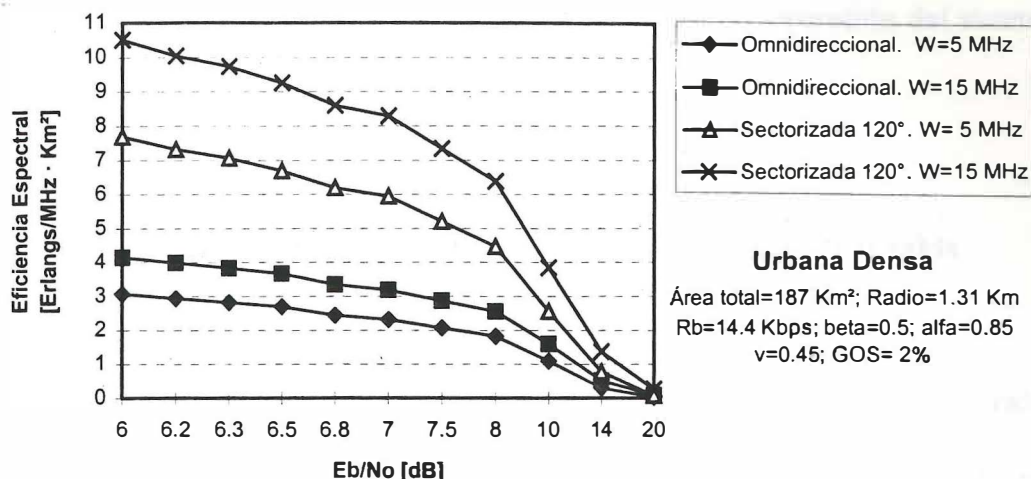


Figura 53. Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km²] en función del E_b/N_0 .

Los resultados de la figura 53 muestran como la eficiencia espectral va incrementando conforme el E_b/N_0 disminuye. El sistema tiene la mejor eficiencia espectral cuando se tiene un E_b/N_0 de 6 dB y tipo de celda sectorizada, para un ancho de banda total de 15 MHz la eficiencia espectral es de 10.512 [Erlangs/MHz·Km²], se tiene una ventaja de 1.4 veces más de eficiencia espectral en comparación con un E_b/N_0 de 7 dB y de 2.5 veces más en comparación con un E_b/N_0 de 6 dB y celda omnidireccional.

Para el caso del ancho de banda de 5 MHz, la eficiencia espectral del sistema es de 7.683 [Erlangs/MHz·Km²] con un E_b/N_0 de 6 dB y celda sectorizada, con una ventaja de 1.2 veces más de eficiencia espectral con respecto a un E_b/N_0 de 7 dB. De acuerdo a los resultados se puede observar que existe un compromiso entre la eficiencia espectral del sistema y el E_b/N_0 , ya que para incrementar la eficiencia espectral se compromete el nivel

de calidad de la señal, porque se tiene una tendencia al margen de operación del sistema ($E_b/N_0 = 6$ dB).

VI.3.4 Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km²] en función del radio de la celda

Otro factor que afecta directamente la eficiencia espectral de un sistema es el radio de la celda, es muy importante al igual que el E_b/N_0 , ya que con el radio de celda se obtiene el área de la celda y por lo tanto el número de celdas en el sistema. La figura 54 muestra el comportamiento de la eficiencia espectral con respecto al radio de celda, tomando en cuenta el $E_b/N_0 = 6$ dB que brinda la capacidad máxima, y es el margen de calidad de la señal aceptable para IS-95, así como, anchos de banda de 5 y 15 MHz tanto para celda omnidireccional y sectorizada.

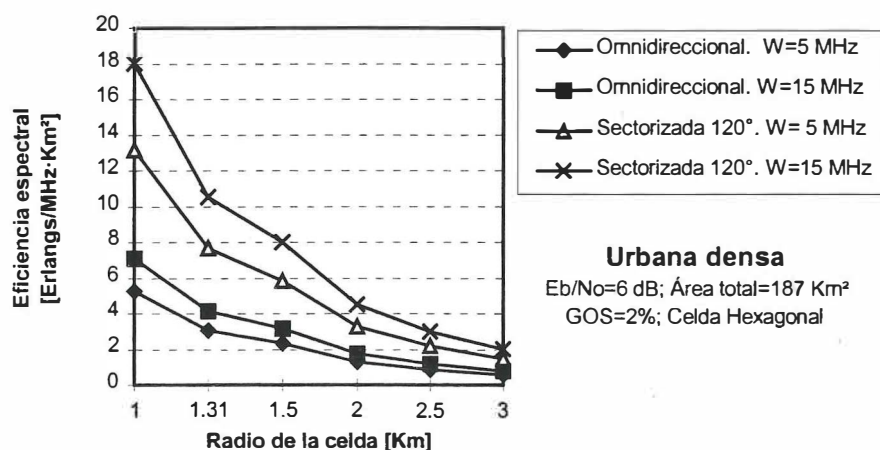


Figura 54. Eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km²] en función del radio de la celda.

Debido a la clasificación de radios de celdas que existen para sistemas celulares y que toman en cuenta el tipo de zona de operación, el radio de celda de una zona urbana densa se encuentra entre 1 y 3 Km, estos radios han sido adoptados en esta tesis. En la figura 54 se observa como a medida que el radio va aumentando la eficiencia espectral tiende a disminuir. Con un radio de 1 Km, donde, el área de celda es de 2.6 Km^2 (área de celda más pequeña) la eficiencia espectral es de $18.021 \text{ [Erlangs/MHz}\cdot\text{Km}^2]$ con celda sectorizada y ancho de banda de 15 MHz, mientras que para el ancho de banda de 5 MHz la eficiencia espectral es de $13.171 \text{ [Erlangs/MHz}\cdot\text{Km}^2]$, estos resultados representan 1.7 veces más de eficiencia espectral con respecto a un radio de 1.31 Km (área de celda de 4.46 Km^2), y de 9 veces más eficiencia espectral con respecto a un radio de 3 Km. Esto quiere decir que con un radio de celda de 1 Km, se tiene mayor capacidad de carga de tráfico en Erlangs por cada MHz de espectro asignado en cada Km^2 de la red. Esto se debe a que la carga de tráfico en Erlangs por MHz es repartida en menos área por celda.

VI.3.5 Eficiencia espectral [llamadas·hora/ Km^2]

Otra manera de definir la eficiencia espectral del sistema es el máximo número de llamadas por hora que pueden ser atendidas por Km^2 [llamadas·hora/ Km^2], este resultado esta en función del número de llamadas por hora por celda y del área de la celda. El número de llamadas por celda esta a su vez en función del tiempo de duración promedio de llamada, que típicamente varía de 120 seg a 180 seg de acuerdo al tipo de subscriptor, siendo el valor más común el de 140 seg. Entonces, antes de presentar la eficiencia

espectral en llamadas por hora/ Km^2 primero se mostrará en la figura 55 como la capacidad de llamadas-hora/celda varía en función del tiempo promedio de duración de llamada. Los resultados obtenidos en la figura 55 se realizan con un E_b/N_0 de 6 dB tanto para celda sectorizada como omnidireccional, con anchos de banda de 5 y 15 MHz, así como un $E_b/N_0 = 7$ dB para celda sectorizada.

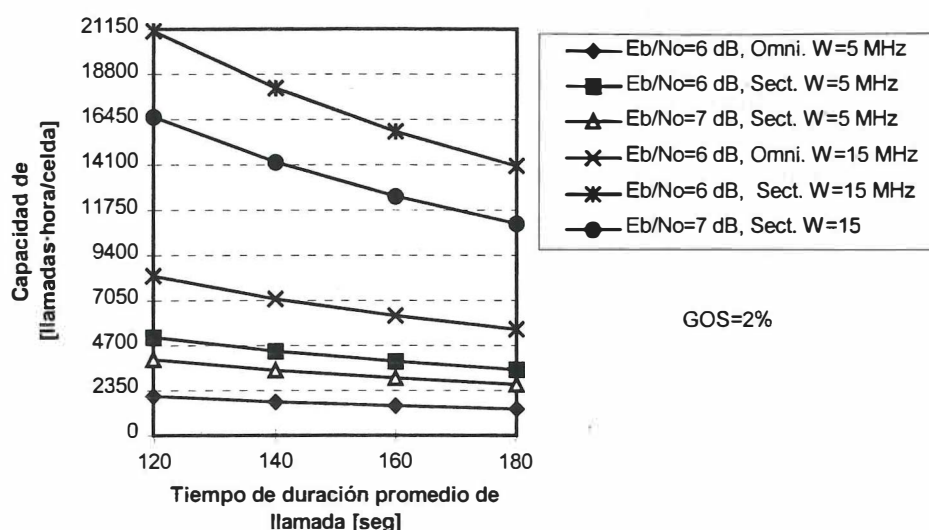


Figura 55. Capacidad de llamadas-hora/celda en función del tiempo de duración promedio de llamada.

Los resultados de la figura 55 indican que a medida que incrementa el tiempo de duración promedio de llamada [seg] la capacidad de [llamadas-hora/celda] decrementa. Para el caso típico del tiempo de duración promedio de llamada de 140 seg, con un ancho de banda de 15 MHz y un $E_b/N_0 = 6$ dB con celda sectorizada se tiene una capacidad de 18,053 [llamadas-hora/celda], mientras que para el caso de un $E_b/N_0 = 7$ dB se tiene 1.2 veces menos de capacidad de [llamadas hora/celda]. Lo mismo ocurre para el caso en que

el ancho de banda total es de 5 MHz. Esto resulta por la diferencia de capacidad de Erlangs/celda que existe al tener un E_b/N_0 u otro.

Por otra parte, la figura 56 presenta la eficiencia espectral en [llamadas·hora/Km²], considerando un tiempo de duración promedio de llamada de 140 seg y un E_b/N_0 de 6 dB. Los resultados obtenidos indican de nuevo que a menor área de celda (menor radio de celda) mayor es la eficiencia espectral, es decir, la capacidad de llamadas que pueden ser atendidas por Km² es mayor. Para el caso de 1.31 Km de radio de celda y celda sectorizada con un ancho de banda de 5 MHz (escenario inicial planteado), se tiene una eficiencia espectral de 985.74 [llamadas·hora/Km²], mientras que para una celda sectorizada de 1 Km de radio se tiene un aumento de 1.7 veces en la eficiencia espectral del sistema.

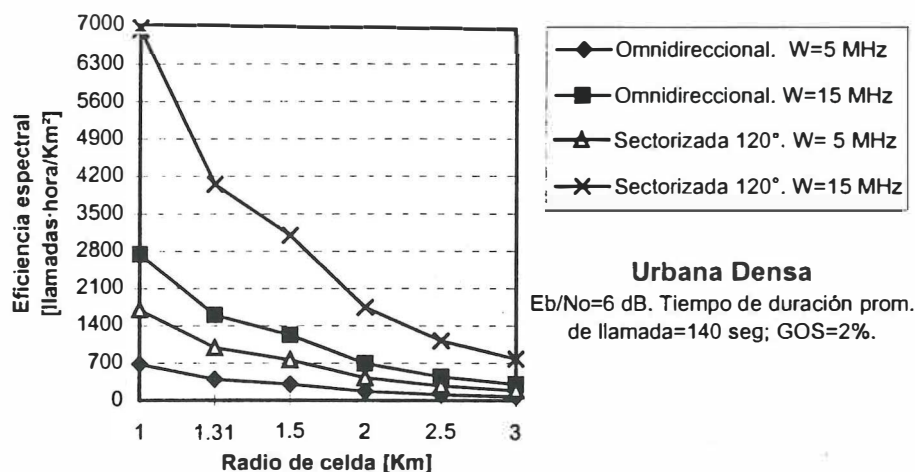


Figura 56. Eficiencia espectral [llamadas·hora/Km²] en función del radio de celda.

VI.3.6 Eficiencia espectral [usuarios/Km²·MHz]

La eficiencia espectral en términos de usuarios/Km²·MHz es una manera más sencilla de poder entender e interpretar la eficiencia espectral del sistema. Esta definición de eficiencia espectral se encuentra en función del número de usuarios·hora/celda que a su vez se encuentra en función del número de llamadas·hora/celda y de la carga de tráfico generada por usuario (número promedio de llamadas por usuario en la hora de mayor ocupación), por lo que primero se presenta en la figura 57, la capacidad de usuarios·hora/celda, con un E_b/N_0 de 6 dB tanto para celda sectorizada como para omnidireccional y anchos de banda de 5 y 15 MHz, asimismo, también se considera un $E_b/N_0 = 7$ dB solo para el caso de celda sectorizada. Se considera una carga de tráfico generada por usuario de 0.015 Erlangs y un tiempo de duración promedio de llamada de 140 seg.

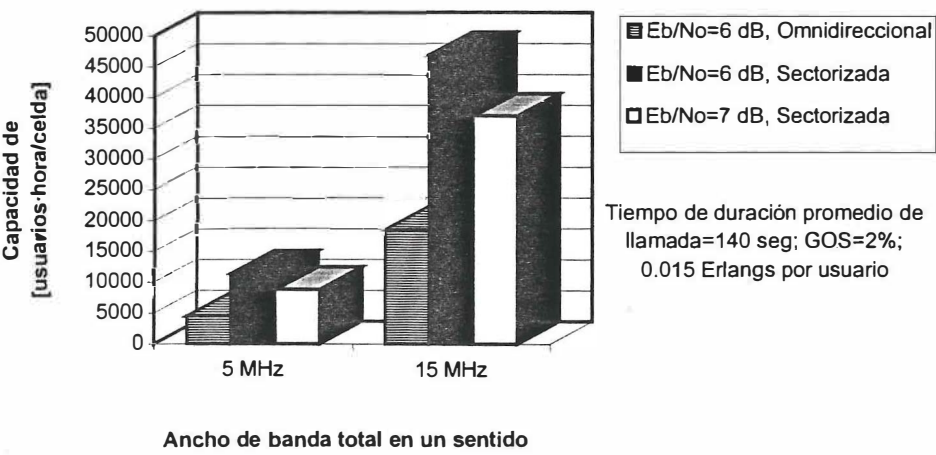


Figura 57. Capacidad de [usuarios·hora/celda].

En la figura 57 se observa que con celdas sectorizadas con un E_b/N_0 de 6 dB se obtiene la máxima capacidad del sistema. Para el caso de una celda sectorizada con un ancho de banda de 15 MHz se tienen 46,805 [usuarios·hora/celda], asimismo, con un $E_b/N_0 = 7$ dB se tiene 36,868 [usuarios·hora/celda]. De igual manera para un ancho de banda de 5 MHz y un $E_b/N_0 = 6$ dB se tiene 11,403 [usuarios·hora /celda].

Por otra parte, en la figura 58, se analiza la eficiencia espectral [usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$] en función del radio de celda. Se puede observar como a medida que varía el radio de celda, incrementa o disminuye la capacidad de usuarios que pueden ser atendidos por cada Km^2 de la red por cada MHz del espectro asignado. Esta capacidad de usuarios es muy importante para el diseño de la red AIF ya que es indispensable saber cual es la capacidad máxima del sistema.

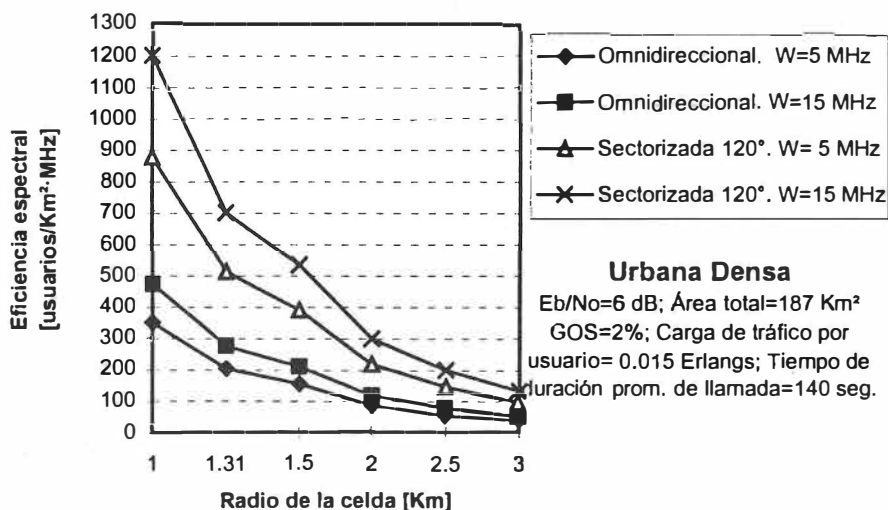


Figura 58. Eficiencia espectral [usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$] en función del radio de celda.

Se puede observar en la figura 58 como la eficiencia espectral del sistema aumenta a medida que el radio de la celda disminuye. Para una celda sectorizada con un radio de celda de 1 Km y un ancho de banda de 15 MHz se tiene una capacidad de 1,201 usuarios por cada Km^2 por cada MHz, con lo que se tiene una ventaja de 500 usuarios por Km^2 por cada MHz respecto a el radio de celda de 1.31 Km. La eficiencia espectral al utilizar celda sectorizada con radio de 1 Km es 2.5 veces mayor con respecto al tipo de celda omnidireccional. Para el caso en que el ancho de banda es de 5 MHz la eficiencia espectral del sistema con radio de celda de 1 Km y tipo de celda sectorizada es de 878 [usuarios/ $\text{Km}^2 \cdot \text{MHz}$], la cual tiene una ventaja de 362 usuarios por cada Km^2 por MHz con respecto a el caso de utilizar un radio de celda de 1.31 Km, es decir, se tiene 1.7 veces más de eficiencia espectral.

VI.3.7 Capacidad de usuarios en toda la red inalámbrica

Por otra parte, en la figura 59 se presenta la capacidad de usuarios en toda la red que puede ser ofrecida por el sistema IS-95 bajo las condiciones del escenario inicial planteado que se ha estado analizando, el cual considera un área total de cobertura de 187 Km^2 , 42 celdas hexagonales con un área de 4.46 Km^2 (radio de celda = 1.31 Km), carga de tráfico por usuario de 0.015 Erlangs y tiempo de duración de llamada de 140 seg. En esta figura se presentan los resultados considerando un E_b/N_0 de 6 y 7 dB con tipo de celda sectorizada, y E_b/N_0 de 6 dB con tipo de celda omnidireccional.

La mejor capacidad de usuarios en toda la red se da al mantener un nivel de 6 dB en la relación E_b/N_0 , por tanto este diseño es el más óptimo que se podría aplicar en el escenario urbano denso planteado.

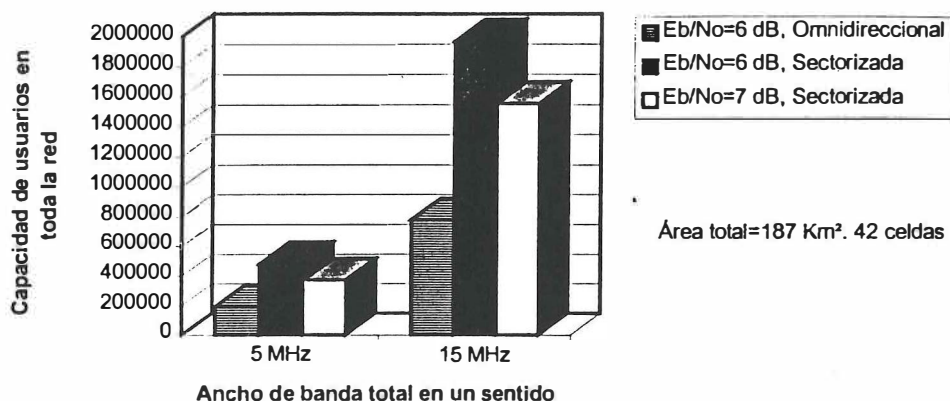


Figura 59. Capacidad de usuarios en toda la red.

En base a los resultados obtenidos en las gráficas anteriores y a los que se muestran en la figura 59, se puede concluir que la eficiencia espectral máxima que se obtiene en un sistema CDMA IS-95 es cuando se emplea una relación de E_b/N_0 de 6 dB y un tipo de celda sectorizada 120°. Asimismo, es importante mencionar que en los sistemas móviles prácticos comúnmente mantienen un requerimiento de E_b/N_0 un poco mayor al margen de calidad indicado por la tecnología, en este caso un E_b/N_0 mayor a 6 dB, para asegurar una buena calidad de la señal (un BER aceptable), mientras que para el caso de un sistema fijo a fijo como la tecnología AIF (Acceso Inalámbrico Fijo), el requerimiento del diseño de la relación E_b/N_0 es menor dado que los desvanecimientos de la señal son mucho menores, además que mediante el uso de antenas direccionales en la unidad del subscritor, existe

mayor rechazo a la interferencia, por lo cual es posible afirmar que un sistema diseñado con un E_b/N_0 de 6 dB es una opción que puede ser empleada por un operador AIF, ya que se tiene un uso más eficiente del espectro y se obtiene una mayor capacidad en el sistema.

IV.3.8 Propuesta de diseño de la red para el escenario de estudio

En las secciones anteriores se realizó un análisis de la eficiencia espectral del sistema CDMA IS-95, considerando los parámetros (área de celda, número de celdas, altura de antenas, etc.) del escenario inicial utilizado por Qualcomm en su estudio para la zona urbana densa de la ciudad de Chicago, la cual tiene un área de 187 Km². En los resultados del análisis se pudo observar que la eficiencia espectral máxima del sistema (capacidad) se obtiene cuando se emplea una celda sectorizada 120° y un E_b/N_0 igual a 6 dB. Por otra parte, como complemento al caso de estudio analizado en este capítulo y con la finalidad de mostrar la aplicación de los resultados obtenidos por medio del programa, en esta sección se presenta una propuesta para un diseño inicial de la red inalámbrica para la zona urbana densa de la ciudad de Chicago, la cual como se mencionó anteriormente tiene un área de cobertura total de 187 Km² y una población de 1,589,000 habitantes (ver tabla X).

El diseño propuesto es realizado desde un punto de vista económico (menor costo), es decir, tratando de emplear el menor número de celdas para brindar cobertura a la zona, por lo cual se utiliza un E_b/N_0 de 6 dB con una celda sectorizada 120°, el cual brinda la mayor capacidad por celda y es factible su empleo en el escenario urbano denso. Para el diseño de la red es necesario conocer la cantidad de subscriptores posibles por Km², esta

cantidad se obtiene considerando una cierta tasa de penetración del servicio en la población. En el análisis realizado por Qualcomm en la ciudad de Chicago [Qualcomm, 1995] se estima que un operador (cabe recordar que en una región existe más de un operador del servicio) alcanzará una tasa de penetración del 7 % del total de subscriptores en los primeros diez años. Si se considera esta tasa de penetración para un desarrollo inicial se tendría una cantidad de 111,230 subscriptores, considerando que los subscriptores están distribuidos de una manera uniforme sobre la zona de 187 Km^2 , se tendrían 595 subscriptores/ Km^2 .

En la tabla XIV se muestran los parámetros del diseño propuestos en la red inalámbrica para atender una demanda de 595 subscriptores/ Km^2 en la hora de mayor ocupación, con el menor número de estaciones base. Este diseño esta realizado en base a los resultados obtenidos del programa desarrollado en esta tesis.

Tabla XIV. Diseño de la red para atender una demanda de 595 subscriptores/ Km^2 .

Zona urbana densa con área de cobertura total	187 Km^2
Ancho de banda total asignado	5 MHz
Altura de la antena de la EB	40 m
Altura de la antena de la EM	1.5 m.
ERP	2.8 W
Área de celda	19.1 Km^2 (radio de celda = 2.71 Km).
E_b/N_0	6 dB.
Número de celdas	10
GOS	2 %
Tiempo de duración promedio de llamada	140 seg
Carga de tráfico por subscritor	0.015 Erlangs
Capacidad de usuarios por hora/celda	11,403
Capacidad de usuarios/Km^2	597
Capacidad de usuarios en toda la red	111,639
Eficiencia espectral total del sistema (Erlangs/MHz· Km^2)	1.829

VI.4 COMPARACIÓN DE CDMA IS-95 CON TDMA GSM

Uno de los objetivos de este trabajo es realizar una comparación entre los sistemas CDMA estándar IS-95 y TDMA estándar GSM, que permita ayudar a definir la tecnología más adecuada desde un punto de vista económico y de capacidad para una región particular. Para un operador del servicio es de vital importancia obtener la máxima eficiencia espectral del sistema (capacidad) al menor costo posible, y esto depende principalmente de la elección del esquema de acceso múltiple, de ahí la importancia de presentar esta comparación.

La comparación entre los sistemas esta basada en el escenario urbano denso tomado del análisis realizado por Qualcomm, en donde se tienen los siguientes parámetros:

- Zona urbana densa.
- Área de cobertura total de 187 Km^2 .
- Área de celda de 4.46 Km^2 (radio de celda de 1.31 Km).
- 42 celdas hexagonales.
- Ancho de banda total asignado de 5 MHz y 15 MHz (se considera un sentido).
- GOS del 2 %.
- Carga de tráfico por subscritor de 0.015 Erlangs.
- Tiempo de duración promedio de llamada igual a 140 seg.

- En el caso de CDMA IS-95 se considera el nivel de E_b/N_0 igual a 6 dB, con el que se obtiene la mayor capacidad, y en el caso de GSM se considera el factor de reuso N igual a 3 dado que brinda la mayor capacidad.

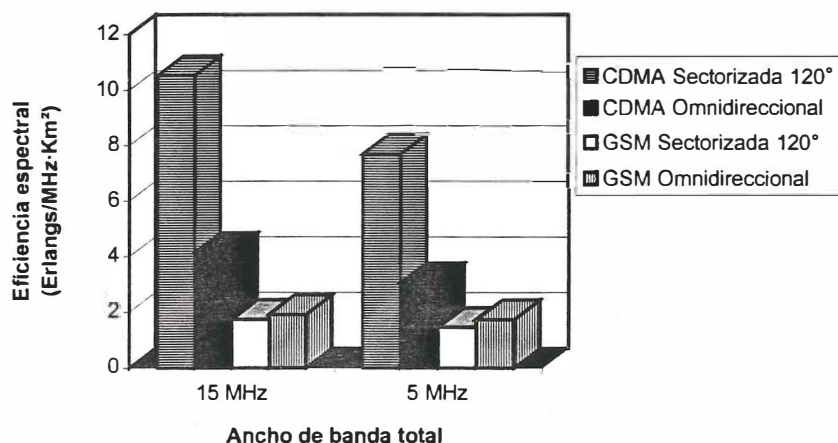
Los resultados que se presentan de CDMA IS-95 son los obtenidos por el programa para el cálculo de la eficiencia espectral, y que ya han sido mencionados en las secciones anteriores, y los resultados que se presentan del sistema GSM tomados del trabajo de tesis desarrollado por [Melgarejo, 1998].

VI.4.1 Eficiencia espectral

Como se mencionó en la sección IV.2 la eficiencia espectral esta definida como una medida para comparar los diferentes estándares celulares. En la tabla XV se presenta una comparación de la capacidad de CDMA IS-95 y de GSM, mientras que en la figura 60 se puede observar los resultados de la eficiencia espectral Erlangs/MHz·Km² de ambos sistemas.

Tabla XV. Capacidad por celda de CDMA IS-95 y GSM.

Parámetros	Espectro asignado 5 MHz				Espectro asignado 15 MHz			
	CDMA	CDMA	GSM	GSM	CDMA	CDMA	GSM	GSM
Ancho de banda de canal [KHz]	1250	1250	200	200	1250	1250	200	200
Número de canales o portadoras	3	3	25	25	11	11	75	75
Factor de reuso de frecuencia*	1	1	3	3	1	1	3	3
Tipo de celda	Omni.	Sect.	Omni.	Sect.	Omni.	Sect.	Omni.	Sect.
Subscriptores/portadora	27	23 (sector)	8 (trama)	8 (trama)	27	23 (sector)	8 (trama)	8 (trama)
Canales de voz/sector	-	69	-	23	-	253	-	67
Canales de voz/celda	81	-	67	-	297	-	200	-
Erlangs/sector	-	58.18	-	15.77	-	238.8	-	56.28
Erlangs/celda	68.26	171	55.15	46.35	277	702.1	182.5	165.5
Usuarios por hora/celda	4,550	11,403	3,677	3,090	18,470	46,800	12,170	11,030

Figura 60. Comparación de eficiencia espectral [Erlangs/MHz·Km²] entre CDMA IS-95 y GSM.

En base a los resultados que se presentan en la figura 60, se puede observar que el sistema CDMA IS-95 tiene una mayor eficiencia espectral que el sistema GSM. Es posible notar que en el caso de CDMA se tiene una mayor eficiencia espectral al emplear celdas sectorizadas en lugar de celdas del tipo omnidireccional (esto es debido al mayor reuso de

frecuencias), mientras que en el caso de TDMA sucede lo contrario, en este aspecto el sistema CDMA tiene ventaja, ya que comúnmente se emplea más el patrón de celda sectorizada por las ventajas en cuanto a reducción de interferencia.

En el caso en que el ancho de banda total asignado es de 15 MHz, el sistema CDMA IS-95 obtiene una eficiencia espectral de 10.51 Erlangs/MHz·Km² considerando el uso de celdas sectorizadas, lo que representa una eficiencia espectral 5.5 veces mayor a la que obtiene el sistema GSM considerando el uso de celda omnidireccional ($N = 3$) y 6 veces mayor si se emplea celda sectorizada ($N = 3 \times 3$). Por otra parte, cuando el ancho de banda total asignado es de 5 MHz, la tecnología CDMA IS-95 haciendo uso de celdas sectorizadas obtiene una eficiencia espectral 4.4 veces mayor a la que obtiene la tecnología GSM considerando el uso de celda omnidireccional, y 5.4 veces mayor si en el sistema GSM se emplea celda sectorizada.

Es importante hacer notar que esta mayor eficiencia espectral es debido a que el sistema CDMA IS-95 reusa todas las frecuencias (todo el espectro de frecuencias asignado) en todas la celdas (factor de reuso igual a 1), mientras que en el caso de TDMA se tiene que dividir el espectro de frecuencias en un grupo de celdas (factor de reuso mayor o igual a 3).

VI.4.2 Capacidad de usuarios en toda la red inalámbrica

Ya que se ha comparado en el punto anterior la eficiencia espectral entre los sistemas CDMA IS-95y, GSM en la figura 61 se puede observar como afecta la diferencia de la eficiencia espectral entre ambos sistemas en la capacidad de usuarios total de la red celular. Cabe recordar que estos resultados son considerando el escenario de estudio con 42 celdas, y la capacidad de usuarios por hora/celda de cada tecnología mostrada en la tabla XV.

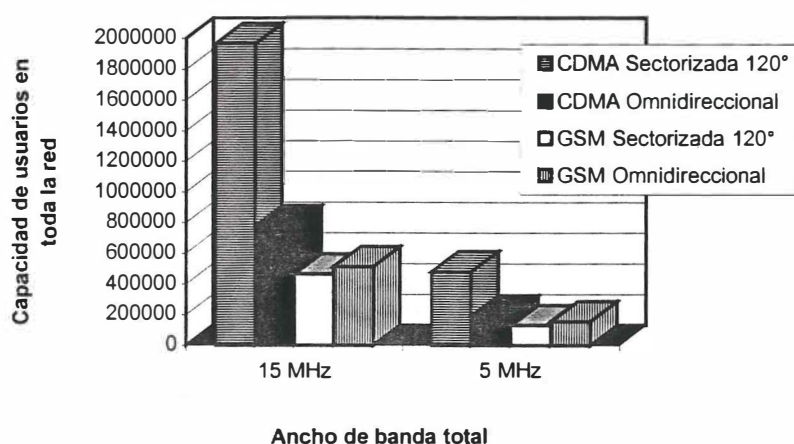


Figura 61. Comparación de la capacidad de usuarios en la red entre CDMA IS-95 y GSM.

Los resultados que se presentan en la figura 61 muestran que el sistema CDMA IS-95 tiene una capacidad de usuarios en toda la red 3.8 veces mayor que el sistema TDMA GSM, esto es considerando el espectro asignado de 15 MHz, y la utilización de celdas sectorizadas en CDMA y celdas omnidireccionales para GSM. Si se compara con el

resultado obtenido con el uso de celdas sectorizadas en el sistema GSM, la ventaja que tiene el sistema CDMA IS-95 es de 4.25 veces.

Por otra parte, considerando un espectro asignado de 5 MHz, la capacidad de usuarios en toda la red del sistema CDMA IS-95 es 3.1 veces mayor respecto al sistema GSM cuando este emplea celdas omnidireccionales y 3.65 veces mayor cuando en el sistema GSM se utilizan celdas sectorizadas.

VI.4.3 Número de estaciones base requeridas para una demanda de tráfico

El aspecto de los costos de las tecnologías es un factor muy importante para el operador del servicio. Muchos factores pueden ser considerados cuando se determina el costo de la implementación de un sistema inalámbrico, sin embargo, los costos iniciales se ven influidos principalmente por el número de estaciones base que se requieren para dar cobertura a una cierta área. Actualmente, el costo de los componentes del sistema CDMA es mayor al costo de los componentes del sistema GSM. Sin embargo, como se describió en la sección anterior, el sistema CDMA IS-95 tiene una capacidad mayor, y puede requerir menor número de estaciones base que el sistema GSM para satisfacer una demanda de tráfico dando cobertura a una determinada área, lo cual puede representar un costo acumulado menor. Es por esto que en la figura 62 se presenta una comparación del número aproximado de estaciones base que requieren ambas tecnologías para brindar servicio a un cierto número de canales de voz activos por Km^2 (el núm. de canales depende de la carga de tráfico que se vaya demandando), considerando un área de cobertura de 1000 Km^2 . Los

parámetros considerados en la obtención de la capacidad de canales de voz por celda de cada tecnología son los que se han mencionado anteriormente y se resumen en la tabla XVI. Los resultados que se muestran en figura 62 (a) y (b) consideran anchos de banda total asignados de 5 MHz y 15 MHz respectivamente.

Tabla XVI. Capacidad de canales de voz/celda de CDMA IS-95 y GSM.

Parámetros	CDMA IS-95		GSM	
Ancho de banda asignado	5 MHZ	15 MHz	5 MHz	15 MHz
Factor de reuso de frecuencia	1 ($E_b/N_0 = 6 \text{ dB}$)	1 ($E_b/N_0 = 6 \text{ dB}$)	3	3
Tipo de celda	Sectorizada	Sectorizada	Omnidireccional	Omnidireccional
Canales de voz/celda	207	759	67	200

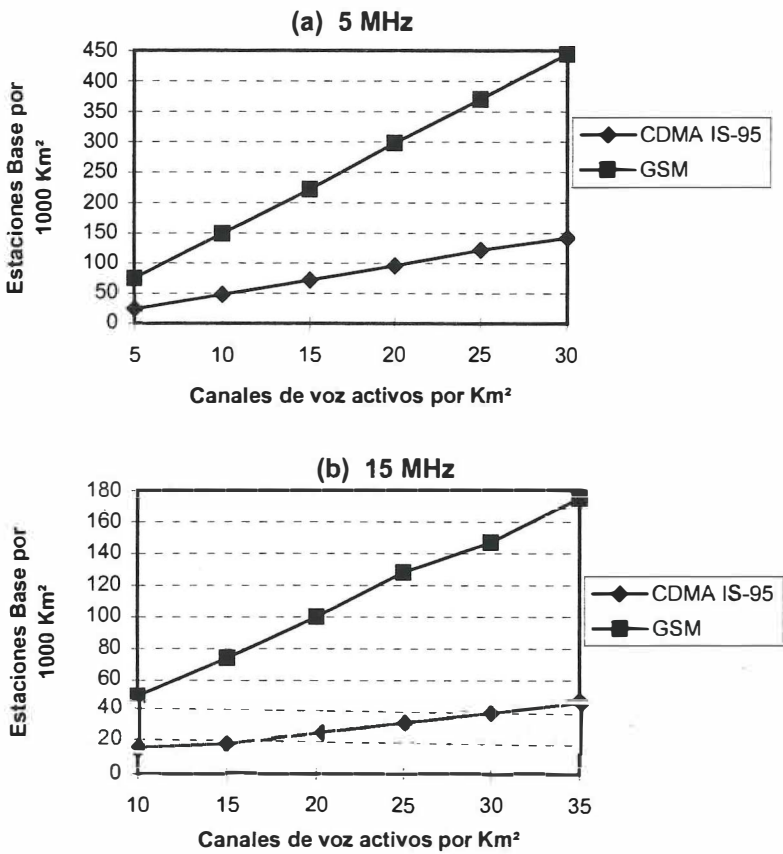


Figura 62. Comparación del número de Estaciones Base requeridas por GSM y CDMA IS-95 en un área de 1000 Km². (a) Ancho de banda asignado de 5 MHz, y (b) ancho de banda asignado de 15 MHz.

De los resultados que se muestran en la figura 62 se puede observar que el sistema GSM requiere un mayor número de estaciones base que el sistema CDMA IS-95 para satisfacer una misma demanda de carga en el sistema. Por ejemplo, si se considera una carga inicial en el sistema de 5 canales de voz activos por Km^2 y se tiene un ancho de banda asignado de 5 MHz, el sistema GSM requiere 75 estaciones base para cubrir el área de 1000 Km^2 , mientras que CDMA requiere 24 estaciones base, esto es un 68 % menos en el número de estaciones base. Con un ancho de banda asignado de 15 MHz y una carga inicial en el sistema de 10 canales de voz activos por Km^2 , el sistema GSM requiere 50 estaciones base para cubrir el área de 1000 Km^2 , y el sistema CDMA requiere 15 celdas, esto representa una cantidad 70 % menor de estaciones base.

Asimismo, cuando la carga de tráfico se incrementa, el número de estaciones base requeridas se incrementa en mayor proporción en el sistema GSM en comparación con el sistema CDMA IS-95.

Por otra parte, los resultados que se han presentado en la comparación de las tecnologías GSM (TDMA) y CDMA IS-95, han mostrado que el sistema CDMA tiene una mayor capacidad y que puede tener un menor costo, lo cual es muy importante para el operador del servicio. Sin embargo, no todos los operadores del servicio necesitarán maximizar la capacidad del sistema, ya que particularmente en zonas rurales y suburbanas, la carga de tráfico es mucho menor a las zonas urbanas, y se emplean celdas con una cobertura mayor (manteniendo el requerimiento de E_b/N_0), por tanto el número de

estaciones base para cubrir un área se ve reducida, lo cual puede ser una ventaja para la tecnología GSM.

El sistema CDMA IS-95 actualmente es empleado en E.U.A. y en otros países de América y Asia principalmente, y se espera en los próximos años que, por sus ventajas en capacidad, tenga una mayor penetración en el mercado y pueda ser la tecnología de mayor utilización.

Capítulo VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se cumplió con el objetivo principal de realizar el estudio de la eficiencia espectral del sistema CDMA, estándar IS-95, para la tecnología de Acceso Inalámbrico Fijo (AIF) en México.

El desarrollo de esta tesis implicó el estudio de la tecnología AIF, la cual se presenta como una opción para dar solución a las personas que hoy en día carecen del servicio telefónico básico en muchos países, incluyendo a México. Esta tecnología también hace posible la competencia en el acceso local con nuevos operadores del servicio. Se estudió el ambiente de propagación de radio de esta tecnología, analizando las diferencias con el sistema móvil, verificando que es posible considerar para un sistema AIF un canal AWGN con los efectos de desvanecimiento representados por pérdidas por trayectoria, con lo que el desempeño de tasa de error de bit (BER) de este sistema es muy satisfactorio. Este mejoramiento en la calidad de la señal permite que el diseño de la relación E_b/N_0 bajo la escenario fijo a fijo sea menor que en el caso móvil. Asimismo, se analizó la relación de esta tecnología al entorno regulatorio de México, analizando las bandas de frecuencias aplicables para esta tecnología, siendo en la banda de 1900 MHz donde el estándar IS-95 es una opción para los operadores de servicio AIF.

Se estudio el sistema IS-95 y su esquema de acceso CDMA. También se analizó la definición de eficiencia espectral que se aplica a los sistemas celulares, la cual esta expresada en términos de Erlangs/MHz·Km², así como el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA, con lo cual fue posible identificar los factores necesarios que permiten analizar la eficiencia espectral del sistema en una región en particular. En base a lo anterior se desarrolló una metodología detallada y explícita para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA considerando el estándar IS-95, aplicada a la tecnología AIF, en la cual se involucra el proceso de la planeación del enlace basándose en el modelo de predicción de pérdidas por trayectoria Hata para la obtención del E_b/N_0 , lo que es de gran importancia ya que se asegura que el enlace cumpla tanto con el margen de calidad del sistema igual a 6 dB, como con un desempeño de tasa de error de bit (BER) satisfactorio, el cual esta en función de las técnicas de modulación QPSK y de codificación de canal FEC con una tasa 1/3. La obtención del E_b/N_0 es importante ya que además de permitir analizar la eficiencia espectral para cada zona, es el principal factor que determina la capacidad de usuarios por portadora.

A partir de la metodología se desarrolló un programa de computadora, el cual puede ser utilizado como una herramienta de apoyo que hace posible el análisis de la eficiencia espectral del sistema CDMA estándar IS-95 según el escenario planteado de una manera práctica, sistemática, y rápida, en donde, además es posible generar escenarios alternos variando los diferentes factores involucrados (variables de entrada), permitiendo realizar una toma de decisiones adecuada en el diseño de la red para un caso particular. Haciendo

uso del programa fué posible analizar la eficiencia espectral del sistema CDMA en base a un caso de estudio de un escenario real urbano denso, tomado de un análisis realizado por Qualcomm en la ciudad de Chicago, el cual representó la forma de validar la metodología planteada y comprobar el funcionamiento del programa desarrollado. Los resultados obtenidos en el capítulo 6, muestran que con un tipo de celda sectorizada 120° y un ancho de banda de 5 MHz se da la mejor eficiencia espectral del sistema, obteniéndose una eficiencia para el escenario planteado de $7.683 \text{ Erlangs/MHz}\cdot\text{Km}^2$, la cual es 2.5 veces mayor a la obtenida con el patrón omnidireccional. También cabe mencionar que la eficiencia espectral del sistema puede ser incrementada a medida que se disminuye el radio de la celda. Asimismo, los resultados indican que el sistema CDMA aplicado a la tecnología AIF, presenta mayor capacidad que en el caso móvil, debido a que como se mencionó anteriormente, el requerimiento del E_b/N_0 es menor en el sistema fijo, dado que este sistema presenta un buen desempeño aún estando en el margen de calidad ($E_b/N_0 = 6 \text{ dB}$).

La comparación entre el sistema CDMA IS-95 y el sistema GSM, realizada desde un punto de vista económico y de capacidad, lo cual es de gran importancia para el operador del servicio, mostró que el sistema CDMA IS-95 tiene una eficiencia espectral 5.5 veces mayor respecto al sistema GSM considerando un ancho de banda asignado de 15 MHz, y 4.4 veces mayor considerando un ancho de banda de 5 MHz. Esta eficiencia es mayor debido a que el sistema CDMA utiliza las mismas frecuencias en celdas adyacentes, aceptando la interferencia que esto produce, lo cual no es posible en TDMA, por lo que

emplea como mínimo un bloque de 3 celdas, en las cuales se divide el espectro total disponible, utilizándose diferentes frecuencias en las celdas.

En el capítulo anterior se observó que apesar de que la tecnología CDMA tiene un costo mayor por estación base, su mayor capacidad de subscriptores puede significar un costo menor en un escenario urbano, en que la capacidad por celda requiere ser maximizada, y por lo que el sistema GSM requiere un mayor número de estaciones base. Sin embargo, en zonas donde la carga de tráfico es menor, como pueden ser zonas suburbanas y rurales, se emplean celdas con una cobertura mayor y el número de celdas disminuye, por lo cual la tecnología GSM puede tener un menor costo.

El sistema CDMA IS-95 actualmente es empleado en E.U.A. y en otros países de América y Asia principalmente, y se espera en los próximos años, que por sus ventajas en capacidad, tenga una mayor penetración en el mercado y pueda ser la tecnología de mayor utilización.

Finalmente, el caso de estudio presentado se puede considerar como una base para realizar el análisis de otros escenarios en diferentes zonas, urbana densa, urbana, suburbana y rural, que se pueden presentar en diferentes regiones de México. Asimismo, se puede afirmar que el programa desarrollado en base a la metodología para el cálculo de la eficiencia espectral, ha mostrado ser de utilidad, por lo que puede ser una herramienta práctica de análisis y diseño, principalmente para los operadores del servicio AIF.

VII.2 APORTACIONES

La aportación principal de este trabajo es el estudio de la eficiencia espectral del sistema CDMA, considerando el estándar IS-95, para la tecnología de Acceso Inalámbrico Fijo, a través del cual se ha desarrollado una metodología y programa para el análisis de la eficiencia espectral del sistema, que permita realizar una toma de decisiones adecuada en el diseño de la red inalámbrica para un caso de estudio en particular. A continuación se presentan de manera más detallada las siguientes aportaciones:

- El desarrollo de una metodología detallada y explícita para el cálculo de la eficiencia espectral del sistema CDMA considerando el estándar IS-95, aplicada a la tecnología AIF, en la cual se incluye el proceso de la planeación del enlace para asegurar la calidad del sistema, y se consideran, los factores necesarios que permiten analizar la eficiencia espectral del sistema en una región en particular.
- El desarrollo de un programa de computadora en base a la metodología planteada, el cual es una herramienta de apoyo que hace posible el análisis de la eficiencia espectral del sistema según el escenario planteado de un manera práctica, sistemática y rápida, dando la posibilidad de generar escenarios alternos variando los diferentes factores involucrados (variables de entrada), facilitando la realización de una toma de decisiones adecuada en el diseño de la red para un caso en particular.

- El desarrollo de un caso de estudio basado en un escenario real, en el cual son incorporados resultados de la eficiencia espectral del sistema CDMA obtenidos por medio del programa, y se presentan escenarios alternos y gráficas que muestran los cambios que tiene la eficiencia espectral del sistema al variar ciertos parámetros, lo cual es una base útil para la realización de otros análisis.
- Se desarrolló una comparación entre las tecnologías CDMA IS-95 y GSM (TDMA), considerando aspectos de eficiencia espectral, capacidad y costo, la cual contribuye a definir la tecnología más adecuada para ciertas consideraciones esperadas de carga de tráfico y zona.
- Considerando que la tecnología AIF actualmente esta siendo introducida en México, el trabajo desarrollado constituye una aportación importante y un documento completo de consulta, para todas las personas interesadas en el tema y para los posibles usuarios del programa (operadores del servicio).

VII.3 RECOMENDACIONES

Dentro de esta línea de investigación se puede continuar con el estudio y análisis de varios temas, los cuales pueden mejorar o complementar el trabajo realizado. Algunos de estos temas son:

- Estudio de la eficiencia espectral de la tecnología W-CDMA (CDMA de banda amplia) estándar TIA/EIA IS 665, para su aplicación en la tecnología de Acceso Inalámbrico Fijo, y su posible comparación con el estándar IS-95.
- Estudio de la eficiencia espectral del estándar híbrido CDMA/TDMA (J-STD-017/IS-661), para su aplicación en la tecnología AIF.
- Estudio del mejoramiento de la eficiencia espectral con la utilización de un arreglo de antenas adaptativo en la estación base, lo cual reduce interferencia.
- Realizar un estudio de los aspectos financieros de las tecnologías CDMA IS-95 y GSM, para complementar el análisis comparativo de la eficiencia espectral entre los sistemas, observando cuales son los costos de cada determinado diseño de la red inalámbrica, el cual de solución a una cierta demanda de subscriptores.

LITERATURA CITADA

Bellamy, John. 1982, Digital Telephony. Ed. John Wiley & Sons. USA. 413-460 p.

COFETEL. 1997. Licitación para bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico para la prestación del servicio de acceso inalámbrico fijo o móvil. Paquete informativo.

Comisión Federal de Telecomunicaciones, México, D.F. 78 pp.

Dababneh, M.I.S., Macario R.C.V., Davies, T. 1994. Considerations of spectral efficiency in future communications. Proceedings of MELECON '94. Mediterranean Electrotechnical Conference, Turkey 12-14 April 1994. Ed. Yuksel, O. NY, USA. IEEE. Vol. 1. 1-4 p.

EURO COST. 1991. Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research EURO-COST 231. Revision 2. The Hague, September 1991.

Faruque, Saleh. 1996. Cellular Mobile Systems Engineering. Ed. Artech House. Norwood, MA. 283 pp.

Garg, V. K, y Wilkes, J. 1996. Wireless and Personal Communications Systems. Ed. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 441 pp.

Garg, V. K., y Sneed, E. L. 1996. Digital Wireless Local Loop System. IEEE

Communications Magazine. Vol. 34, No. 10, Octubre . 112-115 p.

Garg, V. K., Smolik, K. F., y Wilkes, J. E. 1997. Applications of CDMA in

Wireless/Personal Communications. Ed. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 353 pp.

Gibson, Jerry D. 1996. The mobile communications handbook. Ed. por CRC Press, Inc.

USA. 570 pp.

Hata, Masaharu. 1980. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio

Services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. VT-29, No. 3,

Agosto. 317-235 p.

Huuderman, Anton A. 1997. Guide to Telecommunications Transmission Systems. Ed.

Artech House. Norwood, MA. 381 pp.

Jaffery, Naqi A. 1996. PCS Standars and Technology: Overview. Ed. McGraw-Hill.

Datapro Information Services Group. USA. 1-10 p.

Khno R., Median R., y Milstein L. 1995. Spread Spectrum Access Methods for Wireless Communications. IEEE Communications Magazine. Vol. 33, No. 1, Enero. 58-67 p.

Lee, David y Xu Ce. 1997. The Effect of Narrowbeam Antenna and Multiple Tiers on System Capacity in CDMA Wireless Local Loop. IEEE Communications Magazine. Vol. 35, No. 9, Sept. 110-114 p.

Lee, William C.Y. 1989. Mobile cellular telecommunications systems. Ed. McGraw-Hill. USA. 443 pp.

Lee, William C.Y. 1993. Mobile communications design fundamentals. Ed. Wiley. 2nd ed. New York. 367 pp.

Melgarejo Lomelín, Iván. 1998. Estudio de la eficiencia espectral del sistema TDMA en base al esquema de modulación empleado para comunicaciones inalámbricas en México. Tesis de Maestría. CICESE.

Mehrotra, Asha. 1994. Cellular Radio, Analog and Digital Systems. Ed. Artech House. Norwood, MA. 453 pp.

Mohapatra M. y Pachaury V. 1994. A Fixed Wireless Cellular alternative to Wireline Telephony. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications. Bangalore, India. p. 62-73.

Murota, Kazuaki. 1985. Spectrum Efficiency of GMSK Land Mobile Radio. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-34, No. 2, Mayo. 69-75 p.

QUALCOMM, 1995. Economics of PCS. QUALCOMM Incorporated. San Diego, CA. 53 pp.

Ramamurthi B. y Mathiazhagan C. 1994. DECT-Based Wireless Local Loop System. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications. Bangalore, India. p. 55-59.

Rappaport, Theodore S. 1996. Wireless communications, Principles and Practice. Ed. Prentice-Hall. New Jersey. 635 pp.

Salgado, Héctor. 1997. Tendencias de Asignación del Espectro para Telefonía Inalámbrica Fija. Revista de Telecomunicaciones AHCIET. Año XV, No. 70. 9-26 p.

SCT, 1996. Bandas de frecuencias de uso determinado para servicios de acceso local inalámbrico en México. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Comunicaciones y Desarrollo Tecnológico. 104 pp.

Steele, Raymond. 1992. Mobile Radio Communications. Ed. John Wiley & Sons Ltd. London, England. 770 pp.

Tomasi, Wayne. 1996. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana. México, D.F. 174 pp.

Webb, William. 1998. Introduction to Wireless Local Loop. Ed. Artech House. Norwood, MA. 307 pp.

Yue, On-Ching. 1996. Design Trade-Offs in Cellular/PCS Systems. IEEE Communications Magazine, Vol. 34, No. 9, Sept. 146-152 p.

APÉNDICE A. LISTADO DEL PROGRAMA

El listado del programa se encuentra en el disco adjunto.

GLOSARIO

AIF	Acceso Inalámbrico Fijo, del inglés WLL-Wireless Local Loop.
ANSI	American National Standard Institute - Instituto de Estándares Nacional Americano.
AWGN	Additive White Gaussian Noise.
BER	Bit Error Rate - Tasa de error de bit.
COFETEL	Comisión Federal de Telecomunicaciones.
CCM	Centro de Conmutación Móvil.
CDMA	Code Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Código.
CEPT	European Conference of Post and Telecommunications - Conferencia Europea de Correos y Telecomunicaciones.
CITEL	Comisión Interamericana de Telecomunicaciones.
D-AMPS	Digital Advanced Mobile Phone Service - Sistema Telefónico Móvil Avanzado Digital (también conocido como IS-136/54).
Desexpander	Es el proceso de recuperar la señal de información de la señal compuesta de EE por medio de una código particular.
EB	Estación Base.

GLOSARIO (continuación)

EE	Espectro Expandido (del inglés, Spread Spectrum - SS).
EIA	Electronic Industry Asociation
Erlang	Unidad sin dimensión de la intensidad de tráfico telefonico. Un erlag es igual a un circuito en uso por una hora (3600 seg).
ERP	Effective Radiated Power - Potencia Radiada Efectiva.
ETSI	European Telecommunications Standard Institute - Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
FDD	Frecuency Division Duplex - Duplexaje por División de Frecuencia.
FDMA	Frecuency Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FEC	Forward Error Correction - Corrección de Error en Recepción.
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying - Modulación con Corrimiento Mínimo Gaussiano.
GOS	Grado de servicio.
GSM	Global System for Mobile communications - Sistema Global para comunicaciones Móviles.
IS-54	Interim Standard 54 - Estándar Interino 54 (estándar americano TDMA).
IS-95	Interim Standard 95 - Estándar Interino 95 (estándar americano CDMA).
LOS	Line of sight - Línea de vista.
OC	Oficina central de Conmutación.
PCS	Personal Communication Services - Servicios de Comunicación Personal

GLOSARIO (continuación)

QCELP	Qualcomm Codec Excited Linear Prediction
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying - Transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria.
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados.
RSL	Received Signal Level - Nivel de la Señal Recibida.
RTPC	Red Telefónica Pública Conmutada.
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
TDD	Time Division Duplex - Duplexaje por División de Tiempo.
TDM	Time Division Multiplex - Multiplexaje por División de Tiempo.
TDMA	Time Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TIA	Telecommunications Industry Association.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Systems - Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Universal
USO	Obligaciones del Servicio Universal.