CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS MÓVILES CELULARES DE TERCERA GENERACIÓN

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA

Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2005.

TESIS DEFENDIDA POR

ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

DR. ROBERTO CONTE GALVAN

Director del Comité

DR. DAVID HILARIO COVARRUBIAS ROSALES

Miembro del Comité

DR. ARTURO SERRANO SANTOYO

Miembro del Comité

DR. CARLOS ALBERTO BRIZUELA RODRÍGUEZ

Miembro del Comité

DR. GEORGE EMIR MORGAN

Miembro del Comité

Dr. Arturo Velázquez Ventura

Coordinador del programa en Electrónica y Telecomunicaciones

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla

Director de Estudios de Posgrado

25 de agosto del 2005

RESUMEN de la tesis que presenta **Ángel Gabriel Andrade Reátiga,** como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR en CIENCIAS en Electrónica y Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2005.

"METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN TECNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS MOVILES DE TERCERA GENERACIÓN."

Resumen aprobado por:

_____

Dr. Roberto Conte Galvan
Director de Tesis

Algunos de los servicios que estarán disponibles en Latinoamérica en los próximos años, tales como mapas digitales, información de tránsito e Internet inalámbrico traerán una nueva fuente de ingresos para los operadores de telefonía celular. La clave de todo esto es la sigla 3G. En este trabajo de investigación se propone una metodología para configurar y evaluar Técnica y Económicamente la viabilidad de desplegar una red celular de Tercera Generación (3G) utilizando antenas conscientes del entorno. La metodología establece en su primera etapa la evaluación técnica de una red 3G, donde se analiza y evalúa la introducción de utilizar una sectorización consciente del entorno en el proceso de planificación de la red. Con ésta técnica las antenas adaptan su patrón de radiación a la distribución espacial de la señal deseada y a las fuentes interferentes. Para lo anterior se utiliza el modelo de canal radio GSBGM propuesto en este trabajo, con el fin de maximizar la relación E_b/N_o para cada usuario activo en la red y por consiguiente incrementar la capacidad del sistema. El límite de capacidad del sistema se fija por el valor máximo de probabilidad de interrupción, esto es, la probabilidad de que no todos los usuarios activos puedan alcanzar la calidad de servicio (QoS) deseada en un instante determinado. La que la mayoría de las metodologías que se presentan en la literatura para desarrollar una red celular se enfocan principalmente en los aspectos técnicos e ignoran los aspectos económicos. En la segunda fase de la metodología propuesta en este trabajo se desarrolla un modelo económico que evalúa la configuración y viabilidad económica de migrar una red 2G hacia un sistema 3G con sectorización consciente del entorno. Los resultados se basan en métricas como el Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno. Aún cuando esta técnica de sectorización incrementa en un 45% la capacidad de un sistema 3G, no es económicamente viable, al menos bajo las condiciones, escenarios y características de mercado con que cuenta México. Sin embargo, el análisis de sensitividad presenta un análisis más profundo para identificar los parámetros críticos que tienen mayor impacto en la economía del proyecto de inversión. Lo anterior permite establecer bajo qué condiciones y en qué circunstancias se puede actualizar una red 2G hacia una 3G.

Palabras clave: Evaluación Técnica-Económica, Capacidad, CDMA, Tercera Generación, Comunicaciones Móviles, Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno.

ABSTRACT of the thesis presented by **Ángel Gabriel Andrade Reátiga,** as a partial requirement to obtain the DOCTOR of SCIENCE degree in Electronics and Telecommunications. Ensenada, Baja California, México, August 2005.

"TECHNO-ECONOMIC METHODOLOGY FOR THIRD GENERATION MOBILE SYSTEMS."

Some of the digital services to be available in Latin America in the near future, such as digital maps, highway information and wireless Internet, will be a new source of income for cellular telephone operators. The key word to all this is 3G. In this research work a methodology to configure and evaluate the viability of a Third Generation (3G) cellular network deployment is presented, both technically as well as economically, using context-aware antennas. The methodology first establishes the 3G network technical evaluation, where the introduction of context-aware sectoring is analyzed and evaluated during the network planning process. In this technique, the antenna adapts its radiation pattern to the desired signal and interfering sources' spatial distribution. To obtain this, the Gaussian model for the radio channel developed in this work is used, aiming to maximize the *Eb/No* ratio for each active network user, incrementing system capacity. The system capacity limit is set by the maximum value for interruption probability, that is, the probability that not all active network used may reach the desired quality of service (QoS) in a given moment. Most methodologies for cellular network development currently available focus mainly on the technical issues, ignoring its associated economic issues. In the second part of the proposed methodology, an economic model that evaluates the configuration and economic viability to migrate from a 2G to a 3G network with context awareness is developed. The results are based on known economic metrics such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR). Although the sectoring technique increments the capacity a 3G system by 45%, it is not economically viable under Mexico's current conditions, scenarios and market characteristics. Nevertheless, the sensitivity analysis presents a clearer view to identify critical parameters with major economic impact in the investment project. This allows establishing under which conditions a 2G network can be updated to a 3G network.

Keywords: Techno-economic evaluation, capacity, CDMA, Third Generation, Mobile Communications, Net present value, Internal Return Rate

DEDICATORIAS

A mi esposa, cómplice y amiga ***Marcela,*** por estar conmigo en todo momento. Solo tengo que decirte GRACIAS y TQM^2,

A mis hijos ***Ángel Roberto,*** quien durante cuatro años aguantó estoicamente mis muchas ausencias y a pesar de eso me sigue llamando papá y ***Alexis***† quien dondequiera que esté siempre será parte importante de este éxito. Siempre los llevaré en mi corazón,

y a mis dos Familias por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Roberto Conte** o solamente **Roberto**, mi asesor, y sobretodo gran amigo. Roberto, te agradezco todo lo que aprendí de ti, más que cuestiones técnicas o de aquello que tuvo que ver con el proceso de investigación de la tesis, o de hacer una propuesta de tesis, o de hacer una presentación para un avance, o la forma de analizar resultados, o de redactar un articulo (*paper*), lo más importante fue que cada día debemos ser mejores personas y que debemos vivir la vida con optimismo. Por todo lo anterior, muchas gracias Roberto. Espero que sigamos siendo buenos amigos.

Mi más sincero agradecimiento al *Dr. David Covarrubias*, por su apoyo técnico y financiero durante mi estancia en CICESE. Gracias por su amistad y por convertirse en aquella figura paterna que en ocasiones tanta falta nos hace, sobretodo cuando perdemos el rumbo, gracias por darme la oportunidad de trabajar en el Grupo de Comunicaciones Inalámbricas (GCI) y sobretodo por los buenos y sabios consejos para sacar adelante con éxito este trabajo.

A los miembros de mi comité de tesis, *Dr. Arturo Serrano. Dr. Carlos Brizuela y Dr. George Morgan* por su disponibilidad para hacer las recomendaciones y cuestionamientos pertinentes a este trabajo de tesis.

Al Dr. Jesús Favela quién indirectamente, y en ocasiones directamente, influyó positivamente durante este difícil camino hacia mi formación como investigador. Gracias por sus consejos y espero que siga haciéndolo.

Al *Grupo de Comunicaciones Inalámbricas* (*GCI*) del CICESE por todo el apoyo recibido

A mis compañeros de Generación, *Marco, Claudio, Aldo y José* por las largas discusiones técnicas y filosóficas que tuvimos, "sin llegar a nada". Espero que sigamos teniéndolas.

A la **Universidad Autónoma de Baja California** por darme la oportunidad de seguirme superando como académico y como persona.

Se agradece a **CONACYT** por su apoyo económico y brindarme la oportunidad de seguir estudiando. Además del apoyo brindado al proyecto "*Modelado y Simulación de Algoritmos de la Dirección de Llegada (DOA) y Conformación Digital de Haz (DBF) Aplicados a Comunicaciones Móviles Celulares con Antenas Inteligentes",* con **clave** *U39514Y*, donde se enmarcó esta tesis.

A **PROMEP** por la beca otorgada para el desarrollo de este trabajo de investigación.

CONTENIDO

Página

Resumen..... *ii*

Dedicatorias..... *iv*

Agradecimientos..... *v*

Tabla de contenido..... *vi*

Lista de Figuras..... *ix*

Lista de Tablas..... *xi*

I. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN..... 1

1.1 Marco de Referencia..... 2

1.2 Retos de los sistemas 3G..... 3

1.2.1 Planificación Técnica..... 3

1.2.2 Evaluación Económica..... 5

1.3 Objetivo General de la Tesis..... 7

1.4 Contribuciones..... 7

1.5 Organización de la Tesis..... 8

II. FUNDAMENTOS Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÓVILES CELULARES..... 11

2.1 El Concepto Celular en los Sistemas Móviles..... 11

2.2 Evolución de los Sistemas Móviles Celulares..... 12

2.2.1 Generación Cero..... 12

2.2.2 Primera Generación..... 13

2.2.3 Segunda Generación..... 13

2.2.4 Transición Hacia 3G: Sistemas Celulares de 2.5 Generación..... 16

2.3 Sistemas de Tercera Generación (3G)..... 18

2.3.1 CDMA2000..... 20

2.3.1.1 CDMA2000 1X..... 21

2.3.1.2 CDMA2000 3X..... 23

2.3.2 WCDMA o UMTS..... 23

2.4 Estadísticas y Estado Actual..... 24

2.5 Conclusiones..... 27

III. ESTIMACIÓN DE CAPACIDAD EN SISTEMAS MÓVILES CDMA..... 28

3.1 Antecedentes..... 28

3.2 Características Generales de las Redes Celulares..... 30

3.3 Relación Señal-Interferencia..... 31

3.3.1 Cálculo de las Pérdidas por Trayectoria..... 33

3.4 Interferencia..... 34

3.4.1 Interferencia Interna..... 34

3.4.2 Interferencia Externa..... 35

CONTENIDO (continuación)

Página

3.5 Estimación de la Capacidad en un Sistema DS-CDMA…… 37
3.6 Factores que influyen en la Capacidad de un Sistema CDMA…….. 39
3.6.1 Actividad de Voz…….. 40
3.6.2 Control de Potencia…….. 40
3.6.3 Compromiso entre Cobertura y Capacidad…….. 40
3.6.4 Sectorización…… 41
3.7 Conclusiones…….. 42

IV. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO…… 43
4.1 Introducción…… 43
4.2 Geometría y Planteamiento General del Modelo GSBGM……. 44
4.3 Función de densidad de probabilidad conjunta y de densidad marginales del AoA y ToA del Modelo GSBGM…… 47
4.3.1 Función de Densidad de Probabilidad Conjunta AoA/ToA……... 47
4.3.2 Función de Densidad de Probabilidad Marginal del AoA…….. 51
4.3.3 Función de Densidad de Probabilidad Marginal del ToA…….. 53
4.4 Dispersión Angular (AS) del Modelo GSBGM…….. 54
4.4.1 Comparación del Modelo GSBGM con Otros Modelos de Canal Radio... 58
4.5 Conclusiones…… 60

V. INCREMENTO DE CAPACIDAD EN UN SISTEMA CDMA UTILIZANDO SECTORIZACIÓN CONSCIENTE DEL ENTORNO…… 61
5.1 Antecedentes y Trabajo Relacionado…….. 61
5.2 Características de la Simulación…….. 62
5.3 Planteamiento de la Simulación...……... 64
5.3.1 Proceso de la Simulación……... 65
5.4 Análisis de Interferencia…….. 69
5.5 Análisis de Capacidad……. 71
5.5.1 Escenario 1: Antena Omnidireccional…… 72
5.5.2 Escenario 2: Sectorización Consciente del Entorno……... 73
5.6 Conclusiones…… 81

VI. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA 3G……... 83
6.1 Antecedentes…… 84
6.2 Estructura General de un Modelo Técnico-Económico…….. 85
6.3 Parámetros de Entrada del Modelo Técnico-Económico..…….. 89
6.3.1 Tasa de Penetración de Mercado……...……. 89
6.3.2 Calculo de los ingresos……...……... 91
6.3.3 Calculo de los costos……..…… 93

CONTENIDO (continuación)

Página

6.4 Parámetros de Salida del Modelo Técnico-Económico……... 94
6.4.1 Valor Presente Neto (NPV)…… 95
6.4.2 Tasa Interna de Retorno (IRR)……... 96
6.4.3 Curva de Flujo de Efectivo……..... 97
6.5 Análisis de Sensitividad y de Riesgo…… 99
6.6 Conclusiones……. 103

VII. ANALISIS TECNICO ECONOMICO DE LA EVOLUCION DE REDES MOVILES CELULARES……...……... 103
7.1 Antecedentes……...……..... 103
7.2 Componentes del Modelo……..... 107
7.2.1 Tasa de Penetración del Servicio……...……... 107
7.2.2 Número de Usuarios……...……..... 108
7.2.3 Carga de Tráfico……...…… 110
7.2.4 Dimensionamiento de la Red……...……..... 110
7.3 Evaluación de la Estrategia de Evolución……. 111
7.4 Simulación y Análisis de Resultados……. 113
7.4.1 Análisis de Riesgo……..... 117

VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO..…… 122
8.1 Resumen del Trabajo de Investigación……. 122
8.2 Contribuciones……..... 126
8.3 Trabajo Futuro…….. 127
8.4 Conclusiones……. 128

BIBLIOGRAFÍA..……..…… 129

LISTA DE FIGURAS

Página

Figure 1. Estructura de la Tesis. 9
Figure 2. Evolución hacia los Sistemas de Tercera Generación (3G). 12
Figura 3. Distribución mundial de suscriptores por tecnología. 1802 millones de usuarios en el mundo, junio del 2005. 16
Figura 4. Ancho de Banda de un canal, (a) cdma2000 con Multiportadora, (b) cdma2000 con Secuencia Directa y (c) WCDMA. 21
Figura 5. Distribución mundial de suscriptores móviles por región. 1802 millones de usuarios en el mundo, junio del 2005. 26
Figura 6. (a) Interferencia Intracelular en el canal ascendente con control de potencia perfecto. (b) En los sistemas CDMA la interferencia total en la banda de frecuencia es igual a la suma de las potencias de cada usuario. Por lo que, si existen seis usuarios en una célula, con control de potencia perfecto, el valor del SIR que experimenta cualquiera de los usuarios es de 1/5. 35
Figura 7. Geometría de la Ubicación de la MS para Evaluar la Interferencia Intercelular. .36
Figura 8. Geometría de dispersores entre Estación Base y Terminal Móvil. 45
Figura 9. Geometría y distribución de dispersores utilizada en el modelo GBSBGM 46
Figura 10. Función de densidad de probabilidad conjunta AoA/ToA para el modelo GBSBGM, (a) gráfica 3D, (b) mapa de contorno 2D. 50
Figura 11. Límites para calcular el ángulo de arribo de las señales multitrayectoria. 52
Figura 12. Función de Densidad Marginal del AoA del modelo GBSBGM. 53
Figura 13. Geometría para calcular el ToA. 54
Figura 14. Función de Densidad Marginal del ToA del modelo GBSBGM. 55
Figura 15. Dispersión Angular del modelo GBSBGM. 57
Figura 16. Comparación de la Dispersión Angular de los modelos GBSBGM, GBSBCM y GBSBEM. 60
Figura 17. Proceso de Simulación. 67
Figura 18. Geometría del Sistema Celular utilizado en la simulación. 68
Figura 19. Generación de usuarios en el sistema para la simulación. 68
Figura 20. Sistema de Coordenadas por anillo para la evaluación de Interferencia. 70
Figura 21. Probabilidad de Interrupción del sistema solo con usuarios de voz. 73
Figura 22. Probabilidad de Interrupción con transmisión de datos de alta velocidad a 4 y 8 veces la velocidad nominal. 74
Figura 23. Evaluación de Capacidad considerando sectorización consciente del entorno y el modelo de canal radio GSBGM. 74
Figura 24. Área de cobertura, después de aplicar el modelo de canal radio GSBGM, para srw=100 metros. (a) omnidireccional, (b) AS=30°, (c)AS=60°, (d) AS=90°. ...75
Figura 25. Usuarios que provocan interferencia a la célula de referencia, para los casos (a) omnidireccional, (b) AS=30°. 77
Figura 26. Probabilidad de Interrupción del sistema con usuarios de voz para diferentes valores de ancho de haz del patrón de radiación de la BS. 78

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Página

Figura 27. Probabilidad de Interrupción del sistema con usuarios de datos únicamente para diferentes valores de ancho de haz del patrón de radiación de la BS. 79
Figura 28. Probabilidad de Interrupción del sistema con usuarios de voz y datos para diferentes valores de ancho de haz del patrón de radiación de la BS. 80
Figura 29. Numero de usuarios por sector. 81
Figura 30. Estructura general de un modelo técnico-económico.....87
Figura 31. Función de la curva S para la proyección de la tasa de penetración de mercado. 89
Figura 32. Datos de la penetración de mercado en México. 90
Figura 33. Ejemplo de una curva de Valor Presente Neto (NPV). 96
Figura 34. Ejemplo de una curva de Tasa Interna de Retorno en %.....97
Figura 35. Ejemplo de una gráfica del análisis de sensitividad de variación porcentual. 99
Figura 36. Análisis de sensitividad de los parámetros, (a) Renta mensual al usuario, (b) Costos de Instalación, mantenimiento y operación, (c) Precio del Servicio de voz, (d) Probabilidad de Interrupción. 101
Figura 37. Diagrama de simulación para la evolución de redes 2G hacia un sistema 3G. 104
Figura 38. Diagrama de Flujo del modelo Técnico-Económico.....106
Figura 39. Diagrama de Transición de usuarios entre redes……..108
Figura 40. Generación de los escenarios de análisis.....111
Figura 41. Cálculo de los Ingresos Netos para el escenario CDMA2000-1X→1X-EVDO→WCDMA, con expansión ambiciosa y escenario de mercado optimista. ……..…….114
Figura 42. Cálculo del Flujo de Efectivo (NCF) para el escenario CDMA2000-1X→1X-EVDO →WCDMA, con expansión ambiciosa y escenario de mercado optimista.....114
Figura 43. Cálculo del Flujo de Efectivo (NCF) para los escenarios de análisis. (a) Escenario de mercado Optimista. (b) Escenario de mercado Pesimista. 115
Figura 44. Distribución de probabilidad de los ingresos del proyecto de inversión CDMA2000-1X-WCDMA en el primer año de ejecución……..……..…119
Figura 45. Evaluación del riesgo para los diferentes estrategias de evolución de redes……..……..……..…120

LISTA DE TABLAS

Tabla		*Página*
I	Propuestas de Interfaz aérea para los Sistemas 3G……..	20
II	Evaluación Teórica y por simulación del AS……..…….	58
III	Rango de la célula de acuerdo al dimensionamiento…..…….....	69
IV	Parámetros de Simulación…….....……	69
V	Resultados de la evaluación de interferencia intercelular…….	71
VI	Evaluación de interferencia y capacidad en un sistema con sectorización consciente del entorno…….……..	81
VII	Programas de investigación para la evaluación técnico-económica de redes de banda ancha……...……	85
VIII	Parámetros para obtener la curva de penetración de mercado…….....	90
IX	Costo por minuto en dólares……...……...	92
X	Costo de la Estación Base……..	93
XI	Costos de operación y mantenimiento……..…….	93
XII	Clases de Servicio para tercera Generación……..	110
XIII	Resumen de los datos de mercado para los escenario……...	113
XIV	Datos d entrada del modelo, caso optimista……..	113
XV	Datos de entrada del modelo caso pesimista…….	113
XVI	Calculo del NPV, IRR, PP de las estrategias de análisis con escenario de mercado optimista…….	117
XVII	Cálculo del NPV, IRR, PP de las estrategias de análisis con escenario de mercado pesimista…….	117

El telégrafo inalámbrico no es un sistema difícil de entender. El telégrafo convencional es como un gato muy, pero muy largo, le jalas la cola en la ciudad de Nueva York y éste maullará en la ciudad de Los Ángeles. Entonces, el telégrafo inalámbrico funciona de la misma manera, sólo que sin el gato.

Albert Einstein (1879-1955)

Capítulo I

Introducción y Motivación

A mediados del 2005 existían en el mundo 1802 millones de usuarios móviles [EMC, 2005], de los cuales 40 millones se encuentran en México [COFETEL, 2005a] y 105 millones de usuarios realizan llamadas telefónicas desde un dispositivo móvil 3G.

Tercera Generación, o 3G, es un concepto de comunicaciones personales que aúna las características de alta capacidad y variedad de servicios de banda ancha fijando como principal objetivo la posibilidad de establecer cualquier tipo de comunicación (voz, datos y/o multimedia) con cualquier persona, desde cualquier lugar y en cualquier momento *"(anyone, anywhere, any time)"*.

Sin embargo, la instalación de redes 3G ha sufrido varios retrasos y hace cinco años protagonizó en Europa una operación financiera desquiciante, protagonizada por la venta de licencias multimillonarias para utilizar una tecnología que en realidad aún no existía y para la que no había terminales móviles. Esta situación fue cambiando poco a poco en algunos países asiáticos y europeos, y ofreciendo servicios limitados en capacidad.

Aún así, a principios del año 2005 la tecnología 3G dejó de ser un privilegio para unos cuantos países y dado que el número de usuarios móviles no deja de crecer, provocará a mediano plazo un incremento en el tráfico de información. Será necesario buscar alternativas que incrementen la capacidad de las redes móviles y que al mismo tiempo proporcionen ventajas económicamente competitivas a los operadores de servicios celulares [Monogioudis *et al.*, 2004].

Actualmente la industria de las comunicaciones móviles está emigrando sus redes de Segunda Generación (2G) a sistemas 3G, y los diseñadores enfrentarán nuevos retos relacionados con la planificación y el dimensionamiento de las redes celulares. Se están

desarrollando interfaces y protocolos que garanticen la compatibilidad entre los servicios nuevos y antiguos, entre redes nuevas y antiguas, así como entre operadores de redes y de servicios.

I.1 MARCO DE REFERENCIA

A mediados de los 1980s se vivió uno de los principales desarrollos en los sistemas de telecomunicaciones, la migración de redes de circuitos conmutados a redes de conmutación de paquetes. Actualmente los operadores de redes inalámbricas, en especial los que ofrecen comunicaciones móviles, se encuentran en una situación similar, pues están en un proceso de evolución de sus redes celulares 2G hacia sistemas 3G. Lo anterior provocará un aumento en la competencia por usuarios, que obligará a los operadores a minimizar sus costos y maximizar sus fuentes de ingresos. Sin embargo, para los operadores no es priopritario en muchos casos el planificar la evolución de sus redes tomando en cuenta la alternativa de menor costo [Welling *et al.*, 2003 y Katsianis *et al.*, 2001]. En [Soong *et al.*, 2005, Hsiao-Hwa *et al.*, 2002 y Higgins, 2001] se establece que la tecnología 3G ese encuentra en una etapa de transición e incertidumbre, por lo que la decisión tecnológica que se tome actualmente, determinará en los próximos años el éxito del operador en el mercado inalámbrico.

La planificación de un sistema 3G es un proceso más sencillo para los operadores de redes 2G que optaron por utilizar la tecnología GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles) o CDMA IS-95 (Acceso Múltiple por División de Código) como punto de partida. GSM es la norma preferida por los operadores europeos, y tiene dos posibilidades: emigrar directamente a 3G a través del estándar UMTS (Sistema de Telefonía Móvil Universal) o, en algunos casos, una variante TDMA-EDGE. La otra opción de GSM es emigrar por alguna tecnología intermedia (2.5G), conocida como GPRS (Sistema General de Transmisión de Datos mediante Paquetes de Información), cuyas velocidades son más modestas pero implica menores gastos de inversión a corto plazo. Para muchos operadores latinoamericanos el camino de GPRS parece más razonable, porque no se tiene una idea clara y definida de cómo va funcionar 3G en América Latina.

Por otro lado, CDMA no tiene un puente intermedio y se emigra a 3G a través del estándar CDMA2000-1X. Ésta tecnología apoya datos conmutados por circuito y datos de paquete que pueden proveer tasas de datos nominales de 144 kbps. Para un operador TDMA (como los sistemas IS-54/136), las cosas son más complejas, porque no tienen un camino directo hacia 3G. Debe elegir entre pasarse primero al mundo GSM o emplear un modelo totalmente nuevo centrado en CDMA.

Para cualquier selección, es necesario hacer una valoración legítima y válida de las ventajas y desventajas de cada camino y especialmente de los riesgos inherentes de escoger una tecnología sobre la otra. El consumidor es el que, a fin de cuentas, tendrá que cambiar su teléfono celular y pagar la factura si quiere entrar al admirable mundo de la 3G.

I.2 RETOS DE LOS SISTEMAS 3G

La introducción de redes con capacidad de manejo de tráfico heterogéneo, es decir servicios que van más allá del clásico tráfico de voz, obligará a los operadores de redes 3G a adoptar metodologías de diseño objetivas y eficientes. Se tiene la necesidad de contar con mayor eficiencia espectral, minimizar los gastos de inversión y aumentar la calidad de servicio a sus usuarios. Por lo anterior, los operadores se enfrentarán a dos retos principales al momento de diseñar e implantar una red 3G: la planificación técnica de la interfaz aérea y la evaluación económica.

I.2.1 Planificación Técnica

En un principio, las redes celulares fueron creadas y diseñadas para ofrecer cobertura máxima a un costo mínimo [Gamst *et al.*, 1986]. Por ejemplo, hace 25 años la ciudad de Sacramento, CA, contaba con ocho células en su servicio de comunicación celular y la ciudad de Nueva York no contaba con más de 24. Actualmente la ciudad de Sacramento requiere cientos de células y la ciudad de Nueva York más de 4000 para cubrir las demandas de servicio inalámbrico celular. A pesar de este crecimiento, se observa la

necesidad de desarrollar una metodología clara y el plan de negocios asociado para realizar la actualización del sistema. Las células nuevas se instalaron con el único fin de transportar la sobrecarga de tráfico, minimizar la interferencia y aumentar la calidad de servicio (QoS).

Actualmente, la investigación en el desarrollo de nuevas tecnologías inalámbricas va encaminada a satisfacer las necesidades de servir a un mayor número de usuarios y proporcionarles una mejor calidad del servicio. El problema fundamental en los sistemas de comunicaciones móviles actuales, es que muchos usuarios desean acceder a la estación base simultáneamente y establecer un enlace de comunicación. Por lo tanto, el acceso múltiple se implementa para compartir los recursos del sistema entre los usuarios. El método de acceso múltiple que constituye la base de los sistemas 3G es la técnica CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) de banda ancha. En este caso todos los usuarios comparten el mismo canal de comunicaciones durante el tiempo que están activos, lo que produce mayor interferencia en el canal inalámbrico y ésta interferencia es la principal limitación de la capacidad. Lo anterior hace imprescindible pensar en *utilizar técnicas que permitan minimizar la interferencia de acceso múltiple* y con ello aumentar la capacidad de dichos sistemas [Al-Ruwais, 2002, Monogioudis *et al.*, 2004 y Nguyen *et al.*, 2004] .

Existen diferentes técnicas que reducen la interferencia [Liberti y Rappaport, 1996], [Tyler *et al.*, 2004]. Particularmente en este trabajo, se plantea como solución utilizar antenas conscientes del entorno en las estaciones base. Este tipo de antenas adaptan su patrón de radiación a la distribución espacial de la señal deseada y a las fuentes interferentes con el fin de ofrecer cobertura a un sector en particular.

Para lo anterior, se han propuesto métodos que explotan la ubicación espacial de los usuarios móviles, y se ha demostrado ampliamente que utilizar esta tecnología puede incrementar la capacidad en las redes 3G. De hecho, este escenario se analizó anteriormente en [Burachinni *et al.*, 1996, Giuliano *et al.*, 2002, Li *et al.*, 1997, Naguib *et al.*, 1994, Nawrocki *et al.*, 2002, Schacht *et al.*, 2003 y Schacht *et al.*, 2004]. La desventaja que

presentan los trabajos anteriores es que asumieron características ideales de la antena y no consideran un modelo espacial de canal radio.

En este trabajo de investigación se propone un modelo de canal radio que pueda aplicarse tanto a entornos macrocelulares como microcelulares, escenario típico de un sistema 3G. Con éste modelo el patrón de radiación se vuelve más directivo que el que proporciona un sistema convencional, generalmente omnidireccional o sectorial, lo que permite maximizar la relación Señal-Interferencia para cada usuario activo en la red.

Está claro el compromiso que debe existir entre área de cobertura, capacidad y calidad en un sistema 3G, por lo que el proceso de planificación de la red no solo depende de los factores de propagación sino también de la carga de tráfico con que cuente la célula. La revolución de los sistemas 3G obliga a los operadores a olvidarse de la filosofía "primero cobertura y después capacidad", que se aplicaba en la planificación de redes de primera y segunda generación, haciéndolos ahora igual de importantes.

I.2.2 Evaluación Económica

Hasta este momento se han establecido algunos retos tecnológicos que tiene que considerar el diseñador al momento de planificar una red 3G, pero en todo ese proceso de planificación *¿en que parte se consideran los conceptos relacionados con la economía del proceso de planificación?* Este trabajo pretende describir la relación entre los aspectos técnicos y económicos en el diseño de redes celulares 3G.

A mediados de los 1980s el diseño de redes celulares se basaba principalmente en la cobertura de servicio y el costo. Debido a la existencia de poco tráfico, la capacidad no era un problema y la interferencia era fácil de controlar. En los primeros sistemas inalámbricos celulares, las estaciones base estaban localizadas en montañas, edificios o torres de altura mayor a los 80 metros y conforme la demanda lo requería se agregaban mas estaciones base para incrementar el área de servicio. El plan de negocios consideraba en ese entonces,

únicamente proyecciones de tráfico, en los cuales para calcular el costo de instalar una célula nueva, los diseñadores de red utilizaban estimaciones del tráfico para determinar la cantidad de canales que debían asignarse a una célula. De esta manera el costo total de una célula nueva se determinaba por la cantidad de canales más el costo (fijo) por canal. En pocas palabras, las ganancias generadas por la célula estaban relacionadas directamente con la cantidad de tráfico.

La experiencia previa en el diseño y planificación de redes de telecomunicaciones indica que 1) históricamente se detecta una necesidad, 2) se busca una solución técnica tomando en cuenta una tecnología conocida o recomendada, 3) se establece un plan piloto, 4) se instala el equipo necesario y 5) se ofrece el servicio durante la vida útil del equipo de comunicaciones. A esta secuencia es importante incorporarle un análisis económico durante el proceso de planificación. El omitir este análisis lleva a la introducción de sistemas costosos, obligados a cobrar precios elevados, por un servicio que no es necesariamente el más indicado, con un consecuente desperdicio de recursos técnicos y económicos para proveedores y usuarios

A principios del año 2000 comenzaron a desarrollarse metodologías y herramientas técnico-económicas para aplicarse en redes inalámbricas. En [Katsianis *et al.*, 2001] se presenta la evaluación Técnico-Económica de implantar una red 3G, particularmente en países europeos, en el que se analizan los casos para operadores existentes y nuevos operadores. El modelo que se propuso en el trabajo de Katsianis se basa en la metodología propuesta por la Unión Europea, conocida como TERA (Techno-Economic Results from ACTS). Sin embargo, el análisis se realiza tomando en cuenta únicamente el estándar 3G europeo (UMTS) y no lo compara con alguna otra tecnología 3G, a pesar de que existen algunos países de ese continente que están planeando utilizar CDMA2000 o la opción tecnológica china TD-SCDMA como su interfaz aérea 3G. En el trabajo de [Welling *et al.*, 2003] se presenta la evaluación Técnico-Económica de una red UMTS en combinación con una red WLAN. El estudio se basa en el trabajo TONIC (TechnO-ecoNomICs of IP optmised networks and services) propuesto por el programa IST (Tecnologías de la

Sociedad de Información) de la Unión Europea, el cual proporciona una metodología que compara aquellos factores que mayormente influyen en el plan de negocios de un operador UMTS y evalúa el impacto en la rentabilidad de utilizar WLAN como una tecnología de acceso complementaria al sistema 3G.

La metodología y el modelo técnico-económico propuesto en este trabajo de investigación toman en cuenta algunas características de los modelos propuestos en la literatura revisada. Sin embargo, en estos trabajos únicamente hacen el estudio y análisis de la problemática de implantar redes 3G para un operador nuevo (Greenfield) sin considerar la evolución de una red 2G hacia una 3G. Además, en este trabajo se evalúa la viabilidad económica de implantar la tecnología de antenas conscientes del entorno.

El proceso de planificación de redes de telecomunicaciones debe considerar los recursos existentes y disponibles, tanto técnicos como económicos, con el fin de lograr el mejor resultado posible. Una red de comunicaciones debe ser técnicamente funcional, de calidad y económica para el usuario, pero a la vez debe tener una base sólida desde el punto de vista de negocios para el proveedor del servicio.

I.3 OBJETIVO GENERAL DE LA TESIS

El objetivo de planificar redes de comunicación inalámbricas es el de proporcionar una metodología inteligente para identificar, evaluar y asignar los recursos de la red de manera óptima.

En base a lo anterior y a los retos que presentan los sistemas 3G, el objetivo de este trabajo de tesis es el de proponer una metodología que permita determinar la viabilidad técnica y económica de implantar un sistema de comunicaciones móviles celulares de Tercera Generación. La meta de este estudio es investigar los factores que tienen mayor impacto en el proceso de planificación de un sistema móvil celular.

I.4 CONTRIBUCIONES DE ESTE TRABAJO DE TESIS

Las principales contribuciones que se esperan obtener en este trabajo de tesis son:

- Desarrollar un modelo espacial de canal radio que pueda aplicarse en sistemas móviles con antenas adaptivas y que permita el desarrollo satisfactorio de implantar nuevos sistemas 3G.
- Proponer una metodología y una herramienta de cómputo que permitan evaluar la cobertura y capacidad de un sistema de comunicaciones móviles celulares CDMA, considerando el modelo espacial de canal radio.
- Identificar una nueva metodología que permita realizar evaluaciones de viabilidad de nuevas tecnologías desde una perspectiva técnica y económica.
- Desarrollar una herramienta de cómputo que permita identificar y analizar los factores que tienen mayor impacto en la toma de decisiones de proyectos de inversión.
- Analizar las implicaciones técnico-económicas que conlleva emigrar una red de comunicaciones móviles de Segunda Generación a una red 3G.

I.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En la Figura 1 se ilustra la estructura de este trabajo de tesis como apoyo a la introducción y motivación descrita en este capítulo. En el capítulo II se ofrece una perspectiva histórica, incluyendo características técnicas y económicas, de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles celulares, desde los sistemas de Primera Generación hasta el desarrollo de las técnicas CDMA en los sistemas comerciales 3G. Aquí se describen las posibles opciones tecnológicas para emigrar a un sistema 3G y lo complejo que puede llegar a ser este proceso de substitución tecnológica.

En el capítulo III se introduce el concepto de la Relación Portadora-Interferencia (SIR) de un sistema DS-CDMA y se derivan las expresiones para el cálculo de interferencia

interna (Intracelular) e interferencia externa (Intercelular) que influyen en la estimación de capacidad. La capacidad del sistema se obtiene fijando un valor máximo de probabilidad de interrupción, es decir, la probabilidad de que no todos los usuarios activos puedan alcanzar la calidad deseada en un instante determinado. Por último se discuten los factores que incrementan la capacidad de un sistema CDMA.

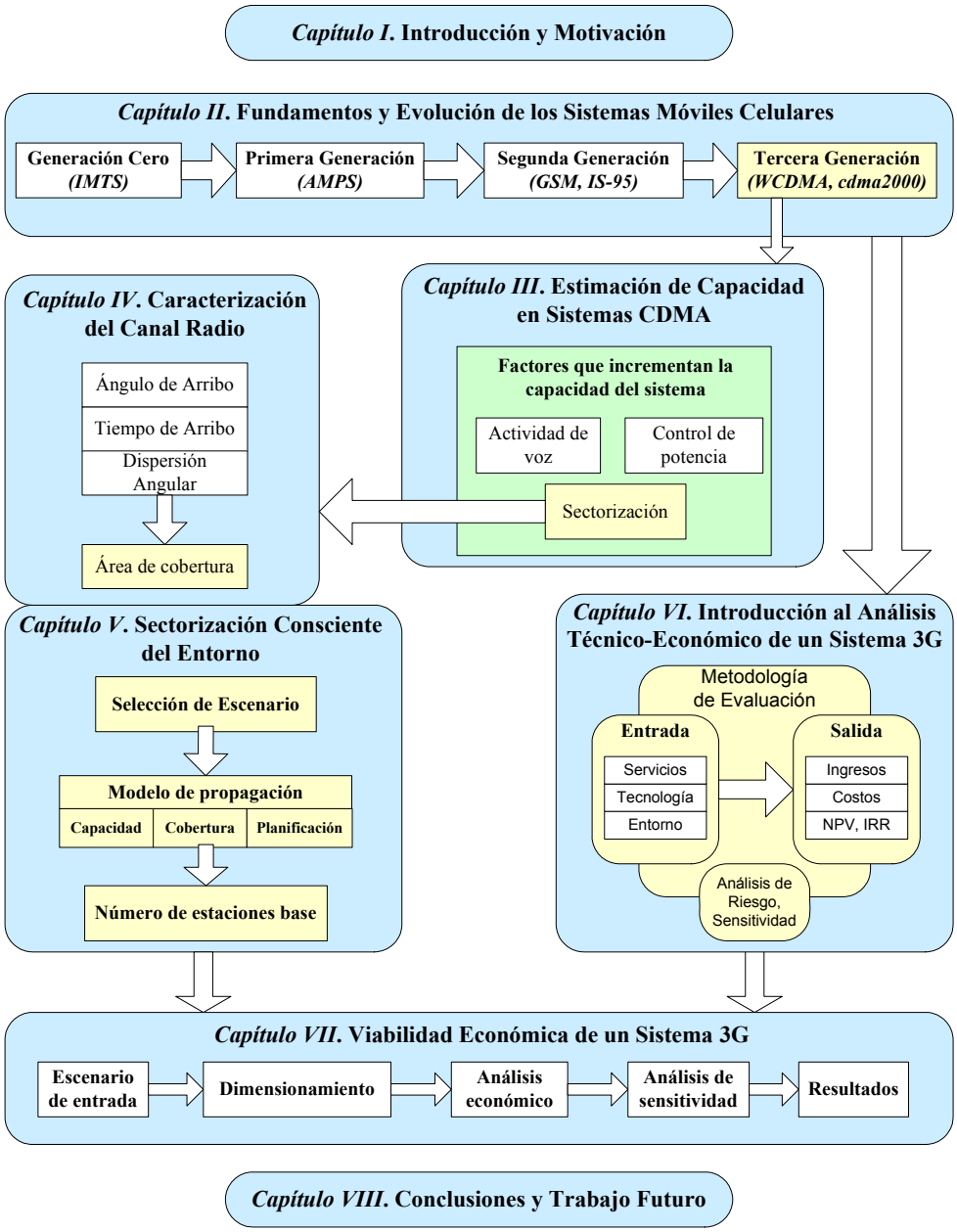


Figura 1. Estructura de la Tesis.

En el capítulo IV se plantea el análisis, simulación y evaluación del modelo de canal radio GSBGM (*Geometrically Single Bounce Gaussian Model*), que utiliza una distribución Gaussiana de dispersores alrededor del Terminal móvil, con este modelo la estación base tendrá la capacidad de determinar el ancho del patrón de radiación para dar cobertura en un sector de la célula. Se demuestra y se concluye que este modelo de canal radio es aplicable tanto en entornos macrocelulares como microcelulares.

En el capítulo V se analiza y evalúa la introducción de utilizar una sectorización consciente del entorno en el proceso de planificación de una red 3G, se considera el modelo de canal radio GSBGM visto en el capítulo IV. El procedimiento de análisis de capacidad considera una descripción estática de la red celular como se describió en el capítulo III, tomando en cuenta la interferencia intracelular e intercelular en un entorno multicelular.

En el capítulo VI se describen algunos de los modelos comerciales y académicos que realizan evaluaciones técnico-económicas. Además se explican algunos conceptos y terminología necesaria para realizar un análisis económico. Por último se determina la viabilidad económica de implantar la tecnología de antenas consciente del entorno en un sistema de comunicaciones móviles celulares aplicando el modelo TERA.

En el capítulo VII se propone una metodología técnico-económica que evalúa la viabilidad de implantar estrategias de evolución de redes celulares hacia un sistema 3G. En el capítulo II se describieron algunas tecnologías disponibles para esta evolución. Se generan varios modelos de redes que utilizarán los operadores como oportunidad de inversión tecnológica para ofrecer servicios de nueva generación. La evaluación considera aspectos técnicos, tales como, el dimensionamiento de la red, la cantidad de usuarios, el tráfico y la capacidad de la red, así como también parámetros económicos, como por ejemplo, costos de instalación de operación y mantenimiento de cada elemento de la red, precios del servicio que ofrece la red y datos de mercado de la región donde se ofrecerá el servicio.

Finalmente, el Capítulo VIII presenta las conclusiones de este trabajo de investigación y futuras líneas de investigación en donde pueden aplicarse algunos de los resultados que se obtuvieron en este trabajo de tesis.

Capítulo II

Fundamentos y Evolución de los Sistemas Móviles Celulares

En menos de tres décadas las comunicaciones móviles celulares han atravesado por una evolución acelerada en varias generaciones Tecnológicas, a causa de una vertiginosa demanda de movilidad y portabilidad en las comunicaciones, la cual no se previó en sus inicios. En este capítulo se ofrece una perspectiva histórica, incluyendo características técnicas y económicas, de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles celulares, desde los sistemas de Primera Generación hasta el desarrollo de las técnicas CDMA, en los distintos sistemas comerciales 3G. Aquí se describen las posibles opciones tecnológicas para emigrar a un sistema 3G y lo complejo que puede llegar a ser. Por último, se presentará una visión general del estado actual del desarrollo de sistemas 3G en las principales regiones del mundo.

II.1 EL CONCEPTO CELULAR EN LOS SISTEMAS MÓVILES.

El concepto celular surge por la necesidad de compartir el espectro radioeléctrico, tomando en cuenta que éste es un recurso limitado en las comunicaciones móviles. El concepto se centra en la idea de controlar la energía radioeléctrica dentro de un área espacial, llamada célula, por lo que el mismo espectro de frecuencias puede utilizarse tantas veces como sea posible, dentro de cada célula [Lee, 1989, Webb, 1998 y Rappaport, 2002].

Cuando un mismo recurso es susceptible de utilizarse por varios usuarios independientes, aparece entre ellos la necesidad de establecer un protocolo de acceso múltiple, con el fin de gestionar el recurso en cuestión (frecuencia, tiempo o códigos). Si no se considera algún tipo de protocolo, podrían ocurrir conflictos cuando más de un usuario quisiera acceder al recurso al mismo tiempo. En los sistemas móviles celulares, las técnicas de acceso múltiple comúnmente adoptadas son Acceso Múltiple por División de

Frecuencia (FDMA), Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) y el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), descritos con mayor detalle en [Rappaport, 2002].

II.2 EVOLUCIÓN DE LOS PRIMEROS SISTEMAS MÓVILES CELULARES

La evolución histórica de los sistemas de comunicaciones móviles se puede estructurar en varias etapas o generaciones, que agrupan sistemas de características técnicas similares y coincidentes en el tiempo. En la Figura 2 se puede observar esta clasificación, además de la relación de descendencia entre dichos sistemas [Holma y Toskala, 2000].

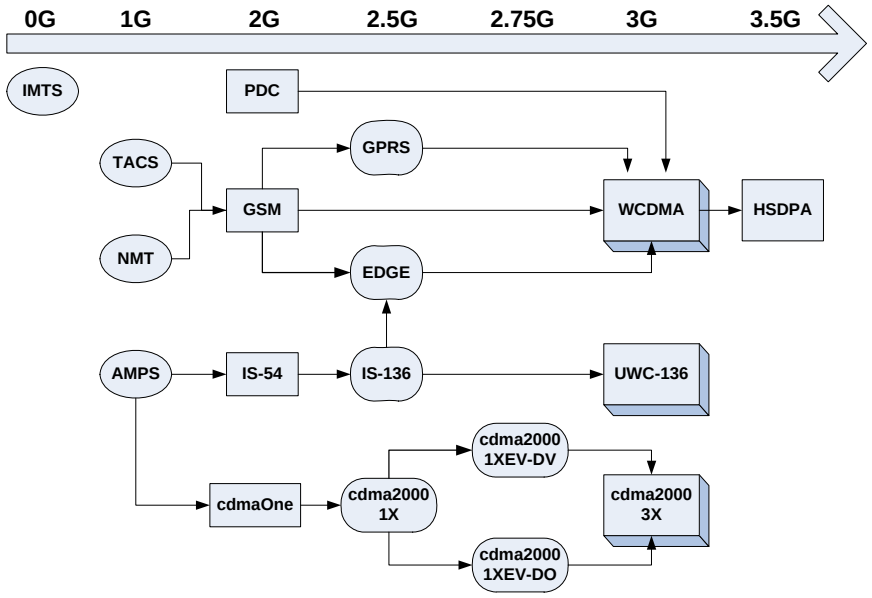


Figura 2. Evolución hacia los Sistemas de Tercera Generación (3G).

II.2.1 Generación Cero

Los sistemas de la Generación Cero, considerados como sistemas no celulares, utilizaban estaciones base ubicadas en lugares elevados, con radios de cobertura de entre 50 y 70 km. Para lograr dicha cobertura se empleaban receptores satelitales distribuidos estratégicamente en toda el área de cobertura, y utilizaban canales analógicos con

modulación en frecuencia tanto para voz como para la señalización, con separación en frecuencia (FDD) entre canales y entre sentidos de transmisión.

Estos sistemas se saturaron rápidamente, debido a la poca cantidad de canales y a la gran extensión de la zona de cobertura de las estaciones base. La solución a este problema de capacidad llegaría posteriormente con la aplicación del *concepto celular*, el cual, pese a haber sido propuesto en 1947, sólo sería realizable varias décadas mas tarde.

Dentro de esta categoría, el sistema más importante es el IMTS (Improved Mobile Telephone System), el cual ofreció el primer servicio público de telefonía móvil a mediados de los años 60 en Estados Unidos.

II.2.2 Primera Generación

Los sistemas móviles de Primera Generación (1G), algunos de los cuales todavía están en funcionamiento, hacen uso del concepto celular "clásico", que se basa en la división del área de cobertura en celdas y en la reutilización de frecuencias. Estos primeros sistemas emplean canales de tráfico de voz analógicos, de 30 KHz de ancho de banda, modulados en frecuencia (FM). Los cuales introducen la señalización digital en la interfaz radio para transmitir información de control.

El primer sistema comercial de esta generación es el AMPS (Advanced Mobile Phone System), que se desarrolló en Estados Unidos en los 1970s [Rappaport, 2002]. A partir de este sistema se desarrollaron otros casi idénticos en diferentes países (con la adaptación a las bandas de frecuencias de cada uno), como el TACS (Total Access Communication System) en el Reino Unido y en España, el NMT (Nosdiska Mobil Telefongruppen), que comenzó a funcionar en Noruega, Suecia, Finlandia y Dinamarca en 1981. Todos estos sistemas tienen como características comunes que son incompatibles entre sí y además utilizan tecnología FDMA, es decir, a cada canal se le asigna una banda de frecuencia única en cada celda.

II.2.3 Segunda Generación

La transición de los sistemas 1G a los sistemas digitales de Segunda Generación (2G) se realizó para solucionar algunos problemas de los sistemas analógicos como un servicio deficiente al sobrepasar el número de usuarios que se podían atender en el ancho de banda asignado, así como otros problemas de calidad, seguridad y confidencialidad.

En 1993 se inició el desarrollo comercial de los sistemas de Segunda Generación (2G), cuyas características principales fueron proporcionar transmisión de voz digital de banda angosta y un servicio de datos de velocidad limitada (9.6 kbps), aunque aún persistían las incompatibilidades entre los sistemas 2G [Rappaport, 2002]. La integración de técnicas de procesamiento digital permitió disminuir los problemas de interferencia, lo que permitió diseñar sistemas con celdas de menor tamaño al que se utilizaba en los sistemas 1G, y con ello reducir el ancho de banda espectral para cada usuario e incrementar la capacidad del sistema (tres o cuatro veces la capacidad de los sistemas 1G), utilizando el mismo recurso espectral y sin agregar estaciones base [Ojanpera y Prasad, 1998].

Uno de los principales sistemas de esta generación fue el estándar celular digital IS-54, o AMPS Digital (Aprobado en 1989 por la Asociación de Industrias de Telecomunicaciones[1]-TIA), en el cual se transmite señales de voz digital a una velocidad de 10 kbps utilizando modulación $\pi/4$ DPSK (Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura Diferencial) y multicanalizadas en tiempo. Utilizaba canales de tráfico de 30 KHz de ancho de banda, lo que permitía transmitir 3 llamadas simultáneas por un solo canal (30 KHz/10 kbps). El sistema IS-54 posteriormente se mejoró, convirtiéndose en el sistema IS-136 al agregársele señalización digital.

Al mismo tiempo, entre 1989 y 1993, un equipo de ingenieros de la compañía Qualcomm, encabezados por A.J. Viterbi, llevaron a cabo una serie de estudios teóricos

[1] Asociación de industrias en Estados Unidos con capacidad de elaborar estándares interinos (interim standards), los cuales en ocasiones se convierten en estándares plenos.

(véase Gilhousen *et al.*, 1991 y Viterbi y Viterbi, 1993]), que mostraban las ventajas de las técnicas CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) en el entorno móvil celular. Asimismo, se llevó a cabo una extensa campaña de pruebas de campo para demostrar la viabilidad práctica del sistema, demostrando que con esta tecnología se podría alcanzar hasta 10 veces mayor capacidad que con otros sistemas digitales [Viterbi y Padovini, 1992]. En 1993 se aprobó el estándar IS-95 como segundo estándar norteamericano de comunicaciones móviles digitales y el primero que utiliza la técnica de espectro disperso (spread spectrum).

En Europa la Segunda Generación ha estado representada por el sistema GSM (Sistema Global para comunicaciones Móviles), cuyo objetivo principal fue el de unificar los servicios de telefonía celular entre los múltiples países de ese continente. Desde su lanzamiento al mercado en 1992, GSM se extendió por todo el mundo en sus versiones de 900, 1800 y 1900 MHz [Steele, 1995]. GSM emplea canales de tráfico de 200 KHz de ancho de banda multicanalizados en frecuencia (FDMA), donde cada canal se divide en 8 ranuras multicanalizadas en tiempo (TDMA), permitiendo 8 llamadas simultáneas por portadora con una velocidad de transmisión de 270.8 Kbps. Actualmente, el sistema GSM continúa como la tecnología celular dominante en el mercado global con el 75.6%[2] (ver Figura 3) de los usuarios móviles (1370 millones de usuarios), y pone en buena posición a la tecnología de Tercera Generación (3G) en los mercados mundial y latinoamericano [EMC, 2005].

A pesar de que los sistemas 2G se diseñaron con perspectivas a futuro para permitir un entorno multi-operador, no dejan de estar básicamente optimizados para transmisión de voz y de algún servicio de valor de agregado en modo circuito, tales como servicios de Fax o acceso a Internet (correo electrónico). Lo anterior presenta limitaciones no sólo en términos de la velocidad de transmisión, sino también de la eficiencia en el uso de los recursos, pues este tipo de aplicaciones se caracterizaban por generar la información en ráfagas por lo que el circuito no se utiliza gran parte del tiempo. Por lo tanto, fue necesario

[2] En marzo de 2005, GSM alcanzó la meta de los 1,000 millones de abonados en el mundo, sumándose a las computadoras personales y a los aparatos de Televisión en términos de penetración global [3GAmericas,2004]

ampliar las capacidades de los sistemas de comunicaciones móviles para satisfacer, a mediano plazo, las exigencias de los servicios de datos y por otro lado reducir el precio de conexión para los usuarios. En consecuencia, era deseable el diseño de nuevos sistemas que fueran capaces de adaptarse a las nuevas características del tráfico mediante técnicas de transmisión orientadas a paquetes, dando lugar a los sistemas que se conocen como sistemas de 2.5 Generación.

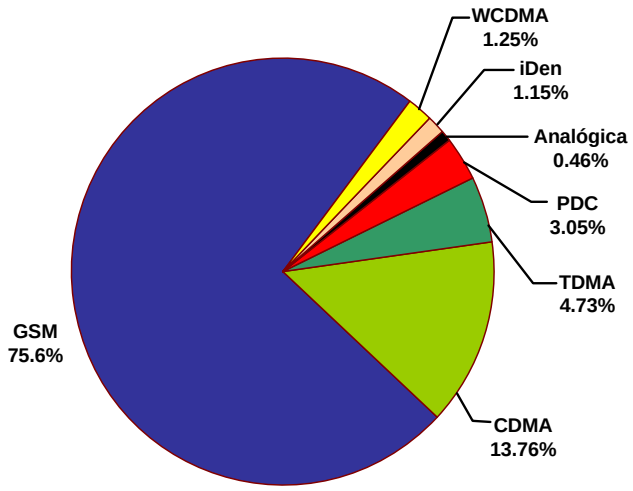


Figura 3. Distribución mundial de suscriptores por tecnología. 1802 millones de usuarios en el mundo, junio del 2005.

II.2.4 Transición hacia 3G: Sistemas celulares de 2.5 Generación

La llamada sociedad de la información demanda cada vez mas disponer de servicios de datos tales como correo electrónico, acceso a redes corporativas, acceso a Internet, videoconferencia, y comercio electrónico, entre otros. Además, el usuario desea mantenerse informado cuando se desplaza de un lugar a otro, disfrutando de los servicios anteriormente mencionados en cualquier lugar y en cualquier momento.

Los sistemas celulares de 2.5 Generación (2.5G) se utilizan actualmente para facilitar el cambio de sistemas 2G hacia los sistemas 3G, que transmitirán su información en formato de paquetes y ofrecerán a los operadores telefónicos responder a las exigencias de los usuarios en cuestión de servicios de datos inalámbricos. Los principales sistemas celulares de 2.5G que se emplean actualmente son el estándar IS-95B y los que se

consideran como la evolución natural del sistema GSM, conocidos como GPRS (Sistema General de Transmisión de Datos mediante Paquetes de Información) y EDGE (Evolución Mejorada de las Velocidades de Datos) [Faccin *et al.*, 1999].

Los sistemas **IS-95B** se están implantando en varios países alrededor del mundo, ya que una de sus características principales es que ofrecen acceso a servicios de datos a alta velocidad (hasta 115.2 Kbps por canal) en formato de conmutación de paquetes sobre un canal dedicado de 1.25 MHz de ancho de banda. Este sistema permite atender a 64 usuarios diferentes de manera simultánea sobre un mismo canal, aunque por la técnica que se utiliza para dividir el canal se alcanza un caudal eficaz de 64 kbps por canal, disponible para un solo usuario [Rappaport, 2002].

Por otro lado, **GPRS** es un servicio de valor agregado que permite enviar y recibir información sobre una red telefónica móvil. Al igual que IS-95B, GPRS utiliza técnicas de conmutación de paquetes con el fin de utilizar ancho de banda solamente cuando se envían datos, por lo que a través de un mismo canal pueden viajar paquetes de diferentes usuarios a velocidades de 14.4 kbps por ranura de tiempo, consiguiendo un caudal eficaz de 115 kbps [Bates, 2002],[Faccin *et al.*, 1999] y [Halonen, 2002]. GPRS es adecuado para manejar tráfico a ráfagas, como el que se encuentra en Internet o en redes de área local.

El siguiente paso para los operadores móviles GSM/GPRS en el camino para ofrecer servicios móviles de 3G es utilizar la tecnología **EDGE**[3] (Mayores Velocidades de Datos para la Evolución de GSM). EDGE es una tecnología de datos inalámbrica que soporta velocidades de datos teórica de 547.2 kbps (velocidad pico), con velocidades promedio de entre 110-130 kbps, esto es tres o cuatro veces superior la capacidad de transmitir datos con respecto a GPRS [Furuskar *et al.*, 1999]. Tecnológicamente utiliza canales de 200 KHz de ancho de banda, lo que significa que no requiere un gran bloque de

[3] EDGE es una mejora de la interfaz de aire que habilita más ancho de banda para el usuario mediante la utilización de un esquema de modulación de mayor nivel 8PSK.

espectro inalámbrico y puede desplegarse en las bandas de frecuencia que actualmente se utilizan para los sistemas celulares de 800, 900, 1800 y 1900 MHz [Halonen, 2002].

A la fecha, EDGE tiene un mercado cautivo potencial de *casi 250 millones de clientes* a partir de la base de usuarios actual de los 71 operadores en 49 países que están desplegando EDGE en el mundo. En muchos mercados, como los de América Latina y Estados Unidos, donde aún debe otorgarse espectro para 3G, EDGE brinda a los operadores una solución que les permite ofrecer servicios 3G, sin necesidad de esperar a recibir más espectro radioeléctrico. Este es un tema de importancia, ya que muchos países de Latinoamérica y Europa Oriental han sufrido constantes postergaciones en el otorgamiento de licencias del espectro, y es muy poco probable que vaya a asignarse espectro para 3G en esas regiones antes de que termine el 2005 [UMTS-FORUM, 2004].

II.3 SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN (3G)

El concepto de 3G surgió inicialmente en el seno de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) con el nombre de FPLMTS (Sistema de Telecomunicaciones Terrestre Móvil y Público del Futuro), y posteriormente se cambió a IMT-2000 (Sistema Móvil Internacional de Telecomunicaciones 2000), que además de ser más sencillo de pronunciar, evoca la idea del concepto que tenía la ITU de Tercera Generación al definir sus requisitos: la banda de frecuencia en que debería operar (2000 MHz), la capacidad del sistema (2000 kbps) y el año en que las especificaciones radio deberían estar listas [Prasad *et al.*, 2000, DaSilva y Fernandes, 1998 y Erben *et al.*, 1996].

Varios organismos de estandarización regionales estuvieron involucrados en el proceso de definición de la tecnología de interfaz radio para los sistemas 3G. En respuesta a una petición formal hecha por la ITU en 1998, se presentaron inicialmente diez especificaciones técnicas que podían utilizarse para la interfaz aérea; dos europeas por parte de la ETSI (Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones), cuatro por parte de la TIA de Estados Unidos, dos por la TTA (Asociación de Tecnologías de

Telecomunicaciones) de Corea, una por parte de la ARIB (Asociación de Industrias de la Radio y Negocios) de Japón y una por parte de la CATT (Tecnología de Telecomunicaciones de la Academia de China) de China.

En la Tabla I donde se muestran algunas características de las propuestas que se enviaron a la ITU, se puede observar que excepto en dos de las propuestas (la UWC-136 norteamericana y la DECT Europea) que se basan en tecnología TDMA, la técnica de acceso radio con mayores posibilidades de elegirse para los sistemas 3G fue la DS-CDMA (Acceso Múltiple por División de Código- Secuencia Directa). A pesar de eso, fue necesario realizar otro consenso para decidir cuales de las candidaturas cumplían con los requisitos de la 3G. Como consecuencia y por intereses políticos y económicos, se produjo una convergencia entre varias de las propuestas, que, a su vez, tuvo el efecto de propiciar la creación de lo que se denomina la *Asociación de Proyectos (Partnership Projects)*. Su objetivo era proporcionar un foro, dentro del cual pudieran colaborar las diversas organizaciones de normatividad y estándares de las diferentes regiones del mundo, para decidir y definir entre las nuevas propuestas que resultaron de la convergencia entre las candidaturas presentadas por dichas organizaciones, cuál sería la interfaz aérea que se utilizaría en los sistemas 3G.

En concreto, se establecieron dos *Asociaciones de Proyectos*, el 3GPP *(Third Generation Partnership Project),* para armonizar las propuestas **WCDMA** europeas y asiáticas, compatibles con los estándares IS-136 y GSM y el grupo 3GPP2 *(Third Generation Partnership Project 2)* para armonizar las propuestas **cdma2000** americanas y coreanas compatibles con el estándar IS-95, en sus modalidades de Secuencia Directa (DS) y Multiportadora (MC).

En el 2000 la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones identificó nuevas bandas de frecuencias para las redes 3G (2500-2690 MHz, 1710-1885 MHz, y 806-960 MHz) [ITU, 2000a]. Y finalmente, en ese mismo año se llegó a la especificación detallada

de los cinco modos definitivos para la interfaz radio de los Sistemas de Tercera Generación [ITU, 2000b]:

- DS-CDMA: para los sistemas WCDMA europeo y japonés.
- DS-CDMA y MC-CDMA: para los sistemas cdma2000 estadounidense y coreano.
- CDMA-TDD: para sistemas europeo WCDMA modo TDD
- TD-SCDMA: para el sistema chino, que utiliza CDMA-TDD
- TDMA con Portadora Única: para el sistema UWC-136, con características comunes al modo de transmisión por paquetes GPRS, GSM y EDGE.

Por la importancia y desarrollo comercial de los sistemas cdma2000 y WCDMA, sobre todo para los intereses de este trabajo de tesis, se describirán las características más importantes de estos sistemas en las siguientes subsecciones.

Tabla I. Propuestas de Interfaz Aérea para los sistemas 3G, 1998.

Interfaz Aérea	Modo de operación	Método de Duplexaje	Organismo/País
cdma2000	-Multi-portadora (MC) -Secuencia Directa (DS-CDMA)	FDD y TDD	TIA/Estados Unidos
UTRA	DS-CDMA	FDD y TDD	ETSI/Europa
NA W-CDMA*	DS-CDMA	FDD y TDD	TIPI/ Estados Unidos
WCDMA	DS-CDMA	FDD y TDD	ARIB/Japón
CDMA II	DS-CDMA	FDD y TDD	TTA/Corea
WINS WCDMA	DS-CDMA	FDD y TDD	TIA/Estados Unidos
CDMA I	DS-CDMA	FDD y TDD	TTA/Corea
TD-SCDMA	DS-CDMA	TDD	CATT/China
UWC-136	TDMA	FDD (exteriores) TDD (Interiores)	TIA/Estados Unidos
DECT	TDMA	TDD	ETSI/Europa

**WidebandCDMA para Norte América*

II.3.1 CDMA2000

CDMA2000 es un sistema de tercera generación que cumple con los requisitos del IMT-2000. Se desarrolló como una evolución del sistema CDMA de banda angosta (*cdmaOne* o IS-95B). Una de las ventajas de utilizar CDMA2000, es que los actuales operadores que utilizan tecnología CDMA (ya sea IS-95 o IS95-B) tienen la capacidad de introducir servicios 3G sin tener que hacer un cambio total de sus estaciones base o en la

asignación del espectro, ya que la mayoría de los cambios se realizan por software o en el equipo de banda base [Tiedemann, 2001].

Con el objeto de facilitar la transición de IS-95 hacia 3G, el sistema CDMA2000 específica dos soluciones:

1.- CDMA2000-1X, que utiliza tecnología DS-CDMA y emplea una portadora de 1.25 MHz (de ahí el termino 1X) a una velocidad de chip de 1.2288 Mcps, se considera un sistema 2.5G con velocidades de datos de baja velocidad.

2.- CDMA2000-3X, utiliza ya sea tecnología Multiportadora (Multicarrier), en la cual se emplean tres portadoras de 1.25 MHz cada una (3.75 MHz en total), con una tasa de chip por portadora de 1.2288 Mcps, como se muestra en la Figura 4, o tecnología de Secuencia Directa (DS, Direct Sequence) donde el ensanchamiento se produce con una tasa de chip de 3.6864 Mcps [Prasad *et al.*, 2000].

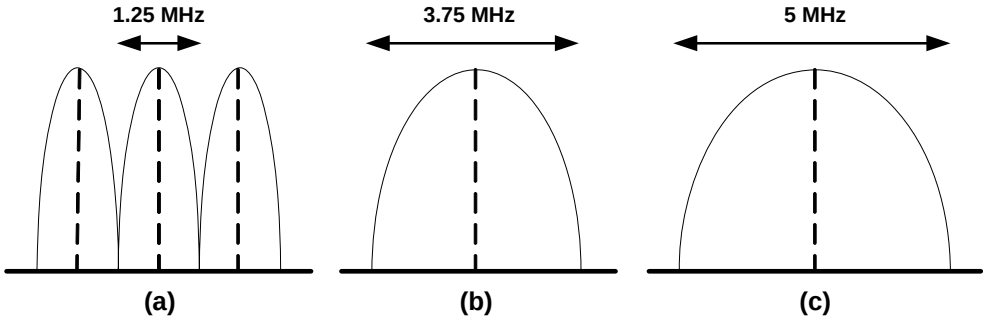


Figura 4. Ancho de Banda de un canal, (a) cdma2000 con Multiportadora, (b) cdma2000 con Secuencia Directa y (c) WCDMA.

II.3.1.1 CDMA2000 1X

CDMA2000-1X es una evolución del estándar IS-95A, utiliza canales con velocidad de transmisión de hasta 307 kbps. Aunque cada usuario puede transmitir hasta 144 kbps en promedio, y dependiendo de la cantidad de tráfico, condiciones de propagación y velocidad del usuario, es suficiente para transportar datos de aplicaciones tales como servicio de Mensajería Corta (SMS, *Short Message Service*), Mensajería Instantánea, descarga de

correo electrónico, fotografías y de sonidos. A pesar de que el crecimiento de los servicios de datos se incrementa día a día, el enfoque principal de este sistema es mejorar la capacidad de los servicios de voz. Lo anterior se debe a que la capacidad de los servicios de datos que se ofrece con CDMA2000-1X no es suficiente para lograr la satisfacción de los usuarios que utilizan servicios de video en tiempo real o juegos interativos en línea. En respuesta a esta demanda y al incremento de aplicaciones de datos inalámbricos se desarrollaron dos especificaciones a los sistemas CDMA2000-1X; el sistema CDMA2000 1X-EVDO y el sistema CDMA2000 1X-EVDV.

El sistema **CDMA2000 1X-EVDO** (Únicamente Evolución de Datos) utiliza portadoras de 1.25 MHz dedicadas específicamente a transmitir datos separadas de las de voz, la velocidad de transmisión que alcanza un usuario por canal es de aproximadamente 2.4 Mbps en el enlace descendente y de 153.6 kbps en el enlace ascendente. Soporta servicios asimétricos no sensibles al retardo (típicamente navegación por Internet), y no soporta servicios simétricos sensibles al retardo (servicios de voz en modo paquetes).

Por otro lado, **CDMA20001X-EVDV** (Integración de Voz y Datos a alta Velocidad), es un sistema integrado que permite a los operadores de redes celulares ofrecer servicios de voz y de multimedia de alta velocidad en forma bidireccional y simultánea sobre un mismo canal de RF de 1.25 MHz de ancho de banda [Frodigh *et al.*, 2001]. Este sistema se desarrolló para explotar la tolerancia a los retardos y la diversidad de tráfico de datos multi-usuario [Soong *et al.*, 2005]. Cuando el sistema presenta exceso de carga de tráfico, la velocidad media que se asegura a un usuario con alta movilidad es de 600 kbps en ambos sentidos. En el caso de baja movilidad en interiores y exteriores, la velocidad pico del enlace ascendente se eleva a 2 Mbps.

1X-EVDV es compatible con IS-95 y CDMA2000, lo que permitirá a los operadores realizar una evolución simple hacia un sistema 3G [Kim y Yi, 2005]. Debido a que 1X-EVDO requiere de un canal dedicado de 1.25 MHz para voz y otro para datos para ofrecer servicios de datos a altas velocidades, no es compatible con los sistemas actuales

CDMA2000-1X-EVDV, por lo que 1X-EVDO necesita un camino de evolución hacia 3G distinto al que presenta 1X-EVDV. Sin embargo, 1X-EVDV y 1X-EVDO eventualmente convergerán y migrarán juntos a un sistema posterior a los sistemas 3G (B3G: *Beyond 3G*) utilizando redes IP comunes.

II.3.1.2 CDMA2000 3X

CDMA2000-3X utiliza tecnología MC-CDMA (Acceso por División de Código con Multiportadora), la cual mantiene la ortogonalidad entre las portadoras IS-95 y CDMA2000. La información se transmite en *M* diferentes portadoras, cada una ensanchada a una velocidad de chip de 1.2288 Mcps [Prasad *et al.*, 2000] y [Holma y Toskala, 2000]. Hasta el momento no se ha anunciado ninguna implementación próxima de estos sistemas, debido principalmente a los problemas de disponibilidad de espectro para la Tercera Generación y a la ausencia de soluciones comercialmente disponibles.

II.3.2 WCDMA o UMTS

El sistema UMTS (Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal) o WCDMA, asegura compatibilidad con los sistemas GSM, IS-136 y PDC, así como con tecnologías 2.5G que trabajan con TDMA. La interfaz aérea WCDMA está diseñada para ofrecer servicios inalámbricos de modo paquete, con el fin de que computadoras, dispositivos de entretenimiento y teléfonos compartan el mismo canal radio y puedan conectarse a Internet cuando y donde el usuario lo desee [Rappaport, 2002].

El procedimiento de acceso al canal radio se basa en la tecnología CDMA con ensanchamiento en secuencia directa (DS-CDMA). A diferencia de GSM (que utiliza 200 kHz de ancho de banda por portadora), WCDMA utiliza portadoras de 5 MHz de ancho de banda en la que todos los usuarios de la celda comparten la misma portadora, utilizando distintos códigos para distinguir su señal [Ojanpera y Prasad, 1998]. WCDMA permite velocidades de transmisión desde 8 kbps hasta 2.048 Mbps por usuario por portadora de 5 MHz, donde cada canal tiene la capacidad de transmitir entre 100 y 350 llamadas

simultáneas de voz, dependiendo de la técnica de sectorización, condiciones de propagación, velocidad del usuario y polarización de la antena.

Actualmente, la tecnología 3G ya no es privilegio de unos cuantos países. La migración a 3G es un proceso más sencillo para los operadores que optaron por GSM o CDMA desde un inicio. En el caso de GSM, se tiene dos posibilidades: 1) emigrar directamente a 3G a través del estándar UMTS (Sistema de Telefonía Móvil Universal) o, en algunos casos, una variante TDMA-EDGE; y 2) emigrar por la tecnología intermedia (2.5G), conocida como GPRS, cuyas velocidades son más modestas pero implica menores gastos de inversión a corto plazo [Downes, 2003]. Para muchos operadores latinoamericanos, el camino de GPRS parece razonable porque no se sabe exactamente cómo va funcionar 3G en América Latina

Para un operador TDMA las cosas son más complejas porque no tienen un camino directo hacia 3G. Debe elegir entre emigrar primero al mundo GSM o emplear un modelo totalmente nuevo centrado en CDMA. Para cualquier selección, es necesario hacer una valoración legítima y válida de las ventajas y desventajas de cada camino y especialmente de los riesgos inherentes de escoger una tecnología sobre la otra. Se podría decir que ésta es la gran pelea que se está desarrollando en las empresas de telecomunicaciones, ya que el botín no es pequeño: en marzo del 2004 existían 100 millones de suscriptores TDMA en toda América Latina [EMC, 2004].

II.4 ESTADÍSTICAS Y ESTADO ACTUAL.

Actualmente existen en el mundo 1802 millones de usuarios móviles [EMC, 2005], 225 millones más que los que se tenían hace 12 meses, lo que representa un incremento del 19.7% en un año. En la Figura 3 se puede observar la distribución mundial de usuarios móviles por tecnología.

Como se puede observar en la figura anterior, la tecnología GSM continúa como la tecnología celular dominante en el mercado global con el 75.60% de los usuarios móviles,

y pone en buena posición a la tecnología UMTS en el mercado latinoamericano. La tecnología TDMA representa el 4.73% de los usuarios móviles en el mundo, 40% menos que hace un año, lo que significa que esta tecnología está dando los primeros pasos para su evolución hacia alguna de las propuestas 3G ya sea WCDMA o cdma2000. Un dato importante es que el 92% de estos usuarios TDMA se encuentran en el continente americano además que es la única tecnología que se utiliza en prácticamente todos los países del continente. Tiene una amplia cobertura entre la población de Estados Unidos, que cuenta con servicio de uno o más operadores, y es la única tecnología con cobertura nacional en Brasil, Colombia, Ecuador, México, Nicaragua y Panamá.

Por otro lado, la tecnología CDMA ofrece sus servicios al 13.76% del mercado global con 207 redes que dan servicio a 256 millones de usuarios [Internet, 2005], sin embargo, muy pocas empresas han decidido actualizarse a 3G bajo la tecnología CDMA2000. Cabe aclarar que, CDMA2000 es un claro dominante en el mercado 3G, ya que el 30% de los usuarios CDMA utilizan tecnología 3G, aproximadamente 80 millones, frente a los 22.44 millones de usuarios W-CDMA que cuentan con sólo el 1.25% del mercado global, con 55 redes comerciales distribuidas en Europa y Japón. Aunque a principios de este año, en el continente Africano, los operadores comerciales EMTEL y Telecom Mobile, comenzaron a prestar servicios de datos 3G en la Isla Mauricio y Argelia respectivamente [Gozalvez, 2005].

Hasta hace un año, en América Latina y el Caribe CDMA estaba como la segunda tecnología después de TDMA y por delante de GSM, sin embargo 12 meses después, GSM se encuentra como la tecnología líder del continente con el 39% del mercado, seguida por el sistema TDMA y en tercer lugar la tecnología CDMA con el 24% de los usuarios. Cabe destacar que la presencia de CDMA adquiere mayor relevancia por la existencia de 123 operaciones comerciales de CDMA2000 1X y veintidós redes CDMA2000-1XEV-DO distribuidas en Asia, América y Europa, siendo la única tecnología de 3G disponible en Latinoamérica actualmente (en Brasil y en República Dominica) [UMTS-Forum, 2005].

Sin dejar de lado Asia, la región con mayor cantidad de usuarios móviles en el mundo, con 695.2 millones (ver Figura 5), está respaldando con fuerza la tecnología TD-SCDMA (Acceso Múltiple por División de Código Síncrono-División por Tiempo) que competirá con las dos tecnologías 3G de mayor aceptación actualmente, WCDMA, y CDMA2000 [Hsiao-Hwa *et al.*, 2002]. China, (que cuenta con el 51.5% de los usuarios móviles de Asia), terminó las pruebas de esta tecnología, y comenzará a emitir licencias para este tipo de servicios a comienzos del 2006. Se estima que TD-SCDMA tendrá su mayor proyección a finales del 2008, con el desarrollo de los Juegos Olímpicos de Beijing y que con esto se convierta en la tecnología 3G de mayor demanda en China a pesar de haber ingresado tarde al mercado [Darling, 2005], [TD-SCDMA, 2005].

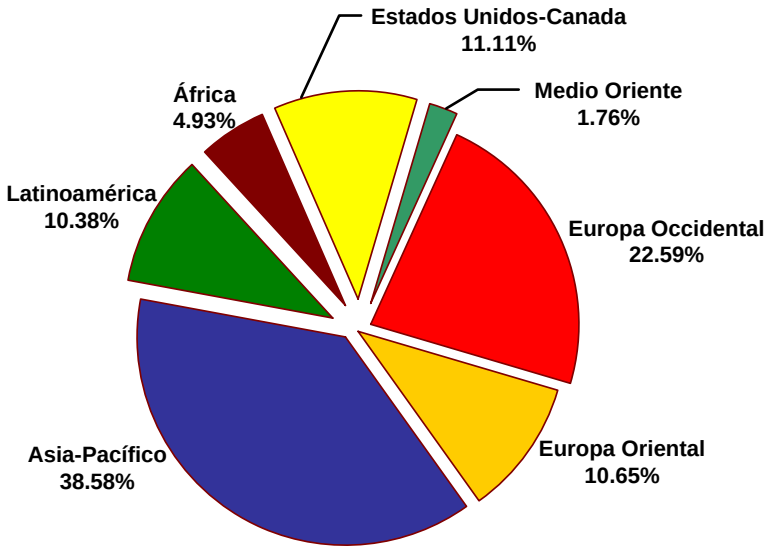


Figura 5. Distribución mundial de suscriptores móviles por región. 1802 millones de usuarios en el mundo, junio del 2005.

A pesar de que la instalación de infraestructura 3G continúa con retrasos, algunas empresas anuncian para el 2006 la disponibilidad de la tecnología HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access). La tecnología HSDPA (considerada como tecnología 3.5G) consiste en utilizar un canal compartido adicional en el enlace descendente que mejora significativamente la capacidad máxima de transferencia de información hasta alcanzar tasas de 14 Mbps. Además, NTT DoCoMo, la empresa más grande de comunicación móvil

en Japón, realizó con éxito experimentos al aire libre de transmitir datos a una velocidad de 1 Gbps usando tecnología de cuarta generación (4G). Con su sistema, que llevará por nombre, "Super G", ofrecerá descarga de archivos hasta de 100 Mbps y transmisión de datos hasta de 50 Mbps.

II.5 CONCLUSIONES

El principal desafío que enfrentan los operadores móviles en el continente americano es la falta de espectro radioeléctrico para ofrecer servicios 3G y, en la mayoría de los casos, las pocas probabilidades de poder adquirirlo en el corto plazo. Esto hace que sea imperativo adoptar tecnologías que maximicen el uso eficiente del espectro dentro de la banda de frecuencias ya otorgada por el gobierno. Este es un tema más apremiante para los operadores móviles interesados en introducir aplicaciones de próxima generación para sus usuarios ya que tienen que aceptar que deben hacerlo usando el ancho de banda existente.

A pesar de lo anterior, para los próximos años están programados mas lanzamientos de tecnología 3G en América Latina, y las operadoras saldrán de una cadena de valores a la que estuvieron acostumbrados por 100 años. Los retrasos serán inevitables, hasta superar los problemas de desarrollo de tecnología y que la mayoría de la población se adapte y adopte los servicios 3G, probablemente hasta después del 2005.

En este capitulo se describieron las características principales de las diferentes generaciones de sistemas móviles celulares y la complejidad que existe al migrar hacia un sistema 3G. Sin embargo, ya se estableció la interfaz aérea que utilizarán los sistemas 3G más comerciales como UMTS y CDMA2000. En el siguiente capitulo se realizará la evaluación de capacidad de estos sistemas utilizando la técnica DS-CDMA (Acceso Múltiple por División de Código con Secuencia Directa). Lo anterior refleja la evaluación técnica de un sistema 3G.

Capítulo III

Estimación de Capacidad en Sistemas Móviles CDMA

El método de Acceso Múltiple por División de Código-Secuencia Directa (DS-CDMA), que constituye la base de los sistemas 3G en su versión de banda ancha, es una técnica de acceso múltiple en la que todos los usuarios comparten el mismo canal de comunicaciones durante el tiempo que están activos, lo que produce mayor interferencia en el canal inalámbrico. Esta interferencia es la principal limitación en la capacidad de tráfico de dichos sistemas.

En este capítulo se introduce el concepto de la Relación Portadora-Interferencia (SIR) de un sistema DS-CDMA y se derivan las expresiones para el cálculo de Interferencia Interna (Intracelular) e Interferencia Externa (Intercelular) que influyen en la estimación de capacidad. La capacidad del sistema se obtiene fijando un valor máximo de probabilidad de interrupción, es decir, la probabilidad de que no todos los usuarios activos puedan alcanzar la calidad deseada en un instante determinado. Y por último se discuten los factores que pueden incrementar la capacidad de un sistema CDMA.

III.1 ANTECEDENTES

Una de las características principales de los sistemas DS-CDMA es que, en la medida en que las interferencias multiusuario que se generan en el sistema sean de banda ancha, es posible que células adyacentes operen también al mismo tiempo y a la misma frecuencia, siempre y cuando las transmisiones que se efectúen utilicen secuencias de códigos diferentes. Se podría decir que el despliegue de las redes CDMA es más inmediato que el caso TDMA en cuanto a planificación de frecuencias se refiere, ya que en CDMA puede hacerse un re-uso completo de frecuencias (agrupamiento de tamaño K=1). Por lo tanto, el precio que se debe pagar por este re-uso audaz de frecuencia es un aumento en la interferencia, lo que produce una componente de interferencia intracelular (que proviene de

los usuarios de la misma célula) y otra componente de interferencia intercelular (proveniente del conjunto de células adyacentes).

El análisis y estimación de la capacidad de un sistema DS-CDMA no es un tema nuevo, sin embargo, en la literatura se presentan distintas formas de evaluar la cantidad máxima de usuarios que puede soportar simultáneamente este tipo de sistemas. Una característica común de estos primeros estudios es que consideran una sola clase de servicio y se centran en aspectos de transmisión y propagación, donde suponen una distribución espacial fija de los usuarios con llamada en curso, e ignoran la variabilidad de la carga del tráfico en el sistema.

Por ejemplo, en el análisis clásico de capacidad de [Gilhousen *et al.*, 1991] se supone una distribución de usuarios determinista y uniforme, además de que modela como fenómenos aleatorios únicamente el desvanecimiento por sombra y la actividad de voz de los usuarios. La asignación de usuarios a estación base (EB) se realiza por mínima atenuación, y se supone que el control de potencia establece el nivel recibido a un valor objetivo igual para todos los usuarios, sin tener en cuenta restricciones de potencia transmitida. Hipótesis similares constituyen la base de los análisis de Milstein *et al.* [1992] y Jalali y Mermelstein [1994]. En el primero se modelan, además, de manera explícita el desvanecimiento multitrayectoria (con distribución Rayleigh y no selectivo en frecuencia) y la diversidad de recepción en la EB (con combinación de MRC, Maximum Ratio Combining). En el segundo se consideran los efectos de desvanecimiento lento y multitrayectoria del canal, modelando los procesos de codificación, modulación, diversidad y control de potencia mediante una combinación de estudio teórico y simulación.

En [Viterbi y Viterbi, 1993] se incluye la característica de variabilidad del tráfico, se modela un cierto número de usuarios con llamada en curso en cada célula utilizando una función de distribución de Poisson, esto es una hipótesis poco realista, ya que suponen que éste numero es igual en todas las células, restando validez al análisis. Sin embargo, ésta restricción se elimina en [Corazza *et al.*, 1998 y Evans y Everitt, 1999], que extiende los

análisis de [Gilhousen *et al.*, 1991] y [Viterbi y Viterbi, 1993] incluyendo el concepto de variabilidad del tráfico. Ambos estudios se limitan al enlace ascendente con asignación por mínima atenuación y una sola clase de servicio. En [Chan y Hanly, 2001] se calcula analíticamente la probabilidad de interrupción (outage probability), modelando el tráfico como un proceso de Poisson espacial, pero realiza simplificaciones importante, tales como considerar una sola clase de servicio, potencia de transmisión ilimitada y control de potencia por nivel recibido (no por SIR). En [Chatovich y Jabbari, 1999] se analiza el efecto de la distribución espacial de usuarios sobre la capacidad del sistema, eficiencia de reutilización y las potencias transmitidas. La utilización de diferentes tipos de servicios se investiga en [Zou y Bhargava, 1998], solo que aquí se considera que el tráfico es fijo (determinista), e igual en todas las células. El análisis de compromiso de capacidad-cobertura se realiza en [Veeravalli y Sendonaris, 1999], con el inconveniente de que los resultados sólo reflejan el análisis de una célula aislada, aunque aportan una visión adecuada del fenómeno.

En las siguientes secciones se explicará, tomando en cuenta algunas características descritas anteriormente, la primera parte de la metodología que se utilizará en este trabajo de tesis para realizar la evaluación técnica de un sistema 3G/DS-CDMA.

III.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS REDES CELULARES

Siguiendo la clasificación de [Simon *et al.*, 1994], pueden agruparse los sistemas celulares en dos categorías: limitados por dimensiones y limitados por interferencia.

- Los sistemas **limitados por dimensiones** se basan en dividir el espectro disponible en canales ortogonales. Puesto que, el número de canales ortogonales que se pueden establecer para un ancho de banda dado es muy reducido, es necesario reutilizar los canales para atender la zona de cobertura con calidad adecuada. Esta reutilización se lleva a cabo agrupando las células en *clusters* de tal forma que las células co-canal estén lo suficientemente alejadas como para que la interferencia sea admisible. El máximo nivel de interferencia tolerable determina el factor de reutilización, y éste indica la

capacidad del sistema. Los sistemas clásicos FDMA y TDMA pertenecen a esta categoría.

- En los sistemas **limitados por interferencia** se establece un conjunto teóricamente ilimitado de canales *no ortogonales*. Debido a la existencia de un gran número de canales, éstos no se reutilizan, sino que cada comunicación utiliza un canal diferente. Por lo tanto, la degradación en este caso no se produce por reutilización de canales, sino porque estos, al no ser ortogonales, interfieren unos con otros. La máxima cantidad de usuarios activos simultáneos que puede atender el sistema estará limitado por el nivel de interferencia máximo admisible.

La diferencia fundamental entre las dos clases de sistemas es que en los segundos la capacidad está limitada directamente por la interferencia de acceso múltiple (MAI), mientras que en los primeros está limitada por la interferencia de una forma indirecta, a través del factor de reutilización.

III.3 RELACIÓN SEÑAL-INTERFERENCIA

La planificación de una red 3G tiene por finalidad realizar los cálculos de cobertura y capacidad de tráfico, con objeto de optimizar el despliegue de las estaciones base y así cumplir los objetivos de calidad de servicio que establece el operador.

Los valores de capacidad y cobertura, deben garantizar que se cumpla el requisito de calidad de recepción en todas las estaciones base (EB). Es decir, el valor de la relación de energía de bit con respecto a la densidad espectral de ruido (E_b/N_o) debe ser superior a un valor de umbral, que dependerá del tipo de servicio y de la máxima tasa de errores de bit (*BER*: *Bit Error Rate*) aceptable. Esta cantidad de E_b/N_o se relaciona de manera convencional con la relación Señal-Interferencia (SIR) al reconocer que la energía por bit es equivalente a la potencia promedio de la señal que se asigna a cada bit, tal que;

$$E_b = S \cdot T \tag{1}$$

donde S es la potencia de la señal del usuario y T es el tiempo de duración del bit. Tomando en cuenta que la velocidad de bit, R_b, es el inverso de T; y sustituyendo en la ecuación (1) entonces se tiene que;

$$E_b = \frac{S}{R_b} \tag{2}$$

Ahora la densidad espectral de la potencia del ruido, N_o, se considera como la interferencia que existe en todo el ancho de banda, W, del canal de transmisión, es decir,

$$N_0 = \frac{I}{W} \tag{3}$$

La interferencia total que se produce en la EB de un sistema DS-CDMA se define como;

$$I_{total} = I_{\text{int}ra} + I_{\text{int}er} \tag{4}$$

donde I_{intra}, es la interferencia que producen aquellos usuarios que se encuentran en la misma célula. Mientras que I_{inter} es la interferencia total producida por todos aquellos usuarios, que se encuentran en las células vecinas, y son atendidos por otras EB.

La capacidad del enlace ascendente en una red CDMA se mejora cuando la interferencia total en cada célula se minimiza. En [Stavroulakis, 2003] se describen y analizan algunas de las técnicas que caracterizan y minimizan la interferencia de un canal inalámbrico. Para ilustrar lo anterior, se considera un área de servicio con K células, sirviendo a N_k usuarios en cada célula. Asumiendo un control de potencia perfecto, (la señal que transmite cada usuario se recibe en la EB con la misma potencia) para cada usuario en la *j-ésima* celda, la relación E_b/N_o está dada por;

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{N_k} = \frac{S \cdot L_o(\theta_o, d_o)}{I_{\text{int}ra} + I_{\text{int}er}} \cdot \frac{W}{R_b} \tag{5}$$

donde $L_o(\theta_o,d_o)$ representa las perdidas por trayectoria de la señal transmitida del móvil de prueba en la dirección, θ_o y d_o representa la distancia entre la terminal móvil (TM) y la BS. El cálculo de las pérdidas por trayectoria se analizará en la siguiente sección. La relación

W/R_b se le conoce como la ganancia de procesado del sistema [Qualcomm, 1993] y [Rappaport, 2002]. El cálculo de I_{intra} e I_{inter} se discutirán en la sección III.4.

III.3.1 Cálculo de las pérdidas por trayectoria

En este trabajo de tesis las pérdidas por trayectoria, L_p, se modelaron como la suma de dos componentes logarítmicos,

$$L_p[dB] = \overline{L_p}[dB] + \zeta[dB] \tag{6}$$

donde $\overline{L_p}$ representa la media de las pérdidas por trayectoria y ζ es una variable aleatoria con distribución log-normal, que representa las pérdidas por sombreo.

Para calcular el promedio de las pérdidas por trayectoria, $\overline{L_p}$, se utilizó el modelo COST231-Hata, recomendado por el grupo 3GPP para los sistemas de Tercera Generación, en el reporte ARIB TR-T12-25.996 V6.1.0 [3GPP, 2003], donde;

$$\begin{aligned}\overline{L_p}[dB] = {} & [44.9 - 6.55\log_{10}(h_{EB})]\log_{10}(r) + 45.5 + (35.46 - 1.1h_{TM})\log_{10}(f_c) - \\ & 13.82\log_{10}(h_{EB}) + 0.7(h_{TM}) + C\end{aligned} \tag{7}$$

En la ecuación (7) $h_{EB,}$ es la altura de la EB en metros, h_{TM} es la altura de la TM en metros, f_c es la frecuencia de operación del canal de operación en MHz, r es la distancia entre la TM y la EB en metros, y C es un factor de corrección (C= 0 dB para áreas suburbanas y C=3 dB para áreas macrocelulares urbanas).

Fijando los parámetros h_{EB}=32 m , h_{TM}=1.5 m y f_c=2000 MHz e ignorando en los cálculos el factor de corrección C y la difracción por filo de navaja (Knife-edge), $\overline{L_p}$ se reduce a lo siguiente;

$$\overline{L_p}[dB] = 31.5 + 35\log_{10}(r) \tag{8}$$

Ahora bien, las pérdidas por sombreo representan las variaciones lentas de la señal que se representa por una distribución log-normal, con media cero y desviación estándar δ. El valor de δ depende del tipo de área de servicio, esto es, un valor de δ=5 dB se utiliza

para áreas abiertas, mientras que δ=6 a 8 dB se utilizan en áreas urbanas densamente pobladas. Para este trabajo se tomó un valor de δ=8 dB [Ramakrishna, 2002].

III.4 INTERFERENCIA

Como se mencionó en la sección anterior la interferencia total que se presenta en un sistema DS-CDMA consiste de la suma de la interferencia interna más la interferencia externa. Análisis cuantitativos han demostrado que la cantidad de ruido térmico que se presenta en estos sistemas es insignificante en comparación con la interferencia que ocurre debido a la presencia de otros usuarios en el sistema [Viterbi, 1995], [Gilhousen *et al.*, 1991].

III.4.1 Interferencia Interna

La interferencia intracelular (I_{intra}) consiste en la superposición de señales de otros usuarios móviles en la EB receptora. Casi todo el ruido que recibe la EB se debe a señales interferentes. La capacidad del sistema se maximiza al hacer que cada potencia de la señal sea la misma y lo más bajo posible para lograr una calidad aceptable del enlace [Lee y Miller, 1998]. Sea N el número de usuarios móviles por célula (o sector). Se supone que S es la potencia de la señal recibida por una EB cuando existe un control de potencia perfecto, por lo que este valor es el mismo para cada TM en la misma célula (ver Figura 6), por lo que la interferencia intracelular es igual a

$$I_{\text{int}ra} = \sum_{j=1}^{N-1} S_j \cdot L_j(\theta_j, d_j) \tag{9}$$

donde S_j es la potencia de transmisión del móvil j y $L_j(\theta_j,d_j)$ son las perdidas por trayectoria que sufre la señal que transmite el usuario j en la dirección θ_j al viajar una distancia d_j.

Considerando que existe un control de potencia, el valor de S_j cambia dinámicamente con el fin de mantener una calidad aceptable de la señal para el usuario j, por lo que S_j es aleatorio y por consecuencia I_{intra} también lo es. De esta manera, dado N usuarios por célula, la interferencia total nunca es mayor de $S(N-1)$.

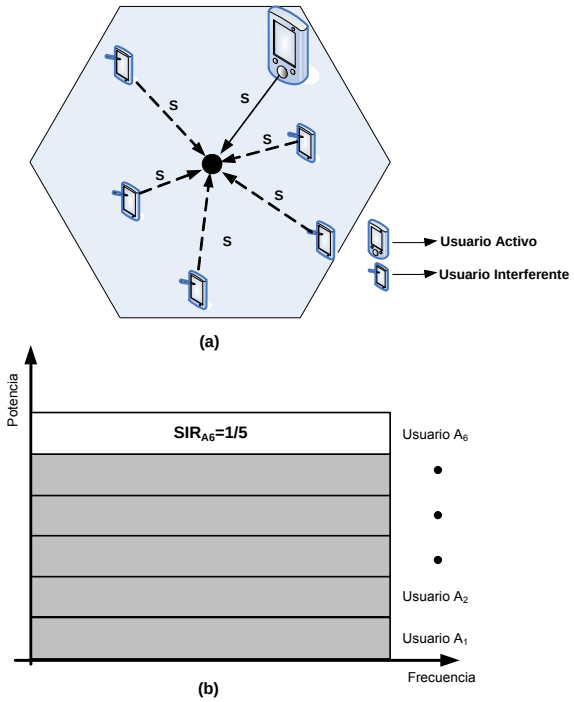


Figura 6. (a) Interferencia Intracelular en el canal ascendente con control de potencia perfecto. (b) En los sistemas CDMA la interferencia total en la banda de frecuencia es igual a la suma de las potencias de cada usuario. Por lo que, si existen seis usuarios en una célula, con control de potencia perfecto, el valor del SIR que experimenta cualquiera de los usuarios es de 1/5.

III.4.2 Interferencia Externa

La interferencia intercelular que produce un usuario en el enlace ascendente, se puede observar como [Gilhousen *et al.*, 1991],

$$I(r,r_0) = S \cdot \left(\frac{10^{\zeta_0/10}}{r_0^n} \right) \left(\frac{r^n}{10^{\zeta/10}} \right) = S \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^n 10^{\frac{(\zeta_0 - \zeta)}{10}} \leq 1 \qquad (10)$$

donde r representa la distancia entre el TM interferente y su EB local, EB_1, mientras que r_o representa la distancia que existe entre el TM interferente y la EB de la célula de referencia, como se observa en la Figura 7. Los parámetros ζ_0 y ζ son dos variables aleatorias del tipo log-normal que representan los errores ocasionado por el sombreo y la propagación multitrayectoria con respecto a su EB local y a la EB de referencia, respectivamente. Ya que ζ_0 y ζ son variables aleatorias independientes con media cero y desviación estándar δ,

la diferencia (ζ_0-ζ), es también una variable aleatoria con media cero y varianza $2\sigma^2$. El parámetro *n* es el exponente de pérdidas por trayectoria, el cual asume valores entre 3.5 y 5.5 en ambientes urbanos.

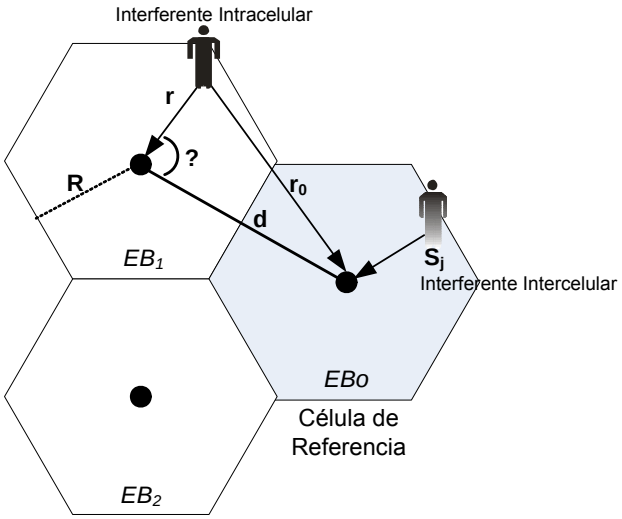


Figura 7. Geometría de la Ubicación de la MS para Evaluar la Interferencia Intercelular.

La ecuación (10) toma en cuenta el hecho de que existe control de potencia perfecto en el enlace ascendente de todas las células. Sea *d* la distancia entre las estaciones base BS_0 y EB_1, y θ la dirección en la cual la TM está localizada con respecto a la línea de unión de las 2 estaciones base, se tiene que;

$$r_0 = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd\cos\theta} \tag{11}$$

La interferencia intercelular total que se recibe en la célula de referencia EB_0 debido a otros usuarios interferentes se determina por

$$I_{\text{int}er} = \sum_{k=2}^{K}\sum_{j=1}^{N_k} S_{k,j}\left(\frac{r_j}{r_{0_{k,j}}}\right)^n 10^{\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j/10\right)} \cdot \Theta\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j, r_{0_{k,j}}/r_j\right) \tag{12}$$

donde

$$\Theta\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j, r_{0_{k,j}}/r_j\right) = \begin{cases} 1, \rightarrow si\left(\dfrac{r_j}{r_{0_{j,k}}}\right)^n 10^{\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j\right)/10} \le 1 \\ 0, \rightarrow otro \end{cases} \tag{13}$$

Se observa que en (12) la primer sumatoria se considera de *k=2* hasta *K* excluyendo la celda de referencia 1 y *K* es el numero total de células vecinas.

Por lo tanto, el E_b/N_o del enlace ascendente se puede calcular al sustituir las ecuaciones (9) y (12) en la ecuación (5) quedando de la siguiente manera;

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{S}{\left(S(N-1) + \sum_{k=2}^{K}\sum_{j=1}^{N_k} S_{k,j}\left(\frac{r_j}{r_{0_{k,j}}}\right)^n 10^{\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j/10\right)}\right)}$$

$$= \frac{1}{\left((N-1) + \sum_{k=2}^{K}\sum_{j=1}^{N_k}\left(\frac{r_j}{r_{0_{k,j}}}\right)^n 10^{\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j/10\right)}\right)} \qquad (14)$$

III.5 ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD EN UN SISTEMA DS-CDMA

En CDMA no existe un valor constaste de la capacidad (como sucede en los sistemas FDMA o TDMA) porque ésta está directamente limitada por la interferencia de la red, y ésta última, a su vez, depende de la dinámica de evolución de tráfico, de la movilidad de los usuarios, o de las condiciones de propagación, entre otros.

La región de capacidad del sistema se define como el conjunto de parámetros para los cuales la probabilidad de interrupción se mantiene por debajo de un umbral predefinido. La probabilidad de interrupción determina el límite de capacidad del sistema, de manera semejante a la probabilidad de bloqueo en sistemas limitados por dimensiones, aunque se deben destacar las siguientes diferencias:

1. La interrupción indica, una situación de congestión instantánea del sistema. Para un número dado de usuarios activos, las fluctuaciones producidas en el sistema por efecto del desvanecimiento, por la actividad discontinua de algunos servicios o por el desplazamiento de los usuarios darán lugar a que en algunos instantes el sistema se degrade y en otros no. El sistema se considera con mayor carga cuanto mayor sea el

porcentaje de tiempo en que se encuentra en situación de interrupción. En los sistemas clásicos, por el contrario, el bloqueo afecta únicamente al acceso de nuevos usuarios; para un numero dado de usuarios aceptados en el sistema, mientras no se produzcan nuevos intentos de acceso o de traspaso no puede producirse una situación de bloqueo.

2. La interrupción es una medida global de congestión, ya que únicamente indica la imposibilidad del sistema de atender a todos los usuarios con una calidad adecuada, sin proporcionar ninguna indicación de cual zona o zonas del sistema son las responsables de tal congestión, o cuales zonas se encuentran con mayor carga de tráfico. El bloqueo en sistemas clásicos, por el contrario, es un concepto local, ya que se aplica a cada célula o sector.

La estimación de capacidad consiste en colocar usuarios en el sistema (tanto en la célula de referencia como en las células vecinas) de forma aleatoria, e incrementar sucesivamente el número de usuarios en el sistema. Cada vez que se agrega un usuario nuevo al sistema, es necesario evaluar el valor del E_b/N_o (visto en la sección anterior) que prevalece en la EB. Se agregarán nuevos usuarios conforme el valor de E_b/N_o sea mayor que el valor del $(E_b/N_o)_{umbral}$ el cual es el objetivo de calidad de la comunicación. En el momento en que un nuevo usuario provoque que el valor de E_b/N_o esté por debajo del valor de $(E_b/N_o)_{umbral}$ este nuevo usuario será bloqueado y la capacidad del sistema se evaluará como el número máximo de usuarios que se pueden soportar con un cierto nivel de calidad en su comunicación. Por lo tanto, la probabilidad de bloqueo o de interrupción de llamadas se define como,

$$P_b = \Pr\left(\frac{E_b}{N_0} \leq \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{umbral} \right) \tag{15}$$

El valor de $(E_b/N_o)_{\text{umbral}}$ que se requiere en un sistema CDMA es aproximadamente de 7.4 dB, para valores de BER que no exceda el valor de 10^{-3} [Gilhousen *et al.*, 1991] y [Wu *et al.*, 1998].

Cuando un usuario quiere iniciar una comunicación, la red debe decidir si será capaz de proporcionar la Calidad de Servicio (QoS) que demanda dicho usuario, así como determinar si, en caso de la incorporación del mismo al sistema, será posible seguir satisfaciendo la QoS de los usuarios ya dentro del sistema con la nueva situación de interferencia que se generará. Por lo visto anteriormente, la interferencia de la red varia a lo largo del tiempo y no es posible conocer cuál será la situación de la misma en un futuro próximo de manera que la decisión de aceptación o rechazo de dicho usuario esté sujeta a error. Si se rechaza al usuario cuando en realidad la red podría tener capacidad de ofrecer el servicio, el operador estaría perdiendo eficiencia en el uso de su red, de la que no obtienen todo el rendimiento que sería posible. Si se acepta al usuario, cuando en realidad la red no tuviera suficiente capacidad, habría usuarios dentro de la red que sufrirían una degradación en su QoS, con el consecuente perjuicio para el operador al disminuir el grado de satisfacción de sus clientes.

III.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CAPACIDAD DE UN SISTEMA CDMA

La capacidad de un sistema CDMA depende de la interferencia introducida por otros usuarios en la misma célula y en células vecinas. Al mismo tiempo también depende de otros factores tales como la actividad de la voz, mecanismos de control de potencia, y el compromiso entre capacidad y cobertura, sectorización, entre otros.

III.6.1 Actividad de Voz

En un sistema limitado por interferencia, cualquier reducción de ésta se traduce directamente en un aumento de la capacidad. En caso de que la actividad de la fuente sea discontinua se puede reducir la potencia de transmisión durante los periodos de inactividad, lo que contribuye a disminuir el nivel global de interferencia, además de incrementar la duración de las baterías en los terminales móviles.

En la ecuación (11) se supone que los usuarios están transmitiendo el 100% del tiempo. En la práctica, un sistema CDMA utiliza un codificador de voz que detecta la actividad vocal y entrega una señal digital cuya velocidad de transmisión varía en función

de la misma. Como las tramas de voz tienen una duración fija, en las tramas con velocidad inferior existen menos bits, que se transmiten con menor potencia (enlace descendente) o se comprimen en el tiempo (enlace ascendente). En los sistemas 3G se utiliza una idea similar para las comunicaciones de voz, tomando en cuenta la función de transmisión discontinua (DTX, Discontinuous Transmission) que incorpora el codificador de voz. En este trabajo se asume un factor de actividad de voz υ=37.5% o 3/8.

III.6.2 Control de Potencia

El control de potencia es imprescindible en sistemas CDMA para evitar que la señal deseada sea enmascarada por otras señales recibidas con una amplitud mayor (efecto cerca-lejos). Es necesario controlar la potencia de transmisión de cada señal, de modo que todas se reciban con su nivel objetivo, el cual depende de las características de cada comunicación (velocidad y calidad) y de las condiciones de propagación (dispersión temporal y efecto Doppler). Los algoritmos de control de potencia se basan en mediciones de la potencia de recepción o del E_b/N_o [Ariyavisitakul, 1994].

III.6.3. Compromiso entre Cobertura y Capacidad

La limitación por interferencia permite compartir los recursos radioeléctricos entre las células de manera eficiente y automática. En un sistema limitado por dimensiones con asignación fija de canales, si una célula *B* se encuentra congestionada (es decir, todos los canales ocupados), cualquier intento de comunicación por algún usuario en ésta célula se rechaza, aunque existan canales disponibles en alguna célula vecina *B'*. Las técnicas de asignación dinámica de canal tratan de minimizar este problema, permitiendo que se compartan canales entre células adyacentes. Sin embargo, utilizar un canal libre de *B'* en la célula *B* puede incidir negativamente en las demás células vecinas de *B*, lo que resta flexibilidad a este mecanismo. En cambio, CDMA comparte los recursos de manera natural, si la carga de *B'* disminuye, la interferencia en *B* también lo hará, con lo que *B* podrá aceptar mayor numero de llamadas simultáneas. En otras palabras, la situación de

menor carga de *B'* beneficia a *B*. Como consecuencia de esto, el número de canales de una célula no es fijo, sino que depende de la carga de todas las células en el sistema.

Esta característica se puede interpretar en términos de un compromiso entre capacidad y cobertura, donde la cobertura en una célula depende de su carga, de tal forma que las células con mayor carga de tráfico "se reducen en tamaño", cediendo parte de su carga a las células vecinas, para que el tráfico en el sistema sea uniforme.

Al compartir la carga de tráfico se tiene como resultado un incremento en la capacidad, utilizando los recursos de manera más eficiente, constituyendo una de las ventajas fundamentales de CDMA. Sin embargo, desde el punto de vista del diseño de la red, aumenta la complejidad en el proceso de planificación y dimensionamiento de la red de comunicaciones móviles.

III.6.4 Sectorización

Las técnicas de sectorización y el empleo de estructuras celulares jerárquicas [Shapira, 1994], tienen aplicación en redes CDMA, con incrementos de capacidad normalmente mas elevados que en sistemas clásicos. La división de una célula en sectores, proporciona un aumento de la carga admisible igual al número de sectores multiplicado por un factor que tiene en cuenta el traslape de patrones de radiación de sectores adyacentes y que se sitúa en torno al 85% [Qualcomm, 1993]. En cambio, la mejora por sectorización en sistemas clásicos se obtiene al reducir el factor de re-uso.

III.7 CONCLUSIONES

En este capítulo se discutieron los fundamentos para la evaluación de capacidad de un sistema celular CDMA en función de la probabilidad de interrupción, tomando en cuenta la interferencia intracelular e intercelular. Las consideraciones de la sección III.6 muestran la necesidad de un estudio detallado, que tenga en cuenta simultáneamente todos los aspectos relevantes del sistema.

Con la llegada inminente de los sistemas 3G y la implantación de nuevos servicios, es imprescindible pensar en utilizar técnicas que permitan aumentar la capacidad de dichos sistemas. En este aspecto, y como se mencionó en la sección III.6, se plantea como solución utilizar una técnica de "*Sectorización Consciente del Entorno"* con características de adaptar el área de cobertura de las estaciones base. En los siguientes capítulos se discutirá la técnica propuesta en esta tesis para la evaluación técnica de la capacidad en un sistema 3G/DS-CDMA utilizando Sectorización Adaptiva. En primer lugar, en el capítulo IV se analiza detalladamente el modelo de canal radio, capaz de adaptar el ancho de haz de la antena tomando en cuenta las condiciones de las señales multitrayectoria, y en el capítulo V se evalúa el incremento de capacidad en el sistema, utilizando el algoritmo de control de acceso (visto en este capítulo) que se basa en fijar el valor máximo de probabilidad de interrupción, es decir, la probabilidad de que no todos los usuarios activos puedan alcanzar la calidad deseada en un instante.

Capítulo IV

Caracterización del Canal Radio

Los sistemas de comunicaciones móviles están experimentando un claro giro hacia la provisión de servicios de 3G. Uno de los aspectos más característicos de estos servicios son las elevadas tasas de transmisión que demandan, lo cual, unido al hecho de que el número de usuarios no deja de crecer, provocará a mediano plazo un incremento en el tráfico que tendrán que soportar las redes móviles. Esto obliga a buscar alternativas que puedan manejar estos incrementos de capacidad y que al mismo tiempo proporcionen ventajas competitivas a los operadores celulares [Monogioudis *et al.*, 2004].

En éste capítulo se plantea el análisis, simulación y evaluación del modelo de canal radio GSBGM (*Geometrically Single Bounce Gaussian Model*), que utiliza una distribución ***normal*** de dispersores alrededor del TM. Con este modelo la EB tendrá la capacidad de determinar el ancho del patrón de radiación para dar cobertura en un sector de la célula. Además, se obtienen las funciones de densidad de probabilidad del Ángulo y Tiempo de Arribo y se caracteriza la región dispersora por medio del AS. Se demuestra y se concluye que este modelo de canal radio es aplicable tanto en entornos macrocelulares como microcelulares.

IV.1 INTRODUCCIÓN

La capacidad de usuarios que pueden atender estos sistemas móviles 3G no es la única limitación inherente, también se pueden destacar los siguientes [M.Chryssomallis, 2000]:

1. El desvanecimiento multitrayectoria que degrada la funcionalidad del canal de comunicaciones.
2. La interferencia co-canal, que disminuye el valor C/I de la señal recibida.
3. La dispersión temporal de la señal.

Desafortunadamente en las comunicaciones móviles celulares se desconoce a-priori el comportamiento de las señales transmitidas por los usuarios, por lo que es necesario entender las propiedades espaciales de un canal de comunicaciones inalámbrico. Un estudio de evaluación de capacidad de sistemas móviles, que se realizó en la Universidad de Suecia por [Zetterberg y Ottersten, 1995] indica que, en sistemas donde se utilizan antenas inteligentes, antenas adaptivas y/o dispositivos de conformación de haz, es necesario contar con modelos de canal radio que consideren las características espacio-temporal del canal. También deben proporcionar información del Ángulo de Arribo (AoA), Tiempo de Arribo (ToA) y Dispersión Angular (AS, por sus siglas en inglés *angle spread*) de las señales multitrayectoria. Conocer estos parámetros le permite a la EB determinar el número y localización de cada uno de los dispersores dentro del escenario celular, así como determinar el ancho de haz que transmitirá la EB para dar cobertura al usuario que solicita el servicio.

Se han propuesto diferentes modelos para caracterizar el comportamiento del canal radio, entre los cuales se puede mencionar los modelos geométricos elíptico (GBSBEM: *Geometrically Based Single Bounce Elliptical Model*) y circular (GBSBCM: *Geometrically Based Single Bounce Circular Model*) desarrollados por [Liberti y Rappaport, 1996] y [Ertel y Reed, 1999a] respectivamente. Estos modelos suponen que los dispersores están ubicados aleatoria y uniformemente en un espacio bidimensional alrededor del Terminal Móvil (TM), de acuerdo a una función de densidad espacial. A partir de allí, es posible derivar las funciones de densidad marginal del AoA y del ToA de las componentes multitrayectoria, útiles para determinar las propiedades espaciales del canal radio.

IV.2 GEOMETRÍA Y PLANTEAMIENTO GENERAL DEL MODELO GSBGM

Desde el punto de vista físico, es razonable asumir que la densidad de dispersores disminuye gradualmente conforme aumenta la distancia con respecto a la antena transmisora por lo que los dispersores más alejados tendrán menor contribución en los efectos de la reflexión multitrayectoria que los dispersores cercanos al transmisor. Un

modelo geométrico que describe esta observación es aquel que utiliza una distribución normal de dispersores [Lotter y Rooyen, 1999].

La Figura 8 muestra la geometría y notación empleada para el desarrollo del modelo de canal radio propuesto. De acuerdo a la Figura 8, y considerando como sistema de referencia (en coordenadas rectangulares) los ejes *x'* e *y'*, la EB se encuentra separada del TM por una distancia *D*, formando un ángulo θ_m respecto al eje de las abscisas. Ahora bien si se toma en cuenta el sistema de coordenadas *x* e *y*, el elemento dispersor se encuentra separado de la EB y del TM por una distancia r_b y r_s respectivamente, formando a su vez un ángulo θ_b y θ_s con respecto a la EB y al TM respectivamente.

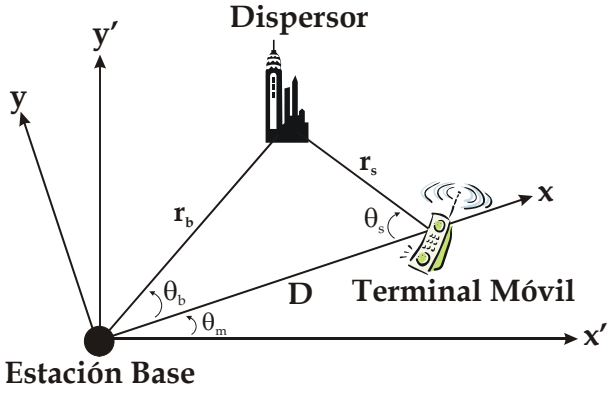


Figura 8. Geometría de dispersores entre Estación Base y Terminal Móvil.

Como puede apreciarse en la Figura 8 la presencia de elementos interferentes dentro del canal de comunicaciones, produce diferentes réplicas de la señal original en la EB conocidas como multitrayectorias, las cuales arriban en diferentes ángulos e instantes de tiempo. En la misma Figura 8 se puede ver que r_s representa la distancia que viaja la señal entre el TM y el dispersor, mientras que r_b representa la distancia que viaja la señal entre el dispersor y la EB.

Aún cuando únicamente se muestra un dispersor en la Figura 8, se supone que existen *n* dispersores distribuidos normalmente en torno al móvil como se muestra en la

Figura 9, y la ubicación de cada uno de ellos se describe por una distribución Gaussiana, delimitados por una región dispersora. La densidad dispersora está dada por la función de distribución

$$f_{x,y}(x,y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_s^2} \cdot e^{\frac{-r_s^2}{2\sigma_s^2}} \tag{16}$$

donde σ_s, es la desviación estándar de la función $f_{x,y}(x,y)$ y representa el ancho de la región dispersora, *srw*.

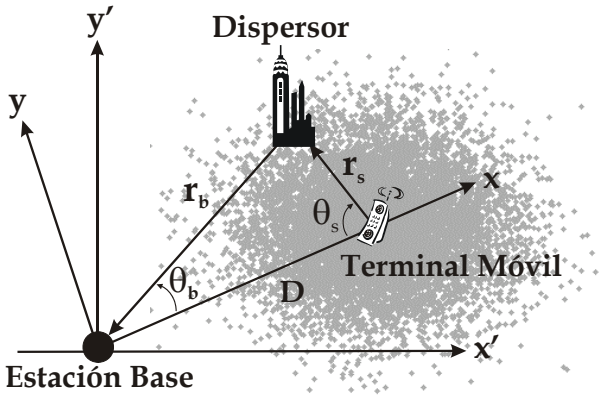


Figura 9. Geometría y distribución de dispersores utilizada en el modelo GBSBGM

Se puede observar en la Figura 9 que si *srw* toma valores mayores a 150 m la EB estaría también dentro de la región dispersora

Tomando en cuenta a [Liberti y Rappaport, 1996], este modelo asume que los elementos dispersores que se encuentran localizados cerca del TM son los que provocan la reflexión multitrayectoria. Bajo esta premisa, y para el desarrollo del modelo, se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Las señales recibidas en la EB son ondas planas que se propagan en el plano horizontal, y por lo tanto, el cálculo del AoA incluye solamente la coordenada azimutal.
2. Los patrones de radiación efectivos son omnidireccionales, tanto para efectos de transmisión como de recepción.

3. Cada dispersor es un elemento radiante con un patrón de radiación omnidireccional.
4. Las señales que se reciben en la EB interactuaron únicamente con un dispersor, de ahí el nombre de *un solo salto o single bounce*.
5. Cada señal multitrayectoria es estadísticamente independiente una de otra en fase y ángulo de arribo. Las fases son independientes y distribuidas uniformemente de 0 a 2π.
6. Las señales multitrayectoria tienen la misma amplitud.

IV.3 FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD CONJUNTA Y DE DENSIDAD MARGINALES DEL AoA Y ToA DEL MODELO GSBGM

Dada una función de densidad espacial de dispersores $f_{r_b,\theta_b}(r_b,\theta_b)$, el objetivo de esta sección es determinar las funciones de densidad marginal del AoA ($f_{\theta_b}(\theta_b)$) y ToA ($f_{\tau}(\tau)$) para el modelo GBSBGM, a partir de la función de densidad de probabilidad conjunta (*fdp*) AoA/ToA ($f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b)$).

IV.3.1 Función de Densidad de Probabilidad Conjunta AoA/ToA

De acuerdo a la Figura 9 y considerando a la EB como el origen, la función de densidad espacial de dispersores $f_{r_b,\theta_b}(r_b,\theta_b)$ (en coordenadas polares) se determina mediante la siguiente expresión [Papoulis, 1991],

$$f_{r_b,\theta_b}(r_b,\theta_b) = \left.\frac{f_{x,y}(x,y)}{|J(x,y)|}\right|_{\substack{x=r_b\cos(\theta_b)\\ y=r_b\sin(\theta_b)}} \tag{17}$$

donde (x,y) representan la ubicación de cada uno de los dispersores y $J(x,y)$ representa la transformación Jacobiana dada por;

$$J(x,y) = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r_b} & \frac{\partial x}{\partial \theta_b} \\ \frac{\partial y}{\partial r_b} & \frac{\partial y}{\partial \theta_b} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\theta_b) & -r_b sen(\theta_b) \\ sen(\theta_b) & r_b\cos(\theta_b) \end{vmatrix}^{-1} = \frac{1}{r_b} \tag{18}$$

Sustituyendo el valor de (18) en la expresión (17) da como resultado que

$$f_{r_b,\theta_b}(r_{b,}\theta_b) = r_b \cdot f_{x,y}(r_b\cos(\theta_b), r_b sen(\theta_b)) \tag{19}$$

El siguiente paso es encontrar una relación entre r_b y el retardo τ de la componente multitrayectoria. Aplicando la ley de cosenos al triángulo de la Figura 9, tenemos que

$$r_s^2 = D^2 + r_b^2 - 2r_b D\cos(\theta_b) \tag{20}$$

El retardo de propagación total de cada componente multitrayectoria se determina por la relación entre la distancia total que recorre la señal y la velocidad de la luz

$$\tau = \frac{r_b + r_s}{c} \tag{21}$$

Por lo que sustituyendo el valor de (20) en la expresión (21) y resolviendo para r_b se obtiene

$$r_b = \frac{D^2 - \tau^2 c^2}{2(D\cos(\theta_b) - \tau c)} \tag{22}$$

Ya que se determinó la relación entre entre r_b y τ, entonces la *fdp* conjunta AoA/ToA ($f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b)$) se representa por la siguiente expresión

$$f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b) = \frac{f_{r_b,\theta_b}(r_b,\theta_b)}{|J(r_b,\theta_b)|}\Bigg|_{r_b=\frac{D^2-\tau^2c^2}{2(D\cos(\theta_b)-\tau c)}} \tag{23}$$

y al igual que en la ecuación (18) el Jacobiano se obtiene de la siguiente manera

$$J(r_b,\theta_b) = \left|\frac{\partial r_b}{\partial \tau}\right|^{-1} = \frac{2(D\cos(\theta_b) - \tau c)^2}{D^2 c + \tau^2 c^3 - 2\tau c^2 D\cos(\theta_b)} \tag{24}$$

sustituyendo el valor de (24) y (19) en la expresión (23) se tiene que

$$f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b) = \frac{D^2 c + \tau^2 c^3 - 2\tau c^2 D\cos(\theta_b)}{2(D\cos(\theta_b) - \tau c)^2} \cdot r_b f_{x,y}(r_b\cos(\theta_b), r_b sen(\theta_b)) \tag{25}$$

donde r_b está dado por la expresión (22), sustituyendo se tiene que la *fdp* conjunta ($f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b)$) está dada por

$$f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b)=\frac{(D^2-\tau^2c^2)(D^2c+\tau^2c^3-2\tau c^2D\cos(\theta_b))}{4(D\cos(\theta_b)-\tau c)^3}\cdot f_{x,y}(r_b\cos(\theta_b),r_b sen(\theta_b)) \tag{26}$$

La ecuación (26) representa la *fdp* conjunta AoA/ToA que se observa desde la EB, en función de una densidad espacial de dispersores arbitraria.

Para establecer la *fdp* conjunta AoA/ToA del modelo GBSBGM, se considera la función de densidad espacial de dispersores de la expresión (16)

$$f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b)=\frac{(D^2-\tau^2c^2)(D^2c+\tau^2c^3-2\tau c^2D\cos(\theta_b))}{4(D\cos(\theta_b)-\tau c)^3}\cdot\frac{1}{2\pi\sigma_S^2}e^{\frac{-r_s^2}{2\sigma_s^2}} \tag{27}$$

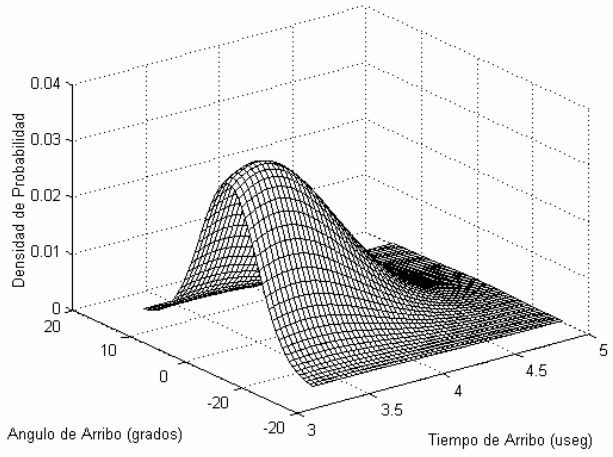
Sustituyendo los valores de r_s y r_b en (27) se tiene entonces que

$$f_{\tau,\theta_b}(\tau,\theta_b)=\frac{(D^2-\tau^2c^2)(D^2c+\tau^2c^3-2\tau c^2D\cos(\theta_b))}{4(D\cos(\theta_b)-\tau c)^3}\cdot\exp\frac{-\left(\frac{2D^2\cos(\theta_b)-2D\tau c-D^2+\tau^2c^2}{2(D\cos(\theta_b)-\tau c)}\right)^2}{2\sigma_s^2} \tag{28}$$

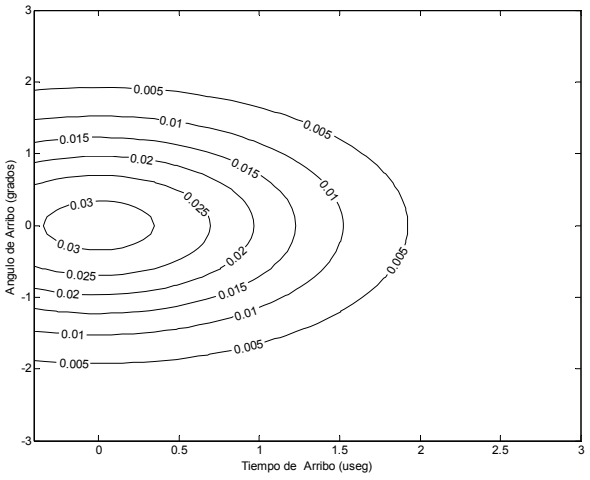
La ecuación (28) representa la función de densidad de probabilidad conjunta AoA/ToA del modelo GBSBGM. La Figura 10 representa gráficamente la expresión (28), para lo anterior se consideraron 10,000 dispersores ubicados espacialmente alrededor del móvil de acuerdo a una distribución normal, un ancho de la región dispersora *srw=100 m* y una distancia entre TM y EB, *D=1 Km.*

En la Figura 10 se puede observar la relación que existe entre el ángulo y el tiempo de arribo de las componentes multitrayectoria recibidas en la EB, las cuales dependen de la posición espacial de los dispersores con los que interactúan. A partir de esta representación tridimensional, es posible obtener información preliminar del entorno espacial desde el punto de vista de la EB en términos de la densidad de dispersores existentes. Se puede observar de la Figura 10 valores máximos en ángulos de arribo a lo largo de la línea de visión directa (cercanos a 0°). Esto se debe a que la mayor contribución de

multitrayectorias que llegan a la EB, se originan por elementos interferentes ubicados en dirección perpendicular a la EB y próximos a la TM. También se observa que el arribo de multitrayectorias se presenta en un intervalo angular de –20° a 20°, este comportamiento se debe a que la altura de la EB es mayor a la altura de los interferentes que se encuentran en las cercanías de la EB. Dicho intervalo angular depende en gran medida de la distancia entre la EB y la TM, y del ancho de la región dispersora en torno al móvil. La caracterización de este intervalo angular se analizará en detalle en la sección IV.4



(a)



(b)

Figura 10. Función de densidad de probabilidad conjunta AoA/ToA para el modelo GBSBGM, (a) gráfica 3D, (b) mapa de contorno 2D.

En la Figura 10 se puede observar la relación que existe entre al ángulo y el tiempo de arribo de las componentes multitrayectoria recibidas en la EB. Estas dependen de la posición espacial de los dispersores con los que interactúan, por lo que a partir de esta representación tridimensional es posible obtener información preliminar del entorno espacial desde el punto de vista de la EB en términos de la densidad de dispersores existentes. Por ejemplo, se puede observar de la Figura 10 valores máximos en ángulos de arribo a lo largo de la línea de vista directa (cercanos a 0°) y para valores de retardo cercanos al umbral (≈ 3.33 μseg), lo anterior se debe a que la mayor contribución de multitrayectorias que llegan a la EB se originan por elementos interferentes ubicados en dirección perpendicular a la EB y próximos a la TM. También se observa que el arribo de multitrayectorias se presenta en un intervalo angular de –20° a 20°. Este comportamiento se debe a que la altura de la EB es mayor que a la altura de los interferentes que se encuentran en las cercanías de la EB. Dicho intervalo angular depende en gran medida de la distancia entre la EB y la TM, así como del ancho de la región dispersora en torno al móvil. La caracterización de este intervalo angular se analizará en detalle en la sección IV.4

Aún cuando los resultados que se presentaron en esta sección predicen de cierta manera algunas características del canal inalámbrico, es preciso derivar, a partir de la *fdp* conjunta AoA/ToA, las funciones de densidad de probabilidad marginales tanto del ángulo como del tiempo de arribo, las cuales se describirán en las siguientes secciones.

IV.3.2 Función de Densidad de Probabilidad Marginal del AoA

El AoA de la Figura 9, θ_b es el ángulo que forma cada componente multitrayectoria con cada elemento sensor del receptor.

La función de densidad de probabilidad marginal ($f_{\theta_b}(\theta_b)$) del AoA, , se obtiene integrando la función de distribución espacial de dispersores, $f_{r_b,\theta_b}(r_b,\theta_b)$ con respecto a r_b, en el intervalo de $r_{bM}(\theta_b)$ a $r_{bm}(\theta_b)$.

$$f_{\theta_b}(\theta_b) = \int_{r_{bm}(\theta_b)}^{r_{bM}(\theta_b)} r_b f_{x,y}(r_b \cos(\theta_b), r_b sen(\theta_b)) dr_b \tag{29}$$

En la Figura 11 se definen los intervalos $r_{bM}(\theta_b)$ y $r_{bm}(\theta_b)$ para una región de dispersores arbitraria.

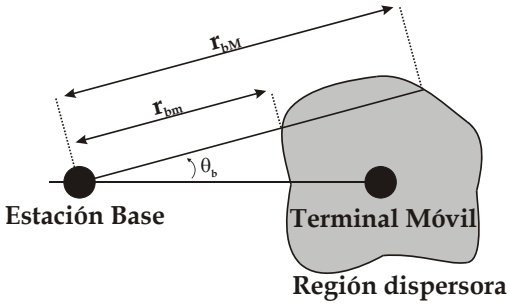


Figura 11. Límites para calcular el ángulo de arribo de las señales multitrayectoria.

Considerando que se utiliza una distribución normal para ubicar a los dispersores, el ancho de la región dispersora podría extenderse hasta el infinito, por lo que el valor del límite superior estaría dado por $r_{bM} \rightarrow \infty$. Siguiendo con estas condiciones, la EB estaría localizada dentro de la región dispersora, lo que se consideraría dentro de la literatura como el caso de un entorno microcelular [Ertel y Reed, 1999a], donde el valor del límite inferior estaría dado por $r_{bm} = 0$.

Sustituyendo la ecuación (16) en (29) se tiene que

$$f_{\theta_b}(\theta_b) = \int_0^{\infty} r_b \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_s^2} e^{\frac{-\left(r_b^2 + D^2 - 2 r_b D \cos(\theta_b)\right)}{2\sigma_s^2}} dr_b \tag{30}$$

Resolviendo (30), se tiene entonces que la función de densidad de probabilidad marginal del AoA, ($f_{\theta_b}(\theta_b)$), está dada por

$$f_{\theta_b}(\theta_b) = \frac{e^{\frac{-D^2}{2\sigma_s^2}}}{\sqrt{2\pi}} + \frac{D\cos(\theta_b)}{\sigma_s 2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-D^2 \sin^2(\theta_b)}{2\sigma_s^2}} \cdot erfc\left(-\frac{D\cos(\theta_b)}{\sigma_s \sqrt{2}}\right) \tag{31}$$

dónde *erfc(x)* es la función de error complementaria.

En la Figura 12 se puede observar la *fdp* marginal del AoA teórico dada por (16) y simulado, para el cual se consideraron 10,000 dispersores ubicados espacialmente alrededor del móvil de acuerdo a una distribución normal, un ancho de la región dispersora *srw=100 m* y una distancia *D=1 Km* entre TM y EB.

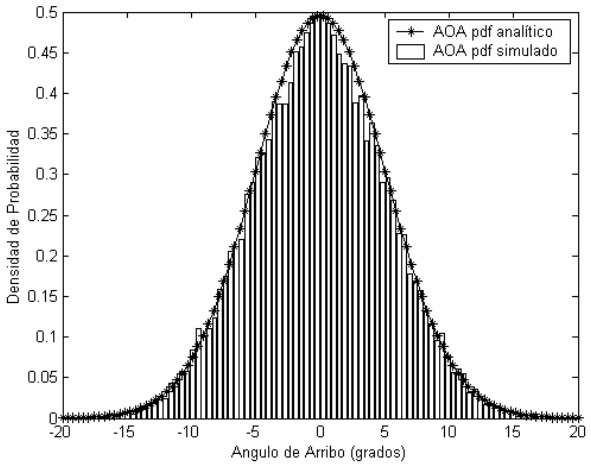


Figura 12. Función de Densidad Marginal del AoA del modelo GBSBGM.

Como se observó en la Figura 10, en la gráfica de la *fdp* del AOA de la Figura 12 las señales multitrayectoria se encuentran concentradas cerca de la línea de visibilidad directa, alrededor de los 0º.

IV.3.3 Función de Densidad de Probabilidad Marginal del ToA

La función de densidad de probabilidad marginal del ToA, $f_\tau(\tau)$, se obtiene, integrando la función de densidad de probabilidad conjunta AoA/ToA sobre los posibles valores del tiempo de llegada, τ, de las señales multitrayectoria. Sin embargo, es necesario encontrar la función de distribución acumulativa *(fdc)* y obtener la derivada con respecto a τ. Para determinar la *fdc* de un τ en particular se consideran todos los retardos menores a τ, es decir, todos los puntos de la región dispersora que contribuirían a esto se encuentran dentro de la elipse $r_b+r_c = c\tau$.

El área de superposición de la elipse con la región dispersora se muestra en la Figura 13, donde A_τ es el área de intersección de la región dispersora con la elipse. Debido a la complejidad de que el ancho de la región dispersora se pueda extender hasta el infinito, aquí se considera que $c\tau$ es constante.

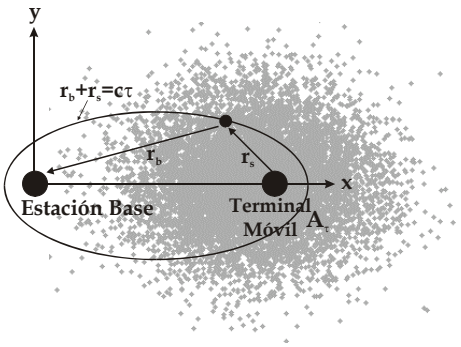


Figura 13. Geometría para calcular el ToA.

Ahora bien, para calcular la probabilidad de que un dispersor se encuentre ubicado dentro de la elipse es necesario considerar una doble integral de la función de densidad dispersora sobre toda la región A_τ, como indica la ecuación (32)

$$f_\tau(\tau) = \frac{d}{d\tau} \int\int_{A_\tau} f_{r_b,\theta_b}(r_b, \theta_b) dr_b d\theta_b \tag{32}$$

La evaluación analítica de las integrales de la ecuación (32) se resuelve convirtiendo en una sola integral y evaluándola por partes cuyo resultado final es

$$f_\tau(\tau) = \frac{Dce^{-\frac{c^2\tau^2}{8\sigma_s^2}}}{4\sigma_s^2\sqrt{\frac{c^2\tau^2}{D^2}-1}} \times \left[\frac{4\sigma_s^2 I_1\left(\frac{Dc\tau}{4\sigma_s^2}\right)}{Dc\tau} + \left(\frac{c^2\tau^2}{D^2}-1\right) I_0\left(\frac{Dc\tau}{4\sigma_s^2}\right) \right] \tag{33}$$

donde $I_n(x)$ es la función de Bessel modificada.

Los resultados analíticos y por simulación de la *fdp* marginal ToA se muestran en la Figura 14.

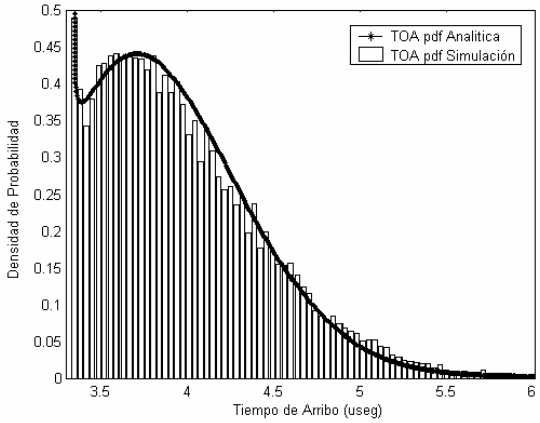


Figura 14. Función de Densidad Marginal del ToA del modelo GBSBGM.

IV.4 DISPERSIÓN ANGULAR (AS) DEL MODELO GSBGM

Las propiedades espaciales del canal radio como la dispersión en tiempo, frecuencia y ángulo, tienen gran impacto sobre el desempeño de los sistemas móviles que utilizan antenas adaptivas. Por lo tanto, caracterizar estas propiedades se vuelve un factor sustancial para el diseño y evaluación del sistema.

Debido a la dispersión que presenta una señal de comunicaciones al viajar por el canal radio, las componentes multitrayectoria de dicha señal llegan a la EB o al TM en diferentes ángulos con respecto a la componente que llega sobre la línea de vista directa. En esta sección analizará la ***Dispersión Angular (AS)*** como responsable del desvanecimiento espacial selectivo dependiendo de si la señal transmitida se refleja por objetos cercanos o lejanos al TM, y como una medida del esparcimiento de los ángulos de llegada de cada una de las componentes multitrayectoria. Para evaluar AS se calcula la desviación estándar de θ_b de la siguiente manera [Petrus y Reed, 2002],

$$AS = \sqrt{\sigma_{\vartheta_b}^2} = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} \theta_b^2 f_{\theta_b}(\theta_b) d\theta_b} \tag{34}$$

Utilizando el teorema de Parseval para series de Fourier [Janaswamy, 2001], la ecuación (34) puede expresarse como

$$AS = \sqrt{\sigma_{\theta_b}^2} = \sqrt{\frac{\pi^2}{3} + 4\pi \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{B_n}{n^2}} \tag{35}$$

Donde B_n es el coeficiente de Fourier dado por

$$B_n = \frac{2}{\pi} \cdot f_{\theta_b}(\theta_b) \int_0^{\pi} \cos n\theta_b d\theta_b \tag{36}$$

Por lo que para encontrar la expresión que determine la dispersión angular de las componentes multitrayectoria, se sustituye en (36) el valor del Angulo de Arribo dado en (28), obteniendo

$$B_n = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} r_b \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_s^2} e^{\frac{-\left(r_b^2 + D^2 - 2 r_b D \cos(\theta_b)\right)}{2\sigma_s^2}} dr_b \int_0^{\pi} \cos(n\theta_b) d\theta_b \tag{37}$$

y se evalúa la segunda integral con respecto a θ_b obteniendo lo siguiente,

$$B_n = \frac{1}{\pi^2 \sigma_s^2} \int_0^{\infty} r_b e^{\frac{\left(r_b^2 + D^2\right)}{2\sigma_s^2}} I_n\left(\frac{r_b D}{\sigma_s^2}\right) dr_b \tag{38}$$

Resolviendo por partes con respecto a r_b la integral (38), se obtiene como resultado el valor del coeficiente B_n, como muestra le ecuación (39).

$$B_n = \frac{D}{2\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{D^2}{4\sigma_s^2}} \cdot \left[I_{\frac{n+1}{2}}\left(\frac{D^2}{4\sigma_s^2}\right) + I_{\frac{n-1}{2}}\left(\frac{D^2}{4\sigma_s^2}\right) \right] \tag{39}$$

Sustituyendo el valor de B_n en (35), se obtiene la expresión analítica que determina la dispersión angular;

$$AS = \sqrt{\frac{\pi^2}{3} + \frac{4\pi D e^{-\frac{D^2}{4\sigma_s^2}}}{2\sigma_s \sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \left[I_{\frac{n+1}{2}}\left(\frac{D^2}{4\sigma_s^2}\right) + I_{\frac{n-1}{2}}\left(\frac{D^2}{4\sigma_s^2}\right) \right] \right]} \tag{40}$$

En la Figura 15 se muestra el comportamiento de AS para el modelo GBSBGM derivado de la expresión (40). Para la obtención de las curvas tanto teórica como de simulación se consideraron 10,000 dispersores, una distancia D entre EB y TM de *1 km* y el ancho de la región dispersora *srw* se considera variable.

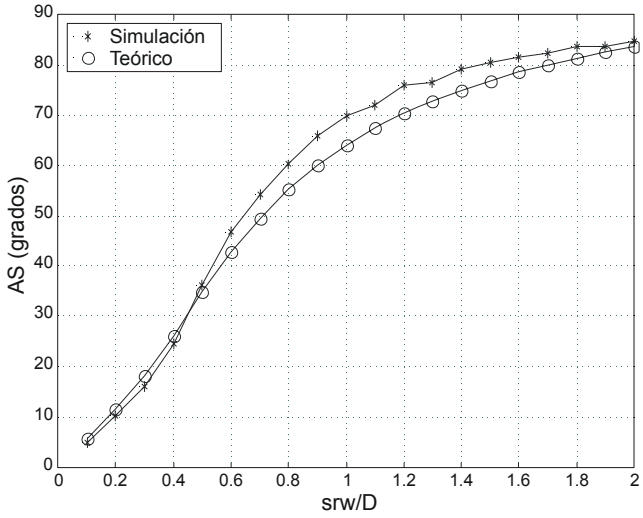


Figura 15. Dispersión Angular del modelo GBSBGM.

De acuerdo a la Figura 15, se puede observar que los resultados están en función de la expresión *srw/D*, que establece la relación entre el ancho de la región dispersora y la distancia de separación entre la EB y el TM. Conforme esta relación se incrementa en el intervalo de $0 \leq srw/D \leq 2$, el valor de AS crece de 0° a aproximadamente 84°. Esto significa que la EB se encuentra rodeada de cada vez de más dispersores conforme el valor de *swr* aumenta. Se puede observar que los resultados que se obtuvieron en el proceso de simulación validan los resultados que se obtuvieron con la ecuación (25) con un error máximo del 4%.

En la Tabla II, se puede observar evaluaciones del AS para diferentes escenarios. Por ejemplo, para un *srw* de 100 m y una distancia de 1 Km entre EB y TM, corresponde un valor de AS de 5.81º, lo que significa que la mayoría de los dispersores que contribuyen con señales multitrayectoria hacia la EB se encuentran ubicados en un intervalo de -5.81°≤

$\theta_b \leq 5.81^o$ con respecto a la EB. A partir de esos parámetros, resultados experimentales reportados por la compañía Ericsson en [Forssén *et al.*, 1994], indican que para un *srw*=80 m y una distancia entre EB y TM de 1 km el valor de AS es igual a 5º.

Tabla II. Evaluación teórica y por simulación del AS

srw (metros)	*D (km)*	*AS (simulación)*	*AS (teórico)*	τ_{max} *(μseg)*
20	1	1.13°	3.96°	3.81
50	1	2.87°	4.18°	4.78
100	1	5.81°	5.93°	5.88
200	1	11.54°	11.7°	8.64
1000	1	60.36°	64°	30.57
1500	1	77.5°	76.9°	42.60

IV.4.1 Comparación del modelo GSBGM con otros modelos de canal radio

En la literatura existen varios modelos de canal radio, con el propósito de modelar la mayoría de las propiedades del canal inalámbrico y cada uno de ellos aplicado a un entorno en particular. En esta sección se analizarán los resultados de dispersión angular que se obtuvieron en este trabajo comparándolos con trabajos previos de otros modelos de canal radio, en los cuales se supone que los dispersores están ubicados aleatoria y uniformemente en un espacio bidimensional alrededor del TM, de acuerdo a una función de densidad espacial.

El modelo Circular (GBSBCM) [Ertel y Reed, 1999a], asume que los dispersores se encuentran distribuidos uniformemente en una región circular de radio *R* en torno al TM. Este modelo es apropiado para entornos macrocelulares, en los cuales la altura de la antena de la EB es mayor que la altura de los elementos interferentes que la rodean, haciendo menos probable que ocurran reflexiones multitrayectoria cerca de la EB.

Por otro lado, el modelo Elíptico (GBSBEM) de [Liberti y Rappaport, 1996], establece que los dispersores se encuentran distribuidos uniformemente en una elipse,

donde la EB y el TM representan los focos. Este modelo se propuso para caracterizar el canal radio en entornos microcelulares, donde la distancia entre EB y TM es mayor que la diferencia entre la altura de la antena de la EB y la altura de los elementos dispersores que los rodean, lo que hace mas probable que la EB reciba mayor cantidad de señales multitrayectoria.

La ecuación (41) describe el comportamiento del AS para el modelo elíptico, el análisis y desarrollo de esta expresión se explica con detalle en [Liberti y Rappaport, 1996],

$$AS = \sqrt{\frac{\pi^2}{3} + \frac{4b}{a} \cdot \ln\left(\frac{1+\frac{b}{a}}{1+\frac{b}{a}+\frac{D}{2a}}\right) + 4\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{-(D/2a)}{1+\frac{b}{a}}\right)^n\left(\frac{1}{n^2}\right)} \tag{41}$$

Los parámetros físicos que se consideraron para este modelo son el retardo máximo *τ,* representado por el semieje mayor *a*, y el semieje menor *b,* que representa la distancia entre EB y TM.

Para evaluar el AS del modelo circular se utilizó la expresión,

$$AS = \sqrt{\frac{\sin^2(R/D)}{2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\sin^2(R/D)}{(k+1)^2(k+2)}} \tag{42}$$

Para conocer los detalles de éste modelo, se recomienda consultar [Ertel y Reed, 1999b].

La Figura 16 presenta la evaluación del AS para los modelos Elíptico, Circular y Gausiano. Se puede observar que, para valores *srw/D* menores a 1, la gráfica de AS del modelo Gausiano tiene un comportamiento similar a la gráfica del modelo Circular. En este caso, si se consideran valores srw/D mayores a 1 para el modelo Circular, no se cumple con las características de un entorno macrocelular, ya que en estas circunstancias tanto la EB como el TM formarán parte de la región dispersora y ese es el caso para un entorno microcelular. Aplicando la misma analogía, se puede observar que para valores *srw/D* mayores a 1 tanto el modelo Elíptico como el Gausiano presentan un comportamiento similar. En este caso se está caracterizando un entorno microcelular, la EB y el TM se

encuentran dentro de la región dispersora y la altura de la antena de la EB es menor o igual que la altura de los elementos interferentes que la rodean.

Lo anterior significa que el modelo Gaussiano tiene aplicación para caracterizar el canal radio de entornos microcelulares y macrocelulares.

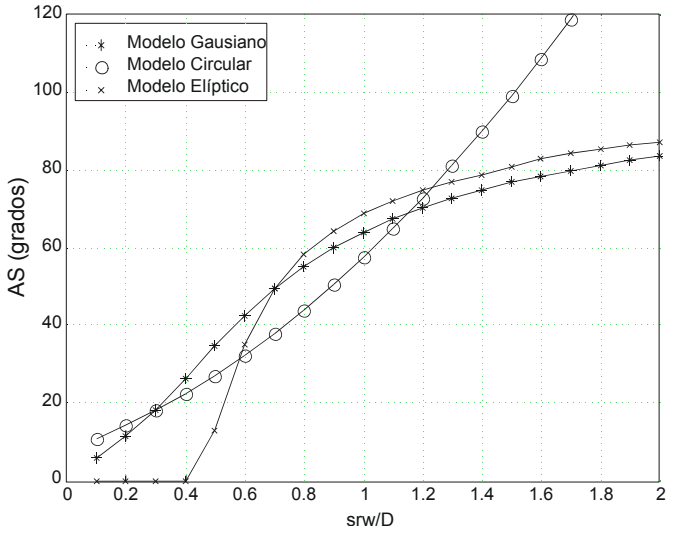


Figura 16. Comparación de la Dispersión Angular de los modelos GBSBGM, GBSBCM y GBSBEM.

IV.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se desarrolló el análisis matemático para determinar y evaluar el Ángulo de Arribo, Tiempo de Arribo y la Dispersión Angular de señales multitrayectoria utilizando el modelo Gaussiano (GSBGM), el cual tiene como característica principal que utiliza una región dispersora con distribución ***normal*** de interferentes alrededor del TM. Se demostró que este modelo, a diferencia de los modelos ya existentes como el Circular y Elíptico, se puede utilizar en entornos macro y micro celulares y una característica de los sistemas 3G de poder ofrecer servicios en ambos entornos. De este análisis se establece que las características espaciales del canal radio dependen en gran medida de la altura de las antenas transmisora y receptora, así como también del entorno local de dispersión.

El objetivo de modelar y simular estos parámetros es reducir de manera significativa la cantidad de mediciones físicas necesarias para caracterizar el canal inalámbrico en un proceso de planificación celular.

En el siguiente capítulo se evaluará la capacidad de un sistema celular 3G-CDMA tomando en cuenta el modelo de canal GSBGM propuesto en este capítulo, para modelar la técnica de sectorización conciente del entorno y con éste determinar el área de cobertura de cada sector en la célula.

Capítulo V

Evaluación de Capacidad en un Sistema CDMA utilizando Sectorización Consciente del Entorno

Durante los últimos años, el constante crecimiento del número de usuarios en los sistemas de comunicaciones móviles ha provocado una necesidad cada vez mayor de incrementar la capacidad de atenderlos. Con la llegada inminente de los sistemas 3G y la implantación de nuevos servicios, es imprescindible pensar en utilizar técnicas que permitan aumentar la capacidad de dichos sistemas. En este aspecto, y como se mencionó en el capítulo anterior, se plantea como solución utilizar Antenas concientes del entorno en las Estaciones Base. Este tipo de antenas consisten en adaptan su patrón de radiación a la distribución espacial de la señal deseada y las fuentes interferentes con el fin de maximizar la relación E_b/N_o para cada usuario activo en la red.

En este capítulo se analiza y evalúa la utilización de sectorización consciente del entorno en el proceso de planificación de una red 3G, considerando el modelo Gaussiano de canal radio (GSBGM) visto en el capitulo anterior. El análisis de capacidad considera una descripción estática de la red celular como se describió en el capítulo III, tomando en cuenta la interferencia intracelular e intercelular en un entorno multicelular. El límite de capacidad de tráfico se fija por el valor máximo de probabilidad de interrupción, es decir, la probabilidad de que no todos los usuarios activos puedan alcanzar la calidad deseada en un instante determinado.

V.1 ANTECEDENTES Y TRABAJO RELACIONADO.

La tecnología de Sectorización Consciente del Entorno, o comercialmente conocida como Sectorización Adaptiva, se explota comercialmente desde hace algunos años para muchas aplicaciones, incluyendo sistemas de comunicaciones de tercera generación (3G) [Tyler *et al.*, 2004]. Sin embargo, el grupo que desarrolló la tecnología 3G consideró a

CDMA como la técnica de acceso inalámbrica para estos sistemas, lo que permitirá incrementar las velocidades de transmisión de información de los usuarios, pero incrementando al mismo tiempo los problemas de capacidad [Al-Ruwais, 2002], [Monogioudis *et al.*, 2004] y [Nguyen *et al.*, 2004].

Para lo anterior, se han propuesto métodos que explotan la ubicación espacial de los usuarios móviles, y se ha demostrado ampliamente que utilizar esta tecnología puede incrementar la capacidad en las redes 3G por encima de los resultados que se puedan ofrecer con una simple sectorización. De hecho, este escenario se analizó anteriormente en [Burachinni *et al.*, 1996], [Giuliano *et al.*, 2002], [Li *et al.*, 1997], [Naguib *et al.*, 1994], [Nawrocki *et al.*, 2002], [Schacht *et al.*, 2003] y [Schacht *et al.*, 2004], mostrando un incremento significativo en la capacidad de un sistema DS-CDMA. La desventaja que presentan los trabajos anteriores es que asumieron características ideales de la antena y no consideran un modelo espacial de canal radio.

En este capítulo se describe y propone una metodología integral que une el análisis de capacidad visto en el capítulo III y el modelo espacial de propagación de canal radio del capítulo IV. Particularmente, se considera una antena en la EB que adapta su patrón de radiación a la distribución espacial de la señal deseada y las fuentes interferentes con el fin de maximizar la relación E_b/N_o para cada usuario activo en la red.

V.2 CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN.

Teorizar la capacidad absoluta de usuarios de una EB requiere de un gran número de suposiciones y simplificaciones: todos los usuarios emiten la misma señal, todos tienen cobertura y todos demandan el mismo tráfico. Sin embargo, la realidad es más compleja y la red puede encontrar factores sobre el terreno que reduzcan la eficiencia prevista para cada EB: la visibilidad global sobre el área de usuarios no es uniforme, usuarios de otras células interfieren en exceso o significativamente menos. Como resultado existen zonas

mal cubiertas o por el contrario con células más eficientes de lo previsto, provocando un sobredimensionamiento de la red.

La planificación de la capacidad de un operador deberá enfrentarse a una demanda incierta de servicios 3G que puede en algunos casos rebasar la capacidad de una red pobre, o por el contrario sobreestimarse por la irrupción de tecnologías sustitutivas como Wi-Fi (Wireless Fidelity) o GPRS+EDGE.

La planificación eficiente de redes 3G requiere de herramientas de diseño y análisis dependientes de la particularidad de cada caso (condiciones no uniformes de propagación, visibilidad irregular de EB, densidad no uniforme de usuarios, etc) y la complejidad del sistema (interdependencia de usuarios y estaciones base en CDMA).
La complejidad del análisis de capacidad en redes celulares 3G obliga a recurrir a la simulación para poder abarcar ciertos aspectos de difícil tratamiento teórico. La simulación constituye una herramienta flexible para el estudio y caracterización de sistemas en general, permitiendo avanzar más allá de las limitaciones impuestas por un estudio puramente analítico.

Por cuestiones de complejidad y tiempo computacional, en este trabajo se utilizan simulaciones estáticas para evaluar la capacidad del sistema. Las **Simulaciones estáticas:** consideran fotografías "(snapshots)" independientes del sistema, cada una de las cuales representa el estado del mismo en un cierto instante de tiempo. Este tipo de simulación se basa en generar un gran número de estas fotografías de manera aleatoria e independiente, especificando en cada una la situación de los usuarios. Por ejemplo; la actividad de cada usuario en ese momento, desvanecimientos, etc. y analizar cada una por separado. Dado que no existe ninguna relación temporal entre las mismas, lo que permite obtener estadísticas relativas al funcionamiento del sistema. Las simulaciones de este tipo tienen menor tiempo de procesamiento que las simulaciones dinámicas. La desventaja es que, al no considerar la evolución temporal del sistema, no se proporciona información sobre los

aspectos relacionados con la misma, tal como la duración de los periodos de congestión en el sistema o el porcentaje de llamadas bloqueadas.

La mayoría de las herramientas de análisis y planificación para sistemas 3G se basan en simulaciones estáticas, como por ejemplo en [Wacker *et al.*, 1999] y [Dehghan *et al.*, 2000], lo que permite caracterizar la red con menor complejidad y procesamiento. Las simulaciones que realiza el grupo 3GPP para estudiar la coexistencia de los dos modos de acceso FDD y TDD de la interfaz radio de UMTS o de varios operadores pertenecen también a esta categoría [3GPP, 2001].

V.3 PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN.

El análisis de capacidad se basa en simulaciones estáticas del sistema siguiendo el método de Monte Carlo y utilizando la probabilidad de interrupción (*outage probability*) como medida de calidad. Se considerará una red celular en un *entorno urbano* debido las elevadas densidades de tráfico que se registran en los entornos urbanos. Además se considerará una red microcelular, dado que ésta es la estructura idónea par proporcionar cobertura y capacidad adecuadas en este tipo de entornos. La metodología de la simulación se describirá en detalle en la siguiente sección.

El análisis mediante simulación se basa en los modelos y algoritmos vistos en los capítulos anteriores, junto con una caracterización adecuada del enlace radio. Al estimar la capacidad de estos sistemas es común considerar la actividad en el enlace ascendente, como el enlace con mayor vulnerabilidad a la interferencia en términos de la relación señal-interferencia [Corazza *et al.*, 1998] y [Viterbi y Viterbi, 1993].

El procedimiento de simulación consiste en generar una gran número de configuraciones estáticas del sistema, de acuerdo con los parámetros de entrada, y analizar para cada una si existe una solución para el problema de asignación y control de potencia, determinando en su caso las potencias de transición necesarias. De este modo se evalúa si el

sistema se encuentra o no en una situación de interrupción, es decir, si existe o no un conjunto de potencias que permita a todos los usuarios alcanzar sus respectivas calidades objetivo. La interrupción corresponde a una saturación instantánea del sistema. Tras simular un número suficiente de configuraciones instantáneas se puede estimar la probabilidad de interrupción del sistema en las condiciones consideradas, así como otros parámetros que ayudan a caracterizar el desempeño de la red.

Cuando el sistema está en una situación de interrupción no es posible atender a todos los usuarios con la calidad objetivo establecida ($E_b/N_{o\ umbral}$). Esto implica que es necesario reducir temporalmente los objetivos de calidad de algunos usuarios. Sin embargo, no existe una única solución posible; el sistema puede elegir sobre qué usuarios se aplica dicha reducción (en la práctica, ésta decisión se soluciona con el mecanismo de asignación de recursos). Se considera que todo el tráfico generado es aceptado por el sistema, es decir, no se aplica control de admisión. Esta suposición es usual en análisis de capacidad de sistemas CDMA [Chan y Hanly, 2001], [Corazza *et al.*, 1998] y [Viterbi y Viterbi, 1993]. El aumento del tráfico ofrecido al sistema no da lugar a situaciones de bloqueo como en sistemas clásicos, sino a un aumento de la probabilidad de interrupción en el sistema.

V.3.1 Proceso de la simulación

La Figura 17 muestra el diagrama de flujo de la simulación que se realizó en este trabajo. A continuación se describe cada uno de los pasos.

1.- Se ubican las estaciones base siguiendo la geometría de la Figura 18, la cual consiste de 19 células en forma hexagonal, todas ellas con la misma forma y tamaño.
2.- Se generan 2000 usuarios activos distribuidos de manera aleatoria y uniforme en la célula de referencia EB_1 y en las 18 células vecinas, como se muestra en la Figura 19.
3.- Se calcula la atenuación por propagación de la transmisión entre cada usuario y cada BS, utilizando el modelo de pérdidas de la sección III.3.1.
4.- Se determina la asignación de usuarios a bases y las potencias de transmisión.

5.- Se evalúan los resultados del paso 3 y se obtienen diversos parámetros que se almacenan para un análisis posterior (paso 6). Los pasos 1-4 se repiten suficientes veces como para obtener un conjunto estadísticamente representativo de resultados.

6.- Analizan los valores almacenados en los pasos anteriores.

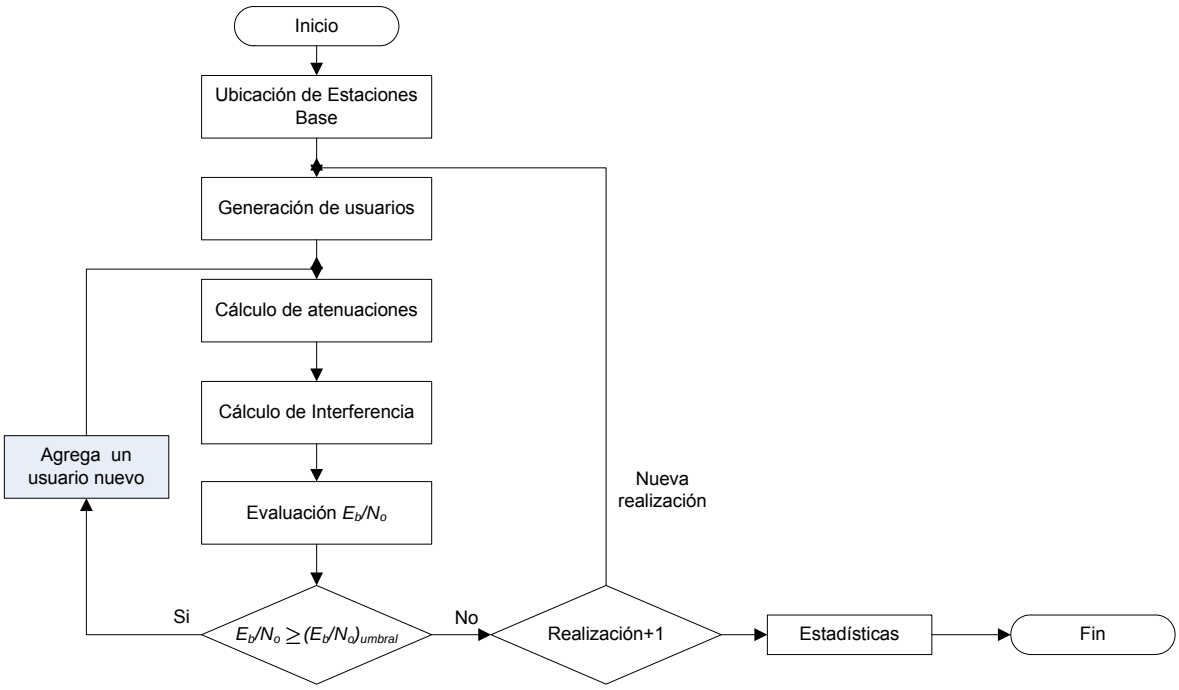


Figura 17. Proceso de Simulación.

En lo sucesivo se denominará *"realización"* al conjunto de pasos 1-4, que se ejecutan en cada paso del ciclo de la Figura 17, y "*simulación"* al proceso completo, que consiste de un número de realizaciones cuyos resultados se presentan en el paso 5. Las diferentes realizaciones que corresponden a una misma simulación son estadísticamente independientes, conforme al carácter estático del método de simulación.

El número total de realizaciones por simulación determina el grado de representatividad de los resultados obtenidos, así como el tiempo de simulación y los requisitos de espacio de almacenamiento. La estimación de la probabilidad de interrupción

será más fiable cuanto mayor sea el número de realizaciones en las que se basa, a costa de una mayor carga de simulación.

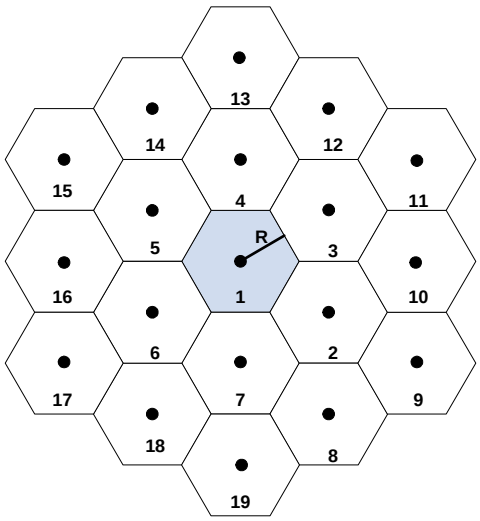


Figura 18. Geometría del Sistema Celular utilizado en la simulación.

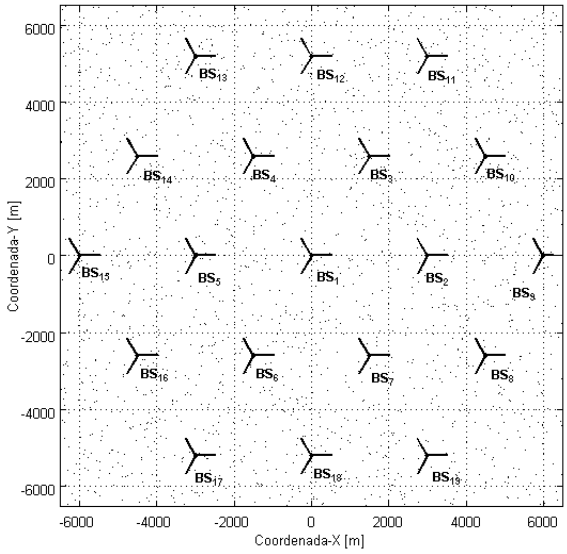


Figura 19. Generación de usuarios en el sistema para la simulación.

El escenario de simulación que se utilizó en este capítulo para evaluar la capacidad un sistema celular CDMA es el que se muestra en la Figura 18. Utilizando el modelo de propagación de la sección III.3.1, se pueden calcular los radios de las células en función del

servicio que se ofrecerá. Como se muestra en la Tabla III, el servicio de 384 kbps es el que limita el alcance de la célula a un radio de 0.61 km.

Tabla III. Rango de la célula de acuerdo al dimensionamiento

	9.6 kbps	64 kbps	144 Kbps	384 kbps
Perdidas por propagación (dB)	-140.20	-136.86	-136.02	-132.26
Alcance máximo de célula(km)	1	0.81	0.77	0.61
Probabilidad de cobertura (%)	98	95	90	90

Ahora bien, se considera que en dicho sistema en un instante determinado existe un conjunto de usuarios activos. Por usuarios activo se entiende un usuario hacia o desde el cual se esta transmitiendo una señal asociada a un cierto servicio portador (o varios), que debe recibirse con una determinada calidad objetivo. Las atenuaciones de transmisión, incluyendo desvanecimientos por sombra, así como las características de dispersión temporal, están determinadas por la posición en la que se encuentran los usuarios, y por tanto no son controlables por parte de la red. Este modelo caracteriza únicamente la carga producida por los usuarios activos, es decir, aquellos que, tienen una llamada o sesión en curso y están generando información en el instante de observación.

En este trabajo donde se investiga el número de usuarios que el sistema puede soportar (capacidad de un sistema CDMA), se utiliza un programa de simulación de acuerdo a las ecuaciones (14) y (15) del capitulo III. El software de simulación se escribió en MATLAB empleando un generador de números aleatorios para representar el arribo de llamadas y ubicación de los usuarios. La simulación se basó en los parámetros del sistema que se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Parámetros de simulación

Velocidad nominal de datos, R_b	9.6 kbps
WCDMA Chip Rate, W	3.840 Mcps
$(E_b/N_o)_{umbral}$	7.4 dB
Radio de la célula	1 km
Numero de células	19
Número de usuarios	2000
Factor de actividad	37% para voz y 100% para datos
Exponente de pérdidas por trayectoria	4

V.4 ANÁLISIS DE INTERFERENCIA

Tomando en cuenta que el radio de las células es de 0.61 km, se procede a evaluar la interferencia que se produce en el sistema. La interferencia que producen las células ubicadas en el tercer anillo (y las de los anillos subsecuentes), en la célula de referencia (célula 1) es extremadamente pequeña [Lee y Miller, 1998] y por tanto se ignora en el análisis de capacidad.

Para demostrar lo anterior, se establece el sistema de coordenadas de la Figura 20 para situar las células en relación con la de referencia (célula 1). La célula de referencia se sitúa en el origen. Cada valor de *a* representa un anillo de células interferentes, y dentro de cada uno existe un total de 6**a* células, las cuales se enumeran por el índice *b*, por tanto cada célula se ubica en la coordenada (*a,b*).

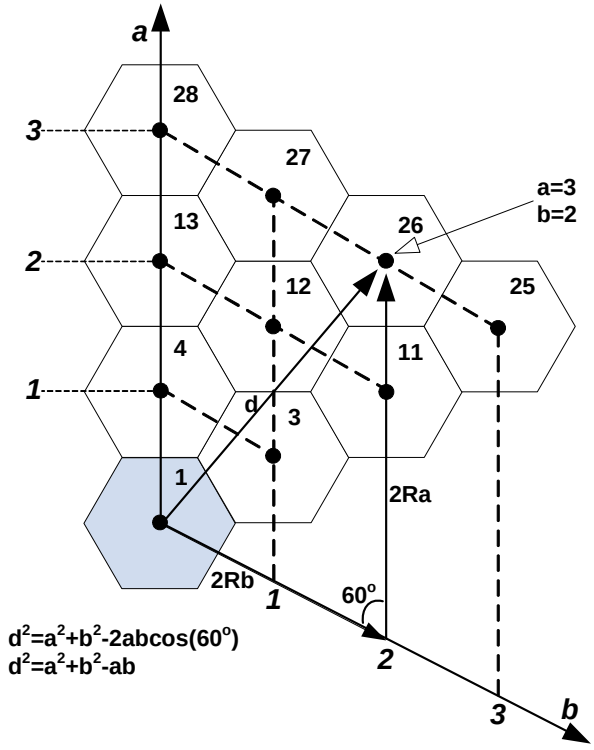


Figura 20. Sistema de Coordenadas por anillo para la evaluación de Interferencia.

Considerando una célula arbitraria (*a,b*), situada a una distancia *d* de la de célula referencia,

$$d(a,b) = 2R\sqrt{a^2 + b^2 - ab} \tag{43}$$

Con esta notación, la distancia normalizada de una célula interferente se representa por;

$$r_{a,b} = \frac{d(a,b)}{R} = 2\sqrt{a^2 + b^2 - ab} \tag{44}$$

La interferencia que se genera por todo el conjunto de células del sistema se calcula por la siguiente expresión

$$I = 6\sum_{a=1}^{n}\sum_{b=1}^{a} 2\left[2r^2 \ln\left(\frac{r^2}{r^2-1}\right) - \frac{4r^2 - 6r^2 + 1}{2\left(r^2-1\right)^2} \right]_{r=r_{a,b}} \tag{45}$$

De acuerdo con [Lee y Miller, 1998], utilizando las ecuaciones (44) y (45), es posible evaluar un sistema con *n* anillos de células interferentes.

La Tabla V muestra los resultados que se obtuvieron al evaluar 100 anillos con células interferentes del sistema. En ella se muestra que únicamente la interferencia de los dos primeros anillos tiene un efecto significativo al momento de evaluar la capacidad de un sistema CDMA. Se puede observar que el 28.4% de la interferencia total que se produce en el sistema proviene de las células ubicadas en el primer anillo, comparado con el 33% que proporcionan en total los 100 anillos, por lo que la contribución de interferencia externa del tercer anillo y los siguientes es muy pequeña comparada con la que proporcionan el primero y segundo.

Tabla V. Resultados de la Evaluación de interferencia Intercelular en el enlace ascendente.

a=anillo	*b*	*D(a,b)/R*	*I*
1	0	2	0.2844
2	0	4	0.2940
	1	$2\sqrt{3}$	0.3120
3	0	6	0.3138
	1	$2\sqrt{7}$	0.3168
	2	$2\sqrt{7}$	0.3198
:	:		:
.	.		.
100	0	20	.
	:	:	:
	99	$2\sqrt{9901}$	0.33

V.5 ANÁLISIS DE CAPACIDAD

Para el análisis de capacidad del sistema celular se utilizó el área de servicios de la Figura 18, la célula de referencia se encuentra en el centro del área de servicio en la cual se asume un control de potencia perfecto para todos los usuarios móviles. Se generó una población de usuarios distribuidos de manera aleatoria y uniforme en la célula de referencia y en las 18 células vecinas. Lo anterior se hizo generando dos conjuntos de números aleatorios que asignan una posición angular y una distancia radial de cada usuario móvil. La posición radial es la distancia de la TM desde su EB local. Las pérdidas por trayectoria individuales junto con el sombreo se calcularon para cada TM con el fin de evaluar el E_b/N_o en la célula. Se simularon escenarios con diferentes anchos de haz y números de sectores. Todos los escenarios se simularon con tres diferentes distribuciones de las estaciones móviles para mejorar la confiabilidad estadística.

La capacidad del sistema se evaluó en términos del número posible de usuarios en cada célula cuando se experimente al menos el 1% de probabilidad de interrupción en cualquiera de las células. No se considera movilidad de los usuarios.

La simulación inicia con el sistema vacío (no existen usuarios en ninguna célula) y se procede a agregar usuarios de manera progresiva, un usuario a la vez, posicionando cada usuario de manera aleatoria en alguna ubicación en cada célula. Cada vez que se agrega un usuario en cualquier lugar del sistema se evalúa el E_b/N_o en las EB de todas las células para observar en cuál de ellas no se excede la probabilidad de bloqueo estipulado con el usuario que se agregó. Cuando la probabilidad de bloqueo excede este valor estipulado termina la simulación y se anota el número de usuarios en cada célula. También se anota la célula que provocó que la simulación terminara. Para cada carga de usuarios se realizaron 20,000 corridas y se obtuvo el valor promedio de la probabilidad de interrupción.
El tráfico de cada usuario se genera de manera aleatoria utilizando un modelo on/off para voz y de mejor esfuerzo (best-effort) para datos [Leong *et al.*, 2004].

V.5.1 Escenario 1: Antena Omnidireccional

En la Figura 21 se muestra la capacidad del enlace ascendente del sistema celular cuando se utiliza una antena omnidirecional. La Figura 21 muestra la máxima cantidad de usuarios que puede soportar el sistema con una cierta probabilidad de degradación, esta capacidad se calculó con usuarios de voz transmitiendo con una velocidad nominal de 9.6 kbps. Los resultados se obtuvieron en base al trabajo de Gilhousen [Gilhousen *et al.*, 1991] y se puede observar en la gráfica que la capacidad del sistema es de 37 usuarios de voz por célula con una probabilidad de interrupción del 1% y 40 usuarios con un 5% de probabilidad de interrupción.

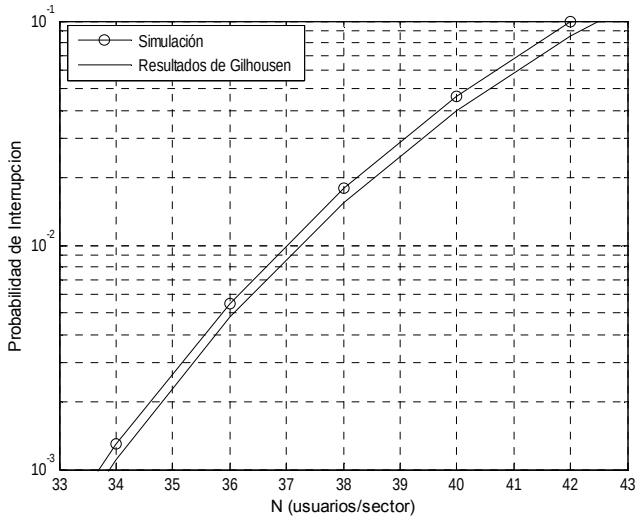


Figura 21. Probabilidad de Interrupción del sistema solo con usuarios de voz.

En la Figura 22 se muestra el bloqueo que experimenta el sistema ubicando un solo usuario que transmite datos (transmitiendo en modo circuito) a 38.4 kbps (4 veces la velocidad nominal de 9.6 Kbps) y 76.8 kbps (8 veces la velocidad nominal). Para este caso el factor de actividad de los usuarios que transmiten datos es de 1, lo que significa que dichos usuarios están activos todo el tiempo. Se puede observar que cuando un usuario de datos está transmitiendo el sistema puede soportar 23 y 12 usuarios a 38.4 y 76.8 Kbps respectivamente, con una probabilidad de bloqueo del 1%.

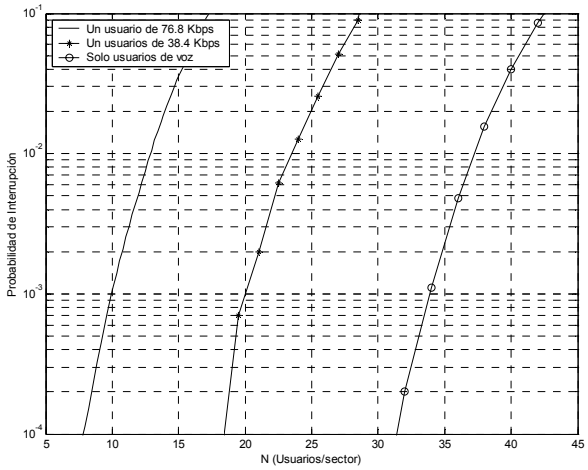


Figura 22. Probabilidad de Interrupción con transmisión de datos de alta velocidad a 4 y 8 veces la velocidad nominal.

V.5.2 Escenario 2: Sectorización Conciente del Entorno

La sectorización consciente del entorno consiste en formar patrones de radiación de manera dinámica hacia los usuarios que desean utilizar algún servicio, y al mismo tiempo mantienen fuera del haz principal a la mayoría de los usuarios interferentes intracelulares, como se observa en la Figura 23. Este efecto reduce considerablemente el número efectivo de interferentes activos.

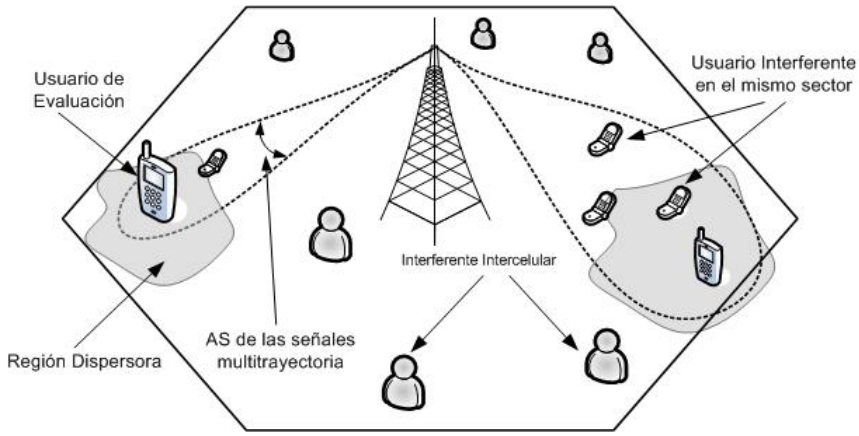


Figura 23. Evaluación de Capacidad considerando sectorización consciente del entorno y el modelo de canal radio GSBGM.

Como se puede observar en la figura anterior cada usuario se encuentra rodeado por un conjunto de dispersores distribuidos normalmente como se explicó en el capítulo IV. Se

utiliza el modelo Gaussiano (GSBGM) para evaluar el Ángulo de Llegada (AoA) de las señales multitrayectoria y el esparcimiento angular (AS), además se emplea el modelo de propagación visto en la lección III.3 para determinar el área de cobertura y el alcance que puede tener cada célula. Lo anterior se puede observar en la Figura 24, en la cual se muestran resultados de la simulación.

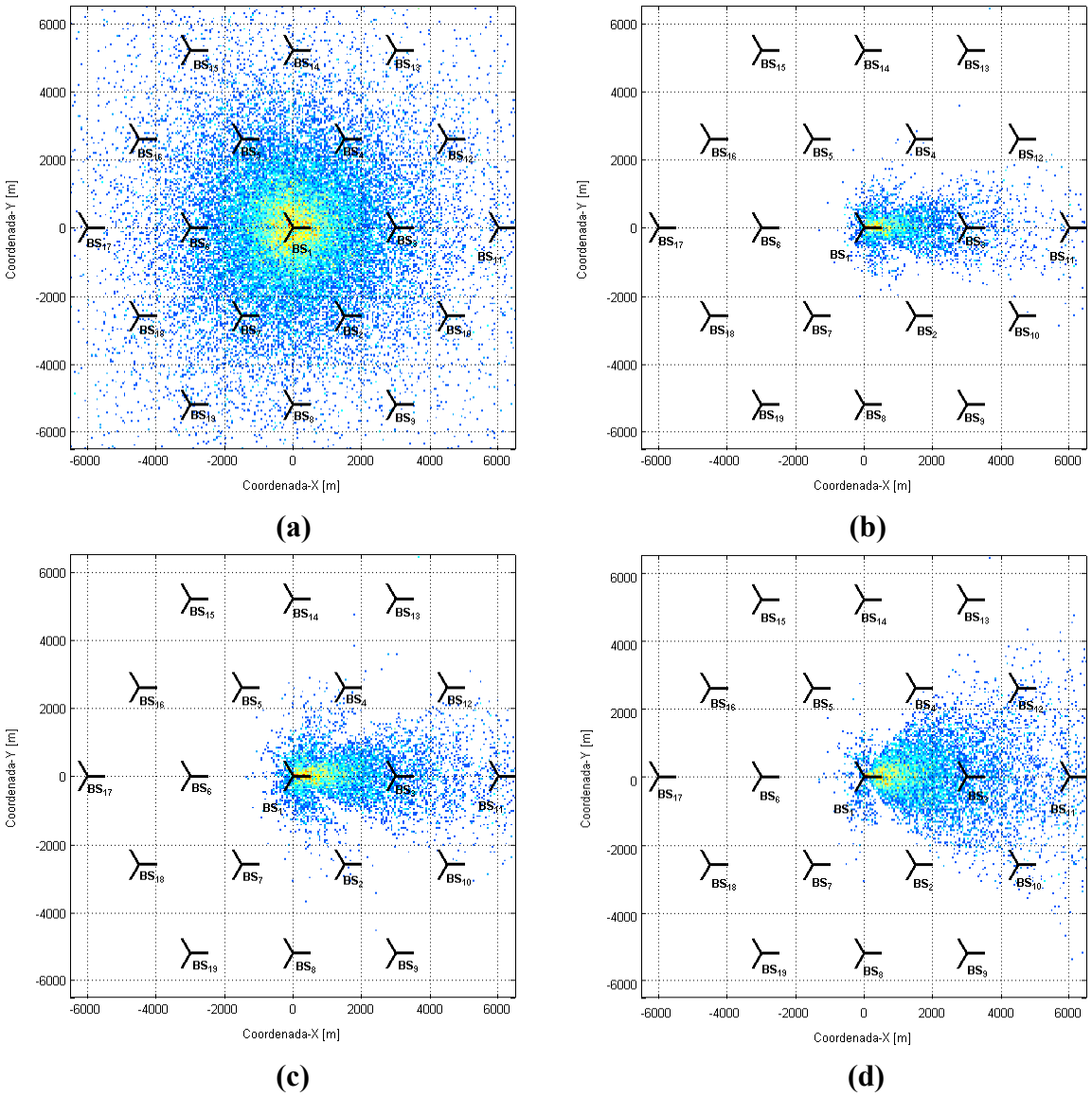


Figura 24. Área de cobertura, después de aplicar el modelo de canal radio GSBGM, para srw=100 metros. (a) omnidireccional, (b) AS=30°, (c)AS=60°, (d) AS=90°.

Para calcular el valor de AS de cada usuario se utilizó el modelo de canal radio visto en la sección IV.4. Se puede observar que la antena tiene la propiedad de adaptar su patrón de radiación a la distribución espacial de la señal de cada usuario en la célula. La Figura 24 muestra el área de cobertura de una antena para diferentes valores de AS, tomando en cuenta valores de *srw*=100 metros y calculando *D* en función de la posición de los usuarios en la célula de referencia. En las Figura 24(a), (b), (c) y (d) se muestran las áreas de cobertura de BS_1 con anchos de haz o valores de AS igual a 360°, 30°, 60° y 90° respectivamente. Se consideraron estos valores de AS ya que representan ambos entornos de propagación el microcelular y el macroceluar, es decir, para valores $srw/D<1$ (Figura 15) el AS es menor de 30 grados, que corresponde a un entorno macrocelular, mientras que para valores de $srw/D>1$ (valores de AS mayores de 60 grados) el modelo GSBGM se aproxima a un entorno microcelular (por ejemplo en un centro comercial).

Para el caso donde se consideró una antena omnidireccional con un área de cobertura de 360°, donde las señales de transmisión tienen un alcance en casi todo el sistema celular, se puede inferir que existe mayor cantidad de interferencia que en los otros casos. Esto se observa en las gráficas donde se representa un AS de 30°, 60° y 90° donde muestran una sectorizaron consciente del entorno, y que el ancho de haz está en función de la cantidad de dispersores que rodea al usuario móvil que solicita el servicio, el ancho de la región dispersora y la distancia que existe entre EB y TM.

En la Figura 25 se observan los usuarios intercelular e intracelular que se encuentran conectados a la EB_1. Se puede observar que existen usuarios de células vecinas que producen un nivel de interferencia, aún cuando el área de cobertura se reduzca como en el caso de la Figura 25(b), existe un nivel de interferencia que ocasiona cierta degradación en el sistema, aunque esta potencia es menor que en el caso de utilizar una antena omnidireccional.

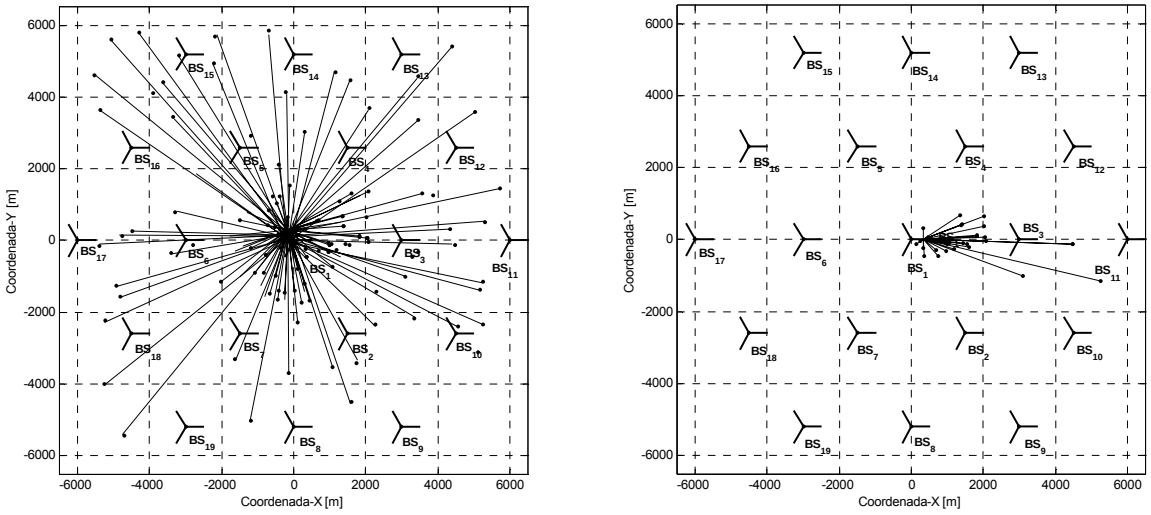


Figura 25. Usuarios que provocan interferencia a la célula de referencia, para los casos (a) omnidireccional, (b) AS=30°.

Para evaluar la capacidad del sistema utilizando sectorización concciente del entorno, se asume que el número de esos interferentes que se encuentran dentro del patrón de radiación es aleatorio, y al igual que en [Al-Ruwais, 2002] se introduce el parámetro $\psi_{j,Nk}$, en la ecuación (14), tal que

$$\frac{E_b}{N_0} = \chi \cdot \frac{1}{\left(\psi_{j,N_k}(N-1) + \psi_{j,N_k} \sum_{k=2}^{K} \sum_{j=1}^{N_k} \left(\frac{r_j}{r_{0_{k,j}}} \right)^n 10^{\left(\zeta_{0_{k,j}} - \zeta_j / 10\right)} \right)} \tag{46}$$

donde χ representa el factor de actividad ya sea de voz o de datos, y $\psi_{j,Nk}$ es una variable aleatoria tipo Bernoulli que indica si el N_k*-ésimo* usuario de la celda *j,* se encuentra o no dentro del patrón de radicación transmitido al usuario que solicita el servicio. La distribución de probabilidad de $\psi_{j,Nk}$ se describe por

$$\psi_{j,N_k} = \begin{cases} 1, & con \quad probabilidad = \left(\frac{AS}{2\pi} \right) \\ 0, & con \quad probabilidad = \left(1 - \frac{AS}{2\pi} \right) \end{cases} \tag{47}$$

En este caso el valor de AS se obtiene de la ecuación (40) y, como ya se mencionó anteriormente, representa el área de cobertura de la EB.

Cuando un usuario accede a una cierta EB de una célula, la estación base verificará si el E_b/N_o que prevalece es mayor que un valor mínimo de umbral. Si el E_b/N_o que se obtiene del sistema es menor que el de umbral, el servicio al usuario se interrumpe. El valor de E_b/N_o umbral es de 7.4 dB de manera que la tasa de error en el bit (BER) no exceda un valor de10^{-3} y se asegure una buena transmisión de la señal de voz o de 10^{-6} para datos.

En la Figura 26 se muestra la probabilidad de interrupción en función de la cantidad de usuarios activos en la célula de referencia para diferentes de valores de AS. En esta gráfica se consideraron únicamente usuarios de voz con un factor de actividad del 37.5% del tiempo. Se puede observar que para valores de 1% de probabilidad de interrupción la capacidad del sistema es de aproximadamente, 37, 27, 22, 18 y 14 usuarios para anchos de haz de 360°, 90°, 60°, 45°, y 30° respectivamente. Lo anterior demuestra que entre mayor número de usuarios activos se aíslen dentro de la célula mayor será la cantidad de usuarios activos simultáneos que se puedan atender. Esto es, por ejemplo, cuando se utiliza un ancho de haz de 30°, se pueden atender a 168 usuarios por célula (14 usuarios/sector × 12 sectores de 30°) contra los 37 usuarios que se pueden atender por célula al utilizar una antena omnidireccional.

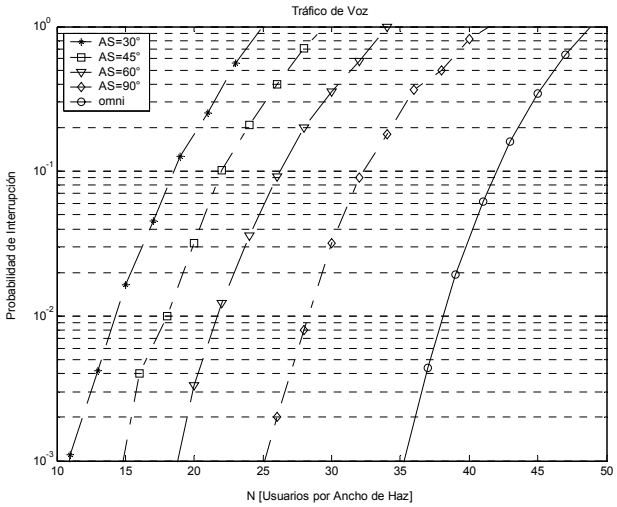


Figura 26. Probabilidad de Interrupción del sistema con usuarios de voz para diferentes valores de ancho de haz del patrón de radiación de la BS.

En la Figura 27 se muestra la evaluación de capacidad del sistema celular, considerando usuarios que únicamente transmiten datos a una velocidad de 384 Kbps, con el fin de simular servicios 3G, en este caso con un factor de actividad del 60%. La diferencia con los resultados que se presentan en la Figura 22, donde se utiliza un factor de actividad del 100%, es que en este caso se utiliza transmisión en modo paquete, mientras que en el segundo la transmisión se realiza en modo circuito, como el que utilizan los sistema GPRS.

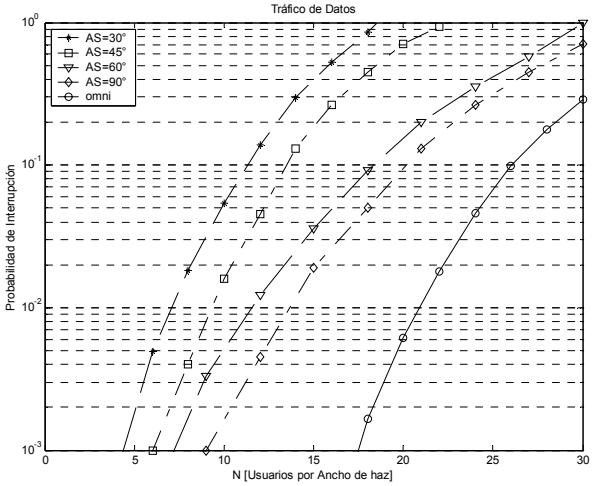


Figura 27. Probabilidad de Interrupción del sistema con usuarios de datos únicamente para diferentes valores de ancho de haz del patrón de radiación de la BS.

Si se comparan los resultados de la Figura 27 con los de la Figura 26 se puede observar que transmitir sólo datos reduce en un 35% la capacidad del sistema para el caso donde se utiliza una antena omnidireccional. Lo anterior se debe a que el canal de transmisión está enviando información constantemente durante la mayor parte del tiempo, generando con ello mayor cantidad de interferencia entre las células y, por consiguiente, aumentando 42% la degradación del sistema.

La Figura 28 muestra los resultados de capacidad al utilizar usuarios de voz y datos simultáneamente. En este caso se presenta un escenario más representativo para un operador celular. Se puede observar en los tres casos que aislar a usuarios activos a través de un área de cobertura de menor tamaño permite atender a una mayor cantidad de usuarios

simultáneos por célula. Para los resultados de la Figura 28, se utilizaron 30% de usuarios de datos con un factor de actividad del 60% y el resto fueron usuarios de voz con factor de actividad del 37.5%, por lo que la cantidad de interferencia que se genera en el sistema es menor que el que se generó en el escenario cuando se utilizan solamente usuarios de datos.

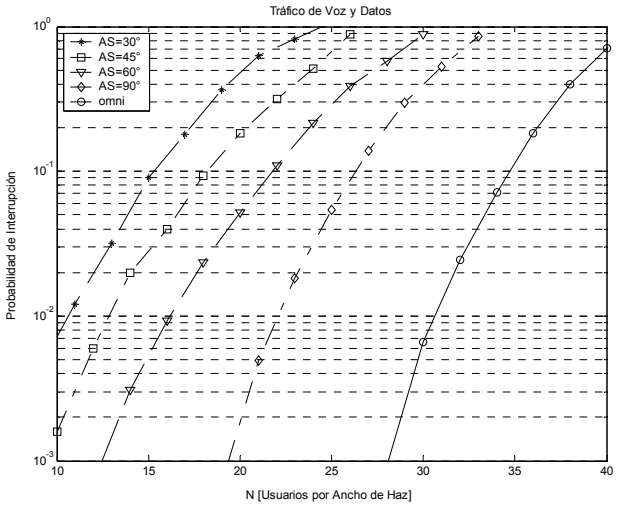


Figura 28. Probabilidad de Interrupción del sistema con usuarios de voz y datos para diferentes valores de ancho de haz del patrón de radiación de la BS.

En los resultados que se presentan en las Figuras 26, 27, y 28, se realizó la evaluación de capacidad que soporta el sistema considerando un análisis por sector. Sin embargo se puede demostrar que el número de usuarios por sector disminuye conforme el número de sectores se incrementa tomando en cuenta el mismo ancho de haz. Además aunque el número de usuarios por célula se incrementa, no es proporcional al número de sectores debido al traslape en los sectores y a la interferencia que produce un sector en otro. Estos resultados se pueden observar en la Figura 29 y en la Tabla VI en donde se muestra que para cada número de sectores existe un ancho de haz óptimo, esto es, para el caso de 3 y 4 sectores el ancho de haz óptimo es de 60°, pero cuando se utilizan seis sectores el ancho de haz optimo es de 30°.

El traslape entre los patrones de radiación así como la influencia del entorno de propagación, hacen difícil controlar la fuga de interferencia de un sector a otro y, en consecuencia, la capacidad del sistema. Lo anterior indica que al utilizar una mayor

cantidad de sectores se puede mejorar la capacidad del sistema, lo que implica tener anchos de haz más pequeños. Sin embargo, entre más sectores se utilicen en una célula se necesitará tener mayor cuidado al momento de planificar la red con el fin de tener mejor control de la interferencia.

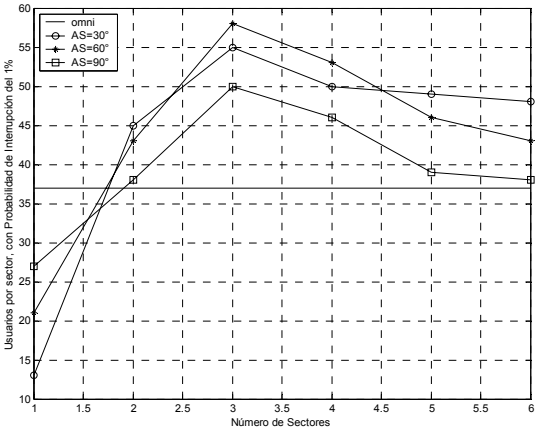


Figura 29. Numero de usuarios por sector.

Tabla VI. Evaluación de la interferencia y capacidad en un sistema con sectorización Conciente del entorno

Numero de sectores	Ancho de Haz	Usuarios/sector	Usuarios/célula	$i=I_{inter}/I_{intra}$
1	Omnidireccional	37	37	0.79
3	90°	50	150	1.19
3	60°	56	168	0.88
3	30°	55	165	0.65
4	90°	46	184	1.49
4	60°	53	212	1.09
4	30°	50	200	0.92
6	90°	39	234	1.97
6	60°	46	276	1.43
6	30°	49	294	1.15

Una consecuencia de utilizar anchos de haz grandes radica en el desperdicio de recursos de la antena. En los resultados de la Figura 29**,** los mejores escenarios fueron aquellos donde se utiliza un ancho de haz de 60° para tres sectores y de 30° para cuatro sectores. Por lo anterior, se puede establecer que al utilizar una técnica de planificación de la red de radio se puede controlar la interferencia y mejorar la capacidad de la red. En la

práctica las estaciones base no se instalan a la misma altura y por tanto la optimización de las EB debe hacerse célula por célula.

V.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se evaluó la influencia de utilizar un modelo de canal radio sobre la capacidad de un sistema celular CDMA. El modelo de canal Gaussian se utilizó para determinar el ancho del patrón de radiación y en consecuencia determinar el área de cobertura del sector tomando en cuenta la ubicación del usuario y la cantidad de dispersores que se encontraban alrededor de él. Se consideró un sistema macrocelular de 19 células hexagonales y se demostró que el número de usuarios que se pueden atender disminuye conforme aumenta la velocidad de transmisión de datos. Además, los resultados mostraron que existe una mejora en capacidad del 65% aproximadamente cuando se utiliza sectorización consciente del entorno.

Hasta este momento se ha desarrollado una metodología para la evaluación técnica de un sistema 3G, sin embargo, las metodologías que se presentan en la literatura científica para desarrollar una red celular le dan prioridad a los aspectos técnicos de una planificación celular pero ignoran los aspectos económicos de configurarla. En los siguientes capítulos se introducirán el modelo económico que se desarrolló en esta tesis para evaluar, en base a un análisis de sensibilidad, la configuración y viabilidad económica de desplegar una red celular de Tercera Generación. El enfoque considera la iteración con algunos componentes de costos, ingresos, y de algunos otros parámetros de diseño para determinar su impacto sobre las ganancias esperadas.

Capítulo VI

Análisis Técnico-Económico de Sistemas Celulares con Antenas Conscientes del Entorno

Como se mencionó en el capítulo I.1, los operadores de redes inalámbricas, en especial los que ofrecen comunicaciones móviles, se encuentran en un proceso de evolución de sus redes celulares 2G hacia sistemas 3G. Lo anterior provocará un aumento en la competencia por usuarios, que obligará a los operadores a minimizar sus costos y maximizar sus fuentes de ingresos. El objetivo de realizar una planificación adecuada de la red le permitirá al operador actualizar sus sistemas tomando en cuenta la alternativa de menor costo [Welling et al., 2003] y [Katsianis et al., 2001]. Para encausar las necesidades de planificación de una red 3G hacia un ambiente dinámico y competitivo, en este trabajo se propone un modelo que mejora los conceptos tradicionales de planificación de redes al incluir factores de negocios y de mercado junto a los factores tecnológicos.

En este capítulo se describen algunos de los modelos comerciales y académicos que realizan evaluaciones técnico-económicas por computadora. Además se explican algunos conceptos y terminología necesarios para realizar un análisis económico. En particular se evalúa la viabilidad económica de implantar un sistema de antenas conscientes del entorno en un sistema de comunicaciones móviles celulares. Se comparan los resultados de esta tecnología con un sistema que utiliza antenas sectoriales de 120 grados de área de cobertura y se realiza un análisis de sensitividad de los parámetros técnicos para identificar cuál de ellos refleja mayor impacto en la rentabilidad del sistema.

VI.1 ANTECEDENTES

Se presentan en la literatura varios modelos que realizan análisis técnico-económicos de redes, ya sean alámbricas e inalámbricos. Por ejemplo, en [Sarnecki *et al.*, 1993] se

discute brevemente los principios de diseño y el impacto económico que éste tiene al momento de implementar una red celular con microcélulas. En [Katz, 1994] se compara el costo de implementar un sistema celular analógico y un sistema microcélular digital. Uno de los primeros modelos de costos se propuso en [Reed, 1993], en el cual se estima el costo de proporcionar un Servicio de Comunicación Personal (PCS) en un desarrollo residencial, desde la perspectiva de un organismo regulador. Este modelo calcula el costo de instalar y operar una red PCS, así como el costo de proporcionar servicios PCS utilizando infraestructura existente tales como, el teléfono, cable y/o la red celular. Uno de los primeros trabajos donde se discute la evaluación técnica y económica de configurar una red celular es en [Gavish y Sridhar, 1995]. En éste se propone un modelo que determina la configuración óptima de una red celular tomando en cuenta el tamaño de la célula, tráfico, número de canales y costo de la licencia, entre otros. También se identifican algunos parámetros económicos, tales como, costos de inversión y de mantenimiento de la red. Los trabajos anteriores analizan únicamente aspectos económicos de redes 1G y 2G, y el enfoque principal es que se basan en optimizar costos, aún cuando optimizar costos no necesariamente optimiza las ganancias que ingresan a la empresa.

El mercado mundial de telecomunicaciones móviles esta cambiando drásticamente y con ello surgen dudas acerca de la tecnología óptima, la estrategia de desarrollo y, sobre todo, la evolución tecnológica mas efectiva que asegure la rentabilidad del operador.

A finales de los 1990s comenzaron a desarrollarse metodologías y herramientas técnico-económicas que evalúan la evolución de redes cableadas de banda amplia como HFC y xDSL, algunos ejemplos incluyen [Olsen, 1996], [Ims, 1996], [Antunes *et al.*, 1998]. Pero no fue sino hasta principios del 2000 que este tipo de modelos empezaron a desarrollarse para aplicaciones en redes inalámbricas [Katsianis *et al.*, 2001] y [Welling *et al.*, 2003], (véase sección I.2.2).

En ambos trabajos se toma un periodo de estudio de 10 años y evalúan la posibilidad de ofrecer el sistema 3G en entornos rurales. Utilizan como parámetros de

análisis y de decisión el Valor Presente Neto (NPV) y la Tasa Interna de Retorno (IRR), que se explicarán en las siguientes secciones. Sin embargo, en ninguno de los casos toman en cuenta la evolución de una red 2G hacia una 3G y tampoco realizan algún análisis de sensitividad o de riesgo al momento de modelar la implantación de la red.

VI.2 ESTRUCTURA GENERAL DE UN MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO

Para el propósito de esta tesis, un análisis técnico-económico se define como aquel que busca determinar la viabilidad económica de implantar alguna nueva tecnología. Mucha de la terminología, metodología y herramientas que se relacionan con el análisis técnico-económico de redes 3G se desarrollaron en base a proyectos de investigación patrocinados por la Unión Europea a finales de los 1990s y principios de los 2000s como muestra la Tabla VII [CORDIS, 2003].

Tabla VII. Programas de investigación para la evaluación técnico-económica de redes de banda ancha

Nombre del proyecto	Programa de Investigación	Año
TITAN (Tool for Introduction scenario and Techno-economic evaluation of Access Network)	**RACE II (FP3)**	**1990-1994**
OPTIMUM (OPTImised architectures for Multimedia networks and services)	**ACTS (FP4)**	**1994-1998**
TERA (Techno-Economic results from ACTS)	**ACTS (FP4)**	**1994-1998**
TONIC (TechnO-EconomICs of IP optimized networks and services)	**IST (FP5)**	**1998-2002**

Cada uno de los proyectos se desarrolló para evaluar alguna aplicación específica, y a partir de ellas se crearon algunas herramientas comerciales con características propias.

Por ejemplo, **STEM** [STEM, 2003], es una herramienta comercial que permite realizar estudios de proyectos de inversión para la industria de las telecomunicaciones. La evaluación de ésta herramienta muestra que para propósitos de esta tesis, éste modelo no es útil por tres razones. La primera, el costo de la licencia para su uso es excesivamente cara (alrededor de 150,000 dólares). El sistema de modelado de STEM contiene demasiados

menús y opciones, que podría tomar demasiado tiempo en adquirir la experiencia necesaria para implementarlo. Además el ambiente de trabajo de la herramienta no es programable, por lo que sería imposible tratar de implementar algún escenario distinto en particular, o tratar de evaluar algún parámetro en específico que no se contemple en esta herramienta.

INVAN [Balzaretti *et al.*, 1999] es una herramienta de análisis puramente económico que desarrolló la compañía Telecom de Italia. El propósito de la herramienta es resolver exclusivamente problemas de costos al momento de dimensionar y planificar redes regionales de banda amplia, ya que la parte de planificación técnica se realiza con otra herramienta conocida como **REFORMA** [Daurell *et al.*, 1996]. Esta segunda herramienta fue desarrollada por Telefónica de España y permite calcular el número de troncales que necesita una red de banda ancha, como por ejemplo SONET o WDM.

Para realizar un análisis y modelado del comportamiento del mercado existen **GAMS** [GAMS, 2005] y **GAMBIT** [GAMBIT, 2005]. Estas herramientas permiten modelar aspectos relacionados con situaciones donde las demandas del mercado son muy variadas en cuanto a tecnología y servicio, además que su metodología se basa en sistemas dinámicos, lo que significa que los modelos pueden cambiar con respecto al tiempo.

Los programas de simulación **Crystal Ball Pro** [Decisioneering, 2005], **PALISADE** [PALISADE, 2005] y **OptQuest** [OPTQUEST, 2005] son herramientas para modelar análisis de riesgo e incertidumbre a través de la técnica Monte Carlo. Éstos incorporan metaheurísticas para guiar sus algoritmos de optimización hacia mejores soluciones, tales como algoritmos genéticos, recocido simulado, búsqueda tabú y sus híbridos. Sin embargo no realizan evaluaciones técnico-económicas.

Lo que se puede observar de los ejemplos anteriores es que ninguna de las herramientas realiza un análisis técnico-económico completo, sino que se complementan unos con otros, lo que hace necesario que se cuente con una herramienta diferente para

resolver cada una de las necesidades al momento de planificar una red, tales como dimensionamiento, evaluación económica y análisis de sensitividad o de riesgo.

El análisis técnico-económico que se realizó en este trabajo de tesis se basa en el modelo **OPTIMUM-TERA**, propuesto por el programa ACTS. Este modelo se creó para la evaluación técnico-económica de aplicaciones de redes y servicios de comunicaciones [Bouillon *et al.*, 2002], [Ims, 1996] y [Zaganiaris, 1993]. La herramienta permite realizar análisis y evaluaciones de la implantación de redes y servicios de comunicaciones de banda ancha, considerando parámetros tales como la densidad de usuarios y penetración de servicio, así como también algunos costos de los componentes de la red.

En la Figura 30 se muestra la estructura general de la metodología propuesta en este trabajo para la evaluación técnico-económica de sistemas 3G.

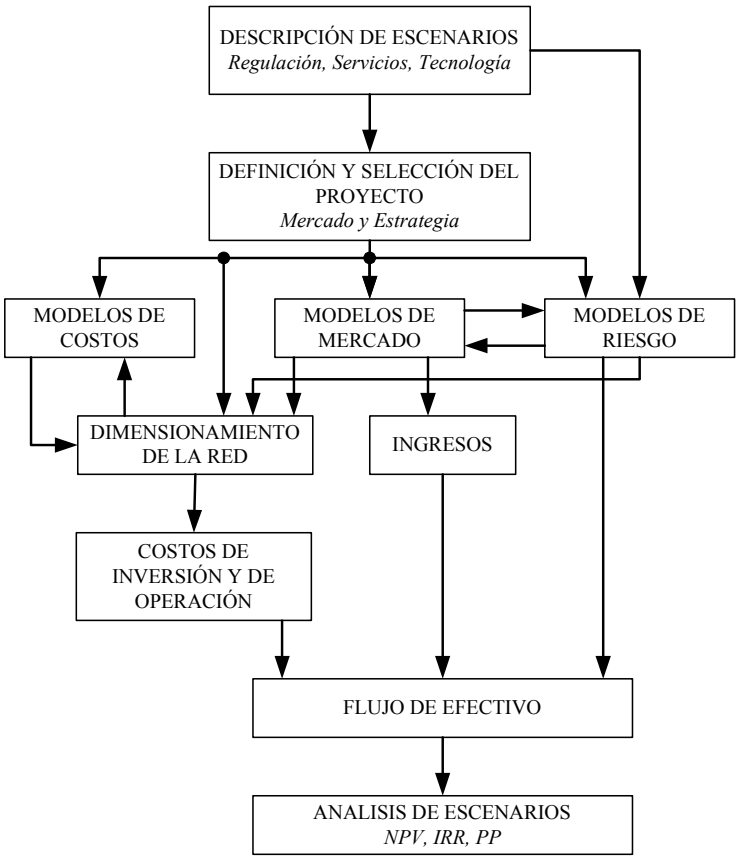


Figura 30. Estructura general de un modelo técnico-económico.

Como se muestra en la Figura 30, la herramienta está estructurada en módulos y debe ser capaz de proveer al operador con la información necesaria para poder tomar decisiones en proyectos de inversión.

El análisis de cualquier proyecto de inversión se realiza siempre para un periodo de estudio propuesto por el usuario. Se deben definir los servicios que se proveerán en la red y la penetración de mercado en esos servicios. Para cada servicio se define la tarifa de conexión y la tarifa anual durante el periodo de estudio. Los ingresos se calculan por año al combinar la penetración de mercado anual y la información de tarifas. También debe definirse la arquitectura de la red que proporcionará el servicio. Esto requiere una planificación de la red que evalúe áreas de cobertura, capacidad de la red o parámetros de calidad del servicio, y no únicamente la cantidad de elementos de la red que se necesitan, como se hace en el proyecto **TERA**. Otra característica del modelo **TERA** es que no realiza análisis de sensitividad o de riesgo, mientras que la metodología que se propone en este trabajo de tesis si incluye este tipo de análisis.

Un módulo generalmente recibe parámetros de entrada de otros módulos, tales como tipo de tecnología y características del mercado, así como también algunos parámetros económicos. Los parámetros de salida se calculan al combinar los ingresos con los costos de mantenimiento y operación, dando como resultado algunas métricas económicas como el NPV y la IRR, que se explicarán en las siguientes secciones.

VI.3 PARÁMETROS DE ENTRADA DEL MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO

Frecuentemente se necesita predecir el comportamiento de algunos de los datos de entrada a futuro, tal como el caso de la penetración de usuarios, de la cantidad de tráfico que existirá en la red, precios de los servicios y hasta sobre algunos costos de elementos de la red. Otros datos de entrada consisten en establecer el tamaño del área geográfica donde se proporcionará el servicio y el segmento de clientes a los que se les va a ofrecer dicho servicio, los servicios que se ofrecerán y la tecnología que se va a utilizar.

VI.3.1 Penetración de Mercado

En este trabajo se asume que la penetración de mercado y la demanda de servicios siguen un comportamiento no lineal, y se representan ya sea por una curva tipo "S" [Higgins, 2001] o curvas de aprendizaje [Olsen, 1996]. Este tipo de gráficas inician con un crecimiento lento y posteriormente incrementan su velocidad de crecimiento hasta alcanzar un límite máximo predeterminado.

La tasa de penetración de mercado que se utiliza en este trabajo está en función de un periodo de tiempo. En la Figura 31 se puede observar el valor de *Δt,* que es el tiempo que toma a la tasa de penetración de mercado en incrementar del 4% al 41%, y *y(t)* es la tasa de penetración en % .

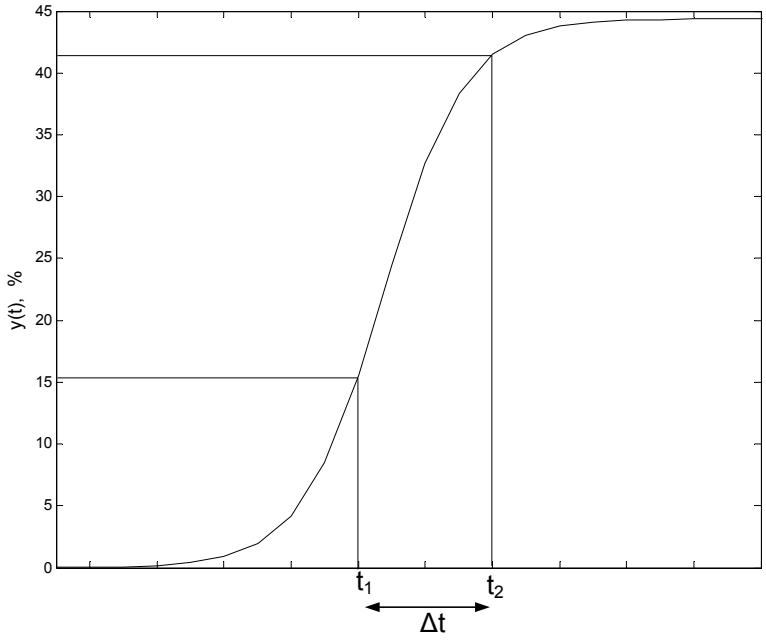


Figura 31. Función de la curva S para la proyección de la tasa de penetración de mercado.

La expresión que se utiliza para obtener la gráfica anterior se muestra a continuación;

$$y_t = d + \frac{a}{\left(1 + ce^{-b(t-m)}\right)^{\frac{1}{c}}} \tag{48}$$

Donde y_t es la tasa de penetración en el tiempo t, a es el límite máximo predeterminado de la curva, d es el límite inferior, b es la tasa de crecimiento promedio y c es un factor que determina si el límite de crecimiento ocurre antes o después de un tiempo t.

Para este trabajo de tesis los valores de penetración de mercado se tomaron de datos de COFETEL en [COFETEL, 2005b]. La Figura 32 muestra el comportamiento de los datos de mercado en un escenario mexicano. Los datos de la gráfica se obtienen a partir de la expresión (48) y considerando los parámetros de la Tabla VIII.

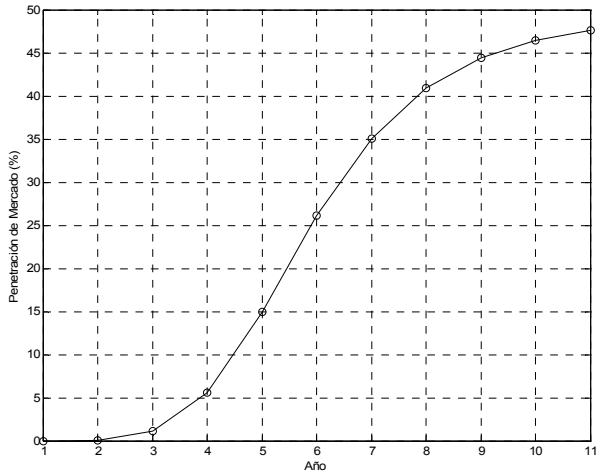


Figura 32. Datos de la penetración de mercado en México.

Tabla VIII. Parámetros para obtener la curva de penetración de mercado

Parámetro	*valor*
b	178.0089
m	14.50
c	56.48
a	47

VI.3.2 Cálculo de los Ingresos

Los ingresos se calculan de manera proporcional a la carga de tráfico que puede soportar el sistema. Considerando que λ_u es la cantidad de llamadas que genera un usuario

en horas pico de tráfico con una duración promedio de la llamada de $1/\mu$, U es la densidad de usuarios que existe en el área de servicio (usuarios/m^2) y $A(r)$ es el área de servicio en m^2, entonces la cantidad de llamadas, $\lambda(r)$ que se generan en una célula de radio r se determina por

$$\lambda(r) = \lambda_u \cdot U \cdot A(r) \tag{49}$$

Ahora bien, considerando una célula k de radio r, a la cual se le asignan i canales, la probabilidad de bloqueo de llamadas en la célula k se puede encontrar por la expresión (50)

$$\rho_k(i,r) = \frac{\frac{\rho(r)^i}{i!}}{\sum_{j=0}^{i} \rho(r)^j / j!} \tag{50}$$

donde $\rho(r) = \lambda(r)*(1/\mu)$. Considerando que existe simetría en todas las células, es decir, $\rho_1(i,r) = \rho_2(i,r) = \rho_3(i,r) = .. \rho_{M(r)}(i,r)$, donde $M(r)$ es el número total de células de radio r que cubren el área total de servicio. Se puede considerar que la probabilidad de bloqueo de una célula de radio r con i canales es $B(i,r) = \rho_1(i,r)$. En este trabajo de investigación el valor de $B(i,r)$ se considera como la probabilidad de interrupción, P_{out}, que se obtuvo en los resultados de las secciones V.5.1 y V.5.2.

Dado un sistema celular con células de radio r, e i canales asignados en cada célula, los ingresos por hora por célula se determinan por

$$R_h(i,r) = \lambda(r)\left[1 - P_{out}\right] \cdot \left[R_f + \left\lceil 1/\mu - 1 \right\rceil^+ R_0\right] \tag{51}$$

donde R_f representa el cobro del primer minuto de la llamada[4], y R_0 es el cargo que se hace al usuario por el resto de los minutos que dure la llamada en curso.

Entonces, considerando el número de horas pico por día, h_{dia}, y el número de días pico por año, $BD_{año}$, los ingresos anuales por célula se calculan por

$$R_{anual}(i,r) = R_h(i,r) \cdot h_{dia} \cdot BD_{año} \tag{52}$$

[4] En México se cobra el primer minuto de una llamada telefónica independientemente de la duración de la llamada

Por tanto los ingresos anuales en toda el área de servicio se determina por

$$R_{areaServcicio} = M(r) \cdot R_{anual}(i,r) \tag{53}$$

Considerando que el número de usuarios, *S,* pagan una renta mensual, R_{co}, independientemente de la configuración de la red, entonces se tiene que el ingreso por cargos de renta al año, R_{ct}, se determina por

$$R_{ct} = R_{co} \cdot S \cdot 12 \tag{54}$$

Por lo anterior, los ingresos totales, R_{tot}, que se reciben al año son,

$$R_{tot}(i,r) = M(r) \cdot \lambda(r)[1 - P_{out}] \cdot \left[R_f + \lceil 1/\mu - 1 \rceil^{+} R_o\right] \cdot h_{dia} \cdot BD_{año} + \left(R_{co} \cdot S \cdot 12\right) \tag{55}$$

Debido al creciente número de servicio y productos, así como a la poca experiencia existente en un mercado nuevo, es difícil definir en este momento el costo de algún servicio 3G. Lo anterior trae como consecuencia que se desarrollen diferentes políticas en la forma de cobro, como por ejemplo por tarifa plana, por volumen de transmisión de datos, por tiempo, por Mbyte e incluso por tipo de contenido. Sin embargo, para propósito de este trabajo, la expresión (55) se puede aplicar tanto para voz como para datos, considerando que la política de cobro es por tiempo de utilización del canal. Por lo anterior, y tomando como base el reporte [Qualcomm, 2003], la Tabla IX muestra el costo del primer minuto, R_f, de cada servicio por tecnología para los servicios WCDMA y cdma2000-1X. El costo de los minutos de uso del servicio posteriores al primer minuto, se consideró del 10% menor.

Tabla IX. Costo por minuto en US dólares

	Densidad de Tráfico		
Tecnología	***Voz***	***SMS***	***MMS***
CDMA2000-1X	0.153	0.0064	0.059
CDMA2000-1XEV	0.074	0.025	0.022
WCDMA	0.214	0.074	0.069
GPRS	0.472	0.417	0.415

SMS=Servicio de Mensajería Corto
MMS= Servicio Multimedia

VI.3.3 Cálculo de los costos

Los costos de implantar, operar y mantener una red se dividen en dos categorías, los Costos de Capital (CAPEX) y los Costos de Operación (OPEX). El CAPEX incluye la inversión que se hace para la infraestructura de la red y los dispositivos móviles, así como el equipo necesario para las funciones de operación y mantenimiento. El OPEX incluye los costos de sueldos y administración de la red, así como los costos de publicidad, ventas y atención a clientes.

Por lo anterior, los costos por célula, *C(i,t)*, van a depender del tipo de antena, *t,* que se utilice en la estación base y de la cantidad de canales por célula, por lo que

$$C(i,t) = CAPEX(t) + OPEX(t) + \left(i \cdot C_{ch}(t)\right) \tag{56}$$

El costo total anual estimado de proveer un servicio en toda el área de cobertura se determina por

$$C_{tot}(i,r,t) = M(r) \cdot \left[CAPEX(t) + OPEX(t) + (i \cdot C_{ch(t)})\right] \tag{57}$$

Los costos que se utilizaron en este trabajo se tomaron de tal manera que reflejaran lo más posible valores del mundo real. Los valores se tomaron de compañías celulares como [Ericsson, 2004] y [Nokia, 2004] y se presentan en la Tabla X y Tabla XI.

Tabla X. Costos de la estación base para un sistema 3G

Tipo de antena *t*	Densidad de usuarios (Personas/km^2)	EB/km^2	Costo de la EB (dólares)	Costo del canal (dólares/año/canal)	Mantenimiento (dólares/año)
1	>2000	0.6024	$445454	$1200	$60000
2	500-2000	0.1956	$280000	$1000	$40000
3	250-500	0.0794	$216363	$1000	$20000
4	<250	0.03756	$159090	$700	$2500

La inversión fuerte se realizará al inicio del despliegue de la red y se agregará un incremento en el costo por año debido a reemplazo de equipo y a los costos de operación que se muestran en la Tabla XI [Welling *et al.*, 2003] y [Katsianis *et al.*, 2001].

Tabla XI. Costos de operación y mantenimiento

Componente	Unidad	Costo
Equipo de trabajo y personal	dólares/hora	50
Renta del site	dólares/año	600
Costo de la licencia	dólares/año/km^2	7

VI.4 PARÁMETROS DE SALIDA DEL MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO

La respuesta que se espera de un análisis técnico-económico es si el proyecto en el que se está de invirtiendo es rentable o no. Comúnmente se utilizan métricas para determinar la factibilidad económica de un proyecto, y en éstas se incluyen el Valor Presente Neto (NPV), Tasa Interna de Retorno de la Inversión (IRR) y el Tiempo de Recuperación de la Inversión (PP).

VI.4.1 Valor Presente Neto (NPV)

Una cantidad a futuro de dinero que se convierte a su equivalente en valor presente tiene un monto de valor presente siempre menor que el flujo de efectivo real, debido a que para cualquier tasa de interés mayor que cero, todos los factores de interés compuesto Presente/Futuro (P/F) tienen un valor menor que 1.

Los flujos de efectivo se describen como las entradas y salidas reales de dinero. Toda persona o compañía tiene entradas de efectivo (ingresos) y desembolsos de efectivo (gastos y costos). Estas entradas y desembolsos son los flujos de efectivo, en los cuales las entradas de efectivo se representan en general con un signo positivo y las salidas con un signo negativo. El flujo neto de efectivo (NCF) durante un determinado periodo de tiempo se determina por

$$NCF_n(t,i,r) = R_{tot}(i,r) - C_{tot}(t,i,r) \tag{58}$$

donde *NCF(n)*= flujo de efectivo en el año o periodo *n*

Sustituyendo (55) y (57) en (58) tenemos que,

$$NCF_n(t,i,r) = M(r)\cdot\lambda(r)\left[1-P_{out}\right]\times\left[R_f + \left\lceil 1/\mu - 1\right\rceil^{+} R_0\right]\cdot h_{dia}\cdot BD_{año} + R_{co}\cdot S\cdot 12$$
$$- M(r)\times\left[CAPEX(t) + OPEX(t) + (i\cdot C_{ch}(t))\right] \tag{59}$$

$$NCF_n(t,i,r) = \left[1 - P_{out}\right] \cdot k_1(r) - i \cdot k_2(t,r) - k_3(t,r) \tag{60}$$

donde

$$k_1(r) = M(r) \cdot \lambda(r)\left[R_f + \left\lceil \tfrac{1}{\mu} - 1 \right\rceil^{+} R_0\right] \cdot h_{dia} \cdot BD_{año} \tag{61}$$

$$k_2(t,r) = M(r) \cdot C_{ch}(t) \tag{62}$$

$$k_3(t,r) = M(r)\left[CAPEX(t) + OPEX(t)\right] - R_{ct} \tag{63}$$

El NPV de una inversión es la medida más favorable de rentabilidad, y permite tomar decisiones de inversión mejores que otros criterios. Esta métrica de evaluación es muy popular ya que los gastos o los futuros ingresos de efectivo se convierten en dinero con valor actual [Higgins, 2001], [Blank y Tarquin, 1999]. El NPV de un proyecto se calcula como la suma de los flujos de efectivo tomando en cuenta el valor del dinero con respecto al tiempo. La siguiente expresión representa la forma de calcular el NPV de un proyecto,

$$NPV_n = \sum_{n=0}^{N} \frac{NCF_n}{(1+r)^n} \tag{64}$$

donde *r* es la tasa de retorno o tasa de interés que el inversionista espera recibir.

VI.4.2 Tasa Interna de retorno (IRR)

La IRR es una medida en porcentaje (%) que se encuentra muy relacionada con el NPV. De hecho, la IRR de un proyecto es aquella tasa de interés (valor de *r* en la ecuación (64)) que hace que el NPV sea igual a cero. Ahora bien, se llama interna porque la tasa se basa solamente en el flujo de efectivo y no existen influencias externas.

Se debe tener presente que esta métrica se desarrolla en relación al concepto de emplear el dinero en la forma mas eficiente [AHCIET, 1990]. Las personas que invirtieron en la empresa proporcionan el capital para el negocio con la expectativa de un retorno futuro de la inversión. Una forma de decidir como invertir los fondos que le fueron

encomendados es asegurándose de que cada incremento de esos fondos se invierta con una eficiencia igual o superior a la tasa de interés que sus inversionistas querrían.

La forma usual de determinar la IRR es resolviendo la ecuación (64) por medio de aproximaciones sucesivas

$$NPV_n = \sum_{n=0}^{N} \frac{NCF_n}{(1+r)^n} = 0 \tag{65}$$

VI.4.3 Curva del flujo de efectivo

Una curva de comportamiento del flujo de efectivo proporciona una visión fácil de entender sobre el comportamiento de la rentabilidad de un proyecto. En las Figura 33 y 34 se muestra el comportamiento del NPV y del IRR, respectivamente, de un proyecto de inversión.

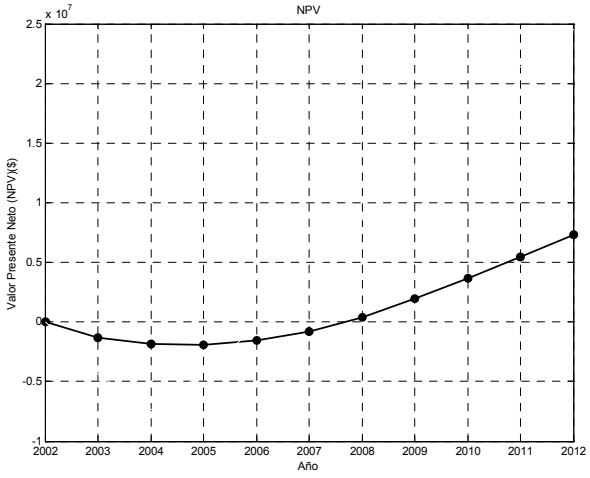


Figura 33. Ejemplo de una curva de Valor Presente Neto (NPV).

Para obtener las gráficas anteriores se consideró un sistema celular de 19 células de de igual tamaño y forma (ver Figura 18), donde el radio de cada célula es de 1 km. Se tomó en cuenta que cada célula tiene en el centro una antena omnidireccional (antena tipo 3 de la Tabla X) y la cantidad de canales, *i,* por célula se obtiene de los valores obtenidos en la Figura 21 para un valor de probabilidad de interrupción del 1%. En este caso, el valor de

i es de 37 canales por célula, considerando únicamente usuarios de voz. El costo de cada canal se toma de la Tabla X. La duración de cada llamada se toma de una función de distribución normal con media de 2.0 minutos, el cargo por renta mensual por usuario es de $25 dólares y la densidad de usuarios es de 0.0001 usuarios/m^2.

La Figura 33 muestra el valor que adquiere el NPV con respecto al tiempo para un periodo de estudio de 10 años, tomando en cuenta que el año tiene 260 días hábiles ($BD_{año}$) y por día existen 8 horas pico ($h_{día}$). Los costos por instalación, operación y mantenimiento se toman de las Tablas X y XI. Se puede observar en la Figura 33 que la curva tiene un comportamiento negativo durante el periodo de 2002 al 2007, debido a que en este periodo es necesario invertir (en costos de instalación y operación) para arrancar el proyecto y los ingresos no se recibirán sino hasta tiempo después. El Periodo de Recuperación (PP) de este proyecto corresponde al número de años que toma al sistema recuperar el monto de la inversión. Para obtener el valor de PP sólo basta con calcular el año en el que el valor de NPV sea cero. Para la Figura 33 el periodo de recuperación (PP) es a partir del sexto año. El valor inferior de la curva determina la cantidad total de dinero que se debe invertir para iniciar el proyecto.

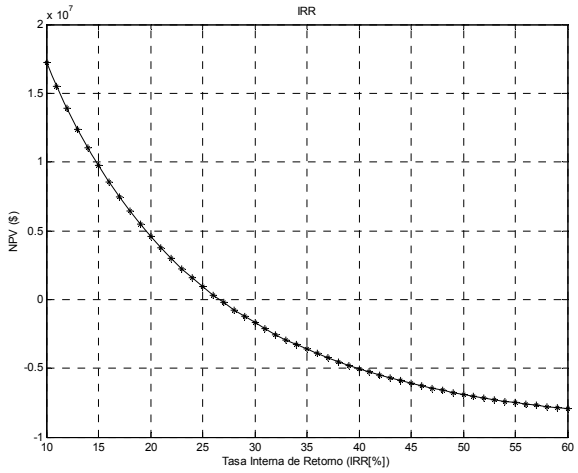


Figura 34. Ejemplo de una curva de Tasa Interna de Retorno en %.

Para este caso en particular el proyecto se considera rentable, ya que la regla del NPV establece que una compañía debe invertir en cualquier proyecto cuando el valor acumulado del NPV al final del periodo de estudio es positivo y rechazarlo cuando éste es negativo. En la Figura 33 el valor de NPV que se obtiene al final del periodo de estudio es de $\$0.55x10^7$ dólares.

En la Figura 34 se ilustra la solución de aproximación del NPV contra la IRR. Se observa una solución gráfica o de interpolación de la ecuación (65) y es necesaria para tener una aproximación satisfactoria y evitar tener que hacer muchos ensayos para el cálculo de la IRR. El valor de IRR para el ejemplo que se utilizó en la Figura 32 es del 26%. Al inicio se adopta una tasa de ensayo, *r,* por lo regular del 10% y se inicia una solución de aproximaciones sucesivas.

VI.5 ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD Y DE RIESGO

Los análisis económicos utilizan estimaciones de sucesos futuros para ayudar a quienes toman decisiones. Dado que las estimaciones a futuro siempre tienen alguna medida de error, existe imprecisión en las proyecciones económicas. El efecto de la variación se puede determinar mediante un análisis de sensitividad.

Estas estimaciones siempre tienen un cierto grado de incertidumbre y las fuentes principales de ésta son, de acuerdo con [Olsen, 1996], la estimación de la demanda de servicio, la competencia entre operadores, el costo de los componentes de la red, el costo de operar nuevas arquitecturas de red, y otros factores más. Generalmente se varía un factor a la vez y se supone que existe independencia de unos factores con otros. Sin embargo, este supuesto no es correcto por completo en situaciones del mundo real, pero es práctico, puesto que en general es difícil considerar de manera precisa la correlación entre las variables.

De acuerdo con [Pike y Neale, 2003], el análisis de sensitividad en sí mismo es un estudio que determina la forma en cómo una de las métricas, vistas en la sección VI.4, se

alteran si un factor o parámetro en particular varía dentro de un rango establecido de valores. Cuando se considera la sensitividad de diversos parámetros para una alternativa utilizando una sola métrica de valor, es útil elaborar gráficas del cambio porcentual para cada parámetro contra la medida de valor. La Figura 35 ilustra el NPV contra cuatro parámetros diferentes para una alternativa dada. La variación de cada parámetro se indica como una desviación porcentual de la estimación más probable en el eje horizontal. Para utilizar la gráfica se puede seleccionar un parámetro determinado. Si la curva de respuesta NPV es plana, como el caso de la renta en la Figura 35, existe poca sensitividad del NPV a ese parámetro. Por otra parte, para este caso de estudio se puede observar que el valor de NPV es muy sensible al tráfico. Si se toma como ejemplo el de precio del servicio, una reducción del 30% del precio esperado del servicio provoca una disminución en el valor de NPV del 135% aproximadamente, mientras que un incremento del 10% en el precio del servicio lo aumenta cerca del 40%.

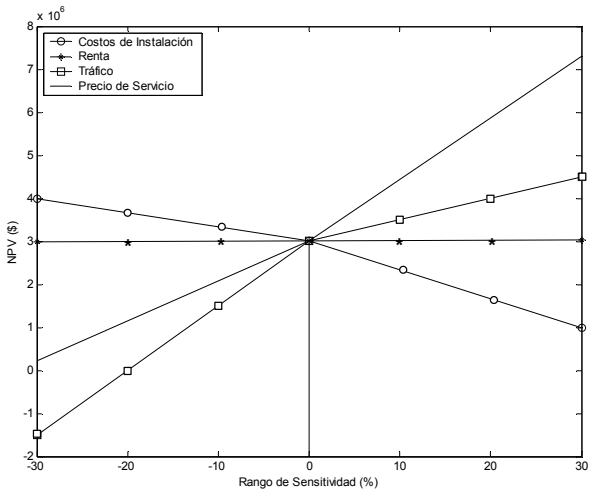


Figura 35. Ejemplo de una gráfica del análisis de sensitividad de variación porcentual.

El análisis de sensitividad es un método simple y se utiliza para identificar los factores más críticos que afectan la rentabilidad del proyecto. Sin embargo, éste no puede, utilizarse para evaluar el riesgo que se relaciona a estos factores. Con este tipo de análisis se puede conocer lo que es posible, pero no se puede saber qué tan probable es.

En el análisis de sensitividad se considera únicamente el efecto de cambiar una sola variable a la vez, lo que no representa una situación real. En los análisis de escenarios se pueden cambiar varias o todas las variables de manera simultánea, lo que permite analizar el mejor y el peor escenario de un proyecto. Sin embargo en este tipo de análisis no existe correlación entre las variables, por lo que tampoco representa una situación real.

En la Figura 36 se muestra un análisis de sensitividad que considera utilizar antenas conscientes del entorno, comparando los resultados con el escenario de la sección VI.4.3 que utiliza únicamente una antena omnidireccional. En este caso se considera que los valores de los costos de instalación, operación y mantenimiento de una antena consciente del entorno se toman de la Tabla X (antena Tipo 1). La cantidad de canales, *i,* por célula se obtiene de los valores obtenidos en la Figura 26 para un valor de probabilidad de interrupción del 1% y un valor del AS de 30º. En este caso, el valor de i=156 canales por célula considerando únicamente usuarios de voz. Se consideró el valor de AS=30º porque es el mejor escenario en cuanto a la cantidad de usuarios por célula. El costo de cada canal se toma de la Tabla X. La duración de cada llamada se toma de una función de distribución normal con media de 2.0 minutos, el cargo por renta mensual por usuario es de $25 dólares y la densidad de usuarios es de 0.0001 usuarios/m^2.

El análisis se realizó para cuatro parámetros del modelo técnico-económico: renta del servicio de voz, costo de instalación, mantenimiento y operación, precio del servicio y probabilidad de interrupción (P_{out}).

El valor de NPV se obtiene al sustituir los datos de entrada en las ecuaciones (58) y (64). Analizando la Figura 36 se observa que el valor de NPV para el proyecto de utilizar antenas conscientes del entorno, es de $-1.75 Millones, y utilizando la expresión (65) se obtiene el valor de IRR de 19%. Obtener un valor negativo de NPV significa que no es económicamente viable utilizar antenas conscientes del entorno, al menos considerando las condiciones que se establecieron como parámetros de entrada. El valor de NPV bajo las

condiciones iniciales de simulación se puede apreciar en la Figura 36 cuando el rango de sensitividad es cero.

En base a lo anterior se podría establecer que utilizar antenas conscientes del entorno no es una solución rentable dadas las condiciones del mercado mexicano. Sin embargo, con el análisis de sensitividad que se muestra en la Figura 36 se pueden analizar algunos de los parámetros críticos y establecer bajo qué condiciones se puede utilizar esta tecnología.

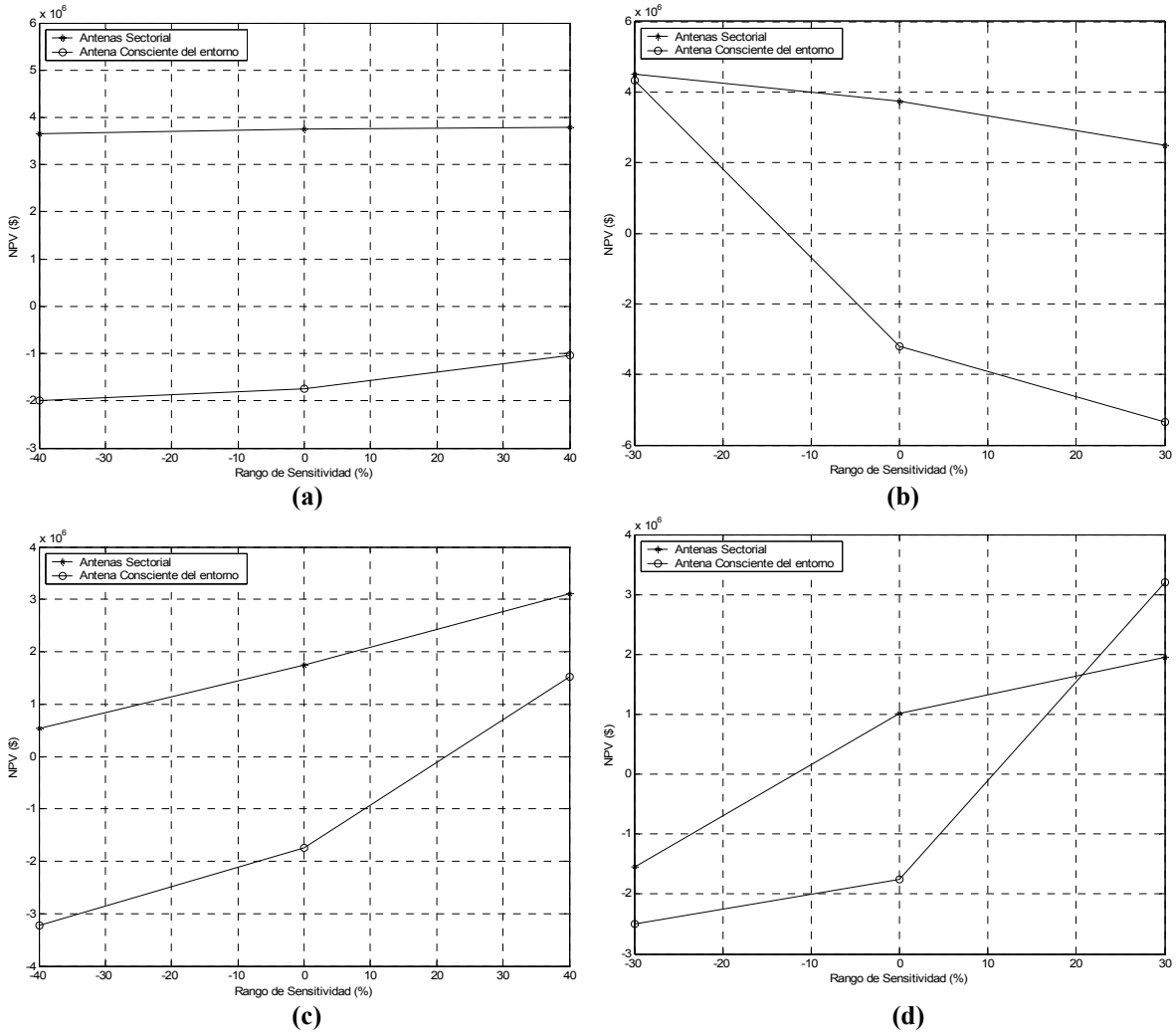


Figura 36. Análisis de sensitividad de los parámetros, (a) Renta mensual al usuario, (b) Costos de Instalación, mantenimiento y operación, (c) Precio del Servicio de voz, (d) Probabilidad de Interrupción.

Las curvas de sensitividad muestran, entre otras cosas, el cambio que se requiere en el parámetro de análisis, para que el proyecto sea económicamente rentable, esto es, que el valor de NPV sea positivo. Por ejemplo, en la Figura 36(a) se analiza la renta mensual que se le cobra al usuario por utilizar el servicio. En este caso se observa que incrementar el costo de la renta en un 40% no tiene mayor impacto en la decisión de apoyar el proyecto de inversión. En cambio en la Figura 36(c), donde se analiza la cantidad de usuarios del sistema, se puede observar un cambio positivo en el valor de NPV cuando la cantidad de usuarios es 30% mayor. También se observa que este valor de NPV es mayor que el valor de NPV utilizando antenas sectoriales. Lo anterior se debe a lo siguiente: si el número de usuarios crece, es necesario agregar nuevas estaciones base del tipo sectorial debido a que no soporta una mayor cantidad de usuarios, a diferencia de utilizar antenas conscientes del entorno las cuales si se pueden adaptar al crecimiento de usuarios activos. Las antenas convierten al sistema en una red limitada por capacidad.

VI.6 CONCLUSIONES

En éste capítulo se describieron algunos de los modelos comerciales que se utilizan para realizar evaluaciones técnico-económicas que toman como base algunos proyectos académicos de la Unión Europea. Se realizó la evaluación de viabilidad económica de utilizar la tecnología de antenas conscientes del entorno en un sistema de comunicaciones móviles celulares. Se observó que con las condiciones iniciales de mercado, la tecnología no era lo suficientemente rentable para apoyar el proyecto. Mediante un análisis de sensitividad se identificaron los factores críticos que afectan la rentabilidad del proyecto. Al parecer uno de los factores que mayor impacto tiene en la planificación de redes CDMA es la cantidad de usuarios que puede soportar dicha red, aunque esto afecta directamente la calidad del servicio o los costos de la red. En este análisis se consideró únicamente el efecto de cambiar una sola variable a la vez para el análisis.

Tomando en cuenta los conceptos y terminología vistos en este capítulo, y para fines de aplicar el modelo propuesto en este trabajo de investigación, en el capítulo VII se analiza un caso de estudio donde se realiza la evaluación técnica y económica de migrar un sistema 2G hacia una red 3G.

Capítulo VII

Análisis Técnico-Económico de la Evolución de Redes Móviles Celulares

Al momento de diseñar una red 3G nos encontramos con dos diferencias cruciales con respecto al diseño de una red 2G: primero la reutilización y asignación de frecuencias no es un elemento imprescindible en la planificación, puesto que 3G parte de la teoría de reutilizar todas las frecuencias; en segundo lugar la capacidad de comunicación entre un usuario y su estación base dependerá en gran medida de los demás usuarios y del servicio que estos utilicen.

El propósito de este capítulo es aplicar la metodología técnico-económica que se propuso en el capítulo VI, para el caso particular de evaluar la viabilidad económica de implantar algunas estrategias de redes que permitan la evolución hacia un sistema 3G. Se generaron varios casos de estudio que utilizarán los operadores como oportunidad de inversión tecnológica para ofrecer servicios de nueva generación. La evaluación considera aspectos técnicos, tales como, el dimensionamiento de la red, la cantidad de usuarios, el tráfico y la capacidad de la red, así como también parámetros económicos, como son los costos de instalación, de operación y de mantenimiento de cada elemento de la red, los precios del servicio que ofrece la red y los datos de mercado de la región donde se ofrecerá el servicio. El análisis considera una ventana de tiempo de 10 años y los resultados se obtienen utilizando métodos de ingeniería económica que se presentan en términos económicos tales como el NPV y el IRR.

VII.1 ANTECEDENTES

La visión inicial de la ITU fue la de desarrollar un estándar común 3G que pudiera utilizarse en todo el mundo. Sin embargo, debido a intereses económicos y políticos diversos, esta idea no se pudo concretar, y a la fecha la meta del proyecto IMT-2000 es

asegurar, al menos, la compatibilidad entre los diferentes estándares 3G existentes (véase capítulo II). En la práctica no existe tal compatibilidad, sobre todo entre los sistemas de mayor demanda comercial como son WCDMA y cdma2000.

En la Figura 37 se ilustran las distintas formas de evolución y de desarrollo de una red 3G. Es difícil determinar, la opción adecuada para migrar la tecnología 2G hacia una 3G. Por lo anterior es necesario desarrollar herramientas de cómputo para evaluar distintas estrategias de evolución de redes.

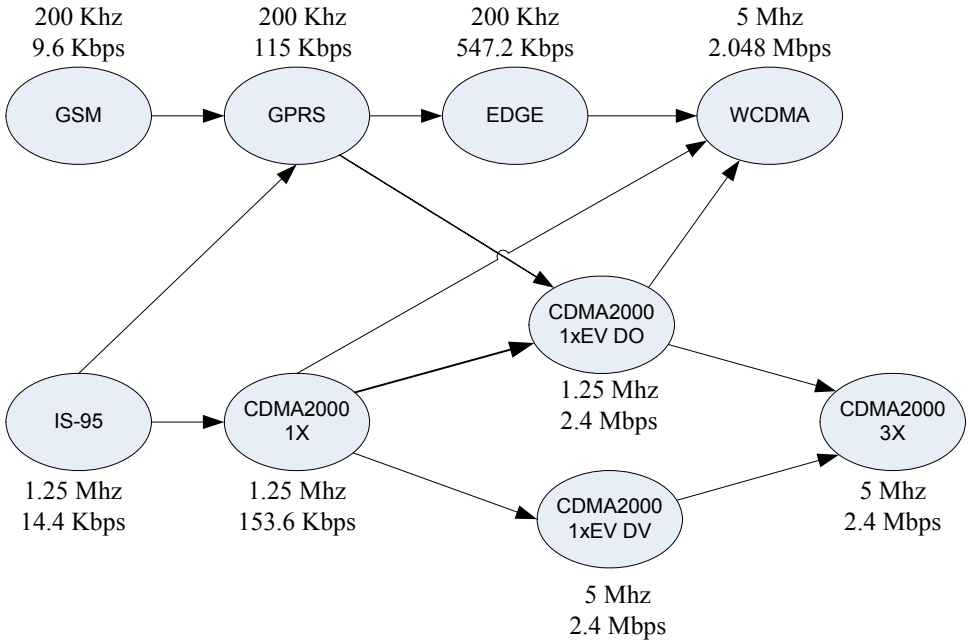


Figura 37. Diagrama de simulación para la evolución de redes 2G hacia un sistema 3G.

En teoría, los operadores GSM pueden emigrar hacia un sistema WCDMA o CDM2000, ya que la tecnología de sus redes es muy similar (ambas utilizan SS7) y sin embargo las dos vías necesitaran una interfaz aérea. A pesar de lo anterior, está definido que el camino de migración de GSM será hacia WCDMA [Henten y Saugstrup, 2004]. Por lo anterior en este capítulo no se considera dentro de la evaluación este camino de evolución.

Aunque existe una solución alterna para emigrar de GSM a CDMA2000, ésta consiste en desarrollar en paralelo los dos sistemas. Esto no se ve algo racional, ya que para los operadores ofrecer servicios de dos redes distintas donde no existe posibilidad de roaming, es una idea descabellada. Una diferencia notable entre GSM y cdmaOne es que los servicio GSM están estandarizados, lo que significa que servicios como SMS y MMS se pueden ofrecer como soluciones globales, mientras que para cdmaOne las variantes son propietarias, lo cual permite ofrecer servicios mas rápido que GSM, pero al mismo tiempo produce poca interoperabilidad entre operadores.

Para cdmaOne la evolución lógica hacia 3G sería por la vía de CDM2000-1X, la cual consiste en implementar e integrar una red de conmutación de paquetes. Lo anterior se logra agregando tarjetas de modems que administre canales de datos en la EB. Además del hecho de que CDMA2000 utiliza la misma frecuencia portadora de cdmaOne, lo que permitirá una cómoda transición hacia CDMA2000-1X y CDMA2000-1X-EVDO. Sin embargo se debe recordar que CDMA2000-1X-EVDO utiliza un canal aparte del de voz para transmitir los datos. La evolución de cdmaOne o CDMA2000-1X hacia WCDMA requerirá implementar toda una red completa sobre la red CDMA existente.

Haciendo referencia a la Figura 37, para el estudio de este capítulo se van a evaluar las siguientes estrategias de evolución

1).- CDMA2000-1X→1X-EVDO→WCDMA
2).- CDMA2000-1X→WCDMA
3).- CDMA2999-1X→1X-EVDV

VII.2 ESTRUCTURA DEL MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO.

Se utilizará el modelo técnico-económico propuesto en la sección VI.2. En la Figura 38 se ilustra el diagrama de flujo del modelo propuesto. El modelo considera dos tipos de entrada de datos: los que se relacionan con el entorno de análisis, que se representa en la

Figura 38 por los rectángulos que no están sombreados, y los que tienen que ver con decisiones del proveedor del servicio (rectángulos sombreados). Los datos asociados con los factores del entorno incluyen la morfología del área de servicio, población, distribución de las EB, tipos de servicio, parámetros de tráfico para cada clase servicio, precio por cada elemento de la red y finalmente los costos de operación y mantenimiento. Los datos que tienen que ver con las decisiones estratégicas incluyen, el plan de desarrollo de la red, el plan para proveer el servicio, plan de cobertura, asignación de servicios a las redes y el plan de migración de los usuarios.

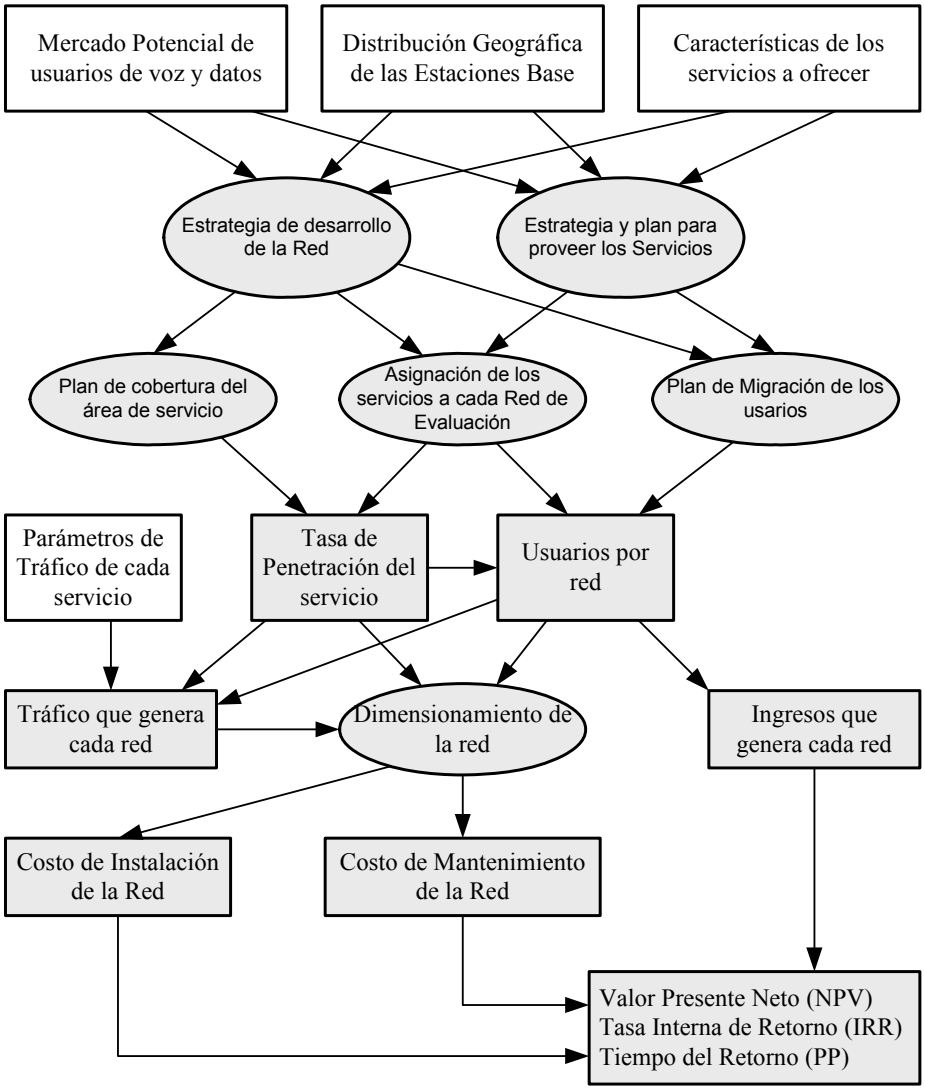


Figura 38. Diagrama de Flujo del modelo Técnico-Económico.

VII.3 Componentes del modelo.

En esta sección se explican en detalle los componentes técnicos del modelo, tales como la penetración de mercado, cantidad de usuarios, carga del tráfico y dimensionamiento de la red.

VII.2.1 Tasa de Penetración del Servicio.

La tasa de penetración del servicio de una región se determina por el área de cobertura geográfica, por el precio del servicio que se ofrece en la región y por lo atractivo del servicio. Sin embargo, para un proveedor de servicio estos factores determinarán en un momento dado la competitividad del mercado, el cual variará dependendiendo del propio desarrollo de la red y de los planes de cobertura. Para propósitos de este trabajo, se estima la tasa de penetración para el servicio de voz y datos en forma separada.

En este modelo se estima primero la tasa de penetración de mercado y después se estima el porcentaje de usuarios de voz y datos que existirán en la red. En las ecuaciones (66) y (67) se representa formalmente el cálculo de la tasa de penetración para los servicios de voz y datos respectivamente

$$\rho_v^t = \rho_w^t \cdot \varpi_v^t(i) \cdot \theta_v^t \tag{66}$$

$$\rho_D^t = \rho_w^t \cdot \varpi_D^t(i) \cdot \theta_D^t \tag{67}$$

donde $\rho_v^t(i)$ y $\rho_D^t(i)$ son la tasa de penetración o porcentaje de usuarios de voz y datos del operador *i* en el año *t* respectivamente, ρ_w^t es la tasa de penetración de mercado en el año *t.* Para el estudio se considera México como el escenario de mercado, por lo que los valores que toma la variable ρ_w^t durante el periodo de estudio se asignan de la Figura 32. Estos valores se tomaron directamente de las estadísticas que maneja la Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL, organismo regulador en México) y reflejan la tasa de penetración del mercado de usuarios móviles en México, en este caso se está considerando el comportamiento del servicio móvil 2G como base para el análisis.

Los parametros ϖ_V^t y $\varpi_D^t(i)$ son el porcentaje de usuarios de voz y de datos del operador del servicio *i* en el año *t* respectivamente, en pocas palabras es lo que se conoce como el "posicionamiento en el mercado". Lo anterior establece la cantidad de usuarios de voz o de datos con que cuenta un solo operador, en México existen 5 operadores comerciales que ofrecen servicio móvil, lo que significa que el mercado móvil considerando que todos los usuarios son de voz en el país se reparte entre 5, esto es, un "market share" del 20%. Lo anterior se cumple en el caso de que todos los operadores tuvieran el mismo número de usuarios en sus redes. Aunque en México, Telcel cuenta el 75% de posicionamiento del mercado. θ_V^t y θ_D^t son los porcentajes de usuarios de voz y datos en el año *t*.

VII.2.2 Cantidad de Usuarios.

En un entorno de múltiples servicios, los usuarios emigran frecuentemente de una red con servicios básico (2G) hacia redes de servicios avanzados (3G). Por lo que, dada la tasa de crecimiento de la base de usuarios, la transición de estos usuarios entre las diferentes opciones de redes 3G se modela utilizando un diagrama de transición como el que se muestra en la Figura 39.

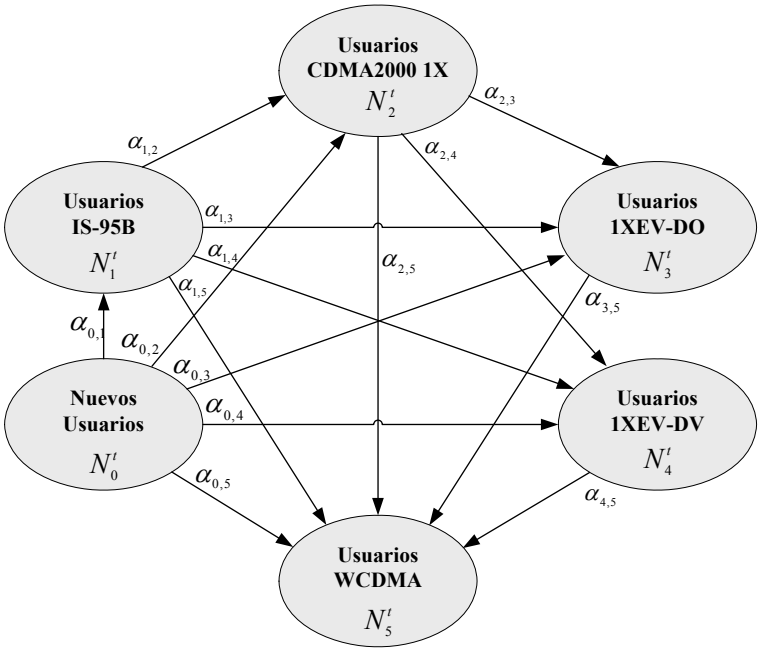


Figura 39. Diagrama de Transición de usuarios entre redes.

Tomando en cuenta la Figura 39, el número de usuarios para una red específica se determina por el número de usuarios base que existen en la red, la cantidad de usuarios que emigran hacia otra red y por la cantidad de usuarios que ingresan de otra red. La dinámica que se presenta en el mercado debido a que los usuarios emigran de una red *i* a otra red *j* en el año *t*, se expresa como

$$N_i^t = (1 - \sum_j \alpha_{i,j}^{t-1}) N_i^{t-1} + \sum_j \alpha_{i,j}^t N_j^{t-1} \tag{68}$$

donde $\alpha_{i,j}^t$ representa el porcentaje de usuarios que emigra de su red actual *i,* hacia una nueva red *j* en el año *t,* y N_i^t es el número total de usuarios que existen en la red *i* en el año *t*. El primer término de la ecuación (68) representa los usuarios que emigran de la red *i* a la red *j,* mientras que el segundo término es la cantidad total de usuarios que ingresan de la red *j* a la red *i*. Esta expresión se aplica en forma separada para servicios de voz y datos.

Los usuarios emigran de una red de menor generación hacia una superior. Se entiende por red de menor generación aquellas como GSM o IS-95, redes del tipo 2G. En este trabajo nunca sucede lo contrario. Lo anterior refleja que un usuario que tenía un contrato con un operador 2G emigrará hacia un servicio 3G y no al revés, aunque lo anterior no es del todo cierto, ya que existen otros factores que pueden hacer cambiar al usuario de una red 3G hacia una 2G, como por ejemplo, que el servicio no alcance los niveles de calidad esperado o que el precio de alguno de los servicios sea muy elevado. Sin embargo, en este trabajo no se considera este último caso.

El mercado móvil en México experimentó en años recientes una transición similar con los servicios de 1G a 2G y de servicios 2G hacia uno 2.5G. La mayoría de los usuarios emigraron de un servicio TDMA a uno GSM y en otros casos de un servicio IS-95 hacia uno CDMA2000 1X, que aparentemente sería la evolución natural de una red celular, mas no de los usuarios. Lo que significa que un usuario puede cambiar de tecnología independientemente de la cual utilice actualmente. En otro caso particular, Telefónica

Móviles de México (TMM) adquirió, en septiembre del 2002 el 65.23% del capital del grupo Pegaso PCS y de los cuatro operadores celulares CDMA, y por cuestiones de políticas de la empresa los usuarios tuvieron que emigrar de un servicio CDMA hacia uno GSM. Por lo anterior, se considera en este trabajo la evaluación de una red CDMA que evoluciona hacia un sistema 3G del tipo WCDMA.

VII.2.3 Cantidad de Tráfico en el sistema.

Tomando en cuenta la Figura 38, el tráfico total que existe en cada red se afecta por el número de usuarios que existe en cada red, los parámetros de tráfico del servicio que se ofrece y por la tasa de penetración de cada servicio que se ofrece en la red.

En la Tabla XII se muestran los parámetros de tráfico de los servicios que se utilizaron en el modelo. La carga total de tráfico para voz y datos, $T_V^t(j)$ y $T_D^t(j)$ respectivamente, que existe en la red *j* para el año *t* se representan por las expresiones (69) y (70)

$$T_V^t(j) = \lambda_1 \cdot N_V^t \tag{69}$$

$$T_D^t(j) = \lambda_i \cdot N_D^t \tag{70}$$

donde *i* representa la clase de servicio y λ_i la carga de trafico por usuario por servicio.

Tabla XII. Clases de servicio para Tercera Generación

Conmutación Circuito/Paquete	Jerarquías del Servicio	Servicios	Velocidad Nominal (kbps)
Circuito	Conversacional	Voz	9.6
Circuito	Conversacional	Video llamada	100
Paquete	Conversacional	Voz sobre IP	16
Paquete	Interactivo	Servicio SMS	1.7
Paquete	Interactivo	Correo electrónico	8.2
Paquete	Tiempo real	Video	100

VII.2.4 Dimensionamiento de la Red.

El procedimiento para dimensionar la red consiste en determinar el número de canales que se necesitan por EB, la capacidad de las líneas de transmisión, la cantidad de controladores y conmutadores.

El procedimiento consiste en determinar la capacidad que requiere la red, tomando en cuenta los niveles de QoS que especifica el proveedor del servicio. Para estimar la cantidad de canales que se requieren en cada red a evaluar, se utilizarán las Figuras 26 a la 28. La cantidad de canales, N_{ch}, dependerá del nivel de QoS, medido en Probabilidad de Interrupción (P_{out}) en la sección V.5.2.

VII.3 EVALUACION DE LA ESTRATEGIA DE EVOLUCIÓN UTILIZANDO UN ESCENARIO DE ANÁLISIS

Con el fin de demostrar la utilidad del modelo, se consideró como escenario de aplicación el mercado mexicano. Con el fin de realizar un análisis lo más objetivo posible se tomó en cuenta a un solo operador de servicio y se incorporaron algunos datos de su situación de mercado. En la Figura 40 se muestra la estructura de cómo se van a generar los diferentes escenarios de evaluación. Se puede observar en la Figura 40 que se evaluarán seis estrategias de desarrollo con seis diferentes planes de cobertura y con dos escenarios de respuesta del mercado.

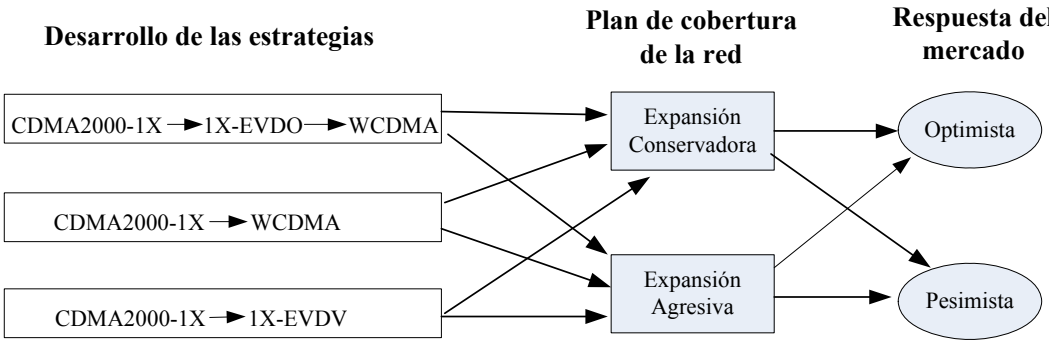


Figura 40. Generación de los escenarios de análisis.

Para el plan de cobertura del área de servicio se consideran dos estrategias de expansión de para cada red del operador. Para el caso de *expansión ambiciosa* la red alcanza una cobertura completa del área de servicio dentro de los primeros cuatro años del periodo de estudio, iniciando con un 50% de cobertura en el primer año de lanzamiento de la red. Por el otro lado la *expansión conservadora* inicia con una cobertura del 10% y alcanzan la cobertura completa hasta el noveno año de lanzamiento de la red.

En la respuesta del mercado se consideran dos casos, el pesimista que es la situación de mercado actual del operador y la optimista que considera un incremento de los parámetros involucrados. La Tabla XIII muestra los datos para ambas respuestas de mercado.

El valor de ARPU (Ingreso Promedio por Usuario) mide los ingresos medios por usuario generados por compañías que poseen una amplia base de usuarios residenciales. El ARPU incluye ingresos por venta de tiempo aire e interconexión por concepto de tráfico entrante. Tradicionalmente el ARPU se calcula de acuerdo al número de minutos de uso por la tarifa correspondiente y el resultado dividido entre los usuarios finales del periodo. En el caso de algunos operadores en México, dicha metodología consideraría los minutos de regalo que se proporcionan al cliente al momento de la activación. Como resultado, los niveles de ARPU calculados por este método sobreestimarían el ingreso mensual que la empresa recibe por usuario. En este caso en junio de este año el valor de ARPU para el operador líder del mercado con tecnología GSM es de 186 pesos [Telcel, 2005]. Y si se esta considerando un incremento del 20% anual, para el caso pesimista significa que el próximo año se tendrá un ARPU de 223.20 pesos. Para uno operador CDMA el ARPU que contabilizó el mes pasado es de 115 pesos.

Para este caso los ingresos de cada usuario se calculan solamente por el primer año en base a la ecuación (55) y se incrementa por año en un 60% y 20 % para los casos optimista y pesimista respectivamente, durante los 10 años del periodo de estudio. Los costos del desarrollo e implantación de cada red se toman de las Tablas X y XI y se calculan en base a la ecuación (57). Con la ecuación (64) se obtiene el valor de NPV y con la ecuación (65) se calcula el IRR.

Tomando en cuenta los datos de la Tabla XIII, se generaron los parámetros de entrada para cada año de estudio considerando una población de 100,000,000 de habitantes en el país, los resultados se muestran en la tabla XIV y XV para los escenarios optimista y pesimista respectivamente.

Tabla XIII. Resumen de los datos de mercado para los Escenarios

	Consideraciones de la respuesta del mercado durante el periodo de estudio (10 años)	
Factores	**Escenario optimista**	**Escenario pesimista**
Tasa de Penetración	Incremento del 10% al 65%	Incremento del 10% al 42%
Market share	Incremento del 25% al 40%	Se mantiene en 25%
Proporción de los usuarios de datos	Incremento del 10% al 60%	Incremento del 10% al 40%
Probabilidades de transición ($\alpha_{i,j}$)	10% para el primer año de introducción de la red y 30% en años posteriores	5% para el primer año de introducción de la red y 10% en año posteriores
Total del ARPU	Incremento de 60% durante los años 1 a10	Incremento del 20% durante los años 1 a10

Tabla XIV. Datos de entrada del modelo, caso optimista

	Año									
Parámetro	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Tasa de crecimiento (%)	0.61	0.63	0.60	0.57	0.54	0.52	0.49	0.46	0.44	0.41
Tasa de penetración, ρ_w (%)	10	20	25	30	35	40	50	55	60	65
Market Share, ϖ^t (%)	25	28	32	33	34	35	36	37	38	40
% de usuarios de voz, θ_v	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% de usuarios de datos, θ_d	10	15	20	25	32	38	45	50	55	60

Tabla XV. Datos de entrada del modelo, caso pesimista

	Año									
Parámetro	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Tasa de crecimiento (%)	0.61	0.63	0.60	0.57	0.54	0.52	0.49	0.46	0.44	0.42
Tasa de penetración (%)	10	15	20	25	30	32	35	38	40	42
Market Share (%)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
% de usuarios de voz	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% de usuarios de datos	10	12	14	15	20	25	30	34	37	40

VII.4 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Considerando las suposiciones y los parámetros de entrada de la sección VII.3, se puede realizar el análisis económico para los escenarios de la Figura 40 que se plantean en este trabajo. En la Figura 41 se analizan los ingresos y costos que se generan en la red, con estos datos y utilizando la ecuación (60) se puede obtener el valor de flujo de efectivo (NCF), como se muestra en la Figura 42. Los resultados de las Figuras 41 y 42 únicamente reflejan el análisis para el escenario de red CDMA2000-1X→1XEVDO→WCDMA considerando expansión ambiciosa y escenario de mercado optimista.

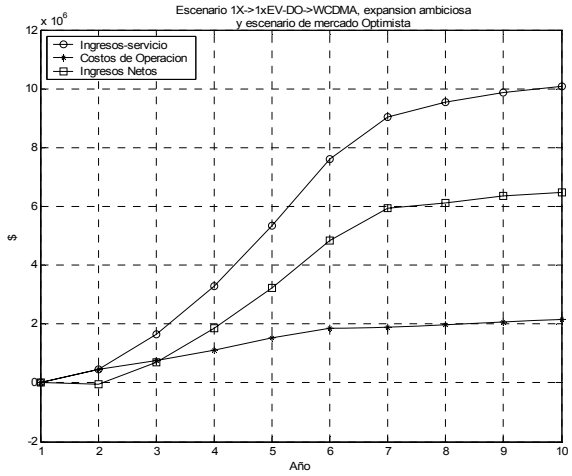


Figura 41. Cálculo de los Ingresos Netos para el escenario CDMA2000-1X→1X-EVDO→WCDMA, con expansión ambiciosa y escenario de mercado optimista.

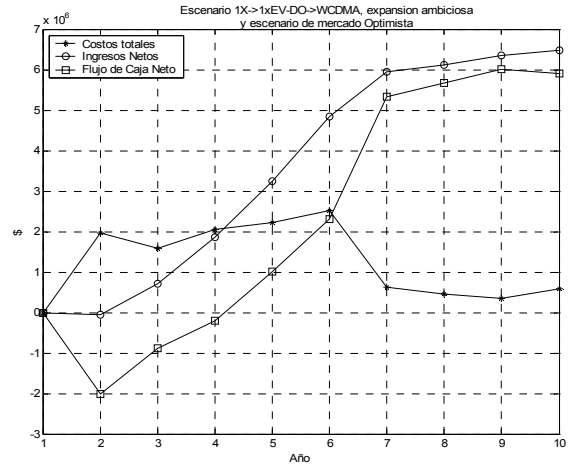
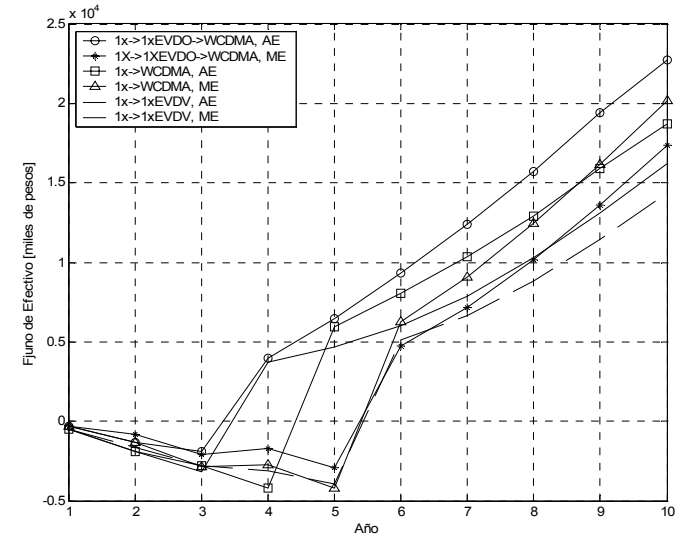


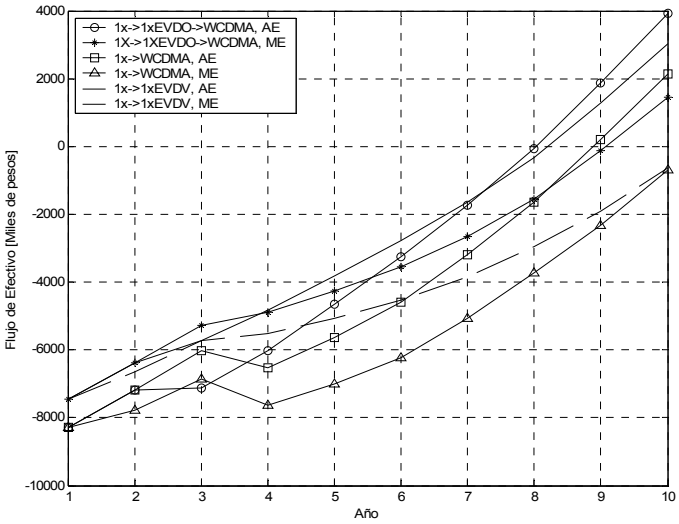
Figura 42. Cálculo del Flujo de Efectivo (NCF) para el escenario CDMA2000-1X→1X-EVDO →WCDMA, con expansión ambiciosa y escenario de mercado optimista.

En la Figure 43 se muestra el cálculo de los flujos de efectivo para todos los 6 escenarios de estrategias de evolución de redes. En la Figura 43(a) se analiza el caso de utilizar un escenario de mercado optimista, mientras que en la Figura 43(b) se analiza el caso pesimista. Para fines de análisis y no por alguna situación en particular, se describirán los resultados que se obtuvieron para la estrategia de evolución CDMA20001X→ WCDMA. Analizando el escenario pesimista de la 43(b), que refleja la situación actual del

mercado en el país, se puede observar que la inversión en la estrategia CDMA20001X→ WCDMA tiene un flujo de efectivo negativo en todo el periodo de estudio por lo que emigrar una red CDMA2000-1X hacia una red WCDMA directamente necesita mayor inversión, en las dos condiciones de expansión tanto para la red moderada (ME) como para la ambiciosa (AE). Además se puede observar que en ningún momento presenta cantidades positivas del Flujo de Efectivo durante todo el periodo de estudio.



(a)



(b)

Figure 43. Cálculo del Flujo de Efectivo (NCF) para los escenarios de análisis. (a) Escenario de mercado Optimista. (b) Escenario de mercado Pesimista.

Con los valores NCF que se obtuvieron en la Figure 43 y utilizando las ecuaciones (64) y (65) se puede calcular el valor de NPV, IRR y de PP. Para este caso se utilizó un valor de tasa de interés, *r,* del 10%.

Si se analiza el valor de NPV de la Tabla XVII para la estrategia CDMA20001X→ WCDMA para el caso pesimista, se puede observar que en ambos casos el valor es negativo, NPV=$-4.10 millones de pesos para AE y NPV=$-5.56 millones de pesos para ME. Lo que significa que este proyecto no es factible económicamente para implementarse en México bajo las condiciones iniciales que se establecieron al inicio del estudio. Se puede observar un comportamiento similar de esta estrategia en un escenario de mercado optimista, como se observa en la Figura 43(a), para este escenario la estrategia de evolución de red CDMA2000-1X→WCDMA también presenta un comportamiento similar al caso pesimista, solo que aquí después del quinto año los resultados son más favorables comparados con el escenario pesimisista, que incluso mejora los resultados el Flujo de Efectivo de otras estrategias en hasta un 20% aproximadamente. Cabe aclarar, que este parámetro no determina la rentabilidad del proyecto, para eso se tiene que utilizar el valor de NPV que le corresponde a cada estrategia de desarrollo de la Tabla XVI. Se pueden observar en la Tabla XVI que los valores de NPV son positivos para la estrategia de evolución de CDMA2000-1X→WCDMA en el escenario de mercado optimista, tanto para una expansión ambiciona como moderada, lo que significa que para este escenario el proyecto es rentable, sin embargo estos valores NPV no son mejores que los que presentan las otras estrategias. Además, que los periodos de recuperación de la inversión son mayores al menos en 1 a 1.5 años comparado con las otras soluciones.

Se puede realizar un análisis similar a cada estrategia de red propuesta. En la Tabla XVI y XVII se muestran los valores de NPV, IRR y PP para todas las estrategias de evolución de la red y escenarios de mercado. Se puede observar que con las condiciones del mercado mexicano (esto es un escenario pesimista) las propuestas no son económicamente viables, ya que todos los valores de NPV son negativos y los periodos de recuperación de la inversión son mayores a los cinco años. Para el escenario de mercado optimista, todas las

propuestas son económicamente factibles de implementarse y de hecho se presentan tres que tienen periodos de recuperación menores a los cinco años. Lo anterior significa que existe la oportunidad de ofrecer servicios de 3G en México siempre y cuando se cumplan las condiciones establecidas al inicio del estudio.

Tabla XVI. Cálculo del NPV, IRR, PP de las estrategias de análisis con escenario de mercado optimista

Estrategia de red	NPV (millones de pesos)	IRR (%)	PP (años)
1x->1x-EVDO->WCDMA, AE	21.8	15.7	4.5
1x->1x-EVDO->WCDMA, ME	19.6	14.6	4.9
1x->WCDMA, AE	12.9	22.4	5.2
1x->WCDMA, ME	11.5	23.9	4.7
1x->1XEV-DV, AE	18.5	15.7	4.6
1x->1XEV-DV, ME	16.8	19.1	5

AE=Expansión ambiciosa
ME=Expansión Moderada

Tabla XVII. Cálculo del NPV, IRR, PP de las estrategias de análisis con escenario de mercado pesimista

Estrategia de red	NPV (millones de pesos)	IRR (%)	PP (años)
1x->1x-EVDO->WCDMA, AE	-0.9	18	5.6
1x->1x-EVDO->WCDMA, ME	-1.26	19.6	6.1
1x->WCDMA, AE	-4.10	23.5	7.5
1x->WCDMA, ME	-5.56	21.02	6.9
1x->1XEV-DV, AE	-0.86	14.7	6.5
1x->1XEV-DV, ME	-1.23	25	6.8

AE=Expansión ambiciosa
ME=Expansión Moderada

VII.4.1 Análisis de Riesgo.

Todas las cosas en el mundo varían, unas con respecto a otras, en el tiempo y con entornos diferentes. Los análisis de riesgo se pueden realizar mediante la técnica Monte Carlo, la cual evalúa el impacto de la incertidumbre de múltiples parámetros de entrada (ya sean independientes o no). En cada ejecución de la simulación se asignan números aleatorios a cada variable o parámetro de entrada para generar cientos de posibles

escenarios, esto es, se producen una combinación de variables de acuerdo a una probabilidad de distribución predefinida.

En función de los resultados que se mostraron en la sección anterior y para descartar la posibilidad de que no se hayan considerado todos los parámetros que se pudieran considerar en el caso de estudio y también la falta de utilizar valores reales. En esta sección se realiza un análisis de riesgo con el fin de comparar múltiples soluciones y escenarios de las distintas estrategias de evolución [Higgins, 2001].

El procedimiento consiste en definir el tipo de función de distribución de probabilidad que se le asignará a una o varias variables de entrada

Para propósitos de este trabajo y en base a recomendaciones hechas en [Drakopoulos, 1999] se consideraran las siguientes variables aleatorias con su respectiva distribución de probabilidad

1.-. El precio del servicio sigue una distribución triangular con valores mínimos y máximos del 50% y 120% respectivamente, con respecto al valor más probable de los precios por tecnología de la Tabla IX.

2.- El tráfico, sigue una distribución de probabilidad normal, la desviación estándar se supone del 10% con respecto al valor promedio del tráfico. El valor promedio del tráfico se obtiene de las ecuaciones (69) y (70).

3.- Los costos de operación siguen una distribución lognormal, el máximo y mínimo con respecto al valor promedio es de 40% y 70% respectivamente, y la desviación estándar es el 10% del valor promedio.

Se supone que no existe correlación entre las variables de estudio, además todas las variables de decisión se establecen a partir del primer año de estudio y por tanto son irreversibles.

El algoritmo de simulación consiste en generar todos los escenarios posibles, al combinar todos los valores que toma la variable aleatoria. Cada escenario produce un valor

de salida de NPV, y al final de la simulación se tiene una descripción estadística del valor de salida de todos los escenarios juntos, la cual es el resultado de la simulación.

En la Figura 44 se observa la distribución de probabilidad de los ingresos que se obtienen del proyecto CDMA2000-1X→WCDMA con expansión moderada (ME) y para el caso de un escenario de mercado pesimista en el primer año de ejecución del proyecto.

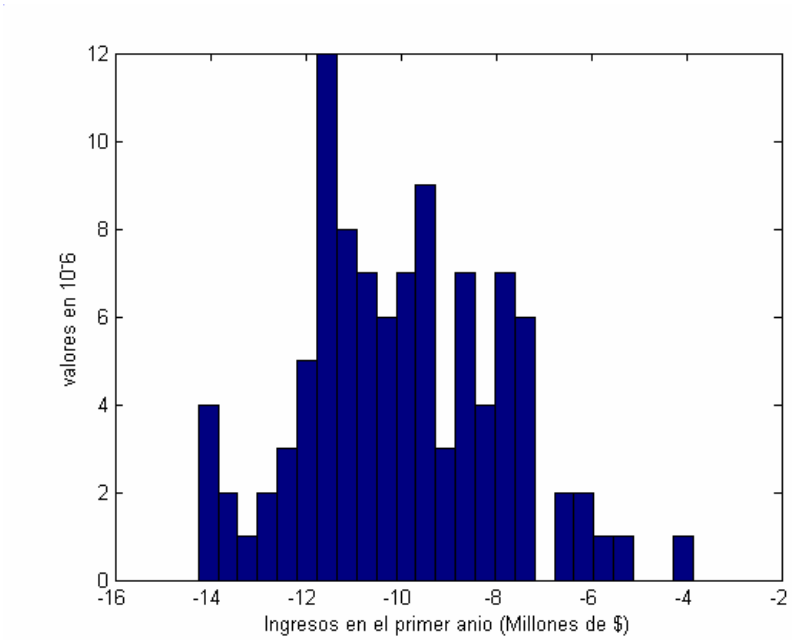


Figura 44. Distribución de Probabilidad de los ingresos del proyecto de inversión CDMA2000-1X→WCDMA en el primer año de ejecución

Con el resultado de la Figura 44, se puede asegurar una probabilidad del 100% de que no se obtendrán ganancias positivas en el primer año del periodo de estudio del proyecto.

La Figura 45 muestra la evaluación de riesgo de todas las estrategias de evolución que se plantean en este trabajo. Se puede observar en la Figura 45 que el eje *x,* representa el promedio de los NPV entre los escenario optimista y pesimista de los proyectos, por lo que los valores del eje *x* evaluan la rentabilidad del proyecto de inversión, mientras que el eje *y* representa la diferencia de los valores de NPV de los escenarios optimista y pesimista de cada estrategia, lo que representa el riesgo implícito en el proyecto.

De los resultados que se presentan en la Figura 45, se puede observar que la estrategia de evolución económicamente más viable es la 1X→1XEV con expansión ambiciosa, ya que tiene mayor valor de NPV. Sin embargo, es la estrategia que presenta mayor riesgo de las seis opciones de desarrollo. Mientras que la evolución 1X→1XEVDO→WCDMA con expansión moderada mantiene la rentabilidad más pobre.

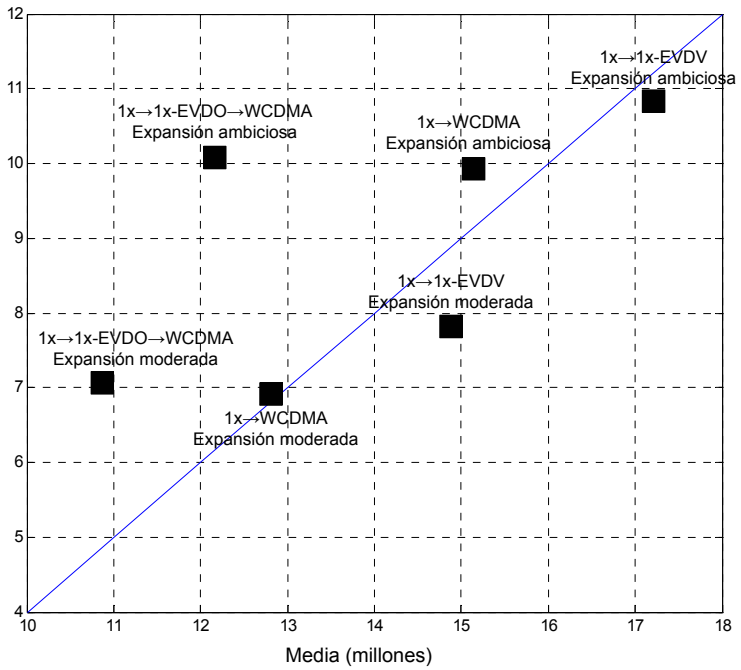


Figura 45. Evaluación del riesgo para las diferentes estrategias de evolución de redes

De la figura 45 se pueden excluir dos estrategias con menor probabilidad de tener éxito en comparación con las otras cuatro. Las cuatro que pueden tener éxito son 1X→WCDMA con expansión moderada, 1X→1X-EVDV con expansión moderada, 1X→WCDMA con expansión ambiciosa y 1X→1XEV-DV con expansión ambiciosa.

De estas opciones cual sería la mejor opción para un proveedor de servicio. Todo dependerá de la preferencia subjetiva de riesgo y la toma de decisiones permitirá tomar conciencia del mercado tecnológico que existe en la región aunque se debe considerar la comercialización. Al parecer la estrategia 1X→1X-EVDV necesita desarrollarse con mayor estabilidad antes de ofrecerse comercialmente.

El plan para proporcionar el servicio de cualquiera de las redes debe ser estratégico en el sentido de que involucra una variedad de riesgo y no puede hacerse por algún camino independiente, el mercado actual restringe la posición del numero de opciones estratégicas que proveedor puede tomar. Algunas veces, el requerimiento tecnológico para satisfacer el respaldo y compatibilidad restringe al proveedor del servicio a tener opciones o variedades de desarrollos tecnológicos.

Capítulo VIII

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo de tesis se propuso una metodología que permite evaluar el diseño y planificación, desde un punto de vista Técnico y Económico, de un Sistema de Comunicaciones Móvil Celular de Tercera Generación. En este capítulo final se presenta un resumen de esta investigación y se describen algunas posibles futuras áreas de investigación.

8.1 RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

En la primera parte de este trabajo se describieron las principales características de los diferentes estándares de interfaz aérea que se utilizarán en los futuros sistemas móviles celulares de Tercera Generación. Se discutió y analizó el camino de evolución que las distintas redes de 2G pueden tomar para ofrecer servicios 3G. Lo que se puede resaltar de esta parte de la investigación es que hasta este momento es difícil establecer cual de las tecnologías 3G será la dominante en el mercado en los próximos años. Se afirma que la tecnología CDMA2000 es la que se encuentra en mejor posición en el mercado global hasta este momento con 80 millones de usuarios contra los 22 millones de WCDMA. Por mencionar un ejemplo, en el mercado Coreano la tecnología CDMA cuenta con un impresionante numero de clientes, y en el mercado japonés, la empresa NTT DoComo, con su espectacular servicio FOMA que utiliza tecnología WCDMA, no ha alcanzado el éxito que tiene la empresa coreana KDDI con su tecnología CDMA. A pesar de lo anterior, las estadísticas muestran que la tecnología WCDMA poco a poco empezará a dominar el mercado, aun cuando CDMA2000 es mas sencillo de implementar, y no es que WCDMA sea mejor tecnológicamente que la familia de CDMA2000, sino que el camino de evolución hacia ofrecer servicios WCDMA estuvo mejor planeada desde el inicio, haciendo un camino dependiente de evolución para los operadores GSM hacia WCDMA. Y como se mencionó al inicio de este trabajo GSM tiene el 70% de los clientes a nivel mundial.

Lo que es un hecho es que ya se decidió acerca del método de acceso que será la base para los sistemas 3G, al menos para los que tienen mayor dominio comercial, como son WCDMA y CDMA2000. El método de Acceso Múltiple por División de Código-Secuencia Directa (DS-CDMA), es una técnica de acceso múltiple en la que todos los usuarios comparten el mismo canal de comunicaciones durante el tiempo que están activos, lo que produce mayor interferencia en el canal inalámbrico. Esta interferencia es la principal limitación en la capacidad de tráfico de dichos sistemas. Por lo anterior en este trabajo se propuso como solución a este problema utilizar Antenas conscientes del entorno en las Estaciones Base. Este tipo de antenas adaptan su patrón de radiación a la distribución espacial de la señal deseada y las fuentes interferentes con el fin de maximizar la relación E_b/N_o para cada usuario activo en la red.

Sin embargo para poder realizar un análisis de la mejora en capacidad del sistema CDMA utilizando este tipo de antenas, fue necesario desarrollar un modelo de canal radio que le permite a la estación base determinar el ancho del patrón de radiación para dar cobertura en un sector de la célula. El modelo Gaussiano (GSBGM) propuesto en este trabajo tiene la característica de que se puede aplicar tanto en entornos macrocelulares como microcelulares, uno de los escenarios de los sistemas 3G. Para el análisis de capacidad se desarrolló una herramienta de cómputo en MATLAB, que permite realizar la planificación de una red celular desde ubicar a las estaciones base en un área de servicio hasta determinar el límite de capacidad de tráfico del sistema. Para lo anterior se consideró como métrica de calidad de servicio la probabilidad de interrupción, es decir, la probabilidad de que no todos los usuarios activos puedan alcanzar la calidad deseada en un instante determinado.

De los resultados importantes que se encontraron con la herramienta de cómputo, cabe resaltar que utilizar antenas conscientes del entorno incrementa alrededor del 65% de la cantidad de usuarios que se pueden atender con antenas sectoriales de 120 grados. Esto se debe que las características del patrón de radiación permite una mayor reducción de interferencia con respecto a los otros casos de antenas como omnidireccional o sectorial.

También se encontró que el número de usuarios por sector disminuye conforme el número de sectores se incrementa tomando en cuenta el mismo ancho de haz. Además aunque el número de usuarios por célula se incrementa, no es proporcional al número de sectores debido al traslape en los sectores y a la interferencia que produce un sector en otro. En este caso se concluye que existe un ancho de haz óptimo para una cierta cantidad de sectores.

Hasta este momento se han establecido los retos tecnológicos que tiene que considerar un diseñador al momento de planificar una red 3G. Experiencias previas en el diseño y planificación de redes de telecomunicaciones indica que 1) históricamente se detecta una necesidad, 2) se busca una solución técnica tomando en cuenta una tecnología conocida o recomendada, 3) se establece un plan piloto, 4) se instala el equipo necesario y 5) se ofrece el servicio durante la vida útil del equipo de comunicaciones.

En la última etapa de este trabajo de investigación se aborda el problema de que frecuentemente se omite realizar un análisis económico durante el proceso de planificación. Esto puede llevar a la introducción de sistemas costosos, obligados a cobrar precios elevados por un servicio que no es necesariamente el más indicado, con un consecuente desperdicio de recursos técnicos y económicos para proveedores y usuarios

El proceso de planificación de redes de telecomunicaciones debe considerar los recursos existentes y disponibles, tanto técnicos como económicos, con el fin de lograr el mejor resultado posible. Una red de comunicaciones debe ser técnicamente funcional, de calidad y económica para el usuario, pero a la vez debe tener una base sólida desde el punto de vista de negocios para el proveedor del servicio.

En este punto se propuso y desarrolló una metodología técnico-económica capaz de evaluar la viabilidad económica de implementar nuevas tecnología en los sistemas móviles celulares. Para evaluar la metodología propuesta se abordaron particularmente dos casos de estudio, en el primero de ellos se estudió la factibilidad de utilizar antenas conscientes del entorno en un sistema móvil celular. Se encontró, mediante un análisis de sensitividad, que

si es viable utilizar este tipo de antenas siempre y cuando se cumplan con los requerimientos que resultaron del análisis, los cuales incluyen que es necesario tener un 30% más cantidad de usuarios en el sistema que los que se tiene actualmente en una red en operación en México que el precio del servicio que se ofrezca debe reducirse en un 40%.

Tomando en cuenta la incertidumbre en cuanto a decidir cuál es el camino adecuado para migrar una red 2G hacia 3G, en el segundo caso de estudio se consideró evaluar la viabilidad económica de implantar algunas estrategias de redes que permitan la evolución hacia un sistema 3G, sobre todo hacia alguno de los sistemas de mayor demanda comercial como son WCDMA y cdma2000. La evaluación consideró aspectos técnicos, tales como el dimensionamiento de la red, la cantidad de usuarios, el tráfico y la capacidad de la red, así como también parámetros económicos, como son los costos de instalación, de operación y de mantenimiento de cada elemento de la red, los precios del servicio que ofrece la red y los datos de mercado de la región donde se ofrecerá el servicio. El análisis consideró una ventana de tiempo de 10 años y las características y escenarios de mercado se tomaron en base a las condiciones con que cuenta el mercado mexicano. Los resultados se obtuvieron utilizando métodos de ingeniería económica que se presentan en términos económicos tales como el NPV y el IRR.

Los resultados presentaron que bajo las condiciones con que cuenta el mercado mexicano actualmente, no es factible implementar alguna tecnología de 3G en México. Entonces surge la pregunta acerca de qué sucede con Iusacell, empresa mexicana que desde el 2004 ofrece servicios 3G a través de una red CDMA200-1X-EVDO. Lo anterior se justifica en el sentido de que a pesar de que se consideraron parámetros lo mas cercano posible a los que manejan los operadores comerciales, puede ser que no se hayan considerado en el estudio todos los parámetros y en su defecto hasta valores reales. En base a lo anterior, se consideró un escenario optimista de mercado en el que los parámetros de entrada contaban con valores por demás satisfactorios comparados con los valores del escenario real.

Los resultados con estos nuevos valores reflejan que sí existe la posibilidad de implementar una red 3G, con valores de NPV positivos y periodos de recuperación de la inversión de menos de cinco años. De los resultados obtenidos se encontró que es factible la migración de una red CDMA2000-1X hacia una red WCDMA, claro considerando el escenario optimista, sin embargo en el mundo real esa transición requerirá implementar toda una red completa WCDMA sobre la red CDMA existente, la pregunta es, si se escoge esta opción ¿se debe implementar primero GSM antes de actualizarse a WCDMA? Es difícil tener la respuesta a esa pregunta. Sin embargo, algunas cuestiones operativas o políticas podrían allanar el camino a esta solución, con el fin de armonizar y centralizar el desarrollo de sus servicios sobre una misma plataforma tecnológica, esto es si un operador móvil desea desarrollar la misma tecnología 3G red en todos sus mercados, en lugar de ofrecer cdma2000 en algunos lugares y WCDMA en otros.

8.2 CONTRIBUCIONES DE ESTE TRABAJO

En resumen las principales contribuciones que se obtuvieron en este trabajo de tesis son:

- Se estableció un análisis comparativo de las características tecnológicas y de mercado de los sistemas de Tercera Generación que existen actualmente.
- Se propuso un nuevo modelo espacial de canal radio que puede aplicarse en sistemas móviles de tercera generación para caracterizar el entorno de propagación de las señales multitrayectoria.
- Se desarrolló una metodología y una herramienta de cómputo que permiten evaluar la cobertura y capacidad de un sistema de comunicaciones móviles celulares del tipo CDMA, considerando el modelo espacial de canal radio propuesto en este trabajo.
- Se propuso una nueva metodología para evaluar la viabilidad de implantar nuevas tecnologías en sistemas móviles celulares desde una perspectiva técnica y económica.
- En base a lo anterior se desarrolló una herramienta de cómputo que permite identificar y analizar los factores de mayor impacto en la toma de decisiones de

proyectos de inversión y las implicaciones técnico-económicas que conlleva emigrar una red de comunicaciones móviles de Segunda Generación a una red 3G.

8.3 TRABAJO FUTURO

El campo de planificación de redes de comunicaciones móviles celulares tiene un espectro de oportunidades de investigación bastante amplio y obviamente no se consideraron todos los aspectos relevantes durante el desarrollo de este trabajo de investigación, a continuación se discutirán algunos problemas abiertos relevantes que garantizan líneas de investigación futura.

8.3.1 Planificación de Redes

- Aplicar la metodología de planificación propuesta en este trabajo para evaluar probabilidades de cobertura utilizando alguna otra tecnología de comunicaciones inalámbricas, tales como WiMax (IEEE802.16), Redes UWB (Ultra Banda Ancha), Redes Ad-hoc o en redes tipo Wi-Fi.

- Incorporar a la herramienta de planificación la evaluación de capacidad de sistemas 3G considerando simulaciones dinámicas de la red. Lo anterior permitirá identificar exactamente en que célula se efectúa algún bloqueo, la cantidad de llamadas que se generan y se bloquean.

- La utilización de la herramienta de planificación para evaluar alguna otra técnica que se utilice para minimizar interferencia en sistemas CDMA, como filtraje espacial, técnicas de conformación digital de haz entre otras.

- La aplicación de algún algoritmo de optimización para determinar escenarios óptimos de desarrollo de la red y con ello mejorar la planificación del sistema celular, tomando en cuenta los parámetros ya estudiados en este trabajo como son,

sectorización, alcance de la célula, probabilidad de interrupción, pérdidas por propagación en función del área de cobertura y de las pérdidas por propagación.

8.3.2 Evaluación Técnico-Económica

- La Aplicación de la metodología técnico-económica propuesta para evaluar la viabilidad de alguna otra red inalámbrica, como por ejemplo Wi-Max (IEEE 802.16), o la interoperabilidad de redes 3G con redes WLAN.

- La integración en la metodología técnico-ecónomica de un modulo que realice análisis de riesgo, ya sea a través de simulaciones Monte Carlo o por algún otro método heurístico. Lo que permitirá no solamente establecer que parámetros tienen mayor impacto en el desempeño de la red sino que informará de la probabilidad de ocurrencia de que suceda uno u otro escenario.

8.4 CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación se desarrolló en base a los retos que presentan los sistemas 3G, una metodología que permite determinar la viabilidad técnica y económica de implantar un sistema de comunicaciones móviles celulares de Tercera Generación en México. La meta de este estudio fue determinar los factores técnicos y económicos que tienen mayor impacto en el proceso de planificación de un sistema móvil celular CDMA.

Bibliografía

3GAmericas. 2004. Unificando las Américas por Tecnologías Inalámbricas. http://www.3gamericas.org. Fecha de consulta: noviembre 2004.

3GPP. 2001. *RF System Scenario. Technical Report 3G TR 25.942 v3.0.0*. Third Generation Partnership Project. 1-30 p.

3GPP. 2003. *ARIB TR-T12-25.996 V6.1.0. Spatial Channel model for Multiple Imput Multiple Output simulations (Release 6)*. ARIB, CCSA, ETSI, T1, TTA, TTC. 40 p.

AHCIET. 1990. *"Planififcación Económica en Telecomunicaciones. Guía para Directivos"*. AHCIET. Primera Edición. Madrid, España. 543 pp.

Al-Ruwais. 2002. *"Teletraffic capacity of CDMA cellular mobile networks and adaptive antennas"*. International Journal of Network Management, 12(4): 203-211 p.

Antunes, C., Craveirinha, J.F., y Climaco, J.N. 1998. *"Planning the Evolution to Broadband Access Networks"*. European Journal of Operational Research, 109(7): 530-540 p.

Ariyavisitakul, S. 1994. *"Signal and Inteference statistics of a CDMA system woth feedback power control"*. IEEE Transactions on Communications, 42(4): 597-605 p.

Balzaretti, S., Pistoia, A.D., Rinalduzzi, M., y Tofanelli, A. 1999. *CSELT Reporte Técnico. INPLAN: an integrated tool for broadband network planning.* **27**(2): 23-45 p.

Bates, R.J. 2002. *"GPRS: General Packet Radio Service (Professional Telecomm)"*. Mc Graw Hill. Primera Edición. Estados Unidos. 355 pp.

Blank, L. y Tarquin, A. 1999. *"Engineering Economy"*. McGraw Hill McGraw Hill. Cuarta Edición. 719 pp.

Bouillon, Y., Elnegaard, N., Katsianis, D., Welling, I., y Olsen, B. 2002. *Report on Tool and Methodology. Delivery 7 from IST-2000-25172 TONIC. http://www.fou.telenor.no/tera/*. Fecha de Consulta: enero 2004.

Burachinni, E., Muratore, F., Palestini, V., y Sinibaldi, M. 1996. *"Performance analysis of a mobile system based on combined SDMA/CDMA access technique"*. Proc. IEEE ISSTA'96, 15-19 de agosto de 1996, Mainz, Alemania. 370-374 p.

Chan, C.C. y Hanly, S.V. 2001. *"Calculating the outage probability in a CDMA network with spatial Poisson traffic"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 50(1): 183-204 p.

Chatovich, A. y Jabbari, B. 1999. *"Effect of non-uniform traffic load on erlang capacity of CDMA"*. IEEE Transaction on Vehicular Technolgy Conference, 18-22 octubre de 1999, Houston, Estados Unidos. 816-820 p.

COFETEL. 2005a. Comisión Federal de Telecomunicaciones, México. Estadísticas de Telefonía Móvil. http://www.cofetel.org.mx. Fecha de consulta: agosto 2005.

COFETEL. 2005b. Comisión Federal de Telecomunicaciones. Análisis de Mercado Financiero. Penetración de la telefonía Móvil. http://www.cofetel.gob.mx/wb2/COFETEL/COFE_Estadisticas_de_telecomunicaciones_2. Fecha de consulta: agosto 2005.

Corazza, G.E., Maio, G.D., y Vatalaro, F. 1998. *"CDMA cellular systems performance with fading, shadowing, and imperfect power control"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 47(2): 450-459 p.

CORDIS. 2003. Community Research and Development Information Service Web Site. http://www.cordis.lu. Fecha de consulta: enero 2005

Darling, A. 2005. China Crisis. http://www.telecoms.com. Fecha de consulta: julio 2005.

DaSilva, J.S. y Fernandes, B.E. 1998. *"The European research Program fo Advanced Mobile Systems"*. IEEE Personal Communications Magazine, 2(1): 14-19 p.

Daurell, A., Gómez, A.J., y Sacristán, A. 1996. 7th International Network Planning Symposium, NETWORKS'96. 2-7 octubre de 1996, Sydeny, Australia. 343-356 p.

Decisioneering. 2005. Optimization Software-Crystal Ball Pro. http://www.decisioneering.com/cbpro/. Fecha de consulta agosto 2005.

Dehghan, S., Lister, D., Owen, R., y Jones, P. 2000. *"WCDMA capacity and planning issues"*. IEE Electronics and Communication Enginneering Journal, 12(3): 101-118 p.

Downes, R. 2003. *"Introducción coordinada de servicios 3G en Latinoamérica"*. VI Foro AHCIET. Comunicaciones Inalámbricas, 2-5 Octubre 2003, México, DF. 1-9 p.

Drakopoulos, E. 1999. *"Economic Valuation and Business Analysis for Multimedia Services"*. Third European Workshop on Techno-economics for Multimedia Networks and ServicesTERA, 14-16 Diciembre 1999, en la Universidad de Aveiro. 61-68 p.

EMC. 2004. *Reporte Trimestral EMC World Cellular*. Editoria EMC, 1-98 p.

EMC. 2005. *Reporte Trimestral de la EMC World Cellular*. Editoria EMC, 1-113p.

Erben, H., DaSilva, J.S., Arroyo, B., Barani, B., y Ikonomou, D. 1996. *"European R&D Towards Third Generation Mobile Communications Systems"*. International Conference on Communications (ICT'96) Estanbul, Turquia. 14-17 abril 1996. 661-666 p.

Ericsson. 2004. http://www.ericsson.com. Fecha de consulta: abril 2004.

Ertel, R.B. y Reed, J.H. 1999a. *"Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models"*. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 17(11): 1829-1839 p.

Ertel, R.B. y Reed, J.H. 1999b. *Antenna array systems: Propagation and performance, Ph.D. Dissertation*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg,VA.

Evans, J.S. y Everitt, D. 1999. *"On the teletraffic capacity of CDMA cellular networks"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 48(1): 153-165 p.

Faccin, S., Liangchi, H., Koodli, R., y Purdani, R. 1999. *"GPRS and IS-136 integration for flexible network and services evolution"*. IEEE Personal Communications Magazine, 6(3): 48-54 p.

Forssén, U., Karlson, J., Johannison, B., Almgren, M., y Lotse, F. 1994. *"Adaptive antenna arrays for GSM900/DCS1800"*. Proc. 43rd IEEE Vehicular Technology Estocolmo. 605-609 p.

Frodigh, M., Parkvall, S., Roobol, C., Johansson, P., y Larson, P. 2001. *"Fourth Generation Wireless Networks"*. IEEE Personal Communications Magazine, 8(10): 10-17 p.

Furuskar, A., Mazur, S., Muller, F., y Olofsson, H. 1999. *"EDGE: Enhanced Data Rates for GSM and TDMA/136 evolution"*. IEEE Personal Communications Magazine, 6(3): 56-66 p.

GAMBIT. 2005. Software Tools for Game Theory. http://econweb.tamu.edu/gambit/. Fecha de consulta: abril 2005.

GAMS. 2005. GAMS Home Page. http://www.gams.com. Fecha de consulta: abrl 2005.

Gamst, A., Zinn, E., Beck, R., y Simon, R. 1986. *"Cellular Radio Network Planning"*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1(3): 8-11 p.

Gavish, B. y Sridhar, S. 1995. *"Economics Aspects of Configuring Cellular Networks"*. wireless Networks, 1(1): 115-128 p.

Gilhousen, K.S., Jacobs, I.M., Padovani, R., Viterbi, A.J., Weaver, L.A., y Wheatley, C.E. 1991. *"On the capacity of a cellular CDMA system"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 40(3): 303-312 p.

Giuliano, R., Mazzenga, F., y Vatalaro, F. 2002. *"Smart cell sectorization for third generation CDMA systems"*. Wireless Communications and Mobile Computing, 2(3): 253-267 p.

Gozalvez, J. 2005. *"Mobile Radio. Research News"*. IEEE Vehicular Techology Society News, 52(1): 21-30 p.

Halonen, T. 2002. *"GSM,GPRS and EDGE Performance: Evolution towards 3G/UMTS"*. John Wiley & Sons. Primera Edición. Inglaterra. 393 pp.

Henten, A. y Saugstrup, D. 2004. *"3G Standarization in a Techno-Economic Perspective"*. ITS 2004: The 15th Biennial Conference 2004. 5-7 septiembre 2004, Berlin, Alemania, 1-18 p.

Higgins, R.C. 2001. *"Analysis for Financial Management"*. Mc Graw Hill. Sexta Edición. Nueva York. 412 pp.

Holma, H. y Toskala, A. 2000. *"WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications"*. John Wiley & Sons. Primera Edición. Inglaterra. 456 pp.

Hsiao-Hwa, C., Chang-Xin, F., y Willie, L. 2002. *"China's Perspective on 3G Mobile Communications and Beyond: TD-SCDMA Technology"*. IEEE Wireless Communications, 9(2): 48-59 p.

Ims, L.A. 1996. *"Multiservice Access Network Upgrading in Europe: A Techno-Economic Analysis"*. IEEE Communications Magazine, 34(12): 124-134 p.

CDG. 2005. Página Electrónica del Grupo de Desarrollo de CDMA. http://www.cdg.org. Fecha de consulta: junio 2005

ITU. 2000a. *"Key Characteristics for the International Mobile Telecommunications 2000 (IMT2000) radio Interfaces"*. Recommendation ITU M.1455: 123 pp.

ITU. 2000b. *"Detailed specifications of the radio interfaces of international mobile telecommunications-2000"*. Recommendation ITU M.1457: 114 pp.

Jalali, A. y Mermelstein, P. 1994. *"Effects of diversity, power control, and bandwidth on the capacity of microcellular CDMA systems"*. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 12(5): 834-842 p.

Janaswamy, R. 2001. *"Radiowave propagation and smart antennas for wireless communications"*. Kluwer Academic Publisher. Primera Edición. Boston. 336 pp.

Katsianis, D., Welling, I., Ylonen, M., Varoutas, D., Kristian, N., y Olsen, B.T. 2001. *"The Financial Perspective of the Mobile Networks in Europe"*. IEEE Personal Communications, 8(6): 58-64 p.

Katz, R.H. 1994. *"Adaptation and Mobility in Wireless Information Systems"*. IEEE Personal Communications Magazine, 1(3): 6-17 p.

Kim, Y.-K. y Yi, B.K. 2005. *"3G Wireless and cdma2000 1X Evolution in Korea"*. IEEE Communications Magazine, 43(4): 36-40 p.

Lee, J.S. y Miller, L.E. 1998. *"CDMA System Engineering Handbook"*. Artech House. Primera Edición. Boston-Londres. 387 pp.

Lee, W.Y. 1989. *"Mobile Cellular Telecommunications Systems"*. Mc. Graw Hill. Segunda Edición. Nueva York. 256 pp.

Leong, C.W., Zhuang, W., Cheng, Y., y Wang, L. 2004. *"Call Admission Control for Integrated on/off Voice and Best Effort Data Services in Mobile Cellular Communications"*. IEEE Transactions on Communications, 52(5): 778-790 p.

Li, Y., Feuerstein, M.J., y Reudink, D.O. 1997. *"Performance evaluation of a cellular base station multibeam antenna"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 46(1): 1-9 p.

Liberti, J.C. y Rappaport, T.S. 1996. *"A geometrically based model for line of sight multipath radio-channels"*. Proc. IEEE Vehicular Techonology. 844-848 p.

Lotter, M.P. y Rooyen, P.V. 1999. *"Modeling spatial aspects of cellular CDMA/SDMA systems"*. IEEE Communications Letter, 3(5): 128-131 p.

M.Chryssomallis. 2000. *"Smart Antennas"*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 42(3): 129-136 p.

Milstein, L.B., Rappaport, T.S., y Barghouti, R. 1992. *"Performance evaluation for cellular CDMA"*. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 10(4): 617-625 p.

Monogioudis, P., Conner, K., Das, D., Gollamudi, S., Lee, J., Moustakas, A., Nagaraj, S., Rao, A., y Soni, R. 2004. *"Intellignet Antenna solutions for UMTS algorithms and simulation results"*. IEEE Communications Magazine, 42(10): 28-39 p.

Naguib, A., Paulraj, A., y Kailath, T. 1994. *"Capacity improvements with base station antenna arrays in cellular CDMA"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 43(3): 691-698 p.

Nawrocki, M.J., Slobodzian, P., y Borowiec, R. 2002. *"Smart antenna techniques for WCDMA systems"*. Procceedings del MIKON'2002 conference, 1-5 julio de 2002, Polonia. 524-529 p.

Nguyen, T.V., Dassanayake, P., y Faulkner, M. 2004. *"Use of adaptive sectorisation for capacity enhancement in CDMA cellular systems with non-uniform traffic"*. Wireless Personal Communications, 28(2): 107-120 p.

Nokia. 2004. http://www.nokia.com. Fecha de consulta: noviembre 2004.

Ojanpera, T. y Prasad, R. 1998. *"Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications"*. Artech House. Primera Edición. Portland, Estados Unidos. 439 pp.

Olsen, B.T. 1996. *"Techno-Economic Evaluation of Narrowband and Broadband Access Network Alternatives and Evolution Scenario Assessment"*. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 14(6): 1184-1203 p.

OPTQUEST. 2005. Optquest, the global optimization software tool. http://www.decisioneering.com/cbpro/optquest.html. fecha de consulta: junio 2005.

PALISADE. 2005. Palisade Corporation. Risk analysis, decision analysis, statistical analysis, and optimization. http://www.palisade.com/. Fecha de consulta: junio 2005.

Papoulis, A. 1991. *"Probability, random variables, and stochastic processes"*. MacGraw Hill. Tercera Edicion Edición. New York. 234 pp.

Petrus, P. y Reed, J.H. 2002. *"Geometrically Based Statistical Macrocell Channel Model for Mobile Environments"*. IEEE Transactions on Communications, 50(3): 495-502 p.

Pike, R. y Neale, B. 2003. *"Corporate Finance and Investment, Decisions and Strategies"*. Prentice Hall. Cuarta Edición. Londres. 259 pp.

Prasad, R., Mohr, W., y Konhauser, W. 2000. *"Third Generation Mobile Communication Systems"*. Artech House. Primera Edición. Boston-Londres. 386 pp.

Qualcomm. 1993. *"The CDMA network engineering handbook. Volume 1: Concepts in CDMA"*. Primera Edición. San Diego. 167 pp.

Ramakrishna, J. 2002. *"Angle and Time of Arrival Statistics for the Gaussian Scatter Density Model"*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 1(3): 488-497 p.

Rappaport, T.S. 2002. *"Wireless Communications.Principles an Practice"*. Theodore Rappaport Prentice Hall. Segunda Edición. New Jersey. 695 pp.

Reed, D.P. 1993. *"The Cost Structure of Personal Communication Services"*. IEEE Communications Magazine, 31(4): 102-108 p.

Sarnecki, J., Vinodrai, C., Javed, A., O'Kelly, P., y Dick, K. 1993. *"Microcell Design Principles"*. IEEE Communications Magazine, 31(4): 76-82 p.

Schacht, M., Dekorsy, A., y Jung, P. 2003. *"System Capacity from UMTS smart antenna concepts"*. Proc. IEEE VTC'2003, 2 al 7 octubre 2003, Orlando, Florida, Estados Unidos. 113-118 p.

Schacht, M., Jugl, E., Muckenheim, J., y Jung, P. 2004. *"Performance evaluation of smart antenna concepts and shared channel transmission in 3G mobile communication systems"*. Proc. IEE Conference on 3G Mobile Communication Technologies 3G2004, 5-9 mayo de 2004, Londres, Inglaterra. 132-137 p.

Shapira, J. 1994. *"Microcell engineering in CDMA cellula network"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 43(4): 817-825 p.

Simon, M.K., Omura, J.K., Scholtz, R.A., y Levitt, B.K. 1994. *"Spread Spectrum Communications Handbook"*. Mc GrawHill. Primera Edición. New Jersey. 345 pp.

Soong, A.C.K., Krzymlen, W.A., y Yoon, Y.C. 2005. *"CDMA2000 EVOLUTION: 1x-EVDV"*. IEEE Communications Magazine, 43(4): 34-35 p.

Stavroulakis, P. 2003. *"Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems"*. Mobile Communications. Artech House. Primera Edición. Boston-Londres. 407 pp.

Steele, R. 1995. *"The therapy of Percy Comms: A Dialogue on PCS issues"*. International Journal on Wireless Information Networks, 2(3): 123-132 p.

STEM. 2003. Comsulting Services. *Analysys-Consultants in Telecommunications*. http://www.analysys.co.uk/stem. Fecha de consulta: febrero 2003.

TD-SCDMA. 2005. Datang Mobile has completed TD-SCDMA Trails Successfully. http://www.tdscdma-forum.org. Fecha de consulta: junio 2005.

Tiedemann, E.G. 2001. *"CDMA2000-1X: New Capabilities for CDMA Networks"*. IEEE Vehicular Techology Society News, 48(4): 24-32 p.

Tyler, N., Allen, B., y Aghvami, H. 2004. *"Adaptive Antennas: The calibration Problem"*. IEEE Communications Magazine, 42(12): 114-122 p.

UMTS-FORUM. 2004. Tecnologías 2.5G: Solución hacia el camino 3G. http://www.umts-forum.org. Fecha de consulta: marzo 2004.

UMTS-Forum. 2005. Verizon Dominicana completa la ampliación de su red inalámbrica 3G en República Dominicana. http://www.umtsforum.net. Fecha de consulta: mayo 2005.

Veeravalli, V.V. y Sendonaris, A. 1999. *"The coverage-capacity tradeoff in cellular CDMA systems"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 48(5): 1443-1450 p.

Viterbi, A.J. y Padovini, R. 1992. *"Implications of mobile cellular CDMA"*. IEEE Communications Magazine, 30(12): 38-41 p.

Viterbi, A.J. 1995. *"Principle of Spread Spectrum Communication"*. Adison-Wesley. Primera Edición. New York. 345 pp.

Viterbi, A.M. y Viterbi, A.J. 1993. *"Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System"*. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 11(6): 892-899 p.

Wacker, A., Laiho-Steffens, J., Sipila, K., y Jasberg, M. 1999. *"Static simulator for studying WCDMA radio network planning issues"*. IEEE Vehicular Technology Conference, 8-12 noviembre de 1999, Houston, Estados Unidos. 2436-2440 p.

Webb, W. 1998. *"Understanding Cellular Radio"*. Mobile Communications. Artech House. Primera Edición. Boston-Londres. 283 pp.

Welling, I., Harno, J., Loizillon, F., Stordahl, K., y Varoutas, D. 2003. *"Techno-Economic Evaluation of 3G & WLAN Business Case Feasibility Under Varying Conditions"*. Proceedings of the IEEE ICT'2003, 23-29 de octubre de 2003, Finlandia. 33-38 p.

Wu, J.S., Chung, J.K., y Wen, C.C. 1998. *"Hot-Spot traffic relief with a tilted antenna in CDMA cellular networks"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 47(1): 1-9 p.

Zaganiaris, A. 1993. *"A Methodology for Achieving Lyfe-cycle Costs of Optical Access Networks from RACE 2078/TITAN"*. Proceedings of the 11th Annual Conference European on Fiber optic Communications, 5-10 de mayo de 1993, Holanda. 56-62 p.

Zetterberg, P. y Ottersten, B. 1995. *"The spectrum efficiency of a base station antenna array system for spatially selective transmission"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 11(3): 651-660 p.

Zou, J. y Bhargava, V.K. 1998. *"Design issues in a CDMA cellular system with heterogeneous traffic types"*. IEEE Transactions on Vehicular Techology, 47(3): 871-889 p.