



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**AUDITORIA DE CALIDAD DE SERVICIO
(BENCHMARKING) PARA REDES DE
TELEFONIA CELULAR**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
PRESENTA**

ALEJANDRO JAVIER PARDO SANTANA

ASESOR: ING. JESUS REYES GARCIA



CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis padres, Marfa Cristina Santana Pinal y Javier Pardo Mercado, por haber dedicado su vida a sus hijos.

A mi hermana Berenice, por ser un ejemplo y haberme soportado.

A toda mi familia, en especial a Pita, Juanita y Moni, por apoyarnos en las buenas y en las malas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de la máxima casa de estudios de México.

A la Facultad de Ingeniería de Ciudad Universitaria, por darme una segunda oportunidad.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería, haber contribuido a mi formación.

A mis amigos, por todo los momentos y consejos.

Al ingeniero Jesús Reyes García, por su importante apoyo en este trabajo.

Aleks Pardo

Indice

I.	Introducción.....	iv
1.	Introducción a los Sistemas Telefónicos Móviles Celulares.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.1.1	Concepto Celular.....	1
1.1.2	¿Porqué la Telefonía Celular se desarrolló en 800 MHz?.....	3
1.1.3	Servicios de Comunicación Personal, PCS (Personal Communications Services).....	3
1.2	Componentes de un Sistema Básico Celular.....	4
1.3	Principios Básicos de Operación de los Sistemas Telefónicos Celulares.....	5
1.4	Criterios de Desempeño.....	6
1.4.1	Calidad de Voz.....	6
1.4.2	Calidad de Servicio.....	6
1.4.3	Servicios Adicionales.....	7
2.	Medio Ambiente de Radiofrecuencia.....	8
2.1	Propagación.....	8
2.1.1	Pérdidas por Propagación.....	9
2.1.2	Pérdidas por Propagación en el Espacio Libre.....	9
2.1.3	Propagación de Radio Móvil.....	11
2.1.4	Pérdidas en la Trayectoria en un Medio Plano.....	12
2.1.5	Pérdidas por Difracción de Filo de Navaja.....	14
2.1.6	Pérdidas Múltiples de Difracción de Filo de Navaja.....	16
2.2	Modelos de Predicción.....	16
2.2.1	Modelos Empíricos y Semiempíricos de Pérdidas por Propagación.....	17
2.2.2	Clasificación de los Modelos de Propagación.....	17
2.2.3	Modelos de Propagación para Macrocelulas.....	19
2.2.3.1	Modelo de Okumura.....	19
2.2.3.2	Modelo de Hata.....	21
2.2.3.3	Modelo COST 231-Hata.....	22
2.2.3.4	Modelo de Lee.....	22
2.3	Deterioros en el Canal de Radiofrecuencia.....	24
2.3.1	Distribuciones estadísticas de la Señal de Radio Móvil.....	24
2.3.2	Desvanecimientos y Multitrayectorias.....	26
2.3.2.1	Propagación Multitrayectoria.....	26
2.3.2.2	Factores que Influyen en los Desvanecimientos.....	27
2.3.3	Efectos de la Propagación Multitrayectoria.....	27
2.3.3.1	Parámetros de los Desvanecimientos Selectivos en Frecuencia.....	28
2.3.3.1.1	Tiempo de Retardo Esparcido.....	28
2.3.3.1.2	Ancho de Banda de Coherencia.....	28
2.3.3.1.3	Modulación en Frecuencia Aleatoria.....	29
2.3.3.2	Parámetros de los Desvanecimientos Dispersivos.....	29
2.3.3.2.1	Variación o Frecuencia Doppler.....	30
2.3.3.2.2	Tiempo de Coherencia.....	31
2.3.4	Tipos de Desvanecimientos de Pequeña Escala.....	32
2.3.4.1	Desvanecimientos Debidos a las Multitrayectorias de Tiempo de Retardo Esparcido.....	32
2.3.4.1.1	Desvanecimiento Plano.....	32
2.3.4.1.2	Desvanecimiento de Frecuencia Selectiva.....	32
2.3.4.2	Desvanecimientos Debidos al Esparcimiento Doppler.....	33
2.3.4.2.1	Desvanecimiento Corto.....	33
2.3.4.2.2	Desvanecimiento Largo.....	33

2.3.5	Eliminación de los Desvanecimientos.....	35
2.3.5.1	Eliminación de los Desvanecimientos Cortos.....	35
2.3.5.1.1	Criterio de Lee.....	35
2.3.5.1.2	Diversidad por Espacio.....	36
2.3.5.2	Eliminación de los Desvanecimientos Largos.....	36
2.3.6	Ruido e Interferencia.....	37
2.3.6.1	Ruido.....	37
2.3.6.2	Interferencia.....	38
2.3.6.3	Interferencia de Canal Adyacente.....	38
2.3.6.4	Interferencia de Canal Adyacente Intracélula.....	39
2.3.6.5	Interferencia de Canal Adyacente Intercélula.....	39
2.3.6.6	Interferencia Co-Canal.....	39
2.4	Transmisión de Datos y Señalización.....	40
2.4.1	Mejoramiento del Desempeño de la Transmisión Digital.....	40
3.	Sistemas Celulares de Primera y Segunda Generación.....	42
3.1	Comunicaciones Personales Inalámbricas.....	42
3.2	Técnicas de Acceso Múltiple para Comunicaciones Inalámbricas.....	42
3.2.1	Técnicas de Duplexación.....	42
3.2.2	Introducción al Acceso Múltiple.....	43
3.2.3	Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA).....	43
3.2.3.1	Efectos de la no-linealidad en FDMA.....	44
3.2.4	Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA).....	44
3.2.5	Acceso Múltiple por División de Código (CDMA).....	46
3.3	Sistemas Celulares Analógicos.....	48
3.3.1	Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS).....	48
3.4	Sistemas Celulares Digitales.....	52
3.4.1	Estándar IS-54/IS-136.....	53
3.4.1.1	Interfaz de Aire del Estándar IS-54.....	54
3.4.2	Estándar IS-95.....	58
3.4.2.1	Conceptos de CDMA.....	58
3.4.2.2	Clasificación de CDMA.....	60
3.4.2.3	Acceso Múltiple por División de Código de Secuencia Directa (DS-SS).....	60
3.4.2.4	Elementos Básicos de DS-SS.....	63
3.4.2.5	Interfaz de Aire del Estándar IS-95.....	66
3.4.2.5.1	Canal de Bajada en CDMA.....	68
3.4.2.5.2	Canal de Subida en CDMA.....	70
4.	Calidad de Servicio de Redes de Telefonía Celular.....	74
4.1	Concepto de Calidad para un Usuario.....	74
4.2	Concepto de Calidad para el Operador Celular.....	75
4.2.1	Áreas Técnicas Encargadas de Elevar la Calidad.....	75
4.2.2	Relación entre Mercadotecnia e Ingeniería.....	75
4.3	Definiciones de Desempeño de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T).....	76
5.	Benchmarking Celular (Auditoría de Calidad de Servicio).....	77
5.1	Objetivo de un Benchmarking Celular.....	77
5.2	Preparación del Proyecto de Benchmarking.....	77
5.2.1	Zonificación.....	77
5.2.2	Documentación.....	77
5.3	Procedimientos de un Benchmarking.....	78
5.3.1	Recolección de Datos.....	78

5.3.2	Rutas.....	78
5.3.3	Equipo de Medición.....	78
5.3.4	Programa de Post-Proceso.....	79
5.4	Criterios de Análisis de Benchmarking.....	79
5.5	Presentación y Organización de Resultados del Benchmarking.....	80
5.5.1	Mapas de Benchmarking.....	80
5.5.1.1	Criterio de Cobertura para Análisis de Benchmarking.....	81
5.5.1.2	Criterio de Calidad para Análisis de Benchmarking.....	82
5.5.1.2.1	Criterio de Calidad Digital.....	82
5.5.1.2.2	Criterio de Calidad Subjetiva de Audio (Analógico y Digital).....	82
5.5.1.3	Criterio de Resultados de Llamadas para Análisis de Benchmarking.....	82
5.5.2	Tablas Estadísticas de Benchmarking.....	85
5.5.2.1	Estadísticas de Cobertura para Análisis de Benchmarking.....	85
5.5.2.2	Estadísticas de Calidad para Análisis de Benchmarking.....	88
5.5.2.2.1	Estadísticas de Calidad Digital.....	88
5.5.2.3	Estadísticas de Resultados de Llamadas para Análisis de Benchmarking.....	89
5.5.2.4	Estadísticas de Calidad Subjetiva de Audio para Análisis de Benchmarking.....	91
5.5.2.5	Estadísticas de Tiempos de Acceso para Análisis de Benchmarking.....	92
5.6	Propuesta de Evaluación de Calidad de Redes de Telefonía Celular de Diferentes Tecnologías.....	93
6.	Conclusiones y Resultados.....	95
6.1	Desempeño de los Estándares de Telefonía Celular que Trabajan en México.....	95
6.2	Aplicación de la Teoría de Propagación y Radiofrecuencia en el Área de Diseño y Optimización de los Operadores Celulares en México.....	96
6.3	Metodología de Evaluación de Calidad de Servicio de la Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL).....	97
6.4	Ejemplos de Mapas de Benchmarking.....	98
6.5	Ejemplos de Estadísticas de Benchmarking.....	103
	Bibliografía.....	106

Auditoría de Calidad de Servicio para Redes de Telefonía Celular

I. Introducción

El presente trabajo de tesis presenta una propuesta de *Auditoría de Calidad de Servicio de Redes de Telefonía Celular*, la cual se lleva a cabo con mediciones de campo y estadísticas de parámetros de radiofrecuencia que pueden ser analizados y servir para un posterior proceso de optimización, el cual puede ser desde un cambio en algunos parámetros de operación, pasando por un análisis de tráfico para aumentar la cantidad de canales de voz digitales en operación, hasta la implementación de un nuevo plan de frecuencias, para el caso de redes con estándares que así lo requiera.

Esta evaluación se ve enriquecida con la obtención de estadísticas de llamadas realizadas en campo, con lo cual se obtiene una evaluación desde el punto de vista de un usuario, quien es el juez más estricto para calificar la calidad que ofrece un operador celular, independientemente de la tecnología que cada uno de ellos emplee para prestar su servicio.

Adicionalmente, se propone hacer una calificación subjetiva de la calidad de voz, empleando conversaciones con voz humana, y no señales senoidales, con lo cual se puede obtener un resultado más confiable.

En el primer capítulo llamado "*Introducción a los Sistemas Telefónicos Móviles Celulares*", se dan a conocer los antecedentes y conceptos generales de operación de un sistema de telefonía móvil celular, así como sus componentes. Posteriormente se explican los principios de operación del sistema, gracias a los cuales es posible que se realice una llamada, la cual puede ser originada por el móvil, o por una línea fija perteneciente a la llamada *Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC)*, la cual en nuestro país es *Teléfonos de México (TELMEX)*. Finalmente, se explica desde un punto de vista muy general el concepto de desempeño celular, el cual se abordará con más detalle en otros capítulos.

En el segundo capítulo llamado "*Medio Ambiente de Radiofrecuencia*", se profundiza en los conceptos de propagación que están involucrados en las comunicaciones inalámbricas móviles. Se describen algunos de los modelos de propagación más empleados en las herramientas comerciales de predicción usadas por los operadores celulares. Posteriormente se explican los deterioros más comunes a los que está expuesto el canal de radiofrecuencia, donde los desvanecimientos y las multitraectorias de la señal juegan un papel muy importante en la calidad de los enlaces. A continuación se describen algunas técnicas y criterios empleados para tratar de disminuir los desvanecimientos, los cuales no se pueden eliminar por completo. Finalmente, se tocan dos puntos muy importantes, con los cuales los ingenieros de optimización de RF trabajan todos los días: el ruido y la interferencia. Por último se aborda brevemente el desempeño de la transmisión digital.

El tercer capítulo llamado "*Sistemas Celulares de Primera y Segunda Generación*" comienza con una descripción de las técnicas de duplexación y de acceso empleadas en las comunicaciones inalámbricas. A continuación se describe el estándar analógico llamado *AMPS (Advanced Mobile Phone Service)*, el cual ya lleva más de diez años de operación en nuestro país, y sigue soportando una parte muy importante del tráfico de la red celular más grande del país. Finalmente se describen los dos estándares norteamericanos digitales que operan en nuestro país, *IS-136* e *IS-95*.

El cuarto capítulo llamado “*Calidad de Servicio Celular*” describe el concepto de Calidad de Servicio de Redes Celulares desde tres puntos de vista:

- ⇒ Concepto de calidad para un usuario.
- ⇒ Concepto de calidad para un operador celular.
- ⇒ Definiciones de desempeño de la *ITU (International Telecommunication Union)*.

El quinto capítulo llamado “*Análisis de Benchmarking*”, presenta la propuesta de metodología de evaluación de calidad de servicio para redes de telefonía celular, cubriendo los tres puntos de vista de calidad descritos en el capítulo cuarto, y la cual está basada en mediciones en campo de la señal de radiofrecuencia, estadísticas obtenidas de la generación de llamadas de la red celular hacia la RTPC, y muestras de evaluación subjetiva de calidad de audio obtenidas en las llamadas realizadas en los mismos recorridos.

Finalmente, en el sexto capítulo llamado “*Conclusiones y Resultados*”, se presenta una crítica del desempeño de las diferentes tecnologías con las que los operadores celulares prestan su servicio celular en nuestro país, basada en dos años y medio de experiencia en el campo de la telefonía celular, así como una descripción desde un punto de vista personal de la aplicación que realmente se le da a la teoría de propagación y radiofrecuencia dentro del área de diseño y optimización de una empresa de telefonía celular. Y finalmente se critica a la Metodología de Evaluación de Calidad de Servicio que lleva a cabo la *Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL)*.

Capítulo 1. Introducción a los Sistemas Telefónicos Móviles Celulares

1.1 Antecedentes

El siglo pasado vio el desarrollo de una red telefónica pública conmutada RTPC terrestre que permite una comunicación confiable de voz y datos de baja velocidad alrededor del mundo. En las últimas dos décadas se han implantado múltiples redes alámbricas optimizadas para propósitos tales como la comunicación local de datos de alta velocidad.

Adicionalmente a las comunicaciones alámbricas existen las comunicaciones inalámbricas, cuya meta es permitirle a los usuarios acceso en cualquier momento sin considerar como limitante su ubicación, y ofreciéndole cierto grado de movilidad, adicionándole capacidad de la red global telefónica terrestre ya existente.

Hubo muchas razones para el desarrollo de los sistemas telefónicos celulares móviles, concepto creado por D. H. Ring en 1947 para los Laboratorios Bell. Si bien ya existían sistemas telefónicos inalámbricos convencionales, estos tenían importantes limitaciones, entre las cuales destacan las siguientes:

- ⇒ Areas con cobertura limitada.
- ⇒ Desempeño de servicio pobre.
- ⇒ Uso ineficiente del espectro de frecuencias disponible.
- ⇒ Capacidad de usuarios limitada.

1.1.1 Concepto Celular

El concepto básico celular es el *reuso de frecuencias*. Si un canal de una cierta frecuencia cubre un área de radio R , entonces la misma frecuencia puede ser reusada para cubrir otra área. Cada una de las áreas constituye una *célula*. Las células usando la misma frecuencia portadora son llamadas *co-células*. Estas son ubicadas con una distancia de separación suficiente para que la *interferencia co-canal* pueda estar dentro de límites tolerables.

La propuesta del concepto celular es una respuesta a los problemas mencionados en los puntos anteriores, siendo un progreso lógico debido a la demanda de capacidad de espectro para un área geográfica. Uno de los mayores problemas que enfrenta la industria de las comunicaciones móviles es la limitación del espectro de radiofrecuencia disponible para este servicio.

Este problema, es combatido disminuyendo el radio de cada *célula*, la cual es la unidad geográfica básica de un sistema celular. Este decremento también es aplicado a la potencia de salida de los sitios celulares llamados *estaciones base*, lo cual ayuda a balancear la potencia de salida entre esta componente del sistema y los teléfonos móviles.

Por lo tanto, los sistemas celulares deben ser diseñados para manejar niveles de potencia bajos en los equipos móviles, lo cual demande menos energía a las baterías, y permita que existan teléfonos más pequeños y con más funciones.

Con el concepto celular, una región atendida inicialmente por una estación base en un sistema móvil convencional es dividida en varias células, cada una con su propia estación base, atendida por su propio subconjunto de canales, llamado *grupo*.

El conjunto de canales disponibles en el sistema es asignado a un conjunto de células constituyendo un grupo de estaciones base, llamado *cluster*. El mismo conjunto puede ser reusado sólo en diferentes grupos *clusters*. El número de células en cada grupo de estaciones base *cluster* determina el *patrón de repetición*, también conocido como *patrón de reuso*. Debido a limitaciones geométricas, sólo pueden aplicarse ciertos patrones de reuso, siendo los más comunes con 4, 7 y 12 células por grupo *cluster*. El menor patrón de reuso con el mayor número de canales por célula, corresponde a la mayor capacidad de tráfico del sistema. Sin embargo, éste patrón con la menor distancia entre co-células, lleva a tener una mayor interferencia co-canal.

Las estrategias de asignación de canales juegan un papel muy importante en la *interferencia de canal adyacente*. Aunque el equipo de radio está diseñado para seleccionar únicamente los canales deseados eliminando las frecuencias adyacentes, puede haber situaciones en que los canales adyacentes causen interferencias. Estas pueden presentarse por ejemplo, cuando dos móviles utilizando canales adyacentes transmiten a la estación base desde una corta y una larga distancia, respectivamente. Los problemas de interferencia empeoran en presencia de los desvanecimientos.

El tamaño de las células varía de acuerdo a la planeación de la red, la cual se realiza apegada a un análisis de tráfico. Sin embargo, comparado con los primeros sistemas de comunicación móvil, las dimensiones de las células son mucho menores. Ya que el sistema está diseñado para permitirle al móvil trasladarse de una célula a otra, se requiere que la llamada ya en curso no sea interrumpida en este proceso. Debido a esto, se requiere que el móvil cambie de un canal a otro, de manera transparente para el usuario. Esta acción de cambio de canales es conocida como transferencia de llamada, *handoff* o *handover*. Las transferencias de llamada *handoffs* ocurren cuando la intensidad de señal se debilita y sobrepasa un valor umbral. El proceso de monitoreo de la calidad de señal y hacer la petición de transferencia de llamada *handoff*, es llamado localización, *locating*. El proceso de determinar la disponibilidad de un móvil para recibir una llamada es conocido como *voceo*, *paging*. La acción de comenzar una llamada, iniciada por el móvil, se conoce como acceso, *access*.

La principal diferencia entre los sistemas convencionales y los celulares es que los primeros son sistemas limitados por el ruido y los segundos son sistemas limitados por las interferencias. A continuación se enlistan sus características y diferencias principales.

Sistemas convencionales limitados por ruido:

- ⇒ Atienden a bajas densidades de suscriptores.
- ⇒ Confían en exceso en la disponibilidad del espectro.
- ⇒ No utilizan el reuso de frecuencias.
- ⇒ Requieren de transmisores de alta potencia montados en lugares muy altos.
- ⇒ Tienen un área de servicio de gran cobertura.
- ⇒ No permiten una expansión modular.
- ⇒ No permiten la transferencia de llamada *handoff*.

Sistemas celulares limitados por interferencias:

- ⇒ Atienden a altas densidades de suscriptores.
- ⇒ Consideran la disponibilidad del espectro como un factor limitante.
- ⇒ Utilizan el reuso de frecuencias.
- ⇒ Requieren transmisores de baja potencia ubicados a bajas alturas.
- ⇒ Dividen el área total de servicio en células de pequeña cobertura.
- ⇒ Permiten teóricamente una expansión modular interminable.
- ⇒ Permiten la transferencia de llamada *handoff*.

1.1.2 ¿Porqué la Telefonía Celular se desarrolló en 800 MHz?

En Estados Unidos de Norteamérica, la Comisión Federal de Comunicaciones *FCC* (Federal Communications Commission), órgano encargado de regular las telecomunicaciones escogió la banda de los 800 MHz debido a que las bandas de frecuencia más bajas estaban ya ocupadas por otros servicios, y el número de posibles canales disponibles sería muy limitado. Por otra parte, la transmisión de radio móvil no es factible realizarla a más altas frecuencias, por ejemplo en la banda de *SHF* (3-30 GHz), debido al severo patrón de pérdidas por propagación, la interferencia multitrayectoria y los efectos de la lluvia, que hacen al medio inadecuado para las comunicaciones móviles.

Es interesante mencionar que debido a las limitantes de la tecnología, las primeras pruebas de un desarrollo de sistema celular se efectuaron hasta 1979, por la empresa Illinois Bell Telephone Company, autorizadas por la *FCC*.

Un total de 50 MHz en las bandas de 824-849 MHz y de 869-894 MHz fueron asignados para el servicio de radio móvil celular. En una región geográfica determinada, se otorga licencia a dos proveedores de servicio, llamados también *carriers*, cada uno con 25 MHz. Las denominadas *banda A* y *banda B* son asignadas respectivamente a un proveedor de servicio sin red alámbrica propia *BTPCA* y a un proveedor de servicio con una red alámbrica propia. Inicialmente fueron asignados 666 canales, 333 por proveedor de servicio siguiendo el estándar llamado Servicio Telefónico Móvil Avanzado, *AMPS* (Advanced Mobile Phone Service). En 1987, la *FCC* expandió el espectro celular a 832 canales, 416 por proveedor de servicio. El uso de los 832 canales es en ocasiones referido como *E-AMPS* (Extended AMPS), con 21 canales de control y 395 canales de voz. Los 25 MHz de cada operador son divididos en 12.5 MHz para transmisión y 12.5 para recepción. Los canales de radio utilizados en los sistemas celulares *AMPS* son espaciados en intervalos de 30 kHz con una distancia de 45 MHz entre las frecuencias de transmisión y recepción.

En nuestro país, el servicio celular comenzó en 1991 utilizando el estándar *AMPS*, con la puesta en operación de las primeras centrales en la ciudad de Tijuana, BCN y en la Ciudad de México, por parte de la empresa TELCEL, la cual trabaja en la banda B. Actualmente la banda celular de 800 MHz está dividida a nivel nacional en nueve regiones, cuya regulación está a cargo de la *COFETEL* (Comisión Federal de Telecomunicaciones), un órgano descentralizado de la *SCT* (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), cuya función es regular el uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, de las redes de telecomunicaciones, y de la comunicación vía satélite.

1.1.3 Servicios de Comunicación Personal, PCS (Personal Communications Services)

PCS representa un conjunto de servicios personalizados de telecomunicaciones, cuya red opera en la banda de 1900 MHz. La *FCC* otorgó a los operadores 120 MHz del espectro de 1850 a 1990 MHz, dividiendo esta porción del espectro en seis bandas, para que en un momento dado seis operadores puedan prestar servicio celular en la misma área de cobertura. Las bandas del espectro fueron asignadas de la siguiente manera:

Banda A: 15 MHz
Banda D: 5 MHz

Banda B: 15 MHz
Banda E: 5 MHz

Banda C: 15 MHz
Banda F: 5 MHz

En nuestro país, los operadores PEGASO y UNEFON prestan su servicio en éstas bandas de frecuencias, por lo que se consideran operadores *PCS*. Por su parte, TELCEL también tiene asignada una banda de frecuencias *PCS*, con la cual ofreció servicio por un tiempo en ambas bandas a sus usuarios que cuentan con un equipo móvil tipo doble-banda, doble-modo, *dual-band*, *dual-mode*.

1.2 Componentes de un Sistema Básico Celular

Un sistema básico celular consiste de tres subsistemas figura (1):

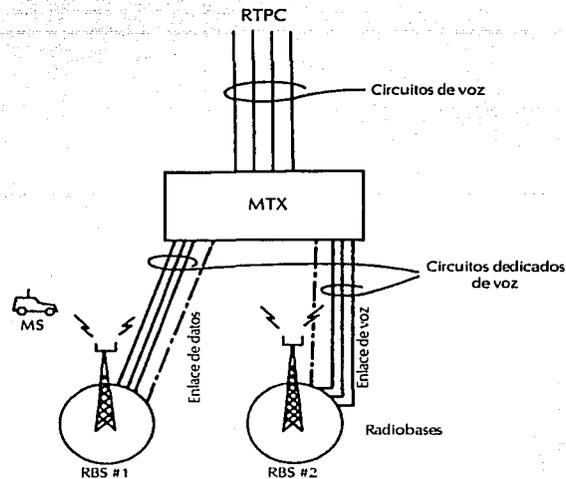


Figura 1. Sistema Básico Celular.

1. **Una unidad móvil MS (Mobile Station).** Una MS unidad móvil contiene una unidad de control, un transductor y un sistema de antena. Su presentación física es el teléfono celular portátil.
2. **Un sitio celular llamado estación base RBS (Radio Base Station).** La RBS es la interfaz entre la MTX y las unidades móviles. Tiene una unidad de control, gabinetes de radio, antenas, una planta de energía y terminales de datos. Es comúnmente llamada *radiobase* o *estación base*.
3. **Una central de conmutación móvil celular MTX (Mobile Telephone Exchange).** Es el elemento central de coordinación para todas las RBS, controla los procesos de las llamadas y es la interfaz con la red telefónica pública conmutada RTPC. Típicamente es llamada *central celular*.

Enlaces de radio y de datos de alta velocidad son los encargados de conectar a los tres subsistemas. Cada teléfono puede usar únicamente un canal a la vez para su enlace de comunicación, pero este canal no es fijo, puede ser cualquiera de los asignados al área de servicio, donde cada estación base tiene varios canales que pueden conectar simultáneamente a muchas estaciones móviles.

La MTX es el corazón del sistema móvil celular, sus procesadores realizan la coordinación de la central y la administración celular.

La central celular, la cual puede ser analógica o digital, conmuta llamadas para conectar a suscriptores móviles con otros suscriptores móviles y a la RTPC. Usa troncales de voz similares a las usadas en las centrales de la RTPC. También contienen enlaces de datos, los cuales supervisan los enlaces entre el procesador y la central, y entre la estación móvil y la estación base. Los enlaces de datos de alta velocidad no pueden ser transmitidos sobre enlaces telefónicos comunes, de ahí la utilización de enlaces dedicados privados terrestres, o por microondas. Estos enlaces son utilizados para llevar tráfico de voz y datos entre la estación base y la central celular.

1.3 Principios Básicos de Operación de los Sistemas Telefónicos Celulares

A continuación se describe la operación de un sistema móvil celular desde la percepción de un usuario, sin tomar en cuenta los parámetros técnicos de diseño. La operación puede ser dividida en cinco partes.

1. **Inicialización de la estación móvil.** Cuando un usuario activa su estación móvil, ésta escanea los canales de control asignados al sistema. Después, la estación móvil selecciona el canal servidor (canal de control) más fuerte y se amarra a éste en un determinado tiempo, el cual es de unos cuantos segundos. Ya que cada estación base tiene asignado un grupo de canales diferente de acuerdo al concepto celular, el hecho de que el teléfono tome el canal más fuerte usualmente significa seleccionar a la estación base más cercana. Este esquema de autoubicación es ejecutado en la etapa de habilitación y es transparente para el usuario. Este procedimiento tiene la gran ventaja de eliminar la carga en la transmisión en la estación base para ubicar al teléfono. La desventaja de este esquema de autoubicación es que no existe información de ubicación habilitada de un teléfono en cada estación base. Debido a esto, cuando la llamada inicia de la RTPC hacia una estación móvil, el proceso de voceo es más largo. Este procedimiento de autoubicación es repetido cada 60 segundos. El uso de este esquema es justificado, ya que un gran porcentaje de las llamadas se originan en los teléfonos móviles.
2. **Llamada originada por el móvil.** Cuando un usuario desea hacer una llamada, éste coloca el número marcado en un registro originador en la estación móvil, verificando en una pantalla que el número sea el correcto, y oprime el botón marcar, *send*. Entonces, una petición de servicio es mandada en el canal de control obtenido por el esquema de autoubicación. A continuación, la estación base recibe esta información, y selecciona el dispositivo que mejor le pueda atender con un canal de voz disponible. Al mismo tiempo, la estación base manda una petición a la MTX vía un enlace de datos de alta velocidad. En respuesta, la central selecciona un canal apropiado para establecer la llamada, y realiza la interconexión con la central de la RTPC.
3. **Llamada originada por la RTPC.** Cuando un usuario desde un teléfono fijo marca a una estación móvil, con la serie de numeración la central de la RTPC reconoce que el número requerido es de una estación móvil celular, y enruta la llamada a la MTX celular. En respuesta, la MTX manda un mensaje de voceo a ciertas estaciones base, basado en el número de la estación móvil. Cada estación base transmite el voceo a sus canales de control analógico y digital en caso de ser una red dual (analógica y digital). Posteriormente, una vez ubicada la estación móvil reconoce su propia identificación en el canal de control, y le responde a la estación base. Finalmente, la estación móvil sigue la instrucción de sintonizarse a un canal de voz asignado e inicia el aviso de llamada al usuario.
4. **Terminación de la llamada.** Cuando el usuario móvil apaga el transmisor, una señal particular (un tono de señalización) se transmite a la estación base, y ambas partes liberan el canal de voz, procediendo el teléfono móvil a sintonizarse nuevamente al canal de control mejor servidor, con el fin de estar disponible para iniciar nuevamente una llamada, ya sea generarla o recibirla.
5. **Procedimiento de transferencia de llamada (handoff).** La transferencia de llamada *handoff*, es un proceso automático de cambio de frecuencias cuando un móvil se traslada de una célula a otra, con diferentes frecuencias de tal modo que se pueda continuar la conversación sin interrupción. Cuando la estación móvil se mueve hacia fuera del área de cobertura de su estación base servidora, la señal se comienza a debilitar y la estación base de la célula actual pide a la central que se ejecute una transferencia de llamada. Entonces, el sistema busca entre las estaciones base vecinas definidas en la base de datos de la central a la mejor candidata para poder aceptar la llamada en curso. Una vez encontrados la célula y el canal más apto para realizar la transferencia de llamada, la central manda conmutar la llamada a un nuevo canal con diferente frecuencia en una nueva estación base sin interrumpir la llamada ni alertar al usuario, el cual no se da cuenta de la realización de la transferencia de llamada, siendo este proceso totalmente transparente para él.

1.4 Criterios de Desempeño

Aunque más adelante se tratará a fondo el concepto de *desempeño celular*, como antecedente encontramos que existen tres categorías que especifican los criterios de desempeño, los cuales por ahora describiremos brevemente:

- ↪ Calidad de voz.
- ↪ Calidad de servicio.
- ↪ Servicios adicionales.

1.4.1 Calidad de Voz

Para un sistema de comunicaciones comercial dado, la *calidad de voz* estará basada sobre los siguientes criterios: un valor x para el cual y porcentaje de clientes califican la calidad de la voz del sistema (del transmisor al receptor) de la siguiente manera, tabla (1).

CM (Mérito del Circuito)	Calificación	Escala de Calidad
CM 5	5	Excelente (voz perfectamente entendible)
CM 4	4	Buena (voz fácilmente entendible, algo de ruido)
CM 3	3	Aceptable (voz entendible con un ligero esfuerzo, necesidad ocasional de repeticiones)
CM 2	2	Pobre (voz entendible sólo con un esfuerzo considerable, necesidad frecuente de repeticiones)
CM 1	1	Inaceptable (voz no entendible)

Tabla (1). Calificación de Calidad de Voz.

El promedio de calificación del mérito del circuito *CM* obtenido de todos los usuarios es llamado *nota media de opinión MOS* (Mean Opinion Score). Usualmente, la calidad total de voz está alrededor de un $MOS \geq 4$.

En la práctica, cuando se busca una calidad con calificaciones de 4 o mayores, el costo del equipo así como el trabajo de optimización del sistema aumentan considerablemente.

1.4.2 Calidad de Servicio

En general, en una red telefónica celular son requeridas tres características para obtener una buena calidad de servicio:

1. **Área de servicio.** El sistema debe atender un área tan grande como sea posible. Sin embargo, con cobertura de radio no es posible cubrir el 100% del área a atender con buenos niveles por tres razones:
 - ↪ La configuración irregular del terreno (morfología y topografía).
 - ↪ La potencia transmitida debe ser muy alta, un factor adicional significativo en los costos.
 - ↪ Una muy alta potencia de transmisión, provoca que sea difícil controlar las interferencias.

Por lo tanto, es necesario adjudicar los niveles de potencia necesarios para cada tipo de cobertura que queramos ofrecer. Por ejemplo, para ciudades densamente urbanas es necesario adjudicar niveles de potencia bajos, lo cual es necesario para evitar interferencias entre estaciones base, ya que las distancias entre estas son muy cortas, de 500 a 1000 metros aproximadamente.

2. **Grado de servicio requerido.** Para un sistema celular normal, el grado de servicio está especificado para una probabilidad de bloqueo de iniciar una llamada de 0.02 en la *hora pico*. Este es un valor

estandarizado. Sin embargo, el porcentaje de ocupación en cada estación base será diferente. Por ejemplo, dentro de la hora pico, en las grandes avenidas, el tráfico de automóviles es usualmente denso, así que la probabilidad de congestión de las estaciones base cercanas será alta, especialmente cuando se presenten accidentes o manifestaciones. Para disminuir la congestión se requiere de una buena medición periódica del tráfico, para poder hacer una buena planeación de sitios nuevos.

3. *Número de llamadas caídas.* Por definición, se denomina a una desconexión como *llamada caída*, a una llamada que es terminada por la pérdida de la señal de radiofrecuencia entre la estación base y el teléfono móvil. Esta tasa de llamadas caídas debe mantenerse baja para considerar que una red tiene buena calidad de servicio. Una tasa alta puede ser causada por problemas de cobertura o problemas de transferencia de llamada *handoff* relacionados a malas definiciones de parámetros o en el peor de los casos por congestión.

Este también es un tema en el que se profundizará durante este trabajo, además de dar al final un punto de vista personal al respecto, basado en la teoría analizada y en la experiencia adquirida en campo.

1.4.3. Servicios Adicionales

La telefonía celular, la cual ha ganado una amplia aceptación de los usuarios desde mediados de la década de los 80s, ha comenzado el proceso llamado *comunicación total inalámbrica*. Aunque en este trabajo no se hablará de los servicios de valor agregado, es conveniente mencionar su existencia e importancia en las redes telefónicas celulares.

Actualmente los sistemas inalámbricos están limitados a voz y datos de baja velocidad dentro de las áreas de cobertura existentes, sin embargo, con el desarrollo de la llamada *tercera generación celular*, los servicios de datos tendrán aplicaciones muy diversas e interesantes.

Hoy en día, los operadores están comenzando a ofrecer tantas funciones especiales adicionales como les es posible, tales como: enrutamiento de llamada, llamada en espera, buzón de voz, usuario visitante llamado *roaming automático*, recepción y envío de mensajes escritos, y servicios de navegación por internet, etc. Sin embargo, en un alto porcentaje los clientes no están dispuestos a pagar por estos servicios extras, sobre todo en un país como el nuestro, por lo cual la recuperación económica de tal inversión será en la mayoría de los casos lenta, o en algunos casos nunca se logrará.

Finalmente, podemos mencionar que debido a la competencia abierta que hay entre los operadores celulares en nuestro país actualmente, algunos de estos servicios son ofrecidos sin costo para los usuarios, con el fin de atraer a un mayor número de clientes.

Capítulo 2. Medio Ambiente de Radiofrecuencia

2.1 Propagación

La habilidad de la energía de radiofrecuencia *RF* de propagarse a través del aire es un concepto y principio fundamental, el cual le permite a los operadores inalámbricos ofrecer su servicio sin una conexión a la red por medio de dispositivos físicos, como el par de cobre. La energía de *RF* está compuesta de una energía electromagnética, mejor descrita en la figura (2.1).

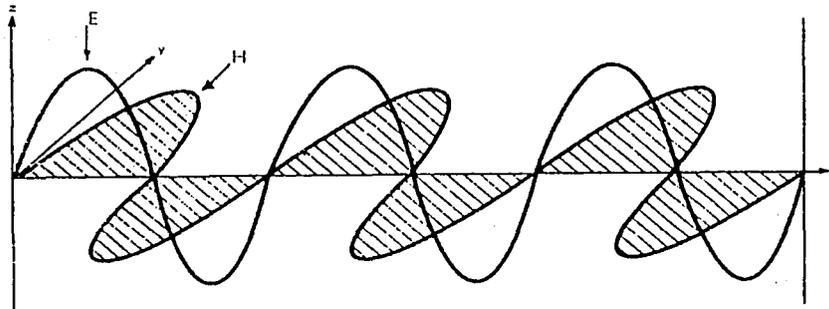


Figura (2.1). Onda electromagnética.

La frecuencia de oscilación de la onda electromagnética está directamente relacionada a la longitud de onda física, como se muestra en la ecuación (2.1).

$$C = f\lambda$$

Ecuación (2.1). Relación entre la frecuencia y la longitud de onda.

donde:

f = Frecuencia en Hz

c = $3 \cdot 10^8$ m/s

λ = Longitud de onda en metros

Con una rápida manipulación, se puede calcular la longitud de onda (ecuación 2.2) para una estación base celular. Por ejemplo, para una frecuencia de 880 MHz se tiene:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0.34 \text{ m}$$

Ecuación (2.2). Longitud de onda con base en la frecuencia.

La longitud de onda para sistemas celulares es pequeña, y como resultado tiene características de propagación únicas, las cuales han sido modeladas por numerosos investigadores a través de los años.

Un modelo de predicción necesita tener incluidas muchas variables, las cuales influyen directamente en la predicción de cobertura de *RF* de la estación base. Los atributos que contribuyen positivamente en la cobertura son la sensibilidad del receptor, la potencia de transmisión, la ganancia de las antenas, y la altura promedio sobre el terreno de las antenas. Por otra parte, los factores negativos que afectan la cobertura son las pérdidas del terreno, los árboles, los edificios, el ruido eléctrico, el ruido natural, la distorsión del patrón de radiación y la ineficiencia de las antenas.

2.1.1 Pérdidas por Propagación

El concepto de *pérdidas por propagación* se refiere a la inherente degradación de la intensidad de la señal y a cómo el medio ambiente afecta a ésta señal de radio. Cuando se diseña un sistema inalámbrico, las pérdidas por propagación pueden ser calculadas usando modelos matemáticos que consideren la mayor cantidad de elementos que afecten a los enlaces. Ya que las pérdidas influyen directamente en la planeación del número de sitios celulares y su ubicación, los cálculos deben ser muy precisos, debido a que tienen un impacto significativo tanto en el tiempo de implantación y los costos de la red, así como en la calidad del desempeño de la misma.

Las pérdidas por propagación PL son un parámetro usado comúnmente para caracterizar la señal promedio en el canal de radio móvil, las cuales representan la atenuación de la señal como una cantidad positiva medida en dB . Están definidas como la relación entre la potencia transmitida P_t de la antena transmisora T_x y la potencia recibida P_r de la antena receptora R_x . Las pérdidas por propagación están expresadas en dB en la ecuación (2.3).

$$PL = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = P_t (dB) - P_r (dB)$$

Ecuación (2.3). Pérdidas por propagación, expresadas en decibeles.

En la definición de pérdidas por propagación, las ganancias de las antenas pueden o no estar definidas.

2.1.2 Pérdidas por Propagación en el Espacio Libre

El modelo de propagación en el espacio libre es usado para predecir la intensidad de la señal recibida cuando el transmisor y el receptor tienen una clara trayectoria de línea de vista entre ellos. Los sistemas de comunicación satelital y los enlaces de radio de microondas son ejemplos típicos de la propagación en el espacio libre. Así como la mayoría de los modelos de radiopropagación, el modelo del espacio libre predice el deterioro de la potencia como una función de la distancia entre transmisor y receptor.

Un radiador *isotrópico* es una antena ideal, la cual radia potencia con una unidad de ganancia uniforme en todas direcciones, y en ocasiones es usado para referenciar la ganancia de las antenas en los sistemas inalámbricos. La *potencia isotrópica radiada efectiva PIRE* (ecuación 2.4), está definida como:

$$PIRE = P_t G_t$$

Ecuación (2.4). Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.

y representa la máxima potencia radiada disponible de un transmisor en la dirección de máxima ganancia de la antena transmisora G_t , comparada a un radiador isotrópico.

En la práctica, en vez de la *PIRE* es usada la *potencia efectiva radiada PRE*, para denotar la máxima potencia radiada comparada a una antena dipolo de media onda. Si se emplean dB_i (ganancia isotrópica) y se quieren convertir a dB_d , se aplica la siguiente relación: $dB_d = 2.14 dB + dB_i$.

En la práctica, la ganancia de las antenas está dada en unidades de dB_i (ganancia en dB con respecto a una fuente isotrópica) o dB_d (ganancia en dB con respecto a un dipolo de media onda).

Concluyendo, las pérdidas por propagación en el espacio libre se refieren a la degradación de la intensidad de la señal que ocurre cuando ésta se propaga a través del espacio. Estas pueden ser calculadas usando la ecuación (2.5).

$$PL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Ecuación (2.5). Pérdidas por propagación en el espacio libre, expresadas en watts.

donde:

PL – Pérdidas por propagación en el espacio libre en [Watts]

d – Distancia a la antena transmisora en [km]

λ – Longitud de onda en [m]

Sin embargo, en la práctica para la simplificación de cálculos, es más conveniente expresar PL en dB .

Cuando no se incluye la ganancia de las antenas en la definición de las pérdidas por propagación, la ecuación puede quedar de la siguiente forma, ecuación (2.6):

$$PL = K + 20 \log d + 20 \log f$$

Ecuación (2.6). Pérdidas por propagación en el espacio libre, expresadas en decibeles.

donde f es la frecuencia y K es una constante que depende de las unidades d y f . Por ejemplo, cuando d está en kilómetros y f en megahertz, $K = 32.44$.

La potencia recibida P_r para una señal que se propaga en el espacio libre es calculada usando la ecuación de Friis (2.7).

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 L}$$

Ecuación (2.7). Potencia recibida para la propagación de una señal en el espacio libre (Ecuación de Friis).

donde:

P_r – Potencia recibida

P_t – Potencia transmitida

G_t – Ganancia de la antena transmisora

G_r – Ganancia de la antena receptora

d – Distancia a la antena transmisora en [km]

λ – Longitud de onda en [m]

L – Factor de pérdidas del sistema ($L > 1$)

La ecuación de Friis es válida para predecir la P_r para valores de d en el campo lejano de la antena transmisora. El campo lejano o *región de Fraunhofer* está definido como la región más allá de la distancia d_f , la cual está relacionada a la mayor dimensión lineal de la apertura de la antena y la longitud de onda de la frecuencia portadora. La distancia Fraunhofer está dada por la ecuación (2.8).

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

Ecuación (2.8). Distancia Fraunhofer

donde D es la mayor dimensión física de la antena, adicionalmente, se deben satisfacer

$$d_f \gg D \quad \text{y} \quad d_f \gg \lambda$$

Las pérdidas misceláneas L usualmente son debido a atenuaciones en la línea de transmisión, pérdidas en los filtros, y pérdidas en las antenas en el sistema de comunicación. Un valor de $L = 1$ indica que no existen pérdidas de hardware, lo cual consideraremos aplicar en este momento.

La ecuación de Friis muestra que la potencia recibida cae proporcionalmente con el cuadrado de la distancia de separación a la antena transmisora. Esto implica que la potencia recibida se deteriora con la distancia a una razón de 20 dB/década.

Por consiguiente, las pérdidas por propagación para el espacio libre incluyendo las ganancias de las antenas están dada por la ecuación (2.9).

$$PL = 10 \log \left(\frac{(4\pi)^2 d^2}{G_t G_r \lambda^2} \right) = K + 20 \log d + 20 \log f - 10 \log G_t - 10 \log G_r$$

Ecuación (2.9). Pérdidas por propagación expresadas en dB para el espacio libre, incluyendo las ganancias de las antenas.

2.1.3 Propagación de Radio Móvil

La mayoría de los sistemas de radio celular operan en áreas urbanas, donde no existe trayectoria de línea de vista directa *LOS* (Line-of-Sight) entre transmisor y receptor (T_t - R_r), y donde la presencia de edificios altos causa severas pérdidas por difracción. Debido a las múltiples reflexiones, las ondas electromagnéticas viajan a través de diferentes trayectorias con diferentes longitudes. La interacción entre estas ondas causa desvanecimientos multitrayectoria en una ubicación específica, y la intensidad de las ondas se decrementa cuando la distancia entre el transmisor y el receptor incrementa.

Los tres mecanismos básicos más importantes que impactan en la propagación de las ondas electromagnéticas en un sistema de comunicación móvil son: *la reflexión, la difracción y la dispersión*. En los modelos de propagación, la intensidad de señal recibida es el parámetro más importante, basándose en estos tres fenómenos. Los desvanecimientos cortos y la propagación multitrayectoria también pueden ser descritos con estos tres mecanismos de propagación.

Reflexión

Ocurre cuando una onda electromagnética que se propaga choca contra un objeto con dimensiones muy grandes comparadas con su longitud de onda, lo que origina un cambio en su dirección de propagación. Las reflexiones generalmente se presentan con la superficie de la tierra, así como con edificios y estructuras grandes.

Difracción

Se presenta cuando la trayectoria de radio entre el transmisor y el receptor es obstruida por una superficie que tiene formas angulosas para la longitud de onda, provocando que la onda rodee el obstáculo. A altas frecuencias, la difracción, así como la reflexión, dependen de la geometría de los objetos, así como de la amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto de difracción.

Dispersión

Ocurre cuando el medio a través del cual viaja la onda consiste de objetos con dimensiones que son pequeñas comparadas a su longitud de onda, y donde el número de obstáculos por unidad de volumen es alto. Las ondas dispersadas son producidas por superficies rugosas y objetos pequeños. En la práctica, las hojas, los señalamientos de las calles y avenidas, así como los postes inducen dispersiones en los sistemas de comunicaciones móviles.

Cuando un móvil se desplaza sobre distancias muy cortas, la intensidad de señal recibida puede fluctuar rápidamente y propiciar *desvanecimientos cortos*. La razón de esto es que la señal recibida es la suma de muchas contribuciones provenientes de diferentes direcciones. Debido a que las fases son aleatorias, la suma de las contribuciones varía ampliamente, por ejemplo siguiendo un desvanecimiento con distribución Rayleigh.

En los llamados *desvanecimientos largos*, la potencia de la señal recibida puede variar del orden de tres a cuatro veces su magnitud (30 o 40 dB) cuando el receptor se mueve tan sólo una fracción de la longitud de onda. Cuando el móvil se aleja del transmisor grandes distancias, la señal local recibida promedio se decrementará gradualmente, y esta señal local recibida promedio es precedida por los modelos de propagación de gran escala. Típicamente, la potencia de la señal local recibida promedio es calculada promediando las mediciones de señal sobre una huella de medición de 5λ a 40λ . Para las frecuencias de celular y PCS en la banda de 1 GHz a 2 GHz, esto corresponde a medir la potencia de la señal recibida promedio sobre distancias de 1 m a 10 m.

La figura (2.2) ilustra los desvanecimientos cortos y largos para un sistema de comunicación en interiores. Aquí se observa que la señal sufre desvanecimientos rápidamente cuando el móvil se desplaza, pero la señal local recibida promedio cambia más lentamente con la distancia.

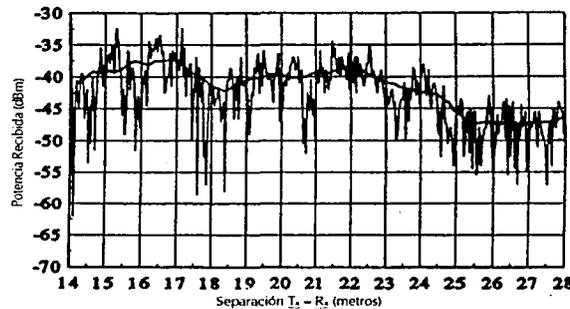


Figura (2.2) Desvanecimientos cortos y largos.

2.1.4 Pérdidas en la Trayectoria en un Medio Plano

Consideremos la propagación de la onda de radio en un medio ambiente con un terreno plano. La señal transmitida puede alcanzar a la antena receptora por varios caminos:

- ⇒ A través de una trayectoria directa.
- ⇒ A través de una trayectoria indirecta, por medio de una onda de radio reflejada por la tierra.
- ⇒ A través de una trayectoria indirecta, por medio de una onda de superficie.
- ⇒ A través de otros medios secundarios.

La señal recibida es una combinación de todas estas ondas, con una potencia resultante igual a la suma de sus potencias individuales. La potencia de la señal debido a la trayectoria directa, está dada por la ecuación de Friis del espacio libre. La onda reflejada tendrá una potencia dada por la ecuación de Friis, pero atenuada por un factor igual al coeficiente de reflexión de la tierra ρ . Además, la señal reflejada será desplazada por una fase $\Delta\phi$ debido a la trayectoria indirecta. La onda de tierra será provocada por la señal que ha sido absorbida por la tierra. La proporción de la señal absorbida está dada por $(1-\rho)$, correspondiente a las ocasiones en que la señal no sea reflejada con un factor de atenuación A . Además, ρ y A dependen de varios factores tales como el ángulo de incidencia, la polarización, las constantes de la tierra y la frecuencia.

Los efectos de las ondas de tierra pueden ser despreciados para el caso de radio móvil empleando frecuencias de microondas. Consecuentemente, podemos expresar la razón entre las potencias de recepción y transmisión en un medio ambiente de tierra plana con la ecuación (2.10).

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 |1 - e^{j\Delta\phi}|^2$$

Ecuación (2.10). Razón entre las potencias de recepción y transmisión en un medio ambiente de tierra plana.

Considerando las alturas h_t y h_r de las antenas transmisora y receptora, respectivamente, separadas por una distancia d , como se muestra en la figura (2.3).

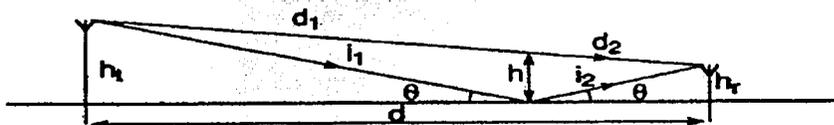


Figura (2.3). Trayectorias directa e indirecta en un medio ambiente con terreno plano.

Si el tiempo de retardo entre las ondas directa e indirecta es Δt , entonces el desplazamiento de fase $\Delta\phi$ está dado por $\Delta\phi = 2\pi f \Delta t$, donde f es la frecuencia de la señal. De aquí,

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda} \quad \text{y} \quad \Delta d = (i_1 + i_2) - (d_1 + d_2)$$

donde Δd es la diferencia entre las trayectorias directa e indirecta. La distancia Δd puede ser fácilmente escrita como función de las alturas de las antenas y la distancia d . Haciendo una aproximación matemática se obtiene:

$$\Delta\phi \approx 4\pi \frac{h_t h_r}{\lambda d}$$

además, considerando las siguientes relaciones:

$$|1 - e^{j\Delta\phi}|^2 = 2(1 - \cos \Delta\phi) = 4 \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \quad \text{y} \quad \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \approx \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)^2$$

Finalmente, pudiendo obtener la ecuación (2.11).

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2$$

Ecuación (2.11). Razón entre las potencias de recepción y transmisión.

Las correspondientes pérdidas por propagación en decibeles son (ecuación 2.12):

$$PL = -10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log(h_t h_r) + 40 \log d$$

Ecuación (2.12). Pérdidas por propagación en un medio ambiente de tierra plana.

Sobresale el hecho de que existe una pérdida de 12 dB cuando se duplica la distancia. Por otra parte, se obtiene una ganancia de 6 dB cuando la altura de la antena es duplicada. Mediciones de campo han mostrado que esto es verdadero para la antena de la estación base. Para la antena del móvil la ganancia es de sólo 3 dB si $h_r < 3\text{m}$, ó 6 dB si $3\text{m} < h_r < 10\text{m}$.

El modelo de terreno plano puede ser aplicado a un medio ambiente que se considere uniforme y sin obstáculos. La medición del terreno plano S , depende de varios parámetros, incluyendo la frecuencia. Una medición está dada por el criterio de Rayleigh en la ecuación (2.13)

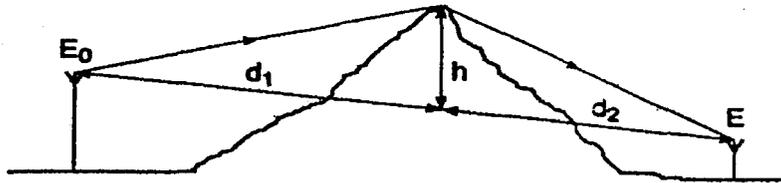
$$S = \frac{4\pi\sigma\theta}{\lambda}$$

Ecuación (2.13). Criterio de Rayleigh.

donde σ es la desviación estándar de las alturas medias de las irregularidades, θ es el ángulo de incidencia, y λ es la longitud de onda. Una superficie con $S < 0.1$ se considera que es uniforme, y para $S > 10$ se considera como accidentado.

2.1.5 Pérdidas por Difracción de Filo de Navaja

Una onda radiada por una antena transmisora puede ser interceptada por obstrucciones tales como montañas, edificios, árboles, etc. En este caso, la señal que llega a la antena receptora puede arribar como una señal difractada, como se muestra en la figura (2.4).



Figura(2.4). Geometría de la difracción de filo de navaja.

Si la intensidad del campo eléctrico es E_0 , el campo eléctrico difractado E es (ecuación 2.14):

$$E = E_0 F e^{j\Delta\phi}$$

Ecuación (2.14). Campo eléctrico difractado.

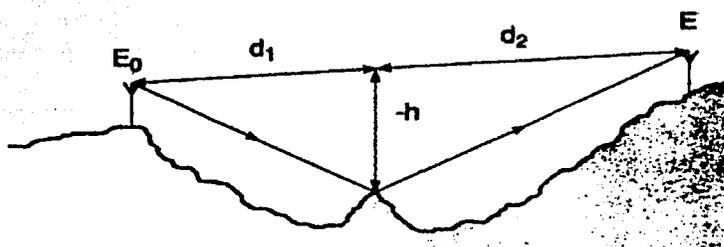
donde F es el coeficiente de difracción y $\Delta\phi$ es la diferencia de fase entre las trayectorias directa e indirecta. Estos parámetros están dados por

$$F = \frac{S(x) + 0.5}{\sqrt{2} \sin(\Delta\phi + \pi/4)} \quad \text{y} \quad \Delta\phi = \tan^{-1} \left[\frac{S(x) + 0.5}{C(x) + 0.5} \right] - \frac{\pi}{4}$$

donde $C(x)$ y $S(x)$ son las integrales coseno y seno de Fresnel, respectivamente.

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du, \quad S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad \text{y} \quad x = -h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)}$$

Dependiendo del terreno, la altura h también puede ser negativa, como se muestra en la figura(2.5).



Figura(2.5). Difracción de filo de navaja con altura negativa.

En tal caso, habrá una trayectoria directa entre las dos antenas. De la ecuación (2.14) las pérdidas debido a la difracción son (ecuación 2.15):

$$PL = 10 \log \left| \frac{E}{E_0} \right|^2 = 20 \log F$$

Ecuación (2.15). Pérdidas debido a la difracción.

Una gráfica de las pérdidas por difracción se muestra en la figura(2.6).

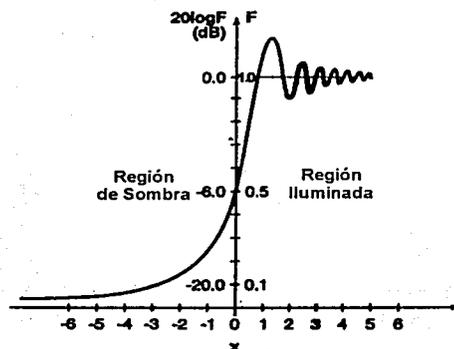


Figura (2.6). Pérdidas por difracción de filo de navaja.

La ecuación de x puede ser escrita como $x = -h/K$, donde K es una constante positiva. La altura positiva ($+h$) implica un valor negativo para x . En este caso, la antena receptora está en una región de sombra y la curva de pérdidas es la que se muestra en la parte izquierda de la gráfica. A mayor altura, mayores pérdidas. Por otra parte, una altura negativa implica una x positiva. En este caso, la antena receptora está en la región iluminada. Si la obstrucción se encuentra justo en la posición ($x=h=0$) de la trayectoria directa, el campo eléctrico recibido tendrá la mitad de la magnitud del campo transmitido.

2.1.6 Pérdidas Múltiples de Difracción de Filo de Navaja

En una situación real una onda radiada es difractada no únicamente por una obstrucción, sino por varias. Una aproximación matemática para estudiar esto es mucho más complicada que lo planteado anteriormente, y no tiene una solución simple. Existen algunos modelos de aproximación, por ejemplo el *modelo de Deygout*, el cual estima inicialmente una trayectoria de pérdidas considerando la obstrucción más dominante del ambiente a estudiar. Las otras pérdidas debidas a los restantes fillos de navaja son determinados con respecto a este fillo dominante, como se muestra en la figura (2.7).

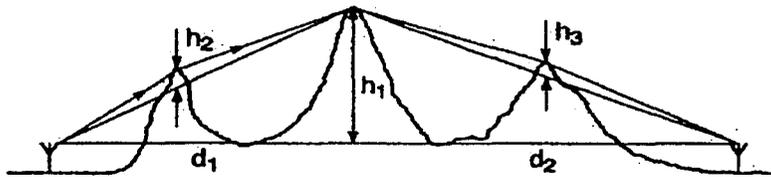


Figura (2.7). Modelo de Deygout.

2.2 Modelos de Predicción

Los modelos de predicción de intensidad de señal están basados usualmente en algunos de los modelos de pérdidas por propagación descritos anteriormente, modificados por parámetros obtenidos de mediciones de campo. Los modelos toman en cuenta información sobre la topografía del terreno, incluyendo la orografía (descripción de las montañas), y la morfología, o sea la descripción del uso del suelo (área urbana, bosque, área abierta, agua, etc). El grado de ondulación del terreno está dado por el parámetro conocido como el rango *interdecile* (Δh), medido, a una distancia de 10 km, como se ilustra en la figura (2.8).

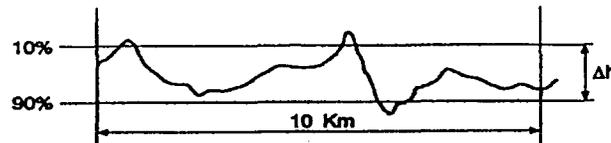


Figura (2.8). Rango interdecile (Δh).

Algunas estimaciones de Δh de acuerdo a la topografía del terreno se muestran en la figura (2.9), fuente: W.C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1974).

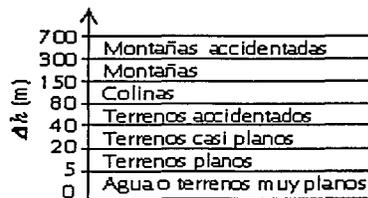


Figura (2.9). Ejemplos del rango interdecile.

Los algoritmos de predicción usualmente manejan una gran cantidad de datos, requiriendo un proceso de cómputo muy tardado. La elección del modelo dependerá principalmente de la calidad que se

quiera obtener: una estimación aproximada o una predicción precisa. Más aún, la disponibilidad de la información jugará en esto un papel muy importante. De acuerdo con esto, los algoritmos pueden escogerse dentro de un rango que va de ecuaciones triviales a software muy sofisticado y costoso. Adicionalmente, se deben llevar a cabo mediciones en campo, con el fin de validar el modelo. Este paso requiere que los parámetros sean reajustados.

Los modelos de propagación que predicen la intensidad de señal para una distancia de separación arbitraria entre T_x - R_x y que son utilizados para la estimación del área de cobertura de radio de un transmisor son llamados *modelos de propagación de gran escala*, debido a que caracterizan la intensidad de la señal sobre grandes distancias de separación entre T_x - R_x (de cientos de metros a varios kilómetros).

Por otra parte, los modelos de propagación que caracterizan las fluctuaciones rápidas de la intensidad de señal recibida sobre distancias muy cortas (algunas longitudes de onda) o cortas duraciones de tiempo (del orden de segundos) son llamados *modelos de propagación de pequeña escala* o *modelos de desvanecimiento*.

2.2.1 Modelos Empíricos y Semiempíricos de Pérdidas por Propagación

Si la potencia recibida en el teléfono móvil es representada como una función de la distancia *estación base-móvil*, debido a que la propagación no es en el espacio libre se presentarán fluctuaciones rápidas en la potencia recibida cuando la distancia varíe una fracción de la longitud de onda. Estas variaciones del nivel de señal, pueden llegar a ser hasta de 40 dB. Este fenómeno es conocido como *desvanecimiento corto*.

Un desvanecimiento corto es consecuencia de la propagación multitrayectoria, la cual ocurre cuando las señales alcanzan al receptor siguiendo diferentes trayectorias, las cuales tienen diferentes longitudes. La señal total recibida es la suma de las señales individuales arribando con diferentes fases y de ahí, produciendo un efecto de interferencias constructivas y destructivas que dan origen al desvanecimiento corto.

Otra consecuencia de la propagación multitrayectoria es el fenómeno llamado *dispersión en el tiempo*. Debido a las diferentes longitudes de las trayectorias, las componentes multitrayectoria no alcanzan al receptor al mismo tiempo, produciéndose dispersión en el tiempo de las señales recibidas.

Otro parámetro empleado para caracterizar la propagación de la señal es la llamada *señal recibida promedio*. Esta es obtenida promediando la señal recibida sobre tramos de varias longitudes de onda o pequeñas áreas con un radio de varias longitudes de onda. La longitud de los tramos puede variar entre 5 (en picocélulas) y 40 longitudes de onda (en macrocélulas), lo cual, a frecuencias del orden de 1 GHz, corresponde aproximadamente a distancias entre 1 y 10 m.

Cuando un teléfono se mueve a lo largo de una trayectoria, la señal promedio sufre fluctuaciones, conocidas como *desvanecimiento largo*. Estas variaciones son una consecuencia de la atenuación de la señal con la distancia entre el transmisor y el receptor y la presencia de obstáculos en el ambiente. La tasa de variaciones por desvanecimientos largos está en el orden del tamaño de los obstáculos que rodean al receptor. De ahí que en ambientes rurales la señal recibida promedio muestra menos variaciones que en escenarios urbanos.

2.2.2 Clasificación de los Modelos de Propagación

Atendiendo a su naturaleza, los modelos de propagación pueden ser clasificados como:

- ↔ Modelos empíricos.
- ↔ Modelos semiempíricos o semideterminísticos.
- ↔ Modelos determinísticos.

Los *modelos empíricos* están descritos por ecuaciones derivadas de análisis estadísticos de un gran número de mediciones. Estos métodos son simples y no requieren información detallada del ambiente. Además son fáciles y rápidos de aplicar, porque la estimación es usualmente obtenida de expresiones cerradas. Su defecto es que no pueden ofrecer una estimación muy exacta de las pérdidas por propagación.

Los *modelos determinísticos* están basados en la aplicación de técnicas electromagnéticas a la descripción específica de cada medio ambiente. La descripción del medio ambiente es obtenida de bases de datos de topografía y morfología. De esta información, se puede obtener una descripción del escenario, la cual puede ser manejada eficientemente usando la teoría electromagnética.

Finalmente, los *modelos semiempíricos o semideterminísticos* están basados en ecuaciones derivadas de la aplicación de métodos determinísticos para generar modelos urbanos o de interiores (*indoor*). En ocasiones, las ecuaciones han sido corregidas experimentalmente con el fin de mejorar sus resultados, apoyándose con mediciones de campo. Las ecuaciones resultantes son funciones de las características de las áreas cercanas a las antenas y ciertas características específicas muy particulares de cada escenario. Estos métodos requieren información más detallada del medio ambiente que los métodos empíricos. Conociendo los datos requeridos, son fáciles y rápidos de aplicar, porque al igual que con los modelos empíricos, los resultados son obtenidos de expresiones cerradas.

Debido a la diversidad de los ambientes donde se llevan a cabo las comunicaciones móviles, cada modelo de propagación está concebido para un medio ambiente específico. Debido a esto, los modelos de propagación pueden ser clasificados de acuerdo a su aplicación.

Tomando como criterio a las células, pueden ser consideradas las siguientes categorías de ambientes:

- ↳ Macrocélulas.
- ↳ Microcélulas.
- ↳ Picocélulas.

Las *macrocélulas* cubren grandes áreas, con radios entre 0.5 y 60 km, y usualmente no hay visibilidad directa entre las estaciones base y móvil.

Las *microcélulas* ocupan áreas pequeñas con radios entre 0.1 y 1 km. Su cobertura no es siempre circular, y dependiendo de su aplicación, pueden atender con o sin línea de vista.

Las coberturas típicas de las *picocélulas* están entre 0.01 y 0.1 km, considerándose dos tipos: interiores (*indoor*) y exteriores (*outdoor*) y también dependiendo de su aplicación, pueden atender con o sin línea de vista.

En general, existe una relación entre los tres tipos de modelos de propagación y los tres tipos de ambientes para los cuales son apropiados. Debido a su naturaleza empírica, los modelos empíricos y semiempíricos son adecuados para macrocélulas con características homogéneas. Los modelos semiempíricos también son aplicables a microcélulas homogéneas. Los modelos determinísticos son aconsejables para microcélulas y picocélulas independientemente de su cobertura, sin embargo, no son adecuados para macrocélulas debido a que los tiempos de procesamiento requeridos se elevan considerablemente.

2.2.3 Modelos de Propagación para Macrocélulas

En el medio ambiente de radiofrecuencia móvil, las pérdidas por propagación no pueden ser calculadas simplemente usando las ecuaciones del espacio libre, ya que éstas consideran un enlace con línea de vista LOS (Line of Sight) y sin multitrayectorias, algo que en la realidad no existe. Debido a la complejidad de las situaciones que se presentan, se han desarrollado diversos modelos de propagación, de los cuales a continuación se describen algunos de los más representativos.

2.2.3.1 Método de Okumura

El modelo de Okumura es uno de los más empleados para predicciones en zonas urbanas. Este modelo está basado en mediciones de campo realizadas en la ciudad de Tokio, Japón. Es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz a 1920 MHz (aunque es extrapolado hasta 3000 MHz) y distancias de 1 km a 100 km. Puede ser usado para antenas en estaciones base con rangos de alturas de 30 m a 1000 m de altura.

Ofrece una estimación inicial de las pérdidas por propagación para un terreno casi plano ($\Delta h \approx 20$ m). Por lo tanto, se deben utilizar algunos factores de corrección para adaptar estos resultados a otras condiciones. Esta estimación inicial comprende un conjunto de curvas de atenuación relativa al espacio libre $A(f,d)$ contra la frecuencia f , para una altura de la antena de una estación base h_b de 200 m y una altura de la antena de una estación móvil h_m de 3 m teniendo como parámetro la distancia d , como se muestra en la figura (2.10). Estas curvas fueron desarrolladas de extensivas mediciones utilizando antenas verticales omnidireccionales tanto en la estación base como en el móvil, y son graficadas como una función de la frecuencia en el rango de 100 MHz a 1920 MHz, y como función de la distancia a la estación base en el rango de 1 km a 100 km. Estas curvas de predicción son relativas a las pérdidas en el espacio libre. El factor de corrección $G_{\text{área}}$ (ganancia) para el tipo de terreno está dado también en función de la frecuencia, figura (2.11).

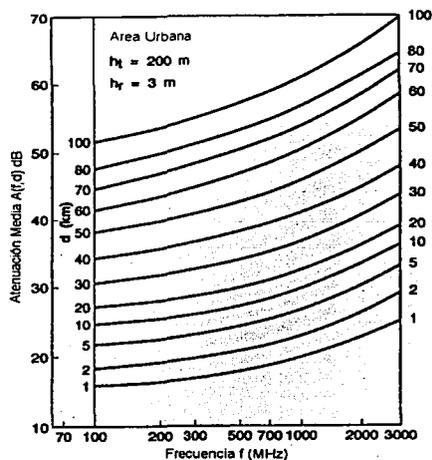


Figura (2.10).

Atenuación relativa a las pérdidas en el espacio libre para un terreno casi plano (usando el método Okumura). Fuente: After Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, *Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service*, Rev. Elec. Comm. Lab., pp. 823-873, Sep-Oct. 1968.

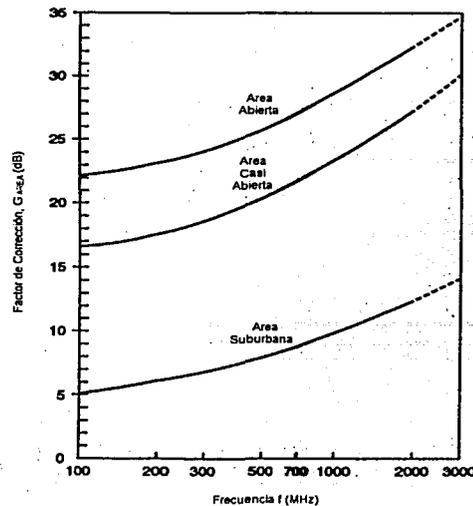


Figura (2.11). Factor de corrección para diferentes tipos de terreno (método Okumura). Fuente: After Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, *Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service*, Rev. Elec. Comm. Lab., pp. 823-873, Sep-Oct. 1968.

Para diferentes alturas de antenas los factores de corrección (ganancia) son los siguientes:

⇒ Ganancia $G(h_t)$ de 6 dB por octava, para una altura de antena de estación base, por ejemplo:

$$G(h_t) = 20 \log(h_t / 200) \quad h_t > 10m$$

$G(h_t)$ varía a una tasa de 20 dB/década.

⇒ Ganancia $G(h_r)$ de 3 dB o 6 dB por octava, para una altura de antena de estación móvil dependiendo del rango, por ejemplo:

$$G(h_r) = 10 \log(h_r / 3) \quad h_r < 3m$$

$$G(h_r) = 20 \log(h_r / 3) \quad 3m \leq h_r \leq 10m$$

$G(h_r)$ varía a una tasa de 10 dB/década para alturas menores a 3 m.

El procedimiento para estimar las pérdidas por propagación es el siguiente:

1. Dadas una distancia d y una frecuencia f , se encuentra la atenuación $A(f, d)$ usando las curvas de la figura (2.10).
2. De acuerdo al tipo de terreno, para la misma frecuencia, se encuentra el factor de corrección G_{area} , y se sustrae éste de $A(f, d)$, obtenido en el punto 1.
3. Se determinan los factores de corrección $G(h_t)$ y $G(h_r)$ de acuerdo a las alturas de las antenas, sustrayéndolas del resultado del paso 2.
4. Las pérdidas obtenidas en el paso 3 son añadidas a las pérdidas por propagación en el espacio libre PL_o , para obtener las pérdidas totales.

Por consiguiente, las pérdidas totales están dadas por (ecuación 2.16):

$$PL = PL_o + A(f, d) - G_{\text{area}} - G(h_t) - G(h_r)$$

Ecuación (2.16). Pérdidas totales para el modelo de Okumura.

El modelo de Okumura está basado totalmente en datos de mediciones en campo y no ofrece una explicación analítica. Para muchas situaciones, pueden realizarse extrapolaciones de las curvas para

obtener valores fuera del rango de medición, aunque la validación de éstas depende de las circunstancias y de la suavidad de la curva en cuestión.

El modelo de Okumura está considerado entre los más simples y con mejores resultados en términos de exactitud en la predicción de pérdidas por propagación para sistemas celulares en medios irregulares. La mayor desventaja del modelo es su lenta respuesta a rápidos cambios en el terreno, de ahí que tenga buena respuesta en áreas urbanas y suburbanas, pero no tan buena en áreas rurales. Los valores de desviación estándar comunes entre predicciones y mediciones de pérdidas por propagación están entre 10 dB y 14 dB.

2.2.3.2 Modelo de Hata

El modelo de Hata es un modelo empírico desarrollado de datos de mediciones obtenidas en Tokio a frecuencias de 150, 450 y 900 MHz. El modelo ofrece expresiones cerradas para las pérdidas por propagación para diferentes ambientes, las cuales pueden ser usadas cuando se presentan las siguientes condiciones:

- ⇒ f_c = Frecuencia de la portadora en MHz, de 150 [MHz] a 1500 [MHz]
- ⇒ h_{RBS} = Altura de la antena de la estación base, rango normal: 30 [m] a 200 [m]; rango extendido: 1.5 [m] a 400 [m]
- ⇒ h_{MS} = Altura de la antena del móvil, 1 [m] a 10 [m]
- ⇒ d = Distancia desde la antena transmisora, rango normal: 1 [km] a 20 [km]; rango extendido: 2 [m] a 80 [km]

Las siguientes fórmulas empíricas para las pérdidas por propagación PL , estuvieron basadas en mediciones de campo, publicadas en *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services* (IEEE Trans on Vehicular Technology. Vol. VT-29, No. 3, Aug 1980)

- ⇒ $PL = A + B \log_{10}(d)$ para áreas urbanas
- ⇒ $PL = A + B \log_{10}(d) - C$ para áreas suburbanas
- ⇒ $PL = A + B \log_{10}(d) - D$ para áreas rurales y tramos carreteros

donde d es la distancia entre la estación base y la estación móvil en kilómetros.

Las variables A, B, C, y D pueden ser calculadas utilizando las ecuaciones (2.17).

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{RBS}) - a(h_{MS})$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{RBS})$$

$$C = 2 \left[\log_{10} \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 + 5.4$$

$$D = 4.78 [\log_{10}(f_c)]^2 - 18.33 \log_{10}(f_c) + 40.94$$

Ecuación(2.17). Ecuaciones para el cálculo de las variables A,B,C, y D, desarrolladas por Hata.

donde:

$a(h_{MS})$ = Factor de corrección que depende del móvil, la frecuencia y el tipo del área de cobertura.

Para áreas urbanas pequeñas o medias:

$$a(h_{MS}) = [1.1 \log_{10}(f_c) - 0.7] h_{MS} - [1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8]$$

Ecuación(2.18). Cálculo de la constante para áreas urbanas pequeñas o medianas.

Para áreas urbanas grandes:

$$a(h_{MS}) = [3.2 \log_{10}(11.75h_{MS})]^2 - 4.97$$

Ecuación(2.19). Cálculo de la constante para áreas urbanas grandes.

Aunque el modelo de Hata no tiene ninguna de las correcciones de trayectoria específica del modelo de Okumura, las expresiones anteriores tienen un gran valor práctico. Las predicciones del modelo de Hata son muy cercanas al modelo original de Okumura, conforme la distancia d excede 1 km. Este modelo funciona bastante bien con coberturas grandes, mayores a 1 km.

2.2.3.3 Modelo de COST 231-Hata

Este es un modelo empírico obtenido del modelo de Hata para cubrir el rango de frecuencias de 1500 a 2000 MHz, realizado por la Cooperativa Europea para Ciencia y Tecnología. La extensión COST-231, 2-GHz es usada para frecuencias en la banda de 1900 MHz. *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 1900 & 1800 MHz bands.* (Rev. 2, The Hague, Sept. 1991). Para áreas metropolitanas, la extensión COST-231, 2-GHz adiciona una constante a las pérdidas por propagación PL dependiente del medio ambiente, $C_M = 3$ dB. Las ecuaciones para ciudades medianas, áreas suburbanas, y áreas rurales permanecen iguales con $C_M = 0$ dB.

La extensión al modelo de Hata altera el parámetro A , definido por la ecuación (2.20).

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{RHS}) - a(h_{MS}) + C_M$$

Ecuación (2.20). Ecuación para la variable A de la extensión COST-231, 2-GHz

La potencia recibida P_r puede ser predecida usando la ecuación (2.21) y los modelos de propagación de Hata, para 800 MHz ó 1900 MHz, dependiendo del ambiente y la frecuencia en la que se esté trabajando.

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL$$

Ecuación (2.21). Cálculo de la potencia recibida para 800 MHz y 1900 MHz.

donde:

P_r = Potencia recibida en [dBm]

P_t = Potencia transmitida en [dBm]

G_t = Ganancia de la antena transmisora en [dB]

G_r = Ganancia de la antena receptora en [dB]

PL = Pérdidas por propagación en [dB]

2.2.3.4 Modelo de Lee

Este es un modelo empírico para macrocélulas de áreas urbanas y suburbanas que predice la potencia recibida P_r , en dBm con la ecuación(2.22).

$$P_r = A - B \log d - n \log \left(\frac{f}{900} \right) + 10 \log \alpha$$

Ecuación (2.22). Ecuación del modelo de Lee para predecir la potencia recibida, en dBm.

donde d es la distancia en kilómetros entre las antenas transmisora y receptora, y f es la frecuencia en MHz. Los parámetros A y B dependen de las características del ambiente, y han sido determinados de mediciones realizadas en varias ciudades con diferentes características, los cuales pueden ser usadas como modelos.

$$A, B = \begin{cases} 53.9, 38.4; \text{Area suburbana} \\ 62.5, 36.8; \text{Filadelfia} \\ 55.2, 43.1; \text{Newark} \\ 77.8, 30.5; \text{Tokio} \end{cases}$$

El factor n tiene los siguientes valores

$$n = \begin{cases} 2, & f < 450 \text{ MHz} \\ 3, & f > 450 \text{ MHz} \end{cases}$$

El parámetro α está dado por la ecuación (2.23).

$$\alpha = \frac{h_t^2 h_r^m p_t g_t g_r}{3660}$$

Ecuación (2.23). Factor α de la ecuación del modelo de Lee para predecir la potencia recibida.

Donde h_t y h_r son las alturas de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente, p_t es la potencia transmitida en watts, g_t y g_r son las ganancias de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente, y m depende de la altura de la antena de recepción, donde:

$$m = \begin{cases} 2, & \text{cuando } h_r > 10 \text{ m} \\ 1, & \text{cuando } h_r < 3 \text{ m} \end{cases}$$

2.3 Deterioros en el Canal de Radiofrecuencia

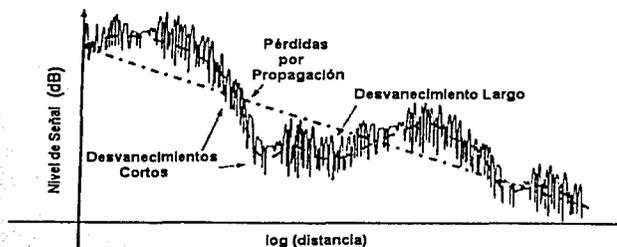
En la práctica, la comunicación entre una estación base y un teléfono móvil en un medio inalámbrico rara vez se realiza con línea de vista directa, debido a condiciones tales como la topografía y morfología del terreno. Consecuentemente, la señal de RF proveniente de la estación base es dispersada por la reflexión y la refracción, alcanzando al receptor a través de muchas trayectorias sin línea de vista. En este medio de no línea de vista surgen los fenómenos de *desvanecimiento corto* y *desvanecimiento largo* que se manifiestan como variaciones en la *intensidad de la señal recibida RSSI* (Received Signal Strength Indication), los cuales degradan el desempeño del canal de radiofrecuencia.

El fenómeno de radio propagación móvil es muy complejo y no puede ser descrito completamente por un modelo teórico único. Existen muchos modelos de predicción de intensidad de señal, pero sólo es posible lograr una buena predicción con una cantidad de datos de entrada lo suficientemente alta con los cuales se pueda caracterizar el medio ambiente del lugar en cuestión. Algunos de estos modelos son aplicables a situaciones muy específicas, y otros pueden ser utilizados en un rango más amplio de condiciones, donde puedan ser aplicados factores de corrección.

Sin embargo, debido a las variaciones de los fenómenos que están involucrados en la radiopropagación móvil, la señal de radio no puede ser tratada únicamente por métodos determinísticos. De acuerdo con esto, dentro de un modelo de predicción destacan tres puntos para describir mejor los fenómenos del medio ambiente:

1. La señal promedio se decreta con la distancia d a una razón $d^{-\alpha}$, donde α es un parámetro que está típicamente en el rango 2-4, dependiendo del medio ambiente.
2. Los *desvanecimientos largos* debido a las sombras de los obstáculos tienen aproximadamente una distribución logarítmica normal, con una desviación estándar en el rango de 4-10 dB.
3. Los *desvanecimientos cortos* debido a la propagación multitrayectoria tienen una distribución Rayleigh. Dentro de edificios, donde se pueden encontrar señales con línea de vista y multitrayectorias, los desvanecimientos cortos siguen una distribución Ricean.

La señal recibida resultante es una combinación de todos estos fenómenos, como se ilustra en la figura (2.12).



Figura(2.12). El desvanecimiento total de la señal.

2.3.1 Distribuciones Estadísticas de la Señal de Radio Móvil

Las tres distribuciones estadísticas más fuertemente relacionadas con el comportamiento de una señal de radio móvil son:

⇒ La distribución lognormal.

La *distribución lognormal* describe a la señal recibida ensombrecida por las obstrucciones tales como montañas, edificios y otros.

La ecuación (2.24) define la distribución logarítmica normal de la señal medida.

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left[\frac{(RSSI - m)^2}{2\sigma^2}\right]}$$

Ecuación(2.24). *Distribución logarítmica normal de la señal medida.*

donde:

- p = Función de densidad de distribución logarítmica normal.
- $RSSI$ = Intensidad de la señal recibida.
- m = Nivel esperado de RSSI.
- σ = Desviación estándar de RSSI.

De datos experimentales recolectados en la banda de 800 MHz, el rango de desviación estándar en ciudades norteamericanas y japonesas es 9-12 dB. En una área urbana ésta desviación tiende a incrementarse con la altura de los edificios *A Power-Spectral Theory of Propagation in the Mobile-Radio Environment*, (IEEE Trans. On Vehicular Technology. Vol. VT-23, Nov. 1973, pp. 143-159, Reudink, D.O.). Consecuentemente, las pérdidas por propagación PL para un medio de radiofrecuencia móvil tienen una desviación estándar de 5 a 12 dB.

⇒ La distribución Rayleigh.

La *distribución Rayleigh* describe a la señal recibida resultante de la propagación multitrayectoria, en áreas donde la señal de RF no tiene componentes de línea de vista.

La señal recibida en el móvil raramente tendrá una línea de vista directa al transmisor. Esta es la suma de las señales formadas por la señal transmitida dispersada por las obstrucciones ubicadas aleatoriamente, imponiéndose diferentes atenuaciones y fases en las señales resultantes. Esto es conocido como *propagación multitrayectoria*. Es admisible suponer que las fases de las ondas dispersadas están uniformemente distribuidas de 0 a 2π radianes y las amplitudes y fases son estadísticamente independientes unas de otras. Consecuentemente, podemos esperar que en un cierto instante las ondas estén en fase, produciéndose ganancias en las amplitudes (interferencia constructiva), mientras que en otro instante estarán desfasadas, produciéndose atenuaciones en sus amplitudes (interferencia destructiva).

El modelo de desvanecimiento de Rayleigh aplica en el caso donde hay un gran número de trayectorias indirectas y éstas predominan sobre la trayectoria directa. El desvanecimiento Rayleigh es el desvanecimiento más severo.

⇒ La distribución Ricean.

La *distribución Ricean* describe a la señal recibida resultante de la propagación multitrayectoria más una componente de línea de vista, predominantemente en medios rurales e interiores.

En algunas circunstancias, cuando existe una propagación de línea de vista, la trayectoria directa predomina sobre las indirectas. Esto puede suceder por ejemplo dentro de un edificio. Si se ubica una antena transmisora en un interior, es lógico esperar que ocurrirán algunos ductos para la propagación de las ondas, añadido a las dispersiones multitrayectoria. Consecuentemente, la señal recibida es la suma de las señales dispersadas y las señales directas.

2.3.2 Desvanecimientos y Multitrayectorias

El concepto de *desvanecimiento de pequeña escala* o simplemente *desvanecimiento*, es usado para describir las rápidas variaciones de la amplitud de una señal de radio sobre un periodo de tiempo o distancia corto, de tal manera que sean ignorados los efectos de las pérdidas por propagación. El desvanecimiento es causado por la interferencia entre dos o más versiones de la señal transmitida que arriban al receptor en tiempos ligeramente diferentes. Estas ondas llamadas *ondas multitrayectoria*, se combinan en el receptor para dar una señal resultante la cual puede variar en amplitud y fase, dependiendo de la distribución de la intensidad y el tiempo relativo de propagación de las ondas, así como el ancho de banda de la señal transmitida.

2.3.2.1 Propagación Multitrayectoria

Las multitrayectorias en el canal de radio móvil crean efectos de desvanecimientos de pequeña escala. Los tres efectos más importantes son:

- ⇒ Cambios rápidos en la intensidad de señal en una distancia o intervalo de tiempo cortos.
- ⇒ Modulación en frecuencia aleatoria debido a las variaciones de Doppler en diferentes señales multitrayectoria.
- ⇒ Dispersión en el tiempo (ecos) causados por los retardos en la propagación multitrayectoria.

En áreas urbanizadas, los desvanecimientos ocurren debido a que la altura de las antenas de los móviles está muy por debajo de la altura de las estructuras circundantes, así que no hay trayectoria de línea de vista con la estación base. Además, aún cuando exista una línea de vista, las multitrayectorias persisten debido a las reflexiones de la tierra y las estructuras del entorno. Las ondas de radio llegan al receptor de diferentes direcciones con diferentes retardos de propagación. La señal recibida por el móvil en cualquier punto del espacio puede consistir de un gran número de ondas planas teniendo amplitudes, fases y ángulos de arribo distribuidos aleatoriamente. Estas componentes multitrayectoria, se combinan vectorialmente en la antena del receptor, y pueden causar que la señal recibida por el móvil se deforme o desvanezca. Aún cuando un receptor móvil tenga una posición fija, la señal recibida puede desvanecerse debido al movimiento de los objetos circundantes en el canal de radio.

Debido a los efectos constructivos y destructivos de las ondas multitrayectoria sumándose en varios puntos del espacio, un receptor moviéndose a alta velocidad puede pasar a través de varios desvanecimientos en un periodo de tiempo corto. Por ejemplo, en un caso extremo, un receptor puede detenerse en un punto en particular en el cual la señal recibida se desvanezca hasta el grado de que se pierda la comunicación entre la estación base y el móvil.

Debido al movimiento entre la estación móvil y la estación base, cada onda multitrayectoria experimenta una variación en frecuencia. El cambio en la frecuencia de la señal recibida debido al movimiento es llamado *variación Doppler*, y es directamente proporcional a la velocidad y a la dirección de la trayectoria del móvil con respecto a la dirección de arribo de la onda multitrayectoria recibida.

Una señal de radio transmitida desde una estación base alcanza a la estación móvil con un gran número de ondas esparcidas. El esparcimiento puede ser provocado por múltiples reflexiones sobre terrenos irregulares, por la presencia de un gran número de obstrucciones, por variaciones de la constante dieléctrica del medio, etc. Debido a la aleatoriedad de este fenómeno, la señal de radio móvil es tratada con teoría estadística. La envolvente, la fase y la frecuencia de la señal recibida varían aleatoriamente de acuerdo a distribuciones de probabilidad conocidas (logarítmica normal, Raileigh y Ricean).

2.3.2.2 Factores que Influyen en los Desvanecimientos

Son muchos los factores físicos que influyen en los desvanecimientos del canal de radio, sin embargo sobresalen los siguientes:

⇒ La propagación multitrayectoria.

La presencia de objetos reflejantes y dispersantes en el canal crean un medio ambiente constantemente cambiante que disipa la energía de la señal en amplitud, fase y tiempo. Estos efectos crean múltiples versiones de la señal transmitida que llegan a la antena receptora, desplazadas unas con respecto de las otras en tiempo y orientación espacial. Las fases y amplitudes aleatorias de las diferentes componentes multitrayectoria causan fluctuaciones en la intensidad de la señal, introduciendo por ello desvanecimientos de pequeña escala, distorsión de la señal, o ambos. La propagación multitrayectoria a menudo eleva el tiempo requerido para que la porción de banda base de la señal llegue al receptor, lo cual causa esparcimiento de la señal debido a la *interferencia intersímbolo*.

⇒ La velocidad del móvil.

El desplazamiento relativo entre la estación base y el móvil crea modulación en frecuencia aleatoria debido a las diferentes *variaciones Doppler* en cada una de las componentes multitrayectoria. Las variaciones Doppler serán positivas o negativas dependiendo de que el receptor móvil se aleje o se acerque a la estación base.

⇒ La velocidad de los efectos circundantes.

Si existen objetos circundantes al canal de radio en movimiento, estos inducen un tiempo variante Doppler en las componentes multitrayectoria. Cuando los objetos circundantes se trasladan a una mayor velocidad que el móvil, entonces este efecto domina los desvanecimientos de pequeña escala. De otra manera, el movimiento de los objetos circundantes puede ser ignorado, y sólo necesita ser considerada la velocidad del móvil.

⇒ El ancho de banda de transmisión del canal.

Si el ancho de banda de la señal transmitida es mayor que el ancho de banda del canal multitrayectoria, la señal transmitida será distorsionada, pero la intensidad de señal recibida no sufrirá grandes desvanecimientos. El ancho de banda del canal puede ser cuantificado por el *ancho de banda de coherencia*, el cual está relacionado a las multitrayectorias del canal. El ancho de banda de coherencia es una medición de la máxima diferencia de frecuencia para la cual las señales están aún fuertemente correlacionadas en amplitud. Si la señal transmitida tiene un ancho de banda angosto comparado con el canal, la amplitud de la señal cambiará rápidamente, pero la señal no será distorsionada en el tiempo.

2.3.3 Efectos de la Propagación Multitrayectoria

En el medio ambiente de radio móvil como un resultado del fenómeno de reflexión multitrayectoria, la señal transmitida desde una estación base que llega al móvil tendrá diferentes trayectorias, y debido a que cada trayectoria tiene diferente longitud, el tiempo de arribo de cada una es diferente. Con el fin de comparar diferentes canales con multitrayectorias y desarrollar guías de diseño para sistemas inalámbricos, son muy empleados parámetros que cuantifiquen las multitrayectorias del canal.

2.3.3.1 Parámetros de los Desvanecimientos Selectivos en Frecuencia

Además de ser *dispersivos* o *no dispersivos en frecuencia*, los canales con desvanecimientos Rayleigh y Rician pueden también ser *selectivos* o *no selectivos en frecuencia*. Sin embargo, esos conceptos son más claramente demostrados en el dominio del tiempo usando los términos equivalentes *dispersivo en el tiempo* y *no dispersivo en el tiempo*. Dos importantes componentes de la dispersión en el tiempo son el *tiempo de retardo esparcido* y el *ancho de banda de coherencia*, el cual es inversamente proporcional al tiempo de retardo esparcido. Esas dos mediciones están fuertemente relacionadas a los desvanecimientos Rician y Rayleigh.

2.3.3.1.1 Tiempo de Retardo Esparcido

El *tiempo de retardo esparcido* es un fenómeno natural causado por las trayectorias de propagación del canal de radio reflejadas y dispersadas.

El tiempo de retardo esparcido en un medio de desvanecimiento de dos señales multitrayectoria es el tiempo de retardo entre el arribo de la señal 1 y la señal 2. La señal 1 puede ser con línea de vista o sin línea de vista; si la señal 1 es con línea de vista, entonces manifiesta las características del desvanecimiento Rician; si la señal 1 es irregular, entonces manifiesta las características del desvanecimiento Rayleigh.

Ejemplos de mediciones de tiempos de retardo esparcido para 800 MHz se muestran a continuación:

- ↪ Interiores, $\Delta t < 0.1 \mu\text{seg}$
- ↪ Area abierta, $\Delta t < 0.2 \mu\text{seg}$
- ↪ Area suburbana, $\Delta t \approx 0.5 \mu\text{seg}$
- ↪ Area urbana, $\Delta t \approx 3.0 \mu\text{seg}$

2.3.3.1.2 Ancho de Banda de Coherencia

Consideremos una señal de radio arbitraria con un ancho de banda dado, propagándose en un medio ambiente de radio móvil. Debido a los efectos de las multitrayectorias, cada componente de frecuencia de la señal puede alcanzar al móvil con diferentes tiempos de retardo. Debido a esto, es esencial determinar la máxima separación en frecuencia para la cual las señales se consideran aún correlacionadas. Esta separación en frecuencia es llamada *ancho de banda de coherencia*.

Los sistemas que operan con canales sustancialmente más angostos que el ancho de banda de coherencia son conocidos como *sistemas de banda angosta*. Los *sistemas de banda ancha* son aquellos operando con canales más anchos que el ancho de banda de coherencia. En los sistemas de banda angosta, el total de los componentes de la señal están igualmente influenciados por la propagación multitrayectoria. De acuerdo a esto, aunque con diferentes amplitudes y afectados por ruido e interferencia, la señal recibida es esencialmente la misma que la señal transmitida. En otras palabras, la señal de radio experimenta un *desvanecimiento no selectivo*. Por otra parte, en los sistemas de banda ancha las diferentes componentes de frecuencia de la señal pueden ser afectadas de distinta manera por el desvanecimiento, caracterizando el fenómeno conocido como *desvanecimiento selectivo*.

El *ancho de banda de coherencia* es el espaciado en frecuencia requerido para que la intensidad de una señal cumpla con una correlación de 0.9 o menor. El ancho de banda de coherencia es inversamente proporcional al tiempo de retardo esparcido, como se muestra en la ecuación (2.25).

$$B_{Coherencia} = \frac{1}{2\pi\Delta t}$$

Ecuación (2.25). Ancho de banda de coherencia contra el tiempo de retardo esparcido.

donde:

$B_{Coherencia}$ - Ancho de banda de coherencia
 Δt - Tiempo de retardo esparcido

El ancho de banda de coherencia es una medición estadística del rango de frecuencias sobre el cual el canal se puede considerar "plano" (por ejemplo, un canal que tiene todas sus componentes espectrales con ganancias y fases lineales aproximadamente iguales).

El ancho de banda de coherencia fija un límite para la más alta velocidad de datos que puede ser usada sobre un canal con desvanecimiento Rician o Rayleigh. Para que un canal con desvanecimiento Rician o Rayleigh sea no dispersivo en el tiempo, se debe de cumplir la condición de la ecuación (2.26).

$$B_{Coherencia} \gg BW$$

Ecuación (2.26). Ecuación que asegura que un canal con atenuación Rayleigh o Rician es no dispersivo en el tiempo.

donde:

Ancho de banda (BW) = 24.3 kHz

De ahí, si $\Delta t > 6 \mu\text{seg}$, los desvanecimientos cortos multitrayectoria Rayleigh y Rician experimentados en 800 MHz son dispersivos en el tiempo. Sin embargo, la mayoría de las mediciones de tiempo de retardo esparcido para 800 MHz en un área urbana están alrededor de 3 μseg , así que la mayoría de los medios actuales experimentarán desvanecimientos Rayleigh o Rician que son no dispersivos en el tiempo. Indiferentemente, la equalización puede ayudar a combatir cualquier degradación en el desempeño.

2.3.3.1.3 Modulación en Frecuencia Aleatoria

La naturaleza aleatoria de la variación en el tiempo de la fase de la señal desvanecida causa un fenómeno conocido como *modulación en frecuencia aleatoria*. La modulación en frecuencia aleatoria adiciona una componente de ruido extra a la señal ya deteriorada, teniendo una potencia proporcional al cuadrado de la velocidad del vehículo.

2.3.3.2 Parámetros de los Desvanecimientos Dispersivos

Las distribuciones de Rayleigh y Rician pueden ser *dispersivas* o *no dispersivas* en el *dominio de la frecuencia*. En el *dominio del tiempo*, los términos usados son *distribuciones selectivas* o *no selectivas en el tiempo*. Sin embargo, los conceptos son más claramente demostrados en el dominio de la frecuencia.

Dos importantes componentes de la dispersión en frecuencia son la *frecuencia de máxima atenuación* y el *tiempo de coherencia*. La frecuencia de máxima atenuación se denomina como la *máxima frecuencia Doppler*, y el tiempo de coherencia es inversamente proporcional a este valor. Debido a esto, se debe explicar la frecuencia Doppler para entender la dispersión en frecuencia.

2.3.3.2.1 Variación o Frecuencia Doppler

La *frecuencia Doppler* se refiere a la variación en frecuencia de la portadora experimentada por un móvil desplazándose bajo las condiciones del espacio libre.

Se considera un móvil trasladándose a una velocidad constante v , a lo largo de una trayectoria con una longitud d entre los puntos X y Y , mientras recibe la señal de un punto S , como se muestra en la figura (2.13).

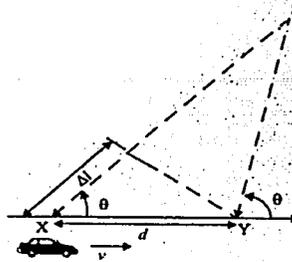


Figura (2.13). Ilustración del Efecto Doppler.

La diferencia en las longitudes de las trayectorias desde el punto S al móvil en los puntos X y Y está dada por $\Delta = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$, donde Δt es el tiempo requerido para que el móvil se traslade de X a Y , y se asume tener el mismo ángulo θ en los puntos X y Y , ya que se consideran distantes entre sí. El cambio de fase en la señal recibida debido a la diferencia en la trayectoria es por consiguiente:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta$$

y de aquí el aparente cambio en frecuencia, o *variación Doppler*.

La ecuación anterior relaciona la variación Doppler a la velocidad del móvil y el ángulo espacial entre la dirección de movimiento del móvil y la dirección de arribo de la onda. De la ecuación se puede ver que si el móvil se traslada hacia la dirección de arribo de la onda, la variación Doppler es positiva (la frecuencia recibida se incrementa), y si el móvil se aleja de la dirección de arribo de la onda, la variación Doppler es negativa (la frecuencia recibida se decrementa). Las componentes multitrayectoria de una señal, las cuales arriban de diferentes direcciones contribuyen a la variación Doppler de la señal recibida, incrementando así el ancho de banda de la señal.

La *frecuencia Doppler* se define en la ecuación(2.27).

$$f_D = \left(\frac{v}{\lambda} \right) \cos \theta$$

Ecuación (2.27). Cálculo de la frecuencia Doppler.

donde:

f_D = Frecuencia Doppler

v = Velocidad de la estación móvil

λ = Longitud de onda en [m]

θ = Angulo de la señal de RF que llega a la estación móvil con respecto al movimiento de dicho móvil.

Cuando $\theta = 0^\circ$, el móvil se está alejando de la estación base. Cuando $\theta = 180^\circ$, la estación móvil se está acercando hacia la estación base. Finalmente, si $\theta = 90^\circ$ o 270° , la estación móvil se está desplazando en círculos alrededor de la estación base. La frecuencia recibida f_{RX} está desfasada de la frecuencia transmitida f_{TX} por la frecuencia Doppler como se muestra en la ecuación (2.28).

$$f_{RX} = f_{TX} - f_D$$

Ecuación(2.28). Cálculo de la frecuencia Doppler para atenuación dispersiva.

donde:

f_{RX} = Frecuencia recibida en la estación móvil
 f_{TX} = Frecuencia transmitida por la estación base
 f_D = Frecuencia Doppler

Si dos señales de RF (señal 1 y señal 2) arriban con diferentes ángulos con respecto al movimiento de la estación móvil (θ_1 y θ_2 , respectivamente), se crea una nueva señal con la suma de las dos señales de RF (las cuales son señales senoidales). La frecuencia de la señal recibida está definida en la ecuación (2.29).

$$f_d = \frac{v}{2\lambda} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1)$$

Ecuación(2.29). Frecuencia recibida con dos diferentes señales de RF entrantes de diferentes ángulos a una estación móvil en movimiento.

donde:

f_d = Frecuencia de la señal recibida
 v = Velocidad de la estación móvil
 λ = Longitud de onda de la señal de RF
 θ_2 = Angulo de la señal 2 de RF llegando a la estación móvil con respecto a su movimiento
 θ_1 = Angulo de la señal 1 de RF llegando a la estación móvil con respecto a su movimiento

La frecuencia Doppler puede ser igual a la frecuencia de atenuación si la frecuencia Doppler es la máxima para las señales 1 y 2 ($\theta_1 = 180^\circ$ y $\theta_2 = 0^\circ$ o $\theta_1 = 0^\circ$ y $\theta_2 = 180^\circ$). Debido a esta relación entre la frecuencia Doppler y la frecuencia de atenuación, la *máxima frecuencia Doppler* está especificada como la *máxima frecuencia de atenuación*.

2.3.3.2.2 Tiempo de Coherencia

El *tiempo de coherencia* está usualmente definido como el intervalo de tiempo requerido para obtener una intensidad de señal con una correlación de 0.7 a 0.9. El tiempo de coherencia es inversamente proporcional al máximo de la frecuencia Doppler como se muestra en la ecuación (2.30).

$$\tau_{Coherencia} = \frac{1}{2\pi f_D}$$

Ecuación (2.30). Tiempo de coherencia en relación a la máxima frecuencia Doppler.

donde:

$\tau_{Coherencia}$ = Tiempo de Coherencia
 f_D = Máxima frecuencia Doppler

El tiempo de coherencia establece un límite en la velocidad de datos más baja que puede ser usada sobre un canal con desvanecimientos Rayleigh o Rician para un esquema de modulación dado. Así, para un canal con desvanecimientos Rayleigh o Rician (a frecuencia no dispersiva), la condición mostrada en la ecuación (2.31) debe ser válida para una modulación $\pi/4$ DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).

$$\frac{\tau_{\text{Coherencia}}}{T_s} \geq 20 \quad \text{donde: } T_s = 41.2 \mu\text{seg}$$

Ecuación (2.31). Ecuación para asegurar que un canal con atenuación Rayleigh o Rician es plano para $\pi/4$ DQPSK.

2.3.4 Tipos de Desvanecimientos de Pequeña Escala

El tipo de desvanecimiento experimentado por una señal que se propaga a través de un canal de radio móvil depende de la naturaleza de la señal transmitida con respecto a las características del canal. Dependiendo de la relación entre los parámetros de la señal (por ejemplo el ancho de banda) y los parámetros del canal (por ejemplo el retardo esparcido), las señales transmitidas estarán afectadas por diferentes tipos de desvanecimientos. Los mecanismos de *dispersión en el tiempo* y *dispersión en la frecuencia* en un canal de radio móvil apuntan a cuatro posibles efectos, los cuales se manifiestan dependiendo de la naturaleza de la señal transmitida, el canal y la velocidad.

2.3.4.1 Desvanecimientos Debidos a las Multitrayectorias de Tiempo de Retardo Esparcido

La *dispersión en el tiempo* debido a las multitrayectorias causa que la señal transmitida sufra *desvanecimientos planos* o *desvanecimientos de frecuencia selectiva*.

2.3.4.1.1 Desvanecimiento Plano

Si el canal de radio móvil tiene una ganancia constante y respuesta en fase lineal sobre un ancho de banda el cual es mayor que el ancho de banda de la señal transmitida, entonces la señal recibida sufrirá un *desvanecimiento plano*. En un desvanecimiento plano, la estructura multitrayectoria del canal es tal que las características espectrales de la señal transmitida se preservan en el receptor. Sin embargo, la intensidad de la señal recibida cambia con el tiempo, debido a las variaciones en la ganancia del canal causadas por las multitrayectorias.

En otras palabras, si la ganancia del canal cambia sobre el tiempo, ocurre un cambio de amplitud en la señal recibida, pero se conserva el espectro de la transmisión. Los canales con desvanecimiento plano también son conocidos como *canales de banda angosta*, ya que el ancho de banda de la señal aplicada es angosto comparado al ancho de banda del canal.

Los canales con desvanecimiento plano pueden requerir 20 dB o 30 dB más de potencia transmitida para tener tasas de errores de bits bajas durante los momentos de desvanecimientos profundos. La distribución de la ganancia instantánea de los canales con desvanecimiento plano es muy importante para el diseño de radio enlaces, y su distribución de amplitud más común es la distribución Rayleigh.

2.3.4.1.2 Desvanecimiento de Frecuencia Selectiva

Si el canal posee una ganancia constante y una respuesta en fase lineal sobre un ancho de banda que es menor al ancho de banda de la señal transmitida, entonces el canal sufre *desvanecimientos de frecuencia selectiva* en la señal recibida. Bajo estas condiciones la respuesta al impulso del canal tiene multitrayectorias de retardo esparcido, las cuales son mayores que el ancho de banda de la forma de onda del mensaje transmitido. Cuando esto ocurre, la señal recibida incluye múltiples versiones de la forma de onda transmitida que son atenuadas (desvanecidas) y retardadas en el tiempo, y de aquí que

la señal recibida sea distorsionada. El desvanecimiento de frecuencia selectiva se debe a la dispersión en el tiempo de los símbolos transmitidos dentro del canal. Así, el canal induce *interferencia intersímbolo (ISI)*. Visto en el dominio de la frecuencia, ciertas componentes de frecuencia en el espectro de la señal recibida tienen mayores ganancias que otras.

En los desvanecimientos de frecuencia selectiva, el espectro de la señal transmitida tiene un ancho de banda mayor al del ancho de banda de coherencia del canal. Concluyendo para el dominio de la frecuencia, el canal tiene características de frecuencia selectiva cuando la ganancia es diferente para las diferentes componentes de frecuencia. Los canales con desvanecimiento de frecuencia selectiva son también conocidos como canales de *banda ancha* ya que el ancho de banda de la señal transmitida es mayor que el ancho de banda de la respuesta al impulso del canal. Al variar el tiempo, el canal varía en ganancia y fase, resultando una señal recibida con distorsión variante en el tiempo.

2.3.4.2 Desvanecimientos Debidos al Esparcimiento Doppler

Dependiendo de que tan rápidamente cambie la señal transmitida en banda base comparado a la tasa de cambio del canal, un canal puede ser clasificado como canal con *desvanecimiento corto* o *desvanecimiento largo*.

2.3.4.2.1 Desvanecimiento Corto

Los *desvanecimientos cortos* son la suma de las señales de RF que llegan al receptor, propagándose con trayectorias de línea de vista y sin línea de vista, usualmente debido a la reflexión. Típicamente, los desvanecimientos cortos se añaden a los desvanecimientos largos. Generalmente, las estructuras hechas por el hombre son las causantes de éstos desvanecimientos.

En un canal con desvanecimiento corto, el tiempo de coherencia del canal es menor que el periodo del símbolo de la señal transmitida. Esto provoca dispersión en frecuencia (también llamado desvanecimiento de tiempo selectivo) debido al esparcimiento Doppler, el cual lleva a la distorsión de la señal. Visto en el dominio de la frecuencia, la distorsión de la señal debido a los desvanecimientos cortos incrementa cuando se incrementa el esparcimiento Doppler relativo al ancho de banda de la señal transmitida.

Los desvanecimientos cortos tiene dos comportamientos:

- Forman una *distribución Rayleigh* en áreas donde la señal de RF únicamente tiene componentes sin línea de vista.
- Forman una *distribución Rician* en áreas donde existen muchas componentes de línea de vista y sin línea de vista, predominantemente en medios rurales e interiores.

Existen técnicas de procesamiento digital de señales *DSP (Digital Signal Processing)* que pueden ser usadas para compensar los desvanecimientos cortos en la *RSSI*, entre las cuales destacan la equalización adaptiva y la diversidad de espacio en las antenas de recepción de las estaciones base.

Los desvanecimientos cortos son ligeramente diferentes para el *forward link* o *uplink* (enlace de subida de móvil a estación base) comparados al *reverse-link* o *downlink* (enlace de bajada de estación base a móvil), ya que en la banda de 800 MHz el enlace de subida es 45 MHz más alto que el enlace de bajada; y para 1900 MHz el enlace de subida es 80 MHz más alto que el enlace de bajada.

2.3.4.2.2 Desvanecimiento Largo

Una onda de radio propagándose en un medio dispersivo será atenuada por las obstrucciones y las variaciones en las características electromagnéticas (permitividad eléctrica, permitividad magnética y conductividad). Un vehículo trasladándose con una distancia constante del transmisor recibirá una

señal con una amplitud experimentando atenuaciones aleatorias debido a las diferentes propiedades de las constantes de atenuación de las obstrucciones aleatorias.

El *desvanecimiento largo*, es la variación de la señal recibida debido a las obstrucciones en el medio ambiente. Hablando en general, la configuración del terreno afecta produciendo desvanecimientos largos, y el medio ambiente creado por el hombre afecta produciendo desvanecimientos largos y cortos.

En un canal con desvanecimiento largo, la respuesta al impulso del canal cambia a una tasa mucho menor que la señal transmitida de banda base. En este caso, el canal puede considerarse como estático sobre uno o varios intervalos de ancho de banda. En el dominio de la frecuencia, esto implica que el esparcimiento Doppler del canal es mucho menor que el ancho de banda de la señal de banda base.

En el desvanecimiento largo la intensidad de señal forma una distribución logarítmica normal si ésta señal es medida sobre una distancia de al menos 40λ , donde λ es la longitud de onda en metros (aproximadamente 6.32 m para 1900 MHz y aproximadamente 15 m para frecuencias de 800 MHz).

Debe quedar claro que la velocidad del móvil (o la velocidad de los objetos) y la señalización en banda base determina cuando la señal sufrirá desvanecimiento corto o desvanecimiento largo.

A continuación se presenta una tabla (2.1) a manera de resumen para los diferentes tipos de desvanecimientos:

Tipo de Desvanecimiento	Causas	Características
Plano	⇒ La propagación multitrayectoria.	⇒ El ancho de banda de la señal es menor al ancho de banda del canal. ⇒ Siguen una distribución Rayleigh debido a las multitrayectorias. ⇒ El espectro de la señal se preserva en el receptor. ⇒ La ganancia de la señal se deteriora con el tiempo.
Frecuencia Selectiva	⇒ La propagación multitrayectoria. ⇒ Dispersión en el tiempo de los símbolos transmitidos dentro del canal.	⇒ El ancho de banda de la señal es mayor al ancho de banda del canal. ⇒ Tiempos de retardo esparcido grandes. ⇒ Las componentes de frecuencia en el espectro de la señal recibida tienen diferentes ganancias. ⇒ El ancho de banda de la señal es mayor al ancho de banda de coherencia.
Corto	⇒ La propagación multitrayectoria. ⇒ El arribo de señales con y sin línea de vista.	⇒ La variación Doppler es alta. ⇒ Las variaciones del canal son mayores a las de la señal de banda base. ⇒ Siguen una distribución Rayleigh debido a las multitrayectorias. ⇒ Siguen una distribución Ricean debido a las señales con línea de vista directa y a las multitrayectorias.
Largo	⇒ Las sombras de los obstáculos presentes en el ambiente. ⇒ Los cambios en la topografía.	⇒ La variación Doppler es baja. ⇒ Las variaciones del canal son menores a las de la señal de banda base. ⇒ Siguen una distribución lognormal.

Tabla (2.1). Tipos de desvanecimientos que se presentan en un medio de radio móvil.

2.3.5 Eliminación de los Desvanecimientos

El incremento en la demanda de los servicios de radio móvil ha impulsado a los operadores y diseñadores a no sólo satisfacer la demanda del servicio, sino también a mejorar constantemente el desempeño del sistema. El desvanecimiento está considerado como una de las principales causas de la degradación del desempeño en un sistema de radio móvil. Un vehículo en movimiento dentro de un ambiente típicamente urbano puede experimentar variaciones de hasta 40 dB en el nivel de intensidad de la señal recibida. La envolvente de la señal se desvanece de acuerdo a una distribución Rayleigh, con una ocurrencia mínima cada media longitud de onda de la frecuencia portadora.

Los efectos de la propagación multitrayectoria son molestos en la transmisión de voz, pero no son críticos. El principal problema aparece cuando se lleva a cabo una señalización o una transmisión de datos, donde una pérdida de la comunicación en ciertos instantes importantes puede ser muy perjudicial.

La eliminación de los desvanecimientos se lleva a cabo generalmente por métodos de diversidad, cuyos principios están basados en el hecho de que los desvanecimientos se presentan en canales independientes, constituyendo eventos independientes. Debido a esto, si cierta información está disponible redundantemente en dos o más canales, la probabilidad de que ésta información sea afectada por un desvanecimiento profundo es baja.

2.3.5.1 Eliminación de los Desvanecimientos Cortos

Los métodos para eliminar los desvanecimientos cortos usan *diversidad microscópica*. Este nombre está relacionado a las distancias involucradas en la obtención de las trayectorias de radio independientes, correspondientes a las fracciones de una o varias longitudes de onda. La diversidad microscópica se basa en el hecho de que las señales independientes tienen una baja probabilidad de sufrir desvanecimientos profundos en el mismo instante de tiempo. Consecuentemente, la idea básica es repetir la información a través de trayectorias de radio independientes y asociarlas de tal manera que la información sea recuperada con el mínimo de desvanecimientos.

2.3.5.1.1 Criterio de Lee

Cuando se mide la *RSSI* en pruebas de campo llamadas *drive test*, se deben conocer los siguientes criterios para tratar de eliminar la componente de desvanecimiento corto:

- ⇒ Las mediciones de RF deben ser tomadas sobre una trayectoria móvil con intervalos de distancia de 40λ , donde λ es la longitud de onda en metros. Si la distancia de los intervalos es muy corta, los desvanecimientos cortos no pueden ser disminuidos. Si los intervalos de distancia son muy grandes, los resultados promedio obtenidos no serán representativos, ya que omiten los cambios finos de la señal debido a las variaciones del terreno.
- ⇒ Al menos 50 muestras de mediciones deben ser tomadas dentro del intervalo de distancia de 40λ .

Este criterio es referido como el *Criterio de Lee*. (Lee, W.C.Y. *Mobile Communications Engineering*. McGraw Hill Publishing. New York: 1985). Si son conocidos estos puntos, el valor promedio estimado de *RSSI* tendrá un 90% de confiabilidad.

Para obtener el desvanecimiento corto, se mide la intensidad de la señal de RF sobre la distancia de unas décimas de la longitud de onda, en vez de 40λ . Por ejemplo, $0.1 \lambda = 0.0158$ m para 1900 MHz y $0.1 \lambda = 0.0375$ m para 800 MHz.

2.3.5.1.2 Diversidad por Espacio

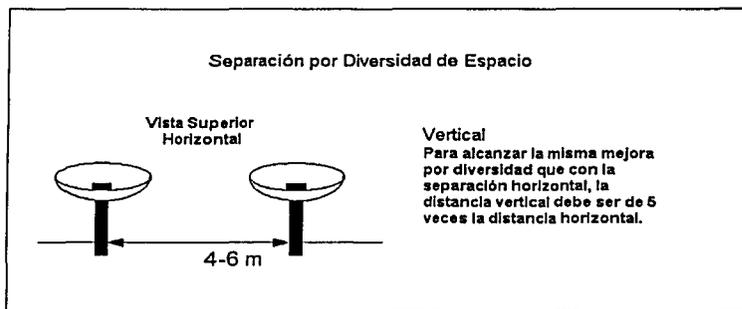
La técnica de diversidad por espacio es la precursora de todas las técnicas de diversidad, siendo aplicada por primera vez en 1929 con el uso de antenas receptoras espaciadas para recepción en HF. Debido a que su implementación es simple y económica, además de que no requiere espectro de frecuencias adicional, este esquema de diversidad es usado ampliamente.

Cuando se menciona a la diversidad en el espacio, está usualmente implícito que el espaciamiento es entre las antenas receptoras. Aunque el espaciamiento en las antenas transmisoras también ofrece diversidad, su implementación no es tan sencilla. Las antenas transmisoras no usan la misma frecuencia y polarización debido a que las señales no podrían ser separadas en receptores independientes.

La *diversidad por espacio* es usada para combatir las rápidas variaciones en los niveles de señal causadas por la propagación multitrayectoria. El mejoramiento del desempeño con el empleo de la diversidad varía dependiendo del medio ambiente. En un terreno abierto el potencial del mejoramiento del enlace por diversidad es relativamente bajo. Sin embargo, en ciudades densas donde existen edificios altos donde se produzcan componentes de ondas reflejadas, las mejoras de la diversidad son altas.

Una forma de reducir la influencia de los desvanecimientos multitrayectoria en el enlace de subida es usar antenas diversivas. La ganancia de las antenas diversivas dependerá de la correlación entre el desvanecimiento de las dos señales y la eficiencia en la potencia de recepción de los dos arreglos de antenas por separado.

Para sistemas en la banda de 800 MHz, se recomienda usar un espaciamiento horizontal de 4 m entre antenas (correspondiente a 11.5λ) para estaciones base rurales con un radio de hasta 10 km. Para células más grandes, el espaciamiento deberá ser de 6 m (correspondiente a 17λ) para tener una suficiente correlación entre las antenas diversivas, figura (2.14). Para sistemas en la banda de 1900 MHz, el espaciamiento entre antenas deberá ser de 2-4 m.



Figura(2.14). Distancia de separación para lograr la diversidad por espacio (800 MHz).

2.3.5.2 Eliminación de los Desvanecimientos Largos

Los métodos para eliminar los desvanecimientos con distribución logarítmica normal usan *diversidad macroscópica*. Las áreas de sombra de una señal transmitida son provocadas por obstrucciones tales como lomas, montañas, edificios, etc, ubicados entre la estación base y el móvil. Un móvil trasladándose dentro de éste escenario puede experimentar una comunicación significativamente mala, y en algunas ocasiones una pérdida completa de la señal.

El método básico para combatir este tipo de desvanecimiento es evitar las obstrucciones. Una manera simple de combatir este tipo de desvanecimiento es ubicar estratégicamente más de una estación base,

de tal manera que los móviles siempre tengan una trayectoria de radio clara hacia al menos una estación base.

Este tipo de diversidad involucra una separación geográfica entre las estaciones base. Se debe considerar un tipo de diversidad en espacio. Debido a que estas distancias de separación son usualmente grandes, esta es clasificada como diversidad macroscópica.

2.3.6 Ruido e Interferencia

El ruido y la interferencia son dos fenómenos que limitan el rango de operación de todo equipo de radio. El ruido es un disturbio no deseado dentro de la banda de frecuencia utilizada, surgido de varias fuentes y mostrando diferentes características. Por su parte, las interferencias de radiofrecuencia se originan por el mismo sistema de comunicación.

2.3.6.1 Ruido

El *ruido* es una señal aleatoria con amplitudes que siguen una cierta distribución, siendo en algunos casos una distribución Gaussiana.

La mayor diferencia entre el ruido gaussiano y los otros tipos de ruido, por ejemplo el ruido impulsivo, es que el tratamiento del primero es simple y sólo es relevante el conocimiento de su potencia. La fuerte dependencia del tiempo y la ubicación geográfica del ruido impulsivo hace difícil su caracterización.

El ruido causado por las actividades humanas es principalmente causado por motores eléctricos, luces neón, líneas de alta tensión y equipos médicos. Este tipo de ruido es más significativo en áreas urbanas que en las suburbanas. La diferencia en potencia en estas dos morfologías puede exceder los 16 dB. En áreas urbanas el ruido es muy importante y es el factor dominante de la degradación del desempeño en las comunicaciones móviles. El ruido hecho por el hombre es más evidente cuando sus fuentes están a distancias cortas del receptor.

Un parámetro de gran importancia para evaluar el desempeño de un sistema, es la relación señal a ruido *SNR*, la cual se puede calcular con la ecuación(2.32):

$$SNR = P_t + G_t - PL + G_r - N_t - F$$

Ecuación (2.32). Cálculo de la relación señal a ruido.

donde los parámetros están expresados en decibeles:

P_t = Potencia de transmisión

G_t = Ganancia de la antena transmisora

PL = Pérdidas por propagación

G_r = Ganancia de la antena receptora

N_t = Ruido térmico

F = Figura de ruido

La *SNR* es una medición de la inmunidad al ruido de un sistema de comunicaciones, expresada en decibeles, y representa el nivel de ruido adicional que el sistema puede tolerar, antes de que se excedan los valores de *C/I* o *BER* requeridos para un buen desempeño.

Una frecuencia portadora, cuando es transmitida en un ambiente de radio móvil, tiene su amplitud modulada por un ruido aleatorio causado por las obstrucciones y la propagación multirrayectoria, como se muestra en la figura (2.15).

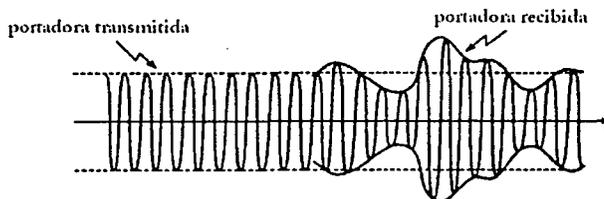


Figura (2.25). Ruido multiplicativo.

Esta modulación de amplitud aleatoria es conocida como desvanecimiento, existiendo básicamente los desvanecimientos largos y desvanecimientos cortos.

2.3.6.2 Interferencia

La interferencia de radiofrecuencia es uno de los problemas más importantes a ser considerados en el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de comunicación móvil. Debido al rápido crecimiento de las redes, es casi imposible mantenerlos en operación libres de interferencias, ya que la mejora del desempeño del sistema no se equipara a la velocidad del incremento de la demanda del servicio.

Los dos tipos de interferencia más con mayor impacto en los sistemas de radio móvil son la *interferencia co-canal* y la *interferencia de canal adyacente*. Existen otros tipos de interferencia, como la *interferencia por intermodulación* y la *interferencia intersímbolo*.

La *interferencia por intermodulación* es generada por cualquier circuito no lineal cuando el producto de dos o más señales generan otra señal, con una frecuencia que es igual o casi igual a la señal buscada. En el transmisor, la interferencia por intermodulación usualmente ocurre en el amplificador de potencia, y en el receptor se produce en el primer convertidor.

La *interferencia intersímbolo* es intrínseca a las redes digitales y es una consecuencia directa del ancho de banda limitado del medio de transmisión. Un sistema ideal podría tener un ancho de banda ilimitado con una transmisión sin distorsiones, tal que una secuencia de pulsos pueda ser enviada a una velocidad tan alta como se desee. Sin embargo, en la práctica cada sistema presenta un ancho de banda limitado con distorsiones inevitables, tales que la forma de los pulsos transmitidos (símbolos) se deforma. Los símbolos tienden a expandirse, con un consecuente traslape entre ellos. Este fenómeno es conocido como interferencia intersímbolo (*ISI*). Para minimizar estos efectos, se utilizan métodos de ecualización y codificación.

2.3.6.3 Interferencia de Canal Adyacente

La *interferencia de canal adyacente* se presenta básicamente debido a las limitaciones del equipo tales como la inestabilidad en frecuencia, el ancho de banda de recepción, el filtraje, etc. Aunque los equipos están diseñados para un máximo desempeño ante las interferencias, una combinación de factores tales como la arquitectura celular y la fluctuación aleatoria de la señal, usualmente causan un deterioro en la señal transmitida, principalmente debido a la interferencia de los canales adyacentes. Esto es debido a que los canales guardan una mínima separación entre sí para obtener la máxima eficiencia del espectro posible.

Es posible el evitar el uso de canales adyacentes en las células vecinas en un patrón de reusos 7/21. Sin embargo, en la práctica dentro de redes de tamaño considerable, las asignaciones de canales adyacentes en las células vecinas ocurre frecuentemente. Cuando se incrementa la potencia portadora en una célula, puede causar interferencia a un canal adyacente en la célula vecina.

2.3.6.4 Interferencia de Canal Adyacente Intracélula

Si son usados canales adyacentes en el mismo sitio celular, podemos tener una situación donde una estación móvil, transmitiendo a una corta distancia de la estación base, interferirá fuertemente con la señal de otros móviles, los cuales se encuentren a una mayor distancia de la misma estación base, en un canal adyacente. Esto es conocido como *interferencia de canal adyacente intracélula*. Una posible solución a este problema es evitar el uso de canales adyacentes dentro de la misma célula.

2.3.6.5 Interferencia de Canal Adyacente Intercélula

En la situación donde los canales no son empleados en la misma célula, pero sí en las células adyacentes, puede presentarse la interferencia de canal adyacente. Por ejemplo, si consideramos dos móviles cerca de la frontera de la célula, cada uno transmitiendo a su propia estación base a través de canales adyacentes. Cada estación base recibe la señal deseada más un cierto nivel de interferencia de la señal no deseada. La interferencia de canal adyacente puede presentarse debido a dos factores principales:

1. Ambas señales experimentan atenuación y desvanecimiento.
2. Sus desvanecimientos no son correlacionados (las señales viajan a través de diferentes trayectorias) de tal manera que la señal interferente pueda ser más fuerte que la señal deseada.

Este fenómeno es conocido como *interferencia de canal adyacente intercélula*. Una posible solución a este problema es evitar el uso de canales adyacentes. Sin embargo en la práctica, cuando se implementa cualquier patrón de reuso, es casi inevitable la asignación de canales adyacentes a células adyacentes.

2.3.6.6 Interferencia Co-canal

La *interferencia co-canal* es un problema que surge en los sistemas móviles que utilizan arquitectura celular, ya que los canales son usados simultáneamente en tantas células como sea posible, con una separación mínima aceptable, con el fin de incrementar la eficiencia de reuso.

Debido al reuso de frecuencias, las frecuencias reutilizadas en las células vecinas pueden interferir con la célula servidora. La interferencia co-canal depende del plan de reuso implementado. Por ejemplo, el plan de reuso 7/21 tiene una interferencia co-canal mayor que el plan 9/27 y menor al plan 4/12. Como conclusión, para reducir la interferencia co-canal es recomendable incrementar el patrón de reuso, dicho con otras palabras, se debe incrementar la distancia de reuso entre células que trabajen con los mismos grupos de frecuencias. El impacto del incremento en la interferencia co-canal repercute inmediatamente en la degradación de la calidad de voz. La interferencia co-canal es medida en términos de la relación *C/I* (Carrier-to-Interference Ratio). Para sistemas analógicos, como mínimo una *C/I* de 17 dB es considerada apropiada para ofrecer una buena calidad de voz. La tabla (2.2) muestra la tasa de bits erróneos *BER* (bit error rate) para un sistema digital con y sin diversidad para diferentes niveles de *C/I*.

<i>C/I</i> (dB)	<i>BER</i>	
	con diversidad	sin diversidad
> 20	< 0.3%	< 1%
17 - 20	0.3% - 0.8%	1% - 3%
< 17	> 0.8%	> 3%

Tabla(2.2). Relación entre el *BER* y la *C/I*.

2.4 Transmisión de Datos y Señalización

En un sistema de radio móvil, la señalización de datos o control puede ser transmitida sobre canales de voz o canales de señalización o control independientes, dependiendo de la tarea que se quiera realizar. Se tienen como ejemplos de tareas de control las fases de petición de llamada por parte de un móvil, el *handoff* (transferencia de llamada) entre estaciones base, una desconexión de llamada, etc. El intercambio de mensajes entre un móvil y una estación base es llevado sobre canales de radio, y la información entre la estación base y la central de conmutación celular usualmente se realiza por medio de enlaces dedicados terrestres o enlaces de microondas punto a punto.

Existen dos tipos de mensajes de señalización transmitidos sobre canales de radio:

1. Aquellos enviados como una trama continua de bits. Incluyen voceos, reportes de estado actual, mensajes de encabezados y son transmitidos sobre canales de control dedicados.
2. Aquellos enviados en ráfagas. Incluyen liberación y transferencia de llamada haciendo uso de los canales de voz, así como peticiones del móvil a la estación base, utilizando canales de control dedicados.

En sistemas analógicos, se le da principal atención a los problemas asociados con la voz utilizando transmisión analógica, y datos utilizando transmisión digital. En sistemas digitales, la transmisión de datos y voz digitalizada puede usar las mismas técnicas digitales.

Un tema importante en la transmisión digital es la sincronización. Un desplazamiento en frecuencia del reloj puede provocar un incremento de la tasa de bits erróneos, degradando así el desempeño del sistema, para lo cual se usan técnicas para disminuir estos efectos. Por ejemplo, puede ser usada una secuencia de 1s o 0s alternados para lograr la sincronización de bits.

A pesar de la sincronización, pueden persistir errores en bits o palabras debido a muchos otros factores, incluyendo los desvanecimientos.

2.4.1 Mejoramiento del Desempeño de la Transmisión Digital

Pueden ser aplicadas varias técnicas para mejorar el desempeño de una transmisión digital. El desvanecimiento de los canales tiene un efecto importante en la tasa de bits erróneos, degradando el desempeño de cualquier esquema de modulación. Con el fin de eliminar los desvanecimientos y, consecuentemente disminuir la tasa de bits erróneos, pueden usarse las siguientes técnicas:

1. *Diversidad*. Para el caso de una transmisión analógica es usada como criterio de efectividad la relación señal a ruido (*SNR*). Por otra parte, una transmisión digital es evaluada con la disminución de la tasa de bits erróneos.
2. *Detección de errores y códigos de corrección*. La implementación práctica de un sistema de transmisión digital, impone límites en la potencia de transmisión. Esto en relación con los esquemas de modulación, dicta el desempeño del sistema.
3. *Transmisión múltiple*. Es utilizada con el fin de recibir la información degradada en el enlace y que no pudo ser recibida e interpretada correctamente.
4. *Interleaving*. Interleaving es una forma simple y eficiente de usar la codificación para combatir los errores en ráfaga que ocurren en un canal con desvanecimiento. El concepto básico es expandir el código de palabra, ubicando los bits de tal manera que experimenten desvanecimientos independientes. De esta forma, el efecto de las tramas de error es expandido en el mensaje de tal manera que puedan ser recobrados los datos con los bits no afectados. Su implementación es fácil

con el uso de memorias, donde los códigos de palabra son escritos renglón por renglón y columna por columna.

5. *Petición repetida automática.* Estos sistemas requieren únicamente de códigos de detección de errores.
6. *Ecualización adaptiva.* La ecualización es una compensación en fase y amplitud de las distorsiones de la señal que utilizan un canal telefónico. Ya que las características del canal son cambiantes en el tiempo, los ecualizadores tienen características adaptivas, ajustando sus coeficientes en tiempo real siguiendo los cambios en el canal.

Capítulo 3. Sistemas Celulares de Primera y Segunda Generación

3.1 Comunicaciones Personales Inalámbricas

El concepto de radio celular puede ser considerado como la primera forma de *comunicación personal inalámbrica*. Esto le permite al suscriptor realizar y recibir llamadas telefónicas con la *RTPC* en cualquier lugar donde haya cobertura celular; la funcionalidad de viajero *roaming* extiende el servicio a los usuarios viajeros fuera de su área de servicio local, denominada hogar *home*. Los pioneros en diseño del sistema celular durante los años 70s fueron los laboratorios Bell en los Estados Unidos, y el primero desarrollado exitosamente fue llamado *Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS) Advanced Mobile Phone Service*. Todos los sistemas de la denominada *primera generación* de sistemas celulares utilizan modulación en frecuencia analógica (*FM*) para transmisión de voz y *modulación digital por desplazamiento en frecuencia (FSK) Frequency Shift Keying* para señalización. Las llamadas usan diferentes frecuencias de forma individual. Esta forma de compartir el espectro es llamada *acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA) Frequency Division Múltiple Access*.

La característica que distingue a los sistemas celulares de los sistemas de radio móviles antecesores es el uso de muchas estaciones base con un radio de cobertura relativamente pequeño (del orden de 10 km o menos, contra 50 a 100 km de los primeros sistemas móviles). Cada frecuencia es usada simultáneamente por múltiples usuarios y estaciones base. Este *reuso de frecuencias* permite soportar una densidad de suscriptores mucho mayor por MHz de espectro que los sistemas anteriores. La capacidad del sistema además puede ser incrementada reduciendo el tamaño de la *célula* (el área de cobertura de una sola estación base) reduciendo el tamaño por ejemplo a 500 m. En adición a un soporte mucho mayor de densidad de suscriptores que los sistemas anteriores, éstas características hacen posible el uso de teléfonos portátiles pequeños con baja potencia de transmisión de radiofrecuencia, la cual es considerablemente menor a la transmitida por las unidades móviles empleadas en los primeros sistemas. En los sistemas celulares, es posible la cobertura continua por medio del proceso llamado *handoff* (el proceso de transferencia de una llamada de una radiobase a otra) cuando la unidad móvil cruza la *frontera* de las células. Este proceso requiere que el móvil cambie de frecuencia de operación bajo control de la red celular.

3.2 Técnicas de Acceso Múltiple para Comunicaciones Inalámbricas

3.2.1 Técnicas de Duplexación

Los *esquemas de acceso múltiple* son usados para permitirle a muchos usuarios móviles compartir simultáneamente una porción finita del espectro de radio. Lo anterior tiene el fin de lograr una alta capacidad, y debe realizarse sin degradar el desempeño del sistema.

En los sistemas de comunicaciones inalámbricas, en ocasiones es deseable permitirle al suscriptor enviar y recibir información simultáneamente a la estación base. Por ejemplo, en los sistemas telefónicos convencionales es posible hablar y escuchar simultáneamente, y este efecto llamado *duplexación* es requerido en los sistemas telefónicos inalámbricos.

La duplexación se puede realizar usando técnicas en el dominio de la frecuencia o en el tiempo. La *duplexación por división de frecuencia (FDD)* requiere dos distintas bandas o frecuencias para cada usuario. La banda superior lleva el tráfico de la estación base al móvil (enlace de bajada), y la banda inferior porta el tráfico de la estación móvil a la estación base (enlace de subida). En *FDD*, cualquier *canal duplex* consiste actualmente de dos canales simplex, y un dispositivo llamado *duplexor* es empleado en cada unidad móvil y estación base para permitir transmisión y recepción simultánea con el par de canales duplex. La distancia en frecuencia entre los canales de bajada y subida es constante.

La *duplexación por división de tiempo (TDD)* usa al tiempo en vez de la frecuencia para ofrecer los enlaces de bajada y subida. Si la separación en tiempo entre los time slots (ranuras de tiempo) de bajada y subida es pequeña, entonces la transmisión y recepción de datos aparece simultánea al usuario. *TDD* permite la comunicación sobre un solo canal, y simplifica el equipo móvil ya que no se requiere el uso de duplexores.

3.2.2 Introducción al Acceso Múltiple

Acceso múltiple por división en frecuencia, frequency division multiple access (FDMA), *acceso múltiple por división en el tiempo, time division multiple access (TDMA)* y *acceso múltiple por división de código, code division multiple access (CDMA)* son las tres técnicas de acceso mayormente usadas en los sistemas de comunicación inalámbrica. Estas técnicas, pueden ser agrupadas como sistemas de banda angosta o banda ancha, dependiendo de cuánto ancho de banda sea puesto a disposición del usuario.

- ⇒ **Sistemas de Banda Angosta** – El término *banda angosta* es usado para relacionar el ancho de banda de un canal sencillo al ancho de banda de coherencia del canal. En un sistema de acceso múltiple de banda angosta, el espectro de radio disponible es dividido en un gran número de canales de banda angosta. Los canales son operados usualmente usando *FDD*. Para minimizar la interferencia entre los canales de subida y bajada, la separación en frecuencia de estos canales es tan grande como sea posible. En *FDMA* de banda angosta, un usuario es asignado a un canal particular el cual no es compartido a otros usuarios cercanos, y si usa *FDD*, entonces el sistema es llamado *FDMA/FDD*. En *TDMA* de banda angosta, se les permite a un número reducido de usuarios compartir el mismo canal, pero estos son asignados a una ranura de tiempo única, separando así a los usuarios en el tiempo en un sólo canal. Para *TDMA* de banda angosta, existen sistemas de acceso *TDMA/FDD* y *TDMA/TDD*.
- ⇒ **Sistemas de Banda Ancha** – En los sistemas de banda ancha, el ancho de banda de transmisión de un canal sencillo es mucho mayor que el ancho de banda de coherencia del canal. De esta manera, los desvanecimientos multirayectoria no afectan severamente la señal recibida dentro de un canal de banda ancha, y sólo ocurren pequeños desvanecimientos de frecuencia selectiva en una pequeña fracción del ancho de banda. En los sistemas de acceso múltiple de banda ancha, los usuarios pueden transmitir en una gran parte del espectro, y a un gran número se les permite transmitir con el mismo canal. *TDMA* proporciona ranuras de tiempo a varios usuarios en el mismo canal y le permite a sólo un transmisor acceder al canal en un instante del tiempo, mientras que *CDMA* con espectro esparcido le permite a todos los transmisores acceder al canal en el mismo tiempo. Sistemas con *TDMA* y *CDMA* pueden usar técnicas de multiplexación *FDD* o *TDD*.

3.2.3 Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA)

Acceso Múltiple por División de Frecuencia, (FDMA) **Frequency Division Multiple Access** asigna canales individuales a usuarios individuales. En la figura (3.1), se puede observar que a cada usuario le es otorgada una única frecuencia, banda o canal. Estos canales son otorgados de acuerdo a la demanda de los usuarios que requieran el servicio. Durante el periodo de la llamada, ningún otro usuario puede usar la misma frecuencia. En los sistemas *FDD*, los usuarios tienen asignados un canal con un par de frecuencias, una frecuencia es usada en el canal de subida, y otra en el canal de bajada.

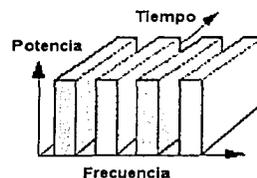


Figura (3.1). FDMA.

Las principales características de *FDMA* son las siguientes:

- ⇒ Los canales de *FDMA* llevan sólo una llamada telefónica a la vez.
- ⇒ Si un canal *FDMA* ya otorgado no está en uso, no puede ser utilizado por otros usuarios para incrementar la capacidad hasta que sea totalmente liberado.
- ⇒ Después de la asignación de un canal de voz, la estación base y el móvil transmiten continua y simultáneamente.
- ⇒ Los anchos de banda de canales *FDMA* son relativamente angostos (30 kHz), de tal manera que cada canal soporta sólo una llamada por portadora.
- ⇒ La interferencia intersímbolo es baja, por lo que no se requiere ecualización en los sistemas *FDMA* de banda angosta.
- ⇒ La complejidad de los sistemas móviles *FDMA* es menor comparada con los sistemas *TDMA*.
- ⇒ Ya que *FDMA* es un esquema de transmisión continuo, son necesarios pocos bits para propósitos de encabezado (tales como sincronización y tramas de bits) comparado a *TDMA*.
- ⇒ Los sistemas *FDMA* tienen mayores costos en las estaciones base comparado a los sistemas *TDMA*, debido al diseño de un canal por portadora, y a la necesidad de usar costosos filtros paso banda para eliminar radiaciones no deseadas en las estaciones base.
- ⇒ Las unidades móviles *FDMA* usan duplexores, ya que el transmisor y el receptor operan al mismo tiempo. Esto repercute en un incremento en el costo de los equipos, tanto móviles como de las estaciones base.
- ⇒ *FDMA* requiere costosos filtros para minimizar la interferencia de canal adyacente.

3.2.3.1 Efectos de la no-linealidad en *FDMA*

En un sistema *FDMA*, muchos canales comparten la misma antena y la misma estación base. Los amplificadores o los combinadores de potencia, cuando operan cerca o a su máxima potencia tienen una respuesta no lineal. Las no linealidades causan esparcimientos de la señal en el dominio de la frecuencia y generan *frecuencias de intermodulación*. Las frecuencias de intermodulación son radiación de radiofrecuencia no deseada que puede interferir con otros canales en los sistemas *FDMA*. El esparcimiento del espectro resulta en interferencia de canal adyacente. La intermodulación es la generación de armónicas indeseables. Las armónicas generadas fuera de la banda de radio móvil causan interferencias a los servicios adyacentes, y cuando se presentan dentro de la banda causan interferencia a otros usuarios en el sistema móvil.

3.2.4 Acceso Múltiple por División de Tiempo (*TDMA*)

Los sistemas *Time Division Multiple Access (TDMA)*, dividen el espectro de radio en *ranuras de tiempo* llamadas *time slots*, y en cada ranura de tiempo sólo se le permite transmitir o recibir a un usuario. Se puede observar en la figura (3.2) que cada usuario ocupa una ranura de tiempo de manera cíclica, de tal manera que un canal pueda ser estimado como una ranura de tiempo particular que reaparece en cada trama llamada *frame*, donde N ranuras de tiempo componen una trama.

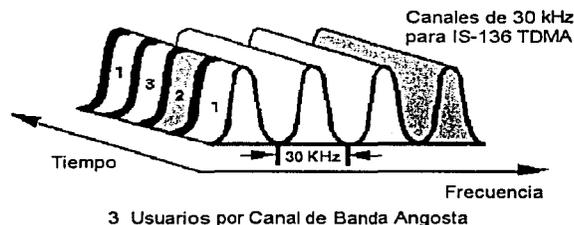


Figura (3.2). Esquema *TDMA*, donde cada canal ocupa una ranura de tiempo con repetición cíclica.

Los sistemas *TDMA* transmiten la información con un método llamado *barrera-y-estallido*, *buffer-and-burbs*, de tal modo que la transmisión de cualquier usuario es no continua. Esto implica que a diferencia de los sistemas *FDMA*, los cuales emplean modulación analógica *FM*, en *TDMA* se deben usar datos y modulación digitales. La transmisión de varios usuarios es llevada en una estructura de trama repetitiva, como se muestra en la figura (3.3).

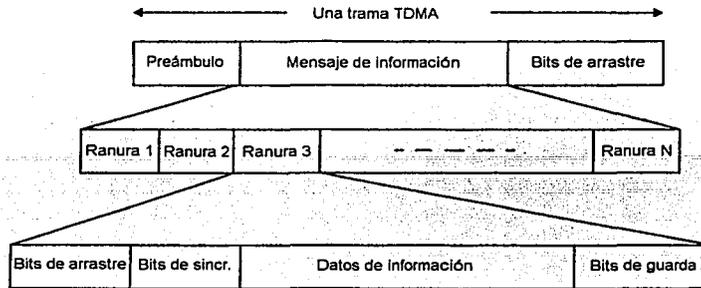


Figura (3.3). Estructura de la trama TDMA.

Se puede considerar que una trama consiste de un número de ranuras, llamadas *slots*. Cada trama está compuesta de un preámbulo, el mensaje de información y bits de arrastre. En un sistema *TDMA/TDD*, la mitad de las ranuras de tiempo en la trama del mensaje de información pueden ser usadas para los canales de bajada, y la otra mitad usada para canales de subida. En los sistemas *TDMA/FDD*, puede ser usada una estructura única de trama idéntica o similar para la transmisión de ambos enlaces, pero las frecuencias portadoras deben ser diferentes para los enlaces de bajada y subida. En general, los sistemas *TDMA/FDD* introducen intencionalmente varias ranuras de tiempo de retraso entre las ranuras de tiempo de bajada y subida para un usuario particular, evitando con esto el uso de duplexores en el equipo terminal móvil.

En la trama *TDMA*, el preámbulo contiene la información de dirección y sincronización que las estaciones base y móvil usan para identificarse entre sí. Los tiempos de guarda son utilizados para permitir la sincronización de los receptores entre diferentes ranuras y tramas. Las características de *TDMA* incluyen los siguientes puntos:

- ⇒ *TDMA* comparte una frecuencia portadora con varios usuarios, donde cada usuario hace uso de ranuras de tiempo, llamadas *time slots*, sin traslaparse. El número de ranuras de tiempo por trama depende de varios factores, tales como la técnica de modulación, el ancho de banda disponible, etc.
- ⇒ La transmisión de datos para los usuarios de un sistema *TDMA* no es continua, se realiza en ráfagas. Esto repercute en un bajo consumo de batería, ya que el transmisor del móvil puede ser apagado cuando no se usa (lo que representa la mayoría del tiempo).
- ⇒ Debido a las transmisiones discontinuas en *TDMA*, el proceso de transferencia de llamada *handoff* es mucho más simple para la unidad móvil, ya que es capaz de escuchar a otras estaciones durante las ranuras de tiempo inactivas. Un enlace de control mejorado, tal como el que es ofrecido por la transferencia de llamada asistida por el móvil, *mobile assisted handoff (MAHO)*, puede realizarse por una unidad móvil escuchando sobre una ranura inactiva en la trama *TDMA*.
- ⇒ *TDMA* utiliza diferentes ranuras de tiempo para transmisión y recepción, de tal manera que no se requieran duplexores. Aún si es usado *FDD*, sólo es requerido un conmutador en vez de un duplexor en el equipo móvil para conmutar entre transmisor y receptor usando *TDMA*.

- ⇒ En los sistemas *TDMA* es usualmente necesaria la ecualización adaptativa, ya que las tasas de transmisión de datos son generalmente muy altas comparadas a los canales *FDMA*.
- ⇒ En *TDMA*, el tiempo de guarda debe ser minimizado. Si la señal transmitida en los bordes de una ranura de tiempo es suprimida bruscamente con el fin de acortar el tiempo de guarda, el espectro transmitido se expandirá y causará interferencia a los canales adyacentes.
- ⇒ En los sistemas *TDMA* son requeridos encabezados de alta sincronización, debido a las transmisiones en ráfagas. Las transmisiones en *TDMA* son ranuradas, y esto requiere que los receptores estén sincronizados para cada ráfaga de datos. Adicionalmente, las ranuras de tiempo son necesarias para separar a los usuarios, y de aquí que los sistemas *TDMA* tengan más datos de encabezados que los sistemas *FDMA*.
- ⇒ *TDMA* tiene la ventaja de que permite asignar diferentes números de ranuras de tiempo por trama a diferentes usuarios. Así, el ancho de banda puede ser otorgado sobre demanda a diferentes usuarios concatenando o reasignando ranuras de tiempo basados en prioridad.

3.2.5 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA)

En los sistemas *Code Division Multiple Access (CDMA)*, la señal del mensaje de banda angosta es multiplicada por una señal con un gran ancho de banda, llamada la *señal esparcida*. La señal esparcida es una secuencia de códigos llamados *pseudo-ruido*, *pseudo-noise (PN)*, que tienen una tasa de velocidad llamada *chip*, la cual tiene una magnitud mucho mayor a la velocidad de los datos del mensaje. Todos los mensajes en un sistema *CDMA*, como se puede observar en la figura (3.4), usan la misma frecuencia portadora y pueden transmitir simultáneamente.

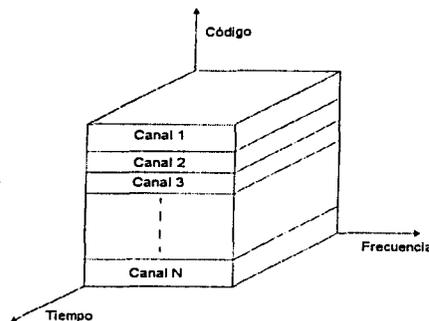


Figura (3.4). Esquema *CDMA*, en el cual a cada usuario le es asignado un código único *PN*, el cual es ortogonal a los códigos *PN* usados por otros usuarios.

Cada usuario tiene su propio código de palabra pseudo-aleatorio el cual es aproximadamente ortogonal a todos los otros códigos de palabra. El receptor desarrolla una operación de correlación en el tiempo para detectar únicamente el código de palabra deseado en específico. Todos los demás códigos de palabras aparecen como ruido. Para la detección de la señal del mensaje, el receptor necesita saber el código de palabra usado por el transmisor. Cada usuario opera independientemente sin conocimiento de los demás usuarios.

En *CDMA*, la potencia de los múltiples usuarios en el receptor determina el piso de ruido después de la decorrelación. Si la potencia de cada usuario dentro de una célula no está controlada de tal manera que no sea igual en el receptor de la estación base, entonces ocurren los problemas llamados *cercano-lejano*, *near-far*.

El problema *near-far* ocurre cuando muchos usuarios móviles comparten el mismo canal. En *CDMA*, los más fuertes niveles de señal elevan el piso de ruido en los demoduladores de la estación base para las señales más débiles, de aquí disminuyendo la probabilidad de que sean recibidas las señales más débiles. Para combatir el problema *cercano-lejano*, en la mayoría de las implementaciones con *CDMA* es usado el *control de potencia*. El control de potencia es ofrecido por cada estación base del sistema celular y asegura que cada móvil dentro del área de cobertura de la estación base ofrezca el mismo nivel de señal al receptor de la estación base. Este control resuelve el problema de tener usuarios cercanos transmitiendo muy fuerte y saturando al receptor de la estación base, causando problemas a las señales débiles de suscriptores lejanos. El control de potencia es implementado en la estación base muestreando rápidamente el nivel de *RSSI* de cada móvil y enviándole un cambio de potencia sobre el enlace de radio de bajada. A pesar del uso del control de potencia dentro de cada célula, los móviles fuera de la célula introducen interferencia que no puede ser controlada por la estación base receptora.

Las principales características de *CDMA* incluyen los siguientes puntos:

- ⇒ Muchos usuarios de un sistema *CDMA* comparten la misma frecuencia. Puede ser usada indistintamente la multiplexación *TDD* o la *FDD*.
- ⇒ A diferencia de *TDMA* o *FDMA*, no tiene un límite de capacidad fijo. El incrementar el número de usuarios en un sistema *CDMA* eleva el piso de ruido linealmente. Así, no existe un límite absoluto en el número de usuarios en *CDMA*. Mejor dicho, el desempeño del sistema se degradará gradualmente para todos los usuarios conforme el número de éstos se incremente, y mejorará conforme este número se decremente.
- ⇒ Los desvanecimientos multitrayectoria pueden ser reducidos sustancialmente debido a que la señal es esparcida sobre un gran espectro. Si el ancho de banda del espectro esparcido es mayor que el ancho de banda de coherencia del canal, la diversidad en frecuencia mitigará los efectos de los desvanecimientos de pequeña escala.
- ⇒ En los sistemas *CDMA* las velocidades de los canales de datos son muy altas. Consecuentemente, la duración del símbolo (*chip*) es muy corta y usualmente mucho menor que el retardo esparcido del canal. Debido a que las secuencias *PN* tienen una baja autocorrelación, las multitrayectorias que son retrasadas por más de un chip aparecerán como ruido. Un receptor *RAKE* puede ser usado para mejorar la recepción colectando versiones de tiempo retardado de la señal requerida.
- ⇒ Debido a que *CDMA* usa células co-canales, puede usar la diversidad espacial macroscópica para ofrecer el llamado *soft handoff* (*transferencia de llamada suave*). La transferencia de llamada suave es llevada a cabo por la central de conmutación, la cual puede monitorear simultáneamente a un usuario en particular desde dos o más estaciones base. La central puede escoger la mejor versión de la señal en cualquier momento sin conmutar las frecuencias.
- ⇒ La auto-interferencia es un problema común en un sistema *CDMA*. La auto-interferencia surge del hecho de que las secuencias esparcidas de diferentes usuarios no son exactamente ortogonales, y debido a esto en el desesparcimiento de un código *PN* en particular, las contribuciones diferentes de cero a las estadísticas de decisión de recepción para un usuario deseado crecen debido a las transmisiones de los demás usuarios del sistema.
- ⇒ El problema *cercano-lejano* ocurre en un receptor *CDMA* si se detecta un usuario no deseado con una potencia mayor comparada a la del usuario deseado.

3.3 Sistemas Celulares Analógicos

En los Estados Unidos, un total de 50 MHz en las bandas de 824-849 MHz y de 869-894 MHz fueron asignados para el servicio de radio móvil celular. En una región geográfica determinada, se otorga licencia a dos proveedores de servicio llamados *carriers*, cada uno con 25 MHz. Las denominadas *banda A* y *banda B* son asignadas respectivamente a un proveedor sin red alámbrica propia *RTPC* y a un proveedor con una red alámbrica propia. Bajo el estándar *AMPS*, este espectro es dividido en 832 canales, con 30 kHz de amplitud. Es empleada modulación en frecuencia (con desviación de 8 kHz) para la voz, y la señalización en los canales usa modulación digital *FSK* con una tasa de 10 kbps. Para combatir la interferencia co-canal, cuyo objetivo para la *razón portadora-interferencia C/I (Carrier-to-Interference ratio)*, promediada sobre el desvanecimiento multitrayectoria es de 17 dB para al menos el 90 % del área de cobertura, existe un plan de reuso de frecuencias que emplea un conjunto de 7 grupos de frecuencias denominado *cluster*, con tres sectores por célula. El servicio celular *AMPS* ha estado disponible al público desde 1983, y actualmente tiene más de 20 millones de suscriptores sólo en los Estados Unidos. Hoy en día, los sistemas *AMPS* también son usados en Canadá, México, Centro y Sudamérica, Australia y China.

3.3.1 Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS)

A finales de los 70s, los laboratorios Bell desarrollaron el primer sistema celular norteamericano llamado *Advanced Mobile Phone System (AMPS)*, el cual fue probado por primera vez en 1983, dentro de las áreas urbanas y suburbanas de Chicago, por la compañía Ameritech, con un total de 40 MHz de espectro en la banda de los 800 MHz. Debido a la gran demanda del servicio, en 1989, la FCC otorgó una expansión de 10 MHz (llamado banda extendida) para telefonía celular.

El sistema celular *AMPS* está basado en *FDMA/FDD*. Un solo usuario ocupa un canal mientras la llamada está en progreso, y este canal está compuesto de dos canales simplex los cuales están duplexados en frecuencia con una separación de 45 MHz. Cuando una llamada es completada, o cuando ocurre una transferencia de llamada, el canal queda vacante para que otro suscriptor móvil pueda utilizarlo. En *AMPS*, es empleada modulación en frecuencia de banda angosta (*NBFM*) para modular la portadora de voz.

El sistema *AMPS* usa un patrón de reuso de 7 células, con la posibilidad de aplicar sectorizaciones y particiones con el fin de incrementar la capacidad cuando sea necesario. Después de muchas pruebas, se encontró que los canales *AMPS* de 30 kHz requieren una razón señal a ruido *SIR (signal-to-interference ratio)* de 18 dB para un desempeño satisfactorio del sistema. El menor factor de reuso que satisfaga este requerimiento utilizando antenas direccionales de 120° es $N=7$.

Los sistemas *AMPS* en Norteamérica están diseñados para un mercado con dos prestadores de servicio por área, asignándole 416 canales a cada uno, sin embargo, es posible implementar el sistema con un proveedor único administrando todos los canales disponibles. Aunque las asignaciones de las frecuencias pueden variar de país en país, el estándar de la interfaz de aire permanece intacto en cualquier parte del mundo.

Como cualquier sistema celular de primera generación, *AMPS* utiliza modulación en frecuencia para la transmisión de radio. En el estándar *AMPS* la transmisión de los móviles a las estaciones base utiliza frecuencias entre 824 MHz y 849 MHz, mientras que las estaciones base transmiten a los móviles utilizando frecuencias entre los 869 y 894 MHz. Cada canal de radio consiste de un par de canales simplex separados 45 MHz. Se fijó una separación de 45 MHz entre los canales de bajada y subida para hacer uso de los económicos y altamente selectivos duplexores de las unidades móviles. La máxima desviación del modulador de FM es ± 12 kHz. Las transmisiones del canal de control y las tramas de datos tienen una velocidad de 10 kbps. Este ancho de banda de la trama de datos tiene una desviación máxima en frecuencia de ± 8 kHz.

Los sistemas AMPS generalmente tienen torres altas que soportan varias antenas receptoras, y también contienen a las antenas transmisoras, cuya potencia efectivamente radiada es variable, dependiendo del medio ambiente donde esté ubicada la estación base. Cada sector de la estación base tiene un canal de control transmisor (que transmite en el enlace de bajada), un canal de control receptor (que escucha en el canal de subida a cualquier móvil dentro de su área de cobertura), y una cantidad no fija pero sí limitada de canales de voz duplex.

Algunas estaciones base comerciales soportan hasta 57 canales de voz. Los *canales de voz de bajada (FVC), forward voice channels* llevan la porción de la conversación telefónica originada en la RTPC. Los *canales de voz de subida (RVC), reverse voice channels* llevan la porción de la conversación originada en el equipo celular móvil. El número de canales de voz empleado en una estación base particular varía dependiendo del tráfico, la madurez del sistema, y la ubicación de las estaciones base vecinas. También el número de estaciones base en un área de servicio varía ampliamente, desde una sola para un área rural, hasta varios cientos de ellas en ciudades densamente urbanas, como la ciudad de México.

Cada estación base transmite datos continuamente con modulación *FSK* en el *canal de control de bajada (FCC), forward control channel*, con el fin de que las unidades móviles tomen el *FCC* más fuerte, en otras palabras, su mejor servidor, el cual pertenece a la estación base más cercana. Todos los móviles deben estar amarrados al *FCC* con el fin de originar o recibir llamadas. Por otra parte, el *canal de control de subida (RCC), reverse control channel* recibe constantemente el monitoreo de las estaciones móviles que tienen tomado el *FCC*. Existen 21 canales de control para cada banda (banda A y banda B), los cuales están estandarizados que sean los siguientes:

- ‡ Banda A: 313-333
- ‡ Banda B: 334-354

En cada mercado celular de Norteamérica, al proveedor de servicio independiente de la RTPC (operador de la banda A) se le asigna un *número de identificación del sistema* impar, *system identification number (SID)*, y al proveedor de servicio relacionado directamente con la RTPC (operador de la banda B) se le asigna un *SID* par. El *SID* es transmitido una vez cada 0.8 segundos en cada *FCC*, junto con otros datos de encabezado con los reportes del estatus del sistema. Los datos transmitidos deben incluir datos tales como la identificación de usuarios visitantes (roamers) que son registrados automáticamente, el control de potencia, etc. Los equipos móviles deben acceder exclusivamente a los canales de la banda A o de la banda B, dependiendo con cuál proveedor estén registrados, aunque los teléfonos tienen la capacidad de acceder a canales de ambas bandas.

Cuando se genera una llamada en la RTPC hacia un usuario celular y llega al *MTX*, también llamado centro de conmutación móvil, *mobile switching center (MSC)*, un mensaje de voceo (*paging*) es mandado junto con el *número de identificación del suscriptor móvil, mobile identification number (MIN)*, simultáneamente a cada *FCC* del sistema. Si el usuario móvil buscado recibe el voceo por medio del canal de control, el equipo responderá por medio de una transmisión de reconocimiento por medio del *RCC*. Hasta recibir el reconocimiento del suscriptor, el *MSC* le manda a la estación base asignarle un *canal de voz de bajada (FVC), forward voice channel* y un *canal de voz de subida (RVC), reverse voice channel* al móvil para que se lleve a cabo la nueva llamada sobre un canal de voz dedicado. La estación base también le asigna al móvil un *tono de supervisión de audio (SAT), supervisory audio tone*, y un *código de atenuación de voz móvil (VMAC), voice mobile attenuation code*. El teléfono móvil se sintonizará de manera transparente para el usuario a la frecuencia del canal de voz asignado.

El SAT tiene una de tres diferentes frecuencias, las cuales le permiten saber a las estaciones base y móvil identificarse entre sí y distinguirse de los usuarios co-canales ubicados en diferentes células. El SAT es transmitido continuamente en ambos enlaces de los canales de voz durante el todo el transcurso de la llamada. El VMAC le ordena al móvil a transmitir con una potencia específica. Una vez en el canal de voz, es empleada información de banda ancha modulada con FSK para realizar las transferencias de llamada *handoff*, cambiar la potencia de la transmisión del móvil en caso de ser necesario, y proveer de información adicional al sistema. La información de señalización permite al MSC enviar datos temporalmente sobre el canal de voz en los instantes que no se envíe voz y el SAT. Este proceso es transparente para los usuarios.

Cuando un usuario móvil realiza una llamada, su equipo transmite un mensaje sobre el RCC. El móvil transmite su *número de identificación móvil (MIN)*, *mobile identification number*, su *número de serie electrónico (ESN)*, *electronic serial number*, su *clase de estación móvil (SCM)*, *station class mark*, y el número telefónico con el cual desea comunicarse. Si la estación base recibe correctamente esta información, la manda al MSC, la cual verifica si el usuario está registrado en el sistema, y lo conecta a la RTPC, asignándole un canal de voz de bajada y subida con sus respectivos SAT y VMAC, con lo cual comienza la conversación.

Las decisiones de transferencia de llamada *handoff* son realizadas por el MSC cuando el nivel de intensidad de señal RSSI en el canal de voz de subida RVC de la estación base servidora cae por debajo de un umbral fijado, o cuando el tono de SAT experimenta un cierto nivel de interferencia. Los niveles de umbral son ajustados en el MSC, y son sujetos a constantes ajustes debido a la optimización por la integración de nuevos sitios. El MSC emplea dispositivos de escaneo en las estaciones base para determinar el nivel de intensidad de señal de un suscriptor en particular que tenga la necesidad de realizar una transferencia de llamada *handoff*, siendo capaz de encontrar el mejor servidor vecino que pueda aceptar al móvil y realizarlo.

Cuando llega una petición de llamada de la RTPC a un usuario móvil, y todos los canales de voz en una estación base particular están ocupados, el MSC retendrá la petición de la RTPC mientras le libera al móvil un *reintento dirigido (directed retry)* sobre el FCC. Un reintento dirigido obliga al suscriptor móvil a conmutar a un canal de control diferente (estación base diferente a su mejor servidor) para que se efectúe la asignación de un canal de voz. Dependiendo de los efectos de propagación, la ubicación específica del móvil, y el tráfico cursado por la estación base a la cual es dirigido, un reintento dirigido puede o no resultar en una llamada exitosa.

Varias causas son las que contribuyen a la degradación del servicio celular, las llamadas caídas y la congestión. Factores tales como el desempeño del MSC, la demanda del tráfico, el plan de reuso empleado, el número de estaciones base por densidad de suscriptor, las condiciones específicas de propagación, y la configuración de los umbrales de transferencia de llamada, juegan un papel importante en el desempeño total del sistema. El mantener una perfecta calidad de servicio en un sistema celular con un número considerable de usuarios es prácticamente imposible, debido a la gran complejidad del sistema y a la falta de control de la determinación de la cobertura de radio y del comportamiento de los usuarios. Los diseñadores se esfuerzan en pronosticar el crecimiento del sistema y proveer la mejor cobertura y capacidad de tráfico, tratando de evitar las interferencias co-canal, pero es inevitable eliminar por completo las llamadas caídas y la congestión.

⇒ Canales AMPS – AMPS usa diferentes canales físicos para transmisión de voz e información de control. Un *canal de control* llamado también *paging channel*, es empleado en cada estación base del sistema para simultáneamente vocear a las unidades móviles y alertarles de llamadas entrantes y asignarles un canal de voz. El canal de control de bajada FCC transmite información constantemente a 10 kbps usando modulación FSK. Las transmisiones del FCC contienen mensajes de encabezado y mensajes de control del móvil. Los canales de voz de bajada y subida FVC y RVC son usados para transmisión de voz en los enlaces de bajada y subida, respectivamente. Algunas de las especificaciones de la interfaz de aire más importantes se muestran en la tabla (3.1).

Parámetro	Especificación
Acceso Múltiple	FDMA
Duplexación	FDD
Ancho de Banda del Canal	30 kHz
Canales de Tráfico por Canal de RF	1
Frecuencias del Canal de Subida	824 – 849 MHz
Frecuencias del Canal de Bajada	869 – 894 MHz
Modulación de Voz	FM
Desviación: Canales de Voz	± 12 kHz
Control/Ancho de Banda de Datos	± 8 kHz
Codificación de Canal para Transmisión de Datos	BCH (40,28) en canal de bajada BCH (48,36) en canal de subida
Velocidad de datos en Canal de Control/Ancho de Banda	10 kbps
Eficiencia espectral	0.33 bps/Hz
Número de canales	832

Tabla (3.1). Especificaciones de la interfaz de aire de AMPS.

Mientras los canales de voz están en uso, son empleadas técnicas de señalización adicionales para mantener la supervisión entre las estaciones base y móviles. Las señales de supervisión son el *tono de supervisión de audio (SAT)*, *supervisory audio tone*, y el *tono de señalización (ST)*, *signaling tone*, los cuales se describirán a continuación. Adicionalmente, el *ancho de banda de datos de señalización* puede ser usado en un canal de voz para ofrecer información, con el fin de mandarle a las estaciones base y móviles ajustar su potencia o iniciar una transferencia de llamada. El ancho de banda de datos trabaja con una técnica llamada *en blanco-y-estallido (blank-and-burst)*, donde el canal de voz de audio es silenciado y reemplazado con una breve cantidad de datos estallido (*burst*) de señalización de banda ancha enviados a 10 kbps utilizando modulación FSK. La duración de los eventos *en blanco-y-estallido* es de aproximadamente 100 ms, por lo que son imperceptibles para los usuarios.

El sistema AMPS provee señales de supervisión durante las transmisiones del canal de voz, las cuales le permiten a cada estación base y a los suscriptores confirmar que están conectados apropiadamente durante una llamada. El SAT siempre está presente durante la ocupación de un canal de voz.

El sistema AMPS usa tres señales de SAT, las cuales son tonos con las siguientes frecuencias:

- ↔ SAT 0: 5970 Hz.
- ↔ SAT 1: 6000 Hz.
- ↔ SAT 2: 6030 Hz.

Una estación base dada transmitirá constantemente uno de los tres tonos de SAT sobre el canal de voz mientras esté en uso. El SAT acompaña a la señal de voz en ambos enlaces, bajada y subida, y es imperceptible para el usuario. El SAT también sirve para distinguir la ubicación particular de una estación base para un canal dado, evitando con esto que el móvil y la MSC no sepan distinguir cual es la estación base servidora que está atendiendo la llamada.

Cuando una llamada es establecida y se le asigna un canal de voz, el canal de voz de bajada FVC de la estación base servidora inmediatamente comienza la transmisión del SAT. Cuando la estación móvil comienza a monitorear el FVC, ésta debe detectar, filtrar, y demodular el SAT proveniente de la estación base y entonces reproducir el mismo tono para realizar una transmisión de respuesta sobre el RVC. Si no está presente el SAT o se detecta incorrectamente dentro de un segundo intervalo, las estaciones base y móvil detendrán la transmisión, y el MSC liberará el canal de voz para otorgar nuevas llamadas. La transmisión del SAT es brevemente suspendida por la estación móvil durante la transmisión de datos *en blanco-y-estallido* en el enlace de subida. La detección y retransmisión del SAT debe realizarse al menos cada 250 ms en la unidad móvil. Las llamadas caídas en ocasiones pueden deberse a interferencias o a una detección incorrecta del SAT en las estaciones base y móvil.

El *tono de señalización (ST)* es una trama de datos de 10 kbps que acompaña a las señales de terminación de llamada del usuario. Es un mensaje especial de terminación de llamada que consiste de alternar unos y ceros digitales enviados en el RVC por la unidad móvil cada 200 ms. A diferencia de los mensajes *en blanco-y-estallido* que suspenden brevemente la transmisión del SAT, el tono ST debe ser enviado simultáneamente con el SAT. La señal ST alerta a la estación base que el suscriptor ha terminado la llamada. Cuando un usuario termina una llamada o apaga el equipo, se envía automáticamente un tono ST por la unidad móvil. Esto les permite saber a la estación base y al MSC saber que la llamada fue terminada deliberadamente por el usuario, sin ser una llamada caída por problemas en el sistema o en el enlace de radiofrecuencia.

Los canales de voz de AMPS llevan tramas de datos de banda ancha de 10 kbps para la señalización *en blanco-y-estallido*. La trama de datos de banda ancha es decodificada de tal manera que cada uno binario NRZ (no retorno a cero) es representado por una transición de cero a uno, y cada cero binario NRZ es representado por una transición uno a cero. Este tipo de codificación es llamado *Manchester* (o codificación bifase). La ventaja del empleo de la codificación Manchester en un canal de voz es que la energía de la señal codificada está concentrada a la frecuencia de la tasa de transmisión de 10 kHz, y se pierde poca energía en el ancho de banda de audio por debajo de los 4 kHz. Debido a lo anterior, una trama de datos transmitida sobre un canal de voz puede ser detectada fácilmente dentro de un canal de RF de 30 kHz, siendo imperceptible para el usuario, y puede ser transmitida sobre líneas telefónicas que tienen circuitos de bloqueo de corriente directa, *direct current (dc)*. El código Manchester es aplicado al canal de control y a las transmisiones *en blanco-y-estallido* del canal de voz.

La trama de datos Manchester de banda ancha codificada es filtrada y se le aplica la codificación de canal usando códigos de bloques BCH. Las tramas de datos de banda ancha son enviadas sobre los canales de voz en bloques cortos de ráfagas con la misma longitud y códigos de corrección de errores. En las transmisiones *en blanco-y-estallido* sobre el FVC son usados códigos BCH (40,28), y son capaces de corregir 5 errores, mientras que en el RVC son empleados códigos BCH (48,36). Los datos codificados son usados para modular la portadora transmisora usando modulación digital FSK. Los unos binarios corresponden a una desviación en frecuencia de +8 kHz, y los ceros binarios corresponden a una desviación de -8 kHz.

3.4 Sistemas Celulares Digitales

El desarrollo de las técnicas de codificación de baja velocidad para voz digital y el continuo incremento en la densidad de los dispositivos de los circuitos integrados (por ejemplo transistores por unidad de área) han hecho posible la completa digitalización de los sistemas de segunda generación. La digitalización permite el uso de *acceso múltiple por división de tiempo TDMA (time division multiple access)* y *acceso múltiple por división de código CDMA (code division multiple access)* como alternativas para el *acceso múltiple por división de frecuencia FDMA*. Con TDMA, el uso de cada canal de radio está particionado en múltiples ranuras de tiempo, y cada usuario está asignado a una combinación específica de frecuencia/ranura de tiempo. Así, únicamente un usuario móvil en una célula dada está utilizando una frecuencia dada en un tiempo en particular. Con CDMA (el cual emplea esparcimiento de secuencia directa), un canal de frecuencia es empleado simultáneamente por múltiples móviles en una célula dada, y las señales son distinguidas esparciéndolas con códigos diferentes. Una ventaja obvia de TDMA y CDMA sobre FDMA es el uso compartido entre múltiples usuarios del hardware de radio en las estaciones base.

Los sistemas digitales pueden soportar un mayor número de usuarios por estación base por MHz de espectro, permitiéndole a los operadores de sistemas inalámbricos ofrecer servicio en áreas de alta densidad más económicamente. El empleo de arquitecturas digitales TDMA o CDMA ofrece las siguientes ventajas adicionales:

- ⇒ Una integración más natural con la RTPC digital.
- ⇒ Flexibilidad para una comunicación de mixta de voz/datos y el soporte de nuevos servicios.
- ⇒ Un potencial para un mayor incremento de capacidad y reducir la tasa de los codificadores de voz.
- ⇒ Una reducción en la potencia de transmisión de radiofrecuencia (incrementando la vida de la batería de los equipos portátiles).
- ⇒ Encriptación para mayor privacidad de la comunicación.
- ⇒ Reduce la complejidad del sistema (transferencia de llamada asistida por el móvil).

Independientemente del protocolo digital con el que un operador celular decida prestar su servicio, los sistemas celulares digitales tienen las siguientes características mostradas en la tabla (3.2).

Características	Celular Digital
Tamaño de célula	Amplio rango (0.1 –30 km)
Elevación de las antenas	Alta (mayor a 15 m)
Velocidad de movilidad	Amplio rango (hasta 250 km/hr)
Cobertura	Areas abiertas e interiores
Complejidad del teléfono	Moderada
Acceso del espectro	Exclusivo
Potencia de transmisión del teléfono	100 - 600 mW
Duplexación	FDD
Codificación de voz	Variable, diferente para cada estándar
Control de errores	FEC / interleaving
Detección	Diferencial coherente
Eliminación de multirayectorias	Diversidad / rake / ecualización

Tabla(3.2). Características Generales de la Tecnología Celular Digital.

3.4.1 Estándar IS-54 / IS-136

Los sistemas celulares que utilizan técnicas de modulación digital (llamados celulares digitales) ofrecen grandes mejoras en capacidad y desempeño. Después de una intensa investigación y pruebas por parte de las más importantes compañías a finales de los 80s fue desarrollado el *Sistema Digital Norteamericano (USDC) United States Digital Cellular*, con el fin de prestar servicio a un mayor número de usuarios con la misma cantidad de espectro de frecuencias. Este sistema trabaja con el esquema de acceso múltiple TDMA, el cual soporta tres usuarios (*full-rate*) en cada canal AMPS. Este estándar usa el mismo esquema FDD de 45 MHz que AMPS. El sistema *dual-mode* (analógico-digital) fue estandarizado como *IS-54 (Interim Standard)* en 1990 por las *Asociaciones de Industrias de Electrónica y Telecomunicaciones (EIA/TIA), Electronic Industries Association and Telecommunication Industry Association*.

El sistema *IS-54* fue diseñado para compartir las mismas frecuencias, plan de reuso, y estaciones base que el sistema *AMPS*, de tal manera que las estaciones base y móviles puedan utilizar canales tanto analógicos como digitales. Al contar con este sistema, los operadores son capaces de brindar su servicio a usuarios con teléfonos nuevos y reemplazar gradualmente los canales analógicos con canales digitales. Debido a la compatibilidad con los sistemas *AMPS*, el estándar *IS-54* es también conocido como *D-AMPS (Digital AMPS)*.

Cuando se introducen los canales digitales a una red *AMPS* operando con cierto grado de madurez, típicamente se asigna la banda expandida del espectro celular, digitalizando gradualmente la red conforme el tráfico digital vaya en aumento. En grandes ciudades, esta gradual digitalización introduce un temporal incremento en las interferencias y llamadas caídas en el sistema analógico.

Para mantener la compatibilidad con los teléfonos *AMPS*, los canales de control para bajada y subida de *IS-54* usan exactamente las mismas técnicas de señalización que *AMPS*. Así, mientras los canales de

voz digitales de IS-54 usan la modulación digital *modulación digital con cuadratura diferencial por desplazamiento en fase ($\pi/4$ DQPSK), $\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying*, con una velocidad de canal de 48.6 kbps, los canales de control digitales de bajada y subida al igual que para AMPS usan el mismo esquema de modulación FSK a 10 kbps. Una actualización al estándar, es la norma IS-136 (formalmente IS-54 revisión C). El IS-136 fue introducido para incrementar la velocidad de datos con un canal de control digital, y ofrecer servicios especializados tales como paging y mensajes cortos.

3.4.1.1 Interfaz de Aire del Estándar IS-54

Con el fin de asegurar una suave transición de analógico a digital, el sistema IS-54 está especificado para operar en modo dual (analógico-digital) lo cual hace posible que exista una transferencia de llamada entre los dos sistemas con un único teléfono. El sistema IS-54 usa la misma banda de frecuencias y espaciamiento entre canales que AMPS, soportando múltiples usuarios en cada canal AMPS. El esquema IS-54 usa TDMA, el cual tiene la flexibilidad de incorporar a más de un usuario con un solo canal de radio. La tabla (3.3) resume la interfaz de aire para el estándar IS-54.

Parámetro	Especificación IS-54
Acceso Múltiple	TDMA / FDD
Modulación	$\pi/4$ DQPSK
Ancho de Banda del Canal	30 kHz
Banda de Frecuencia para Canal de Subida	824 – 849 MHz
Banda de Frecuencia para Canal de Bajada	869 – 894 MHz
Velocidad de Datos para Canal de Subida y Bajada	48.6 kbps
Eficiencia Espectral	1.62 bps/Hz
Ecuilibración	No especificada
Codificación de Canal	CRC de 7 bits y tasa de 1/2 de codificación convolucional de longitud constante 6
Interleaving	2 ranuras interleaver
Usuarios por Canal	<ul style="list-style-type: none"> • 3 (codificación de voz full-rate de 7.95 kbps por usuario) • 6 (codificación de voz half-rate de 3.975 kbps por usuario)

Tabla(3.3). Resumen de las Especificaciones de la Interfaz de Aire IS-54.

⇒ Canales IS-54.

Los canales de control son idénticos a los canales de control analógicos de AMPS. En adición a los 42 canales de control primarios de AMPS, el estándar IS-54 especifica 42 canales de control adicionales, llamados secundarios, pudiendo duplicar con esto el tráfico de voiceo del canal de control. Los canales secundarios se pueden dedicar para uso exclusivamente digital, ya que los teléfonos AMPS no los monitorean ni los decodifican. Cuando se convierte una red AMPS a IS-54/AMPS, un operador puede decidir programar el MSC para enviar voiceos para móviles IS-54 únicamente sobre los canales de control secundarios, mientras el tráfico analógico es enviado únicamente sobre los canales de control AMPS.

Un canal de voz IS-54 ocupa 30 kHz de ancho de banda para ambos enlaces, bajada y subida, y soporta un máximo de tres usuarios, contra uno solo de AMPS. Cada canal de voz soporta un esquema TDMA que provee seis ranuras de tiempo. Para voz con tasa total (*full-rate*), tres usuarios utilizan las seis ranuras de tiempo con el mismo espaciamiento. Por ejemplo, el usuario 1 ocupa las ranuras de tiempo 1 y 4, el usuario 2 ocupa las ranuras de tiempo 2 y 5, y el usuario 3 ocupa las ranuras de tiempo 3 y 6.

En cada canal de voz IS-54, actualmente existen cuatro canales de datos los cuales son proporcionados simultáneamente. El más importante canal de datos, es el *digital traffic channel DTC* (canal de tráfico digital), y los otros tres canales portan la información de supervisión para el sistema celular. El canal de

tráfico digital de subida RDTC, (reverse DTC), porta la información de voz de la estación móvil a la estación base, y el canal de tráfico digital de bajada FDTC, (forward DTC), porta la información del usuario de la estación base al móvil. Los tres canales de supervisión son: el código de color de verificación digital (DVCC), Coded Digital Verification Color Code; el canal de control asociado lento (SACCH), Slow Associated Control Channel; y el canal de control asociado rápido (FACCH), Fast Associated Control Channel.

El DVCC es un mensaje de 12 bits enviado en cada ranura de tiempo, y es similar en funcionalidad al SAT empleado en AMPS. El DVCC es un número de 8 bits entre 1 y 255, el cual es protegido con 4 bits adicionales de codificación de canal con un código Hamming (12,8). La estación base transmite un valor de DVCC sobre el FDTC y cada usuario que use un canal TDMA debe recibirlo, decodificarlo y retransmitir el mismo DVCC a la estación base en el enlace de subida. Si el ciclo del DVCC no es completado satisfactoriamente, entonces la ranura de tiempo será liberada para que sea utilizada por otros usuarios y la llamada en curso se caerá automáticamente.

El SACCH es enviado en cada ranura de tiempo, y ofrece un canal de señalización en paralelo con la voz digital. El SACCH porta varios mensajes de control y supervisión entre las estaciones móvil y base. El SACCH provee mensajes simples sobre muchas ranuras de tiempo consecutivas y es usado para comunicar los cambios de nivel de potencia o las peticiones de transferencia de llamada. El SACCH es también usado por la unidad móvil para reportar los resultados de las mediciones de intensidad de señal de las estaciones base vecinas de tal manera que se pueda implementar el MAHO, que es la transferencia de llamada asistida por el móvil.

El FACCH es otro canal de señalización, el cual es empleado para enviar información importante de control o datos especiales de tráfico entre las estaciones base y móvil. La información del FACCH, cuando es transmitida, toma el lugar de los datos de información del usuario (por ejemplo la voz) dentro de una trama. Se puede pensar que el FACCH es una transmisión en blanco-y-estallido para el estándar IS-54. El FACCH soporta la transmisión de la información de tono dual de frecuencia múltiple DTMF (dual tone multiple frequency), las instrucciones de liberación de llamada, las instrucciones de contestación, y la petición del MAHO y del estatus del estado del usuario. Los datos del FACCH son tratados similarmente a la información de voz en la forma de su empaquetamiento e interpolación para acomodarla en la misma ranura de tiempo. Sin embargo, a diferencia de los datos de voz, de los cuales solo son protegidos ciertos bits con codificación de canal en la ranura de tiempo del IS-54, la información de FACCH usa un código de codificación de canal de tasa de 1/4 para proteger todos los bits que son transmitidos en una ranura de tiempo.

⇒ Estructura de la Trama de los Canales de Tráfico del IS-54 – Como se muestra en la figura (3.5), una trama TDMA en el sistema IS-54 consiste de seis ranuras de tiempo que soportan tres canales de tráfico full-rate.

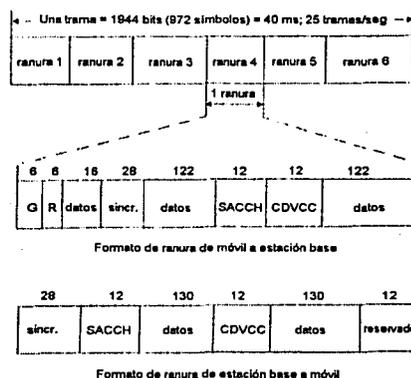


Figura (3.4). Estructura de la trama del estándar IS-54 para enlace de bajada y subida.

La longitud de la trama TDMA es de 40 ms. Ya que el estándar IS-54 usa duplexación FDD, existen ranuras de tiempo para el enlace de bajada y subida operando simultáneamente. Cada ranura de tiempo es designada para portar voz interpolada de dos tramas adyacentes del codificador de voz. (La longitud de la trama para el codificador de voz es de 20 ms, la mitad de la duración de una trama TDMA). El estándar IS-54 requiere que la información de las dos tramas adyacentes del codificador de voz sean enviadas en una ranura de tiempo particular. El codificador de voz del IS-54, produce 159 bits brutos, los datos de voz codificados en una trama de 20 ms, pero la codificación de canal lleva a cada trama de voz codificada hasta 260 bits para el mismo periodo de 20 ms. Si es enviado el FACCH en vez de los datos de voz, entonces una trama de información de voz codificada es remplazada con un bloque de información FACCH, enviando dos bloques de datos FACCH adyacentes.

En el canal de voz de subida, cada ranura de tiempo consiste de dos ráfagas de 122 bits y una ráfaga de 16 bits (para un total de 260 bits por ranura de tiempo) de dos tramas de voz interpoladas (o bloques de datos FACCH). Adicionalmente, 28 bits de sincronía, 12 bits del SACCH, 12 bits del DVCC, y 12 bits de guarda y tiempo de rampa de subida (*ramp-up*) son enviados en una trama de tiempo de un canal de enlace de subida.

En el canal de voz de bajada, cada ranura de tiempo consiste de dos ráfagas de 130 bits de datos, dos tramas de voz interpoladas (o bloques de datos FACCH cuando no se envía voz), 28 bits de sincronía, 12 bits del SAC, 12 bits del DVCC, y 12 bits de reserva. Existen un total de 324 bits por ranura de tiempo en ambos enlaces, y cada ranura de tiempo dura 6.667 ms.

Las ranuras de tiempo en los canales de bajada y subida están escalonadas en tiempo de tal manera que la ranura de tiempo 1 de la N trama en el canal de bajada comienza exactamente con una ranura de tiempo más 44 símbolos (206 símbolos = 412 bits) después del comienzo de la ranura de tiempo 1 de la N trama en el canal de subida. Esto le permite a las unidades móviles usar un simple conmutador para transmitir y recibir, en vez del empleo de un duplexor. Una flexibilidad del estándar IS-54 es que permite ajustar el tiempo de escalonamiento, con el fin de mejorar la sincronización.

- ⇒ Codificación de voz – El codificador de voz (*vocoder*) del IS-54 es llamado VSELP (*Vector Sum Excited Linear Predictive*). Este pertenece a la clase de codificadores CELP (*Code Excited Linear Predictive*). Estos codificadores están basados en libros de códigos, los cuales determinan como cuantizar la señal de excitación residual. El algoritmo VSELP usa un libro de código que tiene una estructura predefinida tal que el número de cálculos requeridos para el proceso de búsqueda del libro de código es reducido significativamente. El codificador de voz VSELP tiene una tasa de salida de 7.95 kbps y produce una trama de voz cada 20 ms. En un segundo, son producidas 50 tramas de voz, cada una conteniendo 159 bits.
- ⇒ Codificación de Canal – Los 159 bits de una trama de voz del codificador de voz son divididos en dos clases. Existen 77 bits clase-1 y 82 bits clase-2. Los bits clase-1, siendo los bits más significantes, tienen protección de errores usando una tasa de códigos convolucionales de $\frac{1}{2}$ de longitud constante $K=6$. En adición a la codificación convolucional, los 12 bits más significativos de clase-1 tienen codificación de bloque usando un código CRC de 7 bits. Los bits clase-2 no tienen protección de errores adicional. Después de la codificación de canal, los 159 bits en cada trama del codificador de voz son representados por 260 bits de canal codificado, y la tasa de bits final del codificador de voz con la codificación de canal es de 13.0 kbps.

La codificación de canal usada para la información de FACCH es diferente de la usada para la información de voz codificada. Un bloque de datos FACCH contiene 49 bits de datos por cada trama de 20 ms. Un código de palabra CRC de 16 bits es añadido a cada bloque de datos FACCH, obteniendo un código de palabra FACCH de 65 bits. La palabra de 65 bits pasa por un codificador convolucional de tasa de $\frac{1}{4}$ de longitud constante 6, con el fin de llegar a los 260 bits de información FACCH por cada trama de 20 ms. Un bloque de datos FACCH ocupa el mismo ancho de banda que

una trama simple de voz codificada, y de esta manera la información de voz sobre el *DTC* puede ser reemplazada con información codificada *FACCH*.

La información de palabra *SACCH* consiste de 6 bits durante cada trama de voz de 20 ms. Cada palabra *SACCH* en bruto pasa a través de un codificador convolucional de tasa de $\frac{1}{2}$ de longitud constante 5 para producir 12 bits codificados durante cada intervalo de 20 ms, o 24 bits durante cada trama IS-54.

- ⇒ Interleaving (Interpolamiento) – Antes de la transmisión, la información de voz codificada es interpolada sobre dos ranuras de tiempo con la información de voz de las tramas adyacentes. La información codificada de voz para las dos tramas adyacentes es colocada en el interpolador de tal manera que se mezclen los bits clase-1 y clase-2. La interpolación para los bloques *FACCH* es idéntica a la usada para la información de voz. Por otra parte, una palabra *SACCH* de 6 bits es codificada usando un codificador convolucional de tasa de $\frac{1}{2}$ y usa un interpolador incremental que se extiende sobre 12 ranuras de tiempo consecutivas.
- ⇒ Modulación – Para ser compatible con *AMPS*, el *IS-54* usa canales de 30 kHz. Sobre los canales de control, *IS-54* y *AMPS* usan por igual modulación *FSK* con codificación Manchester. Sobre los canales de voz, la modulación *FM* es reemplazada con modulación digital teniendo una velocidad de 48.6 bps. Con el fin de alcanzar esta velocidad en un canal de 30 kHz, la modulación requiere una eficiencia espectral de 1.62 bps/Hz.

Por sus características en el medio ambiente de radio móvil es empleada para el estándar *IS-54* la modulación (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) $\pi/4$ *DQPSK*. La velocidad de símbolo del canal es 24.3 kbps, y la duración del símbolo es 41.1523 μ s.

Es empleada ésta forma de pulsos para reducir el ancho de banda de transmisión, además de limitar la interferencia intersímbolo. Es requerida amplificación lineal con el fin de preservar la forma de los pulsos. Con el empleo de $\pi/4$ *DQPSK* es posible la transmisión de 3 señales de voz en un canal con ancho de banda de 30 kHz con protección de canal adyacente de 50 dB.

- ⇒ Revisión C del estándar IS-54

La revisión C del estándar *IS-54*, ofrece señalización para el canal de control digital a una velocidad de 48.6 kbps. El nuevo estándar *IS-136* fue desarrollado para ofrecer nuevas características y servicios para competir contra los operadores de la banda *PCS*. El *IS-136* especifica capacidad de mensajes cortos y privacidad, grupos de usuarios, aplicaciones de *paging* (mensajes cortos). Adicionalmente, *IS-136* especifica un modo de operación llamado *dormido* (*sleep mode*), que ayuda a alargar la vida de la batería de las estaciones móviles. Adicionalmente, el estándar *IS-136* permite el tener en operación redes “*dual-band, dual-mode*” con lo cual se puede prestar un servicio analógico-digital, en las bandas de 800 y 1900 MHz, utilizando el mismo equipo móvil. Actualmente, en México el prestador de servicio TELCEL opera bajo este estándar en la banda de 800 MHz, y durante un tiempo lo estuvo haciendo también en la banda de 1900 MHz, en la cual está por introducir el estándar europeo *GSM* (*Global System for Mobile*).

3.4.2 Estándar IS-95

Los orígenes del espectro esparcido fueron en el campo militar y en los sistemas de navegación. El espectro esparcido fue sugerido por Cooper y Nettleton en 1978. Durante los 80s, la compañía estadounidense Qualcomm investigó las técnicas *CDMA de secuencia directa (DS-CDMA)*, lo cual llevó a la comercialización de las comunicaciones celulares de espectro esparcido en la forma del estándar *CDMA IS-95* en julio de 1993. Las operaciones comerciales de los sistemas *IS-95* comenzaron en 1996.

3.4.2.1 Conceptos de CDMA

En *CDMA* a cada usuario le es asignada una secuencia de código única para codificar la información original de su señal. El receptor, conociendo las secuencias del código del usuario, decodifica la señal recibida y recobra la señal original. Esto es debido a que la correlación entre el código del usuario deseado y los códigos de los otros usuarios es baja. Ya que el ancho de banda de la señal de código es mucho mayor que el ancho de banda de la señal de la información original, el proceso de codificación amplía (esparce) el espectro de la señal, y debido a esto el proceso es también conocido como *modulación de espectro-esparcido*. La señal resultante es también llamada una señal de espectro esparcido, y *CDMA* es en ocasiones llamado como *acceso múltiple de espectro esparcido (SSMA) Spread -Spectrum Multiple Access*.

El esparcimiento en espectro de la señal transmitida le da a *CDMA* su capacidad de acceso múltiple. Debido a esto es importante conocer las técnicas necesarias para generar las señales de espectro esparcido y las propiedades de estas señales. Una técnica de modulación de espectro esparcido debe satisfacer dos criterios:

- ⇒ El ancho de banda de transmisión debe ser mucho mayor al ancho de banda de la información.
- ⇒ El ancho de banda de radiofrecuencia resultante es determinado por una función diferente al de la información enviada (con el fin de que el ancho de banda sea estadísticamente independiente de la señal original). Esto no incluye a técnicas de modulación como *FM* y *PM*.

La razón entre el ancho de banda transmitido y el ancho de banda de información es llamado el proceso de ganancia, G_p , del sistema de espectro esparcido,

$$G_p = \frac{B_t}{B_i}$$

donde B_t es el ancho de banda de transmisión y B_i es el ancho de banda de la señal original.

El receptor correlaciona la señal recibida con una réplica del esparcimiento de código generada sincronamente para recobrar la señal de información original. Esto implica que el receptor debe conocer el código usado para modular la información.

Debido a la codificación y al resultado de ampliar el ancho de banda, las señales de espectro esparcido tienen algunas propiedades que difieren de las señales de banda angosta.

- ⇒ Capacidad de Acceso Múltiple.

Si múltiples usuarios transmiten una señal de espectro esparcido al mismo tiempo, el receptor será capaz de distinguir entre los usuarios proporcionándole a cada usuario un código único que tiene una correlación suficientemente baja con los otros códigos. Correlacionando la señal recibida con una señal de código de un cierto usuario sólo será recuperada la señal de éste, mientras las otras señales de

espectro esparcido permanecerán sobre el gran ancho de banda. Así, dentro del ancho de banda de información la potencia del usuario deseado será mayor a la potencia interferente de los demás usuarios, y la señal deseada puede ser extraída. La capacidad del acceso múltiple es ilustrada en la figura (3.5). En la figura (3.5a), dos usuarios generan una señal de espectro esparcido de su información de banda angosta. En la figura (3.5b) ambos usuarios transmiten sus señales de espectro esparcido al mismo tiempo. En el receptor 1 únicamente la señal del usuario 1 es desesparcida y la información recobrada.

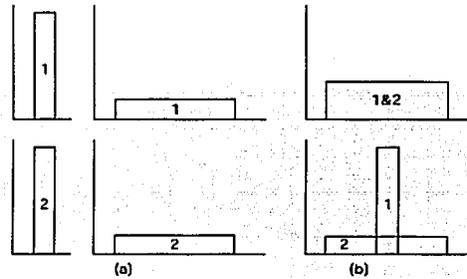


Figura (3.5). Principio del acceso múltiple de espectro esparcido.

⇒ Protección contra Interferencia Multitrayectoria.

En un canal de radio no existe sólo una trayectoria entre el transmisor y el receptor. Debido a las reflexiones y refracciones, una señal será recibida desde diferentes trayectorias. Todas las señales son copia de la misma señal transmitida pero con diferentes amplitudes, fases, retardos y ángulos de arribo. La suma de estas señales en el receptor en algunas frecuencias será constructiva, y en otras será destructiva. En el dominio del tiempo, esto resulta en una señal dispersada. La modulación de espectro esparcido puede combatir esta interferencia multitrayectoria; sin embargo, la manera de la cual ésto se logra depende mucho del tipo de modulación empleado.

⇒ Privacidad.

La señal transmitida sólo puede ser desesparcida y la información recuperada si el código es recibido en el receptor.

⇒ Rechazo a la Interferencia.

Correlacionando la señal del código con una señal de banda angosta, esparcirá la potencia de la señal de banda angosta, reduciendo con ésto la potencia interferente en el ancho de banda de la información. Esto se observa en la figura (3.6). La señal de espectro esparcido (s) recibe una interferencia de banda angosta (i). En el receptor, la señal de espectro esparcido es desesparcida mientras la señal de interferencia es esparcida, apareciendo como ruido de fondo.

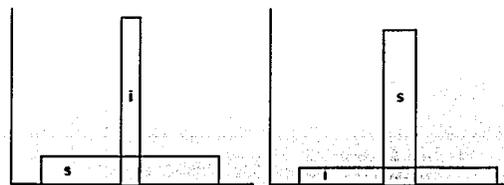


Figura (3.6). Rechazo a la interferencia.

Baja Probabilidad de Intercepción (LPI)

Debido a su baja densidad de potencia, la señal de espectro esparcido es difícil de detectar e interceptar.

3.4.2.2 Clasificación de CDMA.

Una clasificación de CDMA se muestra en la figura (3.7).

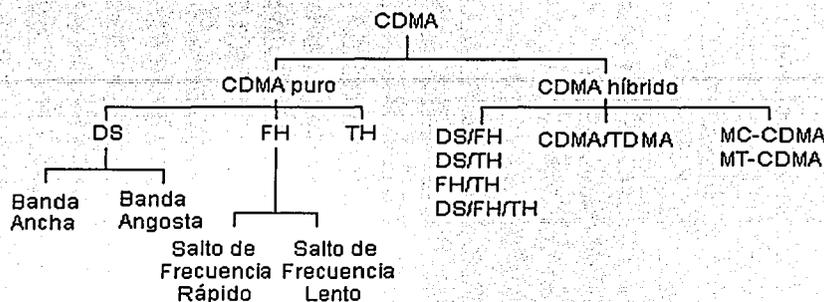


Figura (3.7). Clasificación de CDMA.

Existe una variedad de técnicas de modulación que generan señales de espectro esparcido. A continuación se enlistan las más importantes.

- ⇒ **Espectro Esparcido de Secuencia Directa (DS CDMA)** – La señal de información original es multiplicada directamente por una señal de código chip de alta velocidad.
- ⇒ **Espectro Esparcido de Salto de Frecuencia (FH CDMA)** – La frecuencia portadora a la cual es transmitida la señal de información original es cambiada rápidamente de acuerdo al código de la señal.
- ⇒ **Espectro esparcido de Salto de Tiempo (TH CDMA)** – La señal de información original no es transmitida continuamente. La señal es transmitida en ráfagas cortas, cuya decisión de transmisión es hecha por el código de la señal.
- ⇒ **Modulación Híbrida** – Adicionalmente a las dos técnicas mencionadas anteriormente, es posible combinar CDMA con otros métodos de acceso múltiple: TDMA, modulación multiportadora (MC, multicarrier) o multitono (MT, multitone). En el caso de MC-CDMA, el esparcimiento se lleva a cabo en frecuencia, mientras que para MT-CDMA se realiza en el tiempo. Ambos métodos están basados en multiplexaje por división de frecuencia ortogonal.

3.4.2.3 Acceso Múltiple por División de Código de Secuencia Directa (DS-CDMA)

En DS-CDMA la señal de información original es modulada directamente por una señal de código digital, discreta en el tiempo. La señal original puede ser analógica o digital, siendo en la mayoría de los casos digital. En el caso de una señal digital la información de modulación es en ocasiones omitida y la señal original es multiplicada directamente por la señal de código y la señal resultante modula la portadora de banda ancha. De ésta multiplicación directa toma su nombre la técnica de secuencia directa CDMA.

En la figura (3.8) se muestra un diagrama a bloques del transmisor *DS-CDMA*.

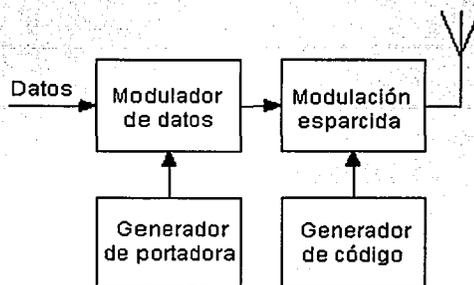


Figura (3.8). Diagrama a bloques de un transmisor de Secuencia Directa de Espectro Esparcido.

La señal de información binaria modula una portadora de radiofrecuencia. La portadora modulada es modulada por una señal de código. Esta señal de código consiste de un número de bits de código llamados *chips* que pueden ser $+1$ o -1 . Para obtener el esparcimiento deseado de la señal, la tasa de chips de la señal de código debe ser mucho mayor a la tasa de chips de la señal de información. Para la modulación del código, pueden emplearse varias técnicas de modulación, utilizándose usualmente: *modulación digital por desplazamiento en fase binaria (BPSK), binary phase shift keying; modulación digital por desplazamiento en fase binaria diferencial (D-BPSK), differential binary phase shift keying; modulación digital por desplazamiento en fase con cuadratura (QPSK), quadrature phase shift keying; o modulación digital por desplazamiento mínimo (MSK), minimum shift keying.*

Si se omite la modulación de la información y se emplea *BPSK* para la modulación del código, obtenemos el diagrama de la figura (3.9).

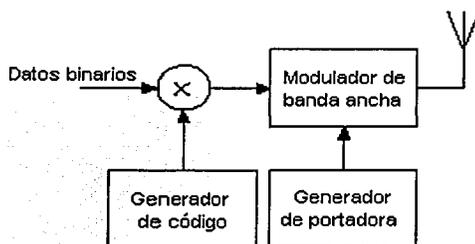


Figura (3.9). Diagrama a bloques modificado de un transmisor de Secuencia Directa de Espectro Esparcido.

La señal de secuencia directa de espectro esparcido (*DS_SS*) resultante de este transmisor es mostrada en la figura (3.10).

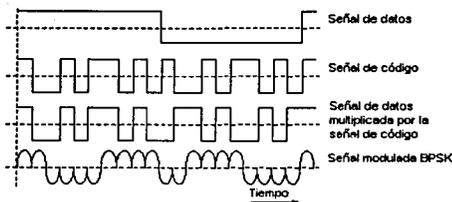


Figura (3.10). Generación de una señal de Espectro Esparcido con modulación BPSK.

La velocidad de la señal de código es llamada *velocidad chip*; un chip denota un símbolo cuando nos referimos a esparcimiento de señales de código. En ésta figura, son transmitidos 10 chips de código por símbolo de información (la velocidad del chip de código es 10 veces la velocidad de la información) así que la ganancia de este proceso es igual a 10.

Después de la transmisión de la señal, el receptor mostrado en la figura (3.11), usa demodulación coherente para desesparcir la señal de espectro esparcido, usando una secuencia de código generada localmente. Para poder realizar el desesparcimiento, el receptor no sólo debe conocer la secuencia de código usada para esparcir la señal, adicionalmente deben sincronizarse los códigos de la señal recibida y el código generado localmente. Esta sincronización debe realizarse al comienzo de la recepción y debe mantenerse hasta que el total de la señal haya sido recibida. El bloque de código sincronización/rastreo desarrolla esta operación. Después de desesparcir los resultados de una señal de información modulada, y después de la demodulación, la información original puede ser recuperada.

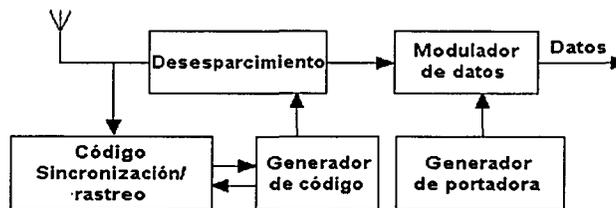


Figura (3.11). Receptor de una Señal de Secuencia Directa de Espectro Esparcido.

A continuación se describen las propiedades más importantes de *DS-CDMA*:

- ⇒ **Acceso Múltiple:** Si múltiples usuarios usan el mismo canal al mismo tiempo, habrán múltiples señales de secuencia directa traslapándose en tiempo y frecuencia. Se emplea demodulación coherente en el receptor para remover la modulación del código. Esta operación concentra la potencia del usuario deseado en el ancho de banda de modulación. Si la correlación entre el código del usuario deseado y los códigos de los usuarios interferentes es baja, la detección coherente sólo pondrá una pequeña parte de las señales interferentes dentro del ancho de banda de la información.
- ⇒ **Interferencia Multitrayectoria:** Si la secuencia de código tiene una función de autocorrelación ideal, entonces la función de autocorrelación es cero fuera del intervalo $[-T_c, T_c]$, donde T_c es la duración del chip. Esto significa que si la señal deseada y las versiones que son retrasadas más de $2T_c$ son recibidas, la demodulación coherente tratará a las versiones retrasadas como señal interferente, poniendo sólo una pequeña parte de la potencia en el ancho de banda de la información.
- ⇒ **Interferencia de Banda Angosta:** La detección coherente en el receptor involucra una multiplicación de la señal recibida por una secuencia de código generada localmente. Sin embargo, como se vio en el transmisor, al multiplicar una señal de banda angosta con una secuencia de código de banda ancha esparce el espectro de la señal de banda angosta de tal manera que la potencia en el ancho de banda de la información disminuye con un factor igual al proceso de ganancia.
- ⇒ **Baja Probabilidad de Interceptación:** Debido a que la secuencia directa usa la totalidad del espectro todo el tiempo, tendrá una muy baja potencia de transmisión por Hz. Esto hace muy difícil de detectar una señal de secuencia directa *DS*.

Además de las anteriores propiedades, *DS-CDMA* tiene otras propiedades específicas que se pueden dividir en ventajas y desventajas:

Ventajas:

- ⇒ La generación de la señal de código es fácil. Se puede realizar con una simple multiplicación.
- ⇒ Debido a que sólo se tiene que generar una frecuencia portadora, el sintetizador de frecuencia (*generador de portadora*) es simple.
- ⇒ Es posible la demodulación coherente de la señal de secuencia directa *DS*.
- ⇒ No se necesita sincronización entre los usuarios.

Desventajas:

- ⇒ Es difícil lograr y mantener la sincronización entre la señal de código generada localmente y la señal recibida. La sincronización se debe mantener dentro de una fracción del tiempo del *chip*.
- ⇒ Para una correcta recepción, el error de sincronización de la secuencia de código generada localmente y la secuencia de código recibida debe ser muy pequeño, una fracción del tiempo del *chip*.
- ⇒ La potencia recibida de los usuarios cercanos a la estación base es mucho mayor que la de los lejanos. Debido a que un usuario transmite sobre la totalidad del ancho de banda, un móvil cercano a la estación base creará constantemente una considerable interferencia a usuarios alejados de la estación base, haciendo imposible su recepción. Este efecto *cercano-lejano* (*near-far*) se puede eliminar aplicando un algoritmo de control de potencia de tal manera que todos los usuarios reciban la señal de la estación base con el mismo nivel de potencia. Sin embargo, este control es complicado.

3.4.2.4 Elementos Básicos de DS-CDMA

⇒ Receptor RAKE.

Una forma de onda de una señal de espectro esparcido se asemeja a un canal multitrayectoria. En un canal multitrayectoria, la señal original transmitida se refleja en los obstáculos tales como edificios y montañas, y el receptor recibe varias copias de la señal con diferentes retardos. Si las señales llegan con más de un *chip* de diferencia entre sí, el receptor puede trabajar sin problemas. Actualmente, desde el punto de vista de cada señal multitrayectoria, las otras multitrayectorias pueden ser consideradas como interferencia y son suprimidas por el proceso de ganancia. Sin embargo, se puede obtener un mayor beneficio si las señales multitrayectoria son combinadas utilizando un receptor llamado *RAKE*. Así, la forma de onda de las señales *CDMA* facilitan la utilización de la diversidad multitrayectoria. Expresando el mismo fenómeno en el dominio de la frecuencia, significa que el ancho de banda de la señal transmitida es mayor que el ancho de banda de coherencia del canal y el canal es selectivo en frecuencia (sólo parte de la señal es afectada por el desvanecimiento).

El receptor *RAKE* consiste de correladores, cada uno recibiendo una señal multitrayectoria. Después de ser desesparcidas por los correladores, las señales son combinadas. Debido a que las señales multitrayectoria recibidas tienen desvanecimientos independientes, el desempeño es mejorado. En la figura (3.12) se ilustra el principio del receptor *RAKE*.

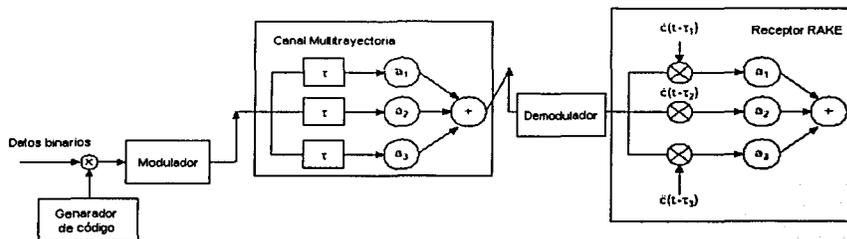


Figura (3.12). Principio de un receptor RAKE.

Después de su esparcimiento y modulación, la señal es transmitida y pasa a través de un canal multitrayectoria. En la figura anterior, tenemos tres componentes multitrayectoria con diferentes retardos (τ_1 , τ_2 y τ_3) y factores de atenuación (a_1 , a_2 y a_3), cada uno correspondiente a una diferente trayectoria de propagación. El receptor RAKE tiene un receptor llamado *dedo* (*finger*) para cada componente multitrayectoria. En cada *finger*, la señal recibida es correlacionada por un código de esparcimiento, el cual está alineado en el tiempo con el retardo de la señal multitrayectoria. Después del desesparcimiento, las señales son valoradas y combinadas. En la figura, cada señal es valorada por la ganancia de trayectoria (factor de atenuación). Debido al movimiento del teléfono, el medio ambiente dispersivo cambiará, y con esto, también cambiarán los factores de atenuación y los retardos. Debido a lo anterior, es necesaria la medición de los retardos y reasignar los *fingers* cuando sea necesario.

⇒ Control de Potencia.

En el enlace de subida de un sistema DS-CDMA, el requerimiento de control de potencia es el problema más serio. El problema de control de potencia crece debido a la interferencia de acceso múltiple. Todos los usuarios en un sistema DS-CDMA transmiten los mensajes usando el mismo ancho de banda al mismo tiempo, y debido a esto se interfieren entre sí. Debido al mecanismo de propagación, la señal recibida por una estación base de un usuario cercano será más fuerte que la señal de otro usuario alejado de la misma. Así, los usuarios distantes serán dominados por los usuarios cercanos. Esto es llamado efecto *cercano-lejano* (*near-far*). Para lograr una capacidad considerable, todas las señales, independientemente de la distancia, deben llegar a la estación base con el mismo nivel de potencia. Una solución a este problema es el control de potencia, el cual busca tener un nivel de potencia constante para cada usuario. Debido a esto, el desempeño del *control de potencia del transmisor* (TPC) es uno de varios factores que afectan en la capacidad de un sistema DS-CDMA.

En contraste al enlace de subida, en el enlace de bajada todas las señales se propagan a través del mismo canal y debido a esto son recibidas por una estación móvil con la misma potencia. Debido a esto, es requerido el control de potencia para eliminar el problema *near-far*. El control de potencia es requerido para minimizar la interferencia hacia otras estaciones base y compensar la interferencia recibida de estas.

Adicionalmente, el control de potencia mejora el desempeño de DS-CDMA contra el desvanecimiento del canal compensando las caídas de la señal.

Existen dos principios de control de potencia: *lazo abierto* y *lazo cerrado*. El control de potencia de lazo abierto mide las condiciones de interferencia del canal y ajusta la potencia de transmisión. Sin embargo, debido a que en los desvanecimientos rápidos no hay correlación entre el enlace de subida y el enlace de bajada, el control de potencia de lazo abierto logrará la potencia correcta sólo en promedio. Debido a esto, se requiere un control de potencia de lazo cerrado. El control de potencia de lazo cerrado mide la relación señal a interferencia (*SIR*, *signal-to-interference ratio*), y envía comandos al transmisor para ajustar su potencia de transmisión.

⇒ Soft Handoff (Transferencia de Llamada Suave).

En la *transferencia de llamada suave* (*soft handoff* o *soft handover*) una estación móvil es conectada a más de una estación base simultáneamente. El *soft handover* es usado en CDMA para reducir la interferencia entre células y mejorar el desempeño a través de la macro diversidad. El llamado *softer handover* es una transferencia de llamada entre dos sectores de la misma estación base.

Debido al proceso de ganancia, el concepto de patrón de reuso no es necesario en CDMA, y puede usarse el factor de reuso de uno. Usualmente, una estación móvil realiza una transferencia de llamada cuando la intensidad de señal de una célula vecina excede el nivel de la célula servidora con un umbral dado. Lo anterior es llamado *hard handover*. Ya que en un sistema CDMA las frecuencias de las

vecindades son las mismas que en la célula servidora, esto pudiese causar interferencia y por consecuencia una degradación en la capacidad. Con el fin de evitar esta interferencia, es requerido un *handover instantáneo*, el cual no es posible en la práctica. El mecanismo del *handover* siempre debe permitirle a la estación móvil conectarse a una célula, cuando la vea con un mayor nivel de potencia. Debido a que en el *soft handover* el móvil está conectado a dos o más estaciones móviles, su transmisión de potencia puede ser controlada por la estación base que recibe con el mayor nivel de intensidad de señal.

La estructura de *CDMA* es apropiada para la implementación del *soft handover*. Esto es debido a que en el enlace de subida, dos o más estaciones base pueden recibir la misma señal por el factor de reuso de uno; y en el enlace de bajada el móvil puede combinar coherentemente las señales de las estaciones base, ya que las ve como componentes multitrayectoria. Esto ofrece un beneficio adicional llamado *macro diversidad*. Usualmente es usado un canal independiente llamado *piloto* con el fin de realizar mediciones de nivel de intensidad de señal y propósitos de transferencia de llamada.

Sin embargo, en el enlace de bajada el *soft handover* crea más interferencia al sistema debido a que la nueva estación base transmitirá una señal adicional a la estación móvil. Es posible que el móvil no reciba toda la energía transmitida por la estación base debido al número limitado de *fingers RAKE*. Así, la ganancia del *soft handover* en el enlace de bajada depende de la ganancia por macro diversidad y las pérdidas de desempeño debido al incremento de la interferencia. La figura (3.13) ilustra el principio del *soft handover* con dos estaciones base involucradas.

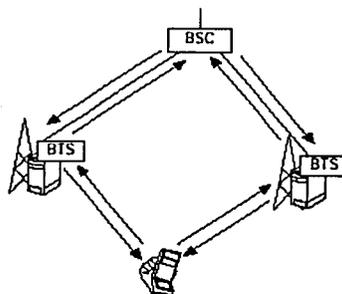


Figura (3.13). Principio del *soft handover* con dos estaciones base.

En el enlace de subida, la señal de la estación móvil es recibida por ambas radiobases, las cuales después de la demodulación y combinación, pasan la señal al punto combinador, típicamente al *controlador de la estación base (BSC, base station controller)*. En el enlace de bajada, la misma información es transmitida por las dos radiobases como señales multitrayectoria separadas, por lo que se pueden combinar.

⇒ Detección Multiusuario.

Los actuales receptores *CDMA* están basados en el receptor múltiple *RAKE*, el cual considera a las señales de otros usuarios como interferencia. Sin embargo, en un receptor óptimo todas las señales pueden ser detectadas en conjunto, o la interferencia de otras señales puede ser removida substrayéndola de la señal deseada. Esto es posible debido a que son conocidas las propiedades de correlación entre las señales (la interferencia es determinística, no aleatoria).

La capacidad de un sistema *CDMA* de secuencia directa usando un receptor *RAKE* es limitada por la interferencia. En la práctica, esto significa que cuando un nuevo usuario, o interferente entra a la red, la calidad del servicio de los demás usuarios caerá por debajo de un nivel aceptable. La mayoría de los

usuarios pueden resistir a esta interferencia. La interferencia por acceso múltiple que perturba a las estaciones base y móviles es una suma de interferencia intra e inter-célula.

La *detección multiusuario (MUD, multiuser detection)*, también llamada cancelación de interferencia (*IC, interference cancellation*), ofrece un medio para reducir la interferencia de acceso múltiple, incrementando por lo tanto la capacidad del sistema. En primer plano la detección multiusuario es considerada sólo para la interferencia intra-célula, significando esto que en un sistema práctico la capacidad será limitada por la eficiencia del algoritmo y la interferencia inter-célula.

Adicionalmente al mejoramiento de la capacidad, la detección multiusuario ayuda a disminuir el problema *cercano-lejano* típico de los sistemas *DS-CDMA*. Un móvil cercano a la estación base puede bloquear todo el tráfico de la estación base usando una potencia de transmisión muy alta. Si este usuario es detectado y substraído de la señal entrante, los demás usuarios no verán la interferencia.

Ya que una óptima detección multiusuario es muy compleja y en la práctica imposible de implementar para un número razonable de usuarios, han sido desarrollados un número de *multiusuarios subóptimos* y *receptores de cancelación de interferencia*. Los receptores subóptimos pueden ser divididos en dos categorías principales: *detectores lineales* y *canceladores de interferencia*. Los *detectores lineales* aplican una transformación lineal a la salida de los filtros para tratar de remover la interferencia de acceso múltiple (por ejemplo, la interferencia debida a las correlaciones entre los códigos de los usuarios). En los *canceladores de interferencia* primero se estima la interferencia de acceso múltiple y después se substraee de la señal recibida.

3.4.2.5 Interfaz de Aire del Estándar IS-95

El sistema celular norteamericano basado en *CDMA* ha sido estandarizado como (*IS-95*) por la *TIA*. Al igual que el *IS-54*, el sistema *IS-95* fue diseñado para ser compatible con la banda de frecuencias del sistema *AMPS*, pudiendo producirse estaciones móviles y base para operación en modo dual. La primera producción piloto de teléfonos de modo dual *CDMA/AMPS* fue realizada por la empresa *Qualcomm* en 1994. Los principales parámetros de la interfaz de aire *IS-95* se muestran en la tabla (3.4).

Ancho de Banda	1.25 MHz
Tasa de Chip	1.2288 Mcps
Ancho de banda para el enlace de subida	869-894 MHz (celular) 1930-1980 MHz (PCS)
Ancho de banda para el enlace de bajada	824-849 MHz (celular) 1850-1910 MHz (PCS)
Longitud de trama	20 ms
Tasas de bit	Tasa fija 1: 9.6 kbps Tasa fija 2: 14.4 kbps IS-95B: 115.2 kbps
Codificación de voz	QCELP 8 kbps ACELP 13 kbps
Transferencia de llamada suave	Sí
Control de potencia	Enlace de subida: lazo abierto + lazo cerrado rápido. Enlace de bajada: Lazo de calidad lento.
Número de fingers RAKE	4
Códigos de esparcimiento	Wash + secuencia larga M

Tabla (3.4). Parámetros de la interfaz de aire *IS-95*.

IS-95 le permite a todos los usuarios que se encuentren en la misma célula usar el mismo canal de radio, al igual que a los usuarios ubicados en las células vecinas, debido a que es un sistema de espectro esparcido de secuencia directa. *CDMA* elimina completamente el trabajo de planeación de frecuencias. Para facilitar la transición de *AMPS* a *CDMA*, cada canal *IS-95* ocupa 1.25 MHz del espectro en cada enlace, lo que representa el 10% del espectro disponible para la banda celular. En la

práctica, los operadores *AMPS* deben tener una banda de guarda de 270 kHz (9 canales *AMPS*) en cada lado del espectro dedicado para *IS-95*.

A diferencia de otros estándares celulares, la velocidad de los datos del usuario (no la velocidad del canal *chip*) cambia en tiempo real, dependiendo de la actividad de la voz y los requerimientos en la red. Además, *IS-95* usa diferentes esquemas de modulación y técnicas de esparcimiento en los enlaces de bajada y subida. En el enlace de bajada, la estación base transmite simultáneamente la información de usuario a todos los móviles en su área de cobertura usando una secuencia esparcida diferente para cada móvil. Un *código piloto* también es transmitido simultáneamente y a un mayor nivel de potencia, debido a esto se les permite a todos los móviles usar detección de portadora coherente mientras se estiman las condiciones del canal. En el enlace de subida, todos los móviles responden de manera asincrónica y tienen idealmente un nivel de señal constante debido al control de potencia aplicado por la estación base.

El primer codificador de voz (*vocoder*) usado en el sistema *IS-95* fue el 9600 bps *Qualcomm Code Excited Linear Predictive (QCELP)*. La implementación original de este codificador de voz detecta la actividad de voz, y reduce la tasa de datos a 1200 bps durante los periodos de silencio. Velocidades intermedias de 2400, 4800 son también usadas para propósitos especiales. Un *vocoder* más moderno introducido en 1995 de 14400 bps llamado (*QCELP13*) trabaja a una velocidad de datos de voz de 13.4 kbps.

⇒ Especificaciones de Frecuencia y Canal.

Está especificado que *IS-95* trabaje en el enlace de subida en la banda 824-849 MHz, y en el enlace de bajada en la banda 869-894 MHz. Muchos usuarios comparten un canal común para transmisión. La máxima velocidad para un usuario es 9.6 kbps. La información de usuario en *IS-95* es esparcida a un canal *chip* de velocidad de 1.2288 Mchip/s (un factor total de esparcimiento de 128) usando una combinación de técnicas. El proceso de esparcimiento es diferente para los enlaces de bajada y subida. En el enlace de bajada, la ráfaga de datos de usuario es codificada usando un código convolucional de tasa $\frac{1}{2}$ interpolado, y esparcida por uno de 64 secuencias esparcidas ortogonales (*funciones Walsh*). A cada móvil en una célula dada, le es asignada una secuencia esparcida diferente, al menos para el caso donde las multitraectorias no existen. Para reducir la interferencia entre los móviles que usan la misma secuencia esparcida en diferentes células, y para ofrecer las características espectrales de banda ancha deseadas (no todas las funciones Walsh permiten una potencia de espectro de banda ancha), todas las señales en una célula particular son mezcladas usando una secuencia pseudoaleatoria de longitud de 2^{15} chips.

La ortogonalidad en el enlace de bajada para todos los usuarios dentro de una célula es conservada porque sus señales son mezcladas sincronamente. Un *canal piloto (código)* es empleado en el enlace de bajada para que cada usuario dentro de la célula pueda determinar y reaccionar a las características del canal mientras se emplea la detección coherente. El canal piloto es transmitido a una mayor potencia que los canales de los usuarios.

En el enlace de subida, es usada una diferente estrategia de esparcimiento debido a que cada señal recibida llega a la estación base con diferente trayectoria de propagación. La ráfaga de datos del canal usuario en el enlace de subida primero es codificada convolucionalmente con un código de tasa $\frac{1}{3}$. Después de la interpolación, cada bloque de seis símbolos codificados es mapeado a una de las 64 funciones ortogonales Walsh, ofreciendo una señalización ortogonal 64ary. Un esparcimiento cuádruple final, dando una tasa de 1.2288 Mchip/s, es logrado esparciendo el resultado la ráfaga resultante de 307.2 kchip/s por códigos específicos para cada usuario en las estaciones base teniendo periodos de $2^{12}-1$ chips y 2^{15} chips, respectivamente. La tasa de codificación de $\frac{1}{3}$ y el mapeo sobre las funciones Walsh ayuda para tener una mayor tolerancia a la interferencia que podría generarse por la repetición de los códigos esparcidos. Esta robustez adicional es importante en el enlace de subida, debido a la detección no coherente y la interferencia recibida en la estación base.

Otro elemento esencial del enlace de subida es el firme control de la potencia de transmisión de cada estación móvil, evitando así el problema *cercano-lejano* que se presenta debido a las diferentes potencias empleadas por los usuarios. Es usada una combinación de lazo abierto y rápido, y control de potencia de lazo cerrado para ajustar la potencia de transmisión de cada usuario de tal manera que la estación base reciba a cada usuario con la misma potencia. Los comandos para el control de potencia de lazo cerrado son enviados a una velocidad de 800 bps, y estos bits son tomados de las tramas de voz. Sin un rápido control de potencia, las variaciones en ésta debido al desvanecimiento podrían degradar el desempeño de todos los usuarios en el sistema.

Tanto en la estación base como en la móvil, los receptores *RAKE* son usados para combatir a las componentes multitrayectoria, disminuyendo los efectos de los desvanecimientos. Un receptor *RAKE*, aprovecha el tiempo de retardo multitrayectoria en un canal y combina las replicas retrasadas de la señal transmitida con el fin de mejorar la calidad del enlace. En las estaciones base de *IS-95*, es empleado un *RAKE* llamado *three finger*. La arquitectura *IS-95* también provee diversidad a las estaciones base durante la transferencia de llamada, llamada *soft handoff*, donde se realiza la transición de un móvil de una estación base a otra manteniendo el enlace con ambas radiobases a la vez. El receptor del móvil combina la señal de ambas estaciones base de la misma manera que lo haría con diferentes componentes multitrayectoria.

3.4.2.5.1 Canal de Bajada en CDMA

El canal de bajada en *CDMA* consiste de un canal *piloto*, un canal de sincronización, hasta 7 canales de *paging* (voceo) y hasta 63 canales de tráfico. El canal piloto le permite a una estación base adquirir la sincronización en tiempo para el canal de bajada, ofrece una referencia de fase para demodulación coherente, y le provee a cada móvil información para realizar comparaciones de nivel de intensidad de señal entre las estaciones base cercanas para realizar la transferencia de llamada. El canal de sincronización transmite mensajes de sincronización a los móviles y opera a 1200 bps. El canal de *paging* es usado para enviar información de control y mensajes de voceo de la estación base a los móviles y opera a 9600, 4800 y 2400 bps. El canal de tráfico de bajada (*FTC, forward traffic channel*) soporta velocidades variables de 9600, 4800, 2400 o 1200 bps.

La información en el *FTC* es agrupada dentro de tramas de 20 ms. La información del usuario primero es codificada convolucionalmente y después formateada e interpolada para ajustarla a la velocidad de datos del usuario en turno, la cual puede variar. Entonces, la señal es esparcida con un código Walsh y una larga secuencia *PN* a una tasa de 1.2288 Mcps.

La tabla (3.5) muestra la codificación y los parámetros de repetición para el *FTC*.

Parámetro	Velocidad de datos (bps)			
	9600	4800	2400	1200
Velocidad de datos de usuario	9600	4800	2400	1200
Tasa de codificación	1/2	1/2	1/2	1/2
Periodo de repetición de datos de usuario	1	2	4	8
Velocidad de datos codificados en banda base	19200	19200	19200	19200
Chips PN / Velocidad de bit codificado	64	64	64	64
Velocidad de Chip PN	1.2288	1.2288	1.2288	1.2288
Chips PN / Bit	128	256	512	1024

Tabla (3.5). Parámetros de modulación del *FTC*.

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

⇒ Codificador Convolucional y Circuito de Repetición.

La voz es codificada usando un codificador convolucional con longitud constante 9. El proceso de codificación es descrito por vectores generadores G_o y G_i los cuales son 753 (octal) y 561 (octal), respectivamente.

El codificador de voz aprovecha las pausas en la voz, y reduce su salida de 9600 bps a 1200 bps durante los periodos de silencio. Con el fin de conservar una velocidad de símbolo constante en banda base de 19.2 kbps, siempre que la velocidad del usuario es menor a 9600 bps, cada símbolo del codificador convolucional se repite antes del bloque de interpolamiento. Si la velocidad de información es 4800 bps, cada símbolo de código se repite una vez. Si la tasa de información es 2400 bps o 1200 bps, cada símbolo de código se repite 3 o 7 veces, respectivamente. La repetición resulta en una velocidad constante codificada de 19200 símbolos por segundo para todas las posibles velocidades de datos.

⇒ Bloque Interpolador.

Después de la codificación convolucional y la repetición, los símbolos son enviados a un bloque interpolador de 20 ms, el cual es un arreglo de 24 por 16.

⇒ Secuencia PN.

En canal de bajada, es empleada secuencia directa para la mezcla de datos. La secuencia *PN* asignada de manera única a cada usuario es un código periódico con un periodo de $2^{42}-1$ chips.

Son empleados dos tipos de máscara en el generador de código: una *máscara pública* para el *número de serie electrónico (ESN, Electronic Serial Number)* de las estaciones móviles, y una *máscara privada* para el *número de identificación del móvil (MIN, Mobile Identification Number)*. Todas las llamadas CDMA son iniciadas usando la máscara pública. La transición a la máscara privada es efectuada después de la autenticación.

⇒ Mezcla de Datos.

La mezcla de datos se lleva a cabo después del bloque interpolador. La secuencia *PN* de 1.2288 MHz es aplicada a un decimador, el cual guarda sólo el primer *chip* de cada 64 *chips PN* consecutivos. La tasa de símbolo del decimador es 19.2 kbps. La mezcla de datos es desarrollada por una adición módulo-2 de la salida del interpolador con el símbolo del decimador.

⇒ Subcanal de Control de Potencia.

Para minimizar la *tasa de bits erróneos (BER)* promedio de cada usuario, *IS-95* procura forzar a cada usuario a ofrecer el mismo nivel de potencia a la estación base servidora. El canal de tráfico del enlace de subida estima y responde a la intensidad de señal (en este momento, la intensidad de señal y la interferencia) para una estación base particular. Ya que la señal y la interferencia varían continuamente, el control de potencia es enviado a cada unidad móvil cada 1.25 ms. Son enviados comandos de control de potencia a cada unidad móvil sobre el subcanal de control del enlace de bajada, el cual le manda al móvil incrementar o decrementar su potencia transmitida en pasos de 1 dB. Si la señal recibida es baja, se transmite un cero sobre el subcanal de control de potencia, instruyéndole al móvil que incremente su nivel de potencia. Si la potencia del móvil es alta, es transmitido un uno para indicarle que decremente su nivel de potencia. El bit de control de potencia corresponde a dos símbolos de modulación del canal de tráfico de subida. Los bits de control de potencia son insertados después de la mezcla de datos.

Los bits de control de potencia son transmitidos usando técnicas punzantes. Durante un periodo de 1.25 ms, son transmitidos 24 símbolos de datos, e IS-95 especifica 16 posibles posiciones de grupo para el bit de control de potencia. Cada posición corresponde a uno de los primeros 16 símbolos de modulación. Son empleados 24 bits del código decimador para la mezcla de datos en un periodo de 1.25 ms. De los 24 bits, sólo son usados los últimos 4 para determinar la posición del bit de control de potencia.

⇒ Envoltura Ortogonal.

La envoltura ortogonal se realiza en el enlace de bajada después de la mezcla de datos. Cada canal de tráfico transmitido en el canal de bajada CDMA es esparcido con una función Walsh a una tasa de chip fija de 1.2288 Mcps. Las funciones Walsh están compuestas de 64 frecuencias binarias, cada una de longitud 64, las cuales son completamente ortogonales entre sí y ofrecen canalización ortogonal para todos los usuarios en el enlace de bajada. A un usuario que es esparcido usando una función Walsh n , le es asignado un canal número n ($n = 0$ a 63). La secuencia Walsh se repite cada 52.083 μ s, la cual es igual a un símbolo de datos codificado. En otras palabras, cada símbolo de datos es esparcido por 64 chips Walsh.

Cada renglón en la matriz 64 por 64 de la función Walsh corresponde a un número de canal. Para el canal número n , los símbolos en el transmisor son esparcidos por el chip Walsh 64 en el n -ésimo renglón de la matriz de la función Walsh. El canal número 0 siempre es asignado al *canal piloto*. Ya que el canal 0 representa el código Walsh 0, entonces el canal piloto no es otra cosa que un código Walsh en blanco y consiste sólo del código PN. El *canal de sincronización* es vital para el sistema IS-95 y es asignado al canal número 32. Si están presentes canales de paging (voceo), ellos están asignados a los canales de código con número más bajo. Los canales restantes están disponibles para canales de tráfico de bajada.

⇒ Modulación de Cuadratura.

Después de la envoltura ortogonal, los símbolos son esparcidos en cuadratura. Una corta secuencia binaria de esparcimiento, con un periodo de $2^{15}-1$ chips, es usada para una fácil adquisición y sincronización en cada receptor móvil y es usada para modulación. Esta corta secuencia de esparcimiento es llamada *secuencia piloto PN*, y está basada en secuencias polinomiales.

Las velocidades de los chips para las secuencias piloto PN son de 1.2288 Mcps. Las salidas binarias I y Q del esparcimiento en cuadratura están mapeadas en fase de acuerdo a la tabla (3.6).

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

Tabla (3.6). Mapeo I y Q del enlace de bajada en CDMA.

3.4.2.5.2 Canal de Subida CDMA

La información de usuario en el enlace de subida es agrupada en tramas de 20 ms. Toda la información transmitida sobre el enlace de subida es codificada convolucionalmente, tiene interpolación por bloques, modulación 64-ary ortogonal, y es esparcida antes de su transmisión. La tabla (3.7) muestra los parámetros de modulación para el canal de tráfico de subida. La velocidad de los datos de voz puede ser de 9600, 4800, 2400 o 1200 bps.

Parámetro	Velocidad de datos (bps)			
	9600	4800	2400	1200
Velocidad de datos de usuario	9600	4800	2400	1200
Tasa de codificación	1/3	1/3	1/3	1/3
Ciclo de rendimiento de Transmisión (%)	100.0	50.0	25.0	12.5
Velocidad de información codificada (sps)	28800	28800	28800	28800
Bits por símbolo Walsh	6	6	6	6
Velocidad de chip Walsh (kcps)	307.2	307.2	307.2	307.2
Duración del símbolo Walsh (μ s)	208.33	208.33	208.33	208.33
Chips PN / Símbolo de Código	42.67	42.67	42.67	42.67
Chips PN / Símbolo Walsh	256	256	256	256
Chips PN / Chip Walsh	4	4	4	4
Velocidad del Chip PN (Mcps)	1.2288	1.2288	1.2288	1.2288

Tabla (3.7). Parámetros de modulación del canal de subida de tráfico.

Los canales de subida de CDMA están compuestos de *canales de acceso (AC, access channels)* y *canales de tráfico de subida (RTC, reverse traffic channels)*. Ambos comparten la misma asignación de frecuencia, y cada canal de tráfico/acceso se identifica por un código de usuario diferente. El canal de acceso es usado por el móvil para iniciar la comunicación con la estación base y responder al canal de mensajes de paging (voceo). El canal de acceso es un canal de acceso aleatorio donde cada canal es identificado por un código único. El canal del enlace de subida para CDMA puede contener un máximo de 32 canales de acceso por canal de voceo soportado. Mientras que el RTC opera con una velocidad de datos variable, el AC trabaja a una velocidad fija de 4800 bps.

⇒ Codificador Convolutacional y Repetición de Símbolo.

La codificación convolutacional usada en el RTC tiene una tasa de 1/3 y longitud constante 9. Los tres vectores generadores g_0 , g_1 , y g_2 son 557 (octal), 663 (octal) y 771 (octal), respectivamente.

Los bits codificados después del codificador convolutacional son repetidos antes de ser interpolados cuando la velocidad de los datos es menor a 9600 bps. Esto es idéntico al método usado sobre el canal de bajada. Después de la repetición, la velocidad de símbolo fuera del codificador es fijada a 28800 bps.

⇒ Bloque Interpolador.

El bloque de interpolación es desarrollado después de la codificación convolutacional y la repetición. El bloque interpolador dura 20 ms, y es un arreglo con 32 renglones y 18 columnas. Los símbolos de código son escritos en una matriz por columnas y leídos fuera de ella por renglones.

⇒ Modulación Ortogonal.

Para el enlace de subida de CDMA es empleada una modulación 64-ary ortogonal. Una de las 64 posibles funciones Walsh es transmitida para cada grupo de seis bits codificados. Dentro de una función Walsh, son transmitidos 64 chips Walsh. Los chips Walsh son transmitidos a una velocidad de 307.2 kcps

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

Es importante decir que las funciones Walsh son usadas para diferentes propósitos en los enlaces de bajada y subida. En el enlace de bajada, las funciones Walsh son usadas para el esparcimiento y distinguir a un canal de usuario particular, mientras que en el enlace de subida las funciones Walsh son usadas para la modulación de los datos.

⇒ Velocidad de Transmisión de Datos Variable.

Datos de velocidad variable son enviados sobre el enlace de subida de *CDMA*. La repetición de símbolos de código introduce redundancia cuando la velocidad de los datos es menor a 9600 bps. Es usado un transmisor de datos aleatorios para enviar ciertos bits en los momentos que es apagado el transmisor. Cuando la velocidad de datos es 9600 bps, todos los bits de salida interpolados son transmitidos. Cuando la velocidad de datos es 4800 bps, son transmitidos la mitad de los bits de salida, y la estación móvil no transmite el 50% del tiempo. La información en cada trama de 20 ms es dividida en 16 grupos de control de potencia, cada uno con un periodo de 1.25 ms. Algunos grupos de control de potencia son de compuerta encendida, y otros son de compuerta apagada. La aleatoriedad de los datos permite que cada símbolo de código repetido sea transmitido sólo una vez. Durante el proceso de compuerta apagada, la estación móvil disminuye su *PIRE* al menos 20 dB respecto a la potencia del más reciente periodo de compuerta encendida, o al piso de ruido de transmisión. Esta acción le reduce la interferencia a los otros móviles que están operando sobre el mismo canal de subida de *CDMA*.

El generador de datos aleatorios realiza un patrón de 0s y 1s que enmascara aleatoriamente los datos redundantes generados aleatoriamente por el proceso de repetición de código. Un bloque de 14 bits tomado del código determina el patrón de enmascaramiento. Los últimos 14 bits del código usados para esparcimiento del segundo al último grupo de control de potencia de la trama previa son usados para determinar la máscara aleatoria para el proceso de compuerta.

El algoritmo trabaja de la siguiente forma:

- ⇒ Si la velocidad del usuario es 9600 bps, la transmisión ocurre en los 16 grupos de control de potencia.
- ⇒ Si la velocidad del usuario es 4800 bps, la transmisión ocurre en 8 grupos de control de potencia.
- ⇒ Si la velocidad del usuario es 2400 bps, la transmisión ocurre en 4 grupos de control de potencia.
- ⇒ Si la velocidad del usuario es 1200 bps, la transmisión ocurre en 2 grupos de control de potencia.
- ⇒ Esparcimiento de Secuencia Directa.

El *RTC* es esparcido por la secuencia de código *PN*, la cual opera a una velocidad de 1.2288 Mcps. El proceso de generación del código es igual al realizado en el enlace de bajada. Cada chip Walsh es esparcido por 4 chips de código *PN*.

⇒ Modulación de Cuadratura.

Antes de la transmisión, el *RTC* es esparcido por secuencias *I* y *Q* del canal piloto *PN* idénticas a las usadas en el proceso del canal de bajada *CDMA*. Estas secuencias piloto son usadas para propósitos de sincronización. La modulación del enlace de subida es *OQPSK* (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*). La información esparcida por la secuencia *Q* de canal piloto *PN* es retrasada por la mitad de un chip (406.901 ns) con respecto a la información esparcida por la secuencia *I*. Este retardo es usado para mejorar la forma espectral y la sincronización. La información binaria *I* y *Q* es mapeada en fase de acuerdo a la tabla (3.5).

⇒ Codificador de Voz 14.4 kbps.

Para tener una mayor velocidad de datos y mejor calidad de voz, la estructura de la interfaz de aire *IS-96* ha sido modificada para proporcionar servicios de mayor velocidad para PCS. En el enlace de subida, la velocidad del código convolucional ha sido modificada de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ punzando dos de cada seis símbolos de la trama original de símbolos codificados de $\frac{1}{2}$. Estos cambios incrementan la velocidad efectiva de la información de 9600, 4800, 2400 y 1200 bps a 14400, 7200, 3600 y 1800 bps respectivamente.

Un codificador de voz con velocidad variable llamado *QCELP13*, fue diseñado para operar a esta mayor velocidad del canal. El *QCELP13* es una versión modificada del codificador de voz *QCELP*. El algoritmo *QCELP13* puede operar en diferentes modos. El modo 0 opera de la misma manera que el vocoder *QCELP* original. El *QCELP13* codifica la señal de voz a la mayor velocidad cuando está presente voz activa y a la menor velocidad cuando se está en silencio. Son usadas velocidades intermedias para diferentes modos de voz, tales como tramas de voz estacionaria y silencios, reduciendo la velocidad promedio e incrementando la capacidad.

Capítulo 4. Calidad de Servicio de Redes de Telefonía Celular

4.1 Concepto de Calidad para un Usuario

Hoy día, en nuestro país está abierta la competencia para el mercado de telefonía celular móvil. Un usuario tiene la opción de contratar una línea telefónica móvil con más de una compañía, llamada en el ambiente de las telecomunicaciones *operador celular* o *carrier celular*. Más rica es la opción en las principales ciudades del país: Tijuana, Monterrey, Guadalajara y Ciudad de México, donde ya están trabajando más de dos operadores celulares, con la liberación y compra de licencias por parte de nuevas compañías para trabajar en la banda llamada PCS en los 1900 MHz.

Ahora bien, al existir varias opciones en el mercado, cuando un usuario va a adquirir una línea telefónica móvil considera los siguientes puntos antes de hacer su elección final:

- ⇒ **Precio y características del equipo.** Una persona cuando selecciona un equipo telefónico busca la conjunción de tres características: un teléfono que sea económico, ligero y que pueda acceder con él a servicios de valor agregado como identificador de llamadas, buzón de voz, llamada en espera, llamada tripartita, etc. La introducción cada vez más fuerte al mercado de equipos digitales ha ayudado a que los precios de los equipos que cumplen con estas características bajen y sean accesibles a un mayor número de clientes.
- ⇒ **Costo del servicio.** Con el pasar de los años, ya más de diez de operar la telefonía celular en México, el costo del servicio telefónico celular ha sido cada vez más accesible para la población, la cual ya no ve el hecho de usar un teléfono celular como un lujo, el cual se ha convertido en una herramienta indispensable para la gente de negocios, y un medio de comunicación muy útil para cualquier persona sin importar su ocupación, edad o nivel social. Dos puntos que han tenido gran aceptación y han ayudado a acrecentar la *teledensidad* (nivel de penetración de la telefonía) en nuestro país son las modalidades de “*el que llama paga*” y “*el sistema de prepago*”. Las estadísticas de las compañías reportan que la gran mayoría de sus abonados tienen su teléfono trabajando bajo el *sistema de prepago*, y que desde la entrada en operación de la modalidad *del que llama paga* creció exponencialmente su número de abonados celulares. Para un abonado común en nuestro país, es más atractivo contar con un equipo que no le obligue a pagar un contrato y rentas mensuales fijas.
- ⇒ **Calidad de servicio.** Una persona espera que su equipo tenga una excelente calidad de audio y le proporcione la más amplia variedad de servicios, los cuales le distingan benéficamente el estar inscrito con la compañía de su elección. Además, para que un usuario esté satisfecho con su compañía, ésta debe garantizarle que siempre haya un canal de voz disponible para que pueda establecer una llamada, y que ésta se mantenga con niveles óptimos hasta que el usuario decida terminarla.
- ⇒ **Cobertura.** Un usuario, sobre todo si es una persona con gran movilidad, espera que su compañía le preste servicio en cualquier lugar donde se encuentre, tanto en su ciudad como en cualquier punto del país. Esta facilidad no todos los operadores celulares se pueden dar el lujo de ofrecerla, ya que se necesita contar con una gran infraestructura a nivel nacional, punto que las nuevas compañías no pueden cubrir actualmente, ni lo podrán hacer a corto plazo.

Es muy importante resaltar que a un usuario común no le interesa cual sea la tecnología con la que esté trabajando la empresa de su elección. Tal vez, debido a la mercadotecnia y al estar de moda todo lo relacionado con lo digital en audio, video, entretenimiento, arte, etc, una persona tendrá en mente comprar un teléfono digital, y tal vez preguntará en el centro de atención a clientes de la compañía que eligió si su cobertura es digital o no.

Por otra parte, ya que un nuevo usuario decidió adquirir un equipo, le interesa que la compañía de su elección le otorgue principalmente dos cosas:

- ⇒ **Buena calidad de servicio.** Para una persona que ya ha experimentado el uso de un teléfono celular, su principal demanda al utilizar su equipo es que sus llamadas las pueda establecer desde que marca la tecla *send* hasta que la termine con la tecla *end*, con una calidad de audio suficientemente buena para llevar una conversación con claridad, sin tener que repetir ningún diálogo, ni marcar nuevamente porque se haya cortado, o tener que marcar varias veces debido a la congestión, hasta que se pueda establecer exitosamente su llamada.
- ⇒ **Buena cobertura.** Relacionada directamente con el punto anterior, la cual es la base para que se pueda cumplir. Un usuario de telefonía celular móvil requiere que su compañía le otorgue un buen servicio sin importarle el lugar donde se encuentre, ya sea en su ciudad, en una carretera o en un puerto turístico.

4.2 Concepto de Calidad para el Operador Celular

4.2.1 Areas Técnicas Encargadas de Elevar la Calidad

En general, podemos dividir el trabajo técnico de una empresa telefónica en tres grandes áreas teniendo a su cargo elevar la calidad del servicio con las siguientes tareas principales:

1. Ingeniería.

- ⇒ Planeación y diseño de la red.
- ⇒ Investigación, análisis e integración de nuevas tecnologías.
- ⇒ Optimización de la red.

2. Implantación y Construcción.

- ⇒ Implantación y construcción de la nueva infraestructura, centrales de conmutación, estaciones base, enlaces punto a punto, etc.

3. Operación y Mantenimiento.

- ⇒ Operación y mantenimiento del sistema, para estaciones base, centrales, enlaces, etc.
- ⇒ Cambio de equipo hardware, tanto en centrales como en estaciones base.
- ⇒ Ejecución en campo de cambios propuestos por el área de ingeniería.

Del trabajo en conjunto de estas áreas depende el funcionamiento de la red, tratando siempre de mantener buenos niveles de calidad de servicio.

4.2.2 Relación entre Mercadotecnia e Ingeniería

Una de las áreas más importantes de una compañía celular debe ser el área de *mercadotecnia*, la cual es la encargada crear la imagen del operador ante los usuarios, dependiendo de ella en gran medida el que se tenga siempre, mes con mes, un aumento significativo en el número de abonados.

El área de mercadotecnia es la encargada de hacer saber a los usuarios del trabajo del corazón de una empresa de telefonía, el cual es el área de *ingeniería*. El área de mercadotecnia tiene bajo su responsabilidad el dar a conocer a sus clientes los avances en infraestructura, capacidad y la implementación de nuevas tecnologías, de lo cual están encargados los ingenieros.

De nada sirve tener plan de publicidad espectacularmente agresivo, muchos centros de atención a clientes, y cobertura nacional, si no se tiene buena calidad de servicio ni una buena relación de trabajo entre las áreas de ingeniería y de mercadotecnia.

4.3 Definiciones de Desempeño del ITU-T

¿Qué es Calidad de Servicio? Existen varias definiciones propuestas por operadores, fabricantes y organismos regulatorios. Sin embargo, en este trabajo nos basaremos en las definiciones del organismo internacional más importante, la *Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)*, *International Telecommunication Union*.

En la recomendación *ITU-T E.800*, la *Calidad de Servicio (Quality of Service, QoS)* está dividida en las siguientes áreas:

- ⇒ **Serviabilidad.**
- ⇒ **Soporte de Servicio.**
- ⇒ **Soporte de Operabilidad.**
- ⇒ **Soporte de Seguridad.**

Específicamente para el *Benchmarking Celular* es de gran interés la *Serviabilidad*, la cual está definida a continuación como:

"La habilidad de que sea obtenido un servicio – dentro de unas tolerancias específicas y otras condiciones dadas – cuando sea solicitado por el usuario y continúe prestándose sin un daño excesivo por una duración solicitada."

Ahora bien, la recomendación E.800 del ITU divide a la *Serviabilidad* en tres aspectos:

Accesibilidad

"La habilidad de que sea obtenido un servicio, dentro de tolerancias específicas y otras condiciones dadas, cuando sea solicitado por el usuario."

Esto es, tener la posibilidad de acceder a un canal de voz, ya sea analógico o digital, al momento de que sea solicitado por el usuario.

Retenibilidad

"La habilidad de un servicio, una vez obtenido, de continuar siendo prestado bajo condiciones dadas por una duración solicitada."

Esto es, poder mantener la llamada desde el momento en que es solicitada hasta que el usuario decida finalizarla.

Integridad

"El grado con el cual un servicio es provisto sin daños excesivos, una vez obtenido."

Esto es, poder llevar a cabo una llamada con una calidad de audio aceptable, que permita llevar a cabo una conversación sin tener que repetir frases o colgar para hacer un nuevo intento debido a que sea imposible entender a la otra persona o hacerse entender.

Capítulo 5. Benchmarking Celular (Auditoría de Calidad de Servicio)

5.1 Objetivo de un Benchmarking Celular

El objetivo de un *benchmarking* es realizar un análisis comparativo de calidad de servicio (*auditoría*) entre varios operadores de redes de telecomunicaciones que prestan su servicio dentro de la misma zona. Para el caso muy particular de redes celulares, esta comparación se lleva a cabo realizando mediciones (*drive test*) para recolectar datos de campo y posteriormente un análisis detallado de los mismos, cuyos resultados finales permiten conocer cuál es la percepción que tiene un usuario del comportamiento y desempeño de dichas redes.

Es importante enfatizar que el objetivo principal de un proceso de benchmarking no es realizar una optimización, sino una auditoría de calidad y desempeño de las redes en cuestión. Sin embargo, este trabajo sirve como punto de partida para enfocar los esfuerzos de optimización de radiofrecuencia y calidad en las zonas donde se detecten problemas.

Además, con el análisis de benchmarking se pueden realizar sugerencias desde un punto de vista técnico para encontrar posibles soluciones a los problemas que se presentaron durante los recorridos en las zonas recorridas.

5.2 Preparación del Proyecto de Benchmarking

Para que pueda desarrollarse correctamente un proyecto de benchmarking, es de gran importancia tomar en cuenta todos los requerimientos que necesarios para analizar una zona con cobertura celular, los cuales son descritos a continuación.

5.2.1 Zonificación

Con la finalidad de realizar un análisis detallado, es necesario crear una división por zonas de la región en cuestión, con la cual se garantice una recolección de datos detallada y por ende confiable para su posterior estudio. A grandes rasgos, se puede emplear el siguiente esquema de zonificación:

- ⇒ Ciudades principales.
- ⇒ Vías principales (tramos carreteros).

Con el fin de obtener un máximo aprovechamiento del tiempo disponible para los *drive test* y obtener información más precisa, las ciudades grandes que cuenten con una infraestructura celular considerable pueden dividirse en *subzonas*, con lo cual se puede hacer un análisis con más detalle.

Cabe mencionar que durante la realización del proyecto es factible agregar algunas zonas, siempre y cuando estas no impacten negativamente en los tiempos estimados para las mediciones.

5.2.2 Documentación

Un proyecto de benchmarking, debe estar totalmente documentado durante su desarrollo, con reportes ejecutivos semanales de actividades en los cuales se describa el estado general del proyecto, los logros, los planes para la semana siguiente y las sugerencias para que el trabajo se desarrolle con una mayor fluidez.

Por otra parte, se debe crear un *cronograma* de tiempos del proyecto, el cual se debe tratar de seguir lo más estrictamente posible en todas sus etapas, tomando en cuenta que se pueden tener retrasos significativos en la etapa de preparación, la cual se debe llevar a cabo con mucho cuidado, ya que aquí se puede arrancar un buen proyecto, o en el peor de los casos, se puede salir de las manos y fracasar.

5.3 Procedimientos de un Benchmarking

A continuación se presenta una descripción de los procedimientos necesarios para completar los objetivos del proceso de benchmarking:

5.3.1 Recolección de Datos

La recolección de datos durante un proceso de benchmarking se debe realizar de tal forma que se permita obtener una caracterización de las redes celulares tanto en enlace de bajada (de la estación base hacia la estación móvil) como en enlace de subida (de la estación móvil hacia la estación base). Para este fin se debe utilizar un equipo de medición de campo que cumpla satisfactoriamente con esta función.

La recolección de datos se debe efectuar con los recorridos durante la hora pico, en días de semana (Lunes a Viernes) y en horas de tráfico normal (8-9 AM a 7-8 PM), con el fin de evitar un comportamiento de tráfico celular anormal dentro de las redes.

5.3.2 Rutas

Para la realización de los recorridos se deben trazar rutas que permitan seguir un orden lógico de manejo de acuerdo con la ubicación de las zonas de interés, principales avenidas y zonas con alto tráfico celular fundamentalmente. De esta forma, se pretende aprovechar al máximo el tiempo y permitir un margen al final de las actividades de *drive test* por si fuese necesario la repetición de alguno de los recorridos o la realización de alguna zona adicional.

Es muy importante resaltar en que una avenida se debe recorrer una sola ocasión, y en un solo sentido. Además, se debe crear un cronograma para los *drive test* en el que se describa el tiempo estimado para recorrer cada zona.

5.3.3 Equipo de Medición

El equipo de medición, debe ofrecer la posibilidad de medir los enlaces de subida y bajada simultáneamente, de forma autónoma, ya que de esta forma los problemas en cada enlace de transmisión pueden aislarse con exactitud.

⇒ Medición del enlace de subida (uplink)

Para la medición del enlace de subida debe utilizarse un equipo de medición en tierra. Este equipo debe estar conectado a líneas fijas de la *red telefónica pública conmutada (RTPC)* reservadas para este propósito, para así evitar tener una medición del enlace de subida que sea afectada por condiciones ajenas a la red celular.

Este equipo puede constar básicamente de una PC y un procesador digital de señales, conectados a las respectivas líneas telefónicas fijas. El equipo debe realizar una medición de la calidad de audio del enlace de subida para los teléfonos celulares utilizados durante las pruebas, registrando todos los datos recolectados en un archivo para después ser post-procesados con programas (*software*) apropiados.

⇒ Medición del enlace de bajada (downlink)

Para la medición del enlace de bajada se utiliza un equipo de medición de campo. A este equipo conectan los teléfonos celulares. Este equipo debe estar conformado básicamente por un módulo electrónico que contenga las siguientes partes funcionales:

1. **Transceptor de llamadas:** Constituido por los módulos de llamada a los cuales están conectados los teléfonos celulares utilizados en las pruebas, y por un microprocesador que es el encargado de gobernar el control de la programación las llamadas.
2. **Receptor escáner:** Es la parte del módulo encargada de realizar las mediciones de intensidad de señal de las redes en análisis, tanto en canales de control como de voz.
3. **Sección de Navegación:** Esta sección es la que permite la recolección de datos geográficos de posición durante las pruebas. Debe constar de un equipo *GPS (Sistema de Posicionamiento Global)* y de una interfaz de conexión por medio de un cable de datos hacia una computadora portátil para la recolección de datos.
4. **Recolector de datos:** Adicionalmente el equipo de campo debe estar equipado con una computadora portátil, la cual realiza el almacenamiento de la información recolectada. Este equipo tiene también la función de gobernar los esquemas bajo los cuales se realicen las pruebas: tiempo de llamada, tiempo entre llamadas, tiempo para desconexión, protocolo de comunicación, etc.

5.3.4 Programa de Post-proceso

Para el post-proceso, se debe utilizar un programa de cómputo que manipule los datos recolectados con los equipos de medición, produciendo reportes estadísticos y mapas para un análisis del desempeño de las redes analizadas.

Con el software de post-procesamiento de los recorridos se debe hacer una relación de los datos recolectados en campo y en tierra, y de esta forma poder evaluar cobertura, calidad y estadísticas de llamadas en las redes analizadas.

5.4 Criterios de Análisis de Benchmarking

En un proyecto de benchmarking, el proceso de análisis siempre debe ser tendiente a comparar el desempeño de las redes en cuestión desde el punto de vista de un usuario.

Los criterios de análisis a abordar en el proceso de benchmarking para redes celulares móviles son:

1. Cobertura.
2. Calidad.
3. Resultados de llamadas.

Para lograr lo anterior, se deben utilizar dos teléfonos celulares para cada red, por los siguientes motivos:

Estación móvil para análisis de accesos: Debe ser una estación móvil programada para realizar llamadas de corta duración en las redes, con el objetivo de recolectar la máxima información posible de acceso:

- ⇒ Intentos totales de accesos.
- ⇒ Tiempo total en línea.
- ⇒ Tiempo promedio de acceso.
- ⇒ Llamadas normalmente terminadas.
- ⇒ Llamadas no exitosas por congestión en las estaciones base (*reorders*).
- ⇒ Llamadas no exitosas por congestión en interconexión con la *RTPC (fast busy)*.
- ⇒ Llamadas no exitosas por mala cobertura (*sin servicio*).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Las llamadas pueden ser programadas para durar de 30 a 90 segundos. Con esta duración se describe un comportamiento normal promedio de los usuarios, sin dar lugar a perder información de accesos. En redes con alta densidad de estaciones base es conveniente establecer tiempos cortos (30 seg) y así obtener mayor cantidad de información. Concluyendo, a medida que el número de estaciones base se incremente, este tiempo debe reducirse.

Estación móvil para análisis en línea: Debe ser una estación móvil programada para realizar llamadas de larga duración, permitiendo describir el comportamiento de las redes durante un tiempo estable de llamadas, para cubrir el criterio de análisis de calidad, siendo aquí de gran importancia las llamadas caídas.

Las llamadas deben ser programadas para durar de 300 a 600 segundos, debido a las siguientes consideraciones:

Se sugieren tiempos cortos de 5 minutos en zonas con baja densidad de estaciones base, ya que si una llamada se cae, es posible que sea generada nuevamente en un sitio cercano, y de esta forma no perder información sobre calidad y transferencia de llamada *handoff*.

Es importante tomar en cuenta que en redes duales *AMPS/IS-95* se realiza la transferencia de llamada de *IS-95* hacia *AMPS*, pero no de *AMPS* a *IS-95*. Si una llamada cambia de digital a analógico, ésta permanecerá como tal sin poder volver a *CDMA*, ocurriendo el mismo fenómeno cuando se genera desde un principio en *AMPS*. Por lo tanto, realizando llamadas cada 5 minutos, disminuye la probabilidad de que las llamadas se amarren a *AMPS* y por ende de perder información digital. Así, con este tiempo realmente se logra comparar el desempeño de redes digitales de diferente tecnología.

Cuando las ciudades son relativamente pequeñas, se requiere poco tiempo para recorrerlas. Por lo tanto, teniendo tiempos muy largos de llamadas se corre el riesgo de no detectar problemas en algunas zonas. Esta probabilidad se reduce programando llamadas con tiempos de 300 segundos, tomando en cuenta que este tiempo debe ser suficiente para analizar calidad y transferencia de llamada.

5.5 Presentación y Organización de Resultados del Benchmarking

Como se dijo anteriormente, las muestras recolectadas ya procesadas se deben presentar en dos formatos para su análisis:

- ⇒ Mapas.
- ⇒ Tablas estadísticas.

En este trabajo, se presentarán los mapas y estadísticas para un análisis de Benchmarking entre dos redes celulares duales, *AMPS / TDMA (IS-136)* y *AMPS / CDMA (IS-95)*, trabajando ambas redes únicamente en la banda de 800 MHz.

5.5.1 Mapas de Benchmarking

La forma más ilustrativa de plasmar los resultados de los recorridos y analizar la información recolectada es mediante mapas (*plots*) que deben contener básicamente la siguiente información:

- ⇒ Ruta recorrida en campo.
- ⇒ Muestras recolectadas del criterio a analizar.
- ⇒ Traza urbana de la ciudad, o en su caso, del tramo carretero.
- ⇒ Infraestructura de estaciones base y/o repetidores.

Para cada uno de los criterios de análisis deben presentarse un conjunto de mapas que permitan analizar y describir el comportamiento y estado de las redes. A continuación se describen los mapas sugeridos para emplearse en cada criterio de análisis.

5.5.1.1 Criterio de Cobertura para Análisis de Benchmarking

⇒ Mejor Servidor (Best Server) (AMPS y TDMA) (Canal de Control)

Proporciona la intensidad de señal del canal de control mejor servidor visto por el escáner. En otras palabras, nos muestra el canal de control analógico con la mayor intensidad de señal para un sistema y banda en específico, en una ubicación particular. Esta información es de gran utilidad para detectar las zonas donde no hay buena cobertura, con lo cual se puede recomendar la implantación de nuevos sitios, o la revisión del equipo hardware donde si los haya y se observe este problema.

Si el equipo de campo lo permite, es muy útil obtener el mejor servidor digital, información de gran valor, la cual además podemos comparar con el mejor servidor analógico, los cuales deben estar radiando con el mismo nivel de intensidad.

Se considera que se tiene pobre cobertura cuando el canal de control trabaja con niveles de intensidad de señal menores a -95 dBm.

⇒ RSSI (Received Signal Strength Indication) (AMPS e IS-136) (Canales de Voz)

Muestra la intensidad de señal en los canales de voz analógicos y digitales, ayudando a detectar posibles dispositivos de radio hardware con mal funcionamiento para su revisión. A su vez, complementándose con la información de mejor servidor, ayuda a detectar zonas con cobertura deficiente.

Podemos considerar que un radio tiene mal desempeño cuando se detecta que está trabajando con niveles de intensidad de señal menores a -95 dBm.

⇒ Canal Piloto más Fuerte (Strongest Pilot) (exclusivo para IS-95)

Sirve como equivalente de mejor servidor para las tecnologías AMPS e IS-136.

⇒ Huella (Analógico vs. Digital), Footprint (Redes Duales)

En redes duales, es muy útil conocer los porcentajes de ocupación de canales de voz de las mismas (analógico vs. digital), ya que la meta es siempre tratar de establecer una llamada en digital, lo cual no siempre se logra en redes saturadas, debido principalmente por la congestión en los canales de voz digitales. Es importante enfatizar que esta información refleja la ocupación digital contra la analógica, mas no la cobertura ni la infraestructura. Esta información nos da una buena referencia de la congestión digital, con lo cual se pueden detectar estaciones base que necesiten expansiones en canales de voz digitales, o zonas donde por tráfico sea justificable proyectar una nueva estación base.

⇒ Código de Atenuación de Voz Móvil, (VMAC) Voice Mobile Attenuation Code (AMPS y TDMA)

El VMAC es un código de referencia usado por la estación base para solicitarle ajuste de control potencia a la estación móvil. Esta información es de gran utilidad para observar la potencia de transmisión del teléfono, cuyos primeros efectos son las quejas de los usuarios acerca de la eficiencia de la batería, la cual se consume más o menos rápido dependiendo de la demanda de potencia que tengan las estaciones móviles.

5.5.1.2 Criterio de Calidad para Análisis de Benchmarking

5.5.1.2.1 Calidad Digital

⇒ Tasa de Bits Erróneos, (BER) Bit Error Rate (IS-136)

El *BER* es un indicador muy importante para evaluar la calidad de la comunicación digital. Por definición, el *bit error rate* es el porcentaje de bits erróneos en el enlace de transmisión, siendo una medida de la calidad de la señal digital.

⇒ Tasa de Tramas Erróneas, (FER) Frame Error Rate (IS-95)

El *FER* es el indicador de calidad digital para la tecnología *IS-95*. Se define como el porcentaje de tramas digitales recibidas con errores, debido a que el código de redundancia cíclica *CRC* no las verificó, existiendo bits corruptos en la trama.

5.5.1.2.2 Criterio de Calidad Subjetiva de Audio (Análogo y Digital)

⇒ Nota Media de Opinión (MOS) Mean Opinion Score, para el Enlace de Bajada (todas las tecnologías)

La calidad de audio es uno de los puntos más penalizados por un usuario, por lo tanto es de gran importancia saber las zonas donde dicha calidad es deficiente, para poder indagar en posibles problemas en la red, los cuales pueden ser de muy diversa naturaleza:

- ⇒ Problemas de cobertura deficiente.
- ⇒ Interferencias co-canal y/o de canal adyacente.
- ⇒ Plan de frecuencias mal diseñado.
- ⇒ Problemas de funcionamiento en equipo (*hardware*).
- ⇒ Problemas de diseño del enlace (*link budget*).
- ⇒ Frecuencias, SAT y DVCC mal asignados.

⇒ Nota Media de Opinión, (MOS) Mean Opinion Score, para el Enlace de Subida (todas las tecnologías)

El mismo objetivo del mapa anterior, complementando el análisis del cálculo del enlace (*link budget*) con el enlace de subida, los cuales deben estar balanceados para un desempeño eficiente de la red.

5.5.1.3 Criterio de Resultados de Llamadas para análisis de Benchmarking

Es de gran importancia conocer todos los eventos de llamadas que se pueden presentar durante los recorridos, ya que éste análisis se relaciona directamente con todos los anteriores, además de ofrecer información de posible congestión en las estaciones base, rutas de interconexión con la *RTPC* o en rutas adicionales (prepagado, mensajes escritos, buzón de voz, etc.).

Los tipos de terminación de llamadas que se pueden presentar al realizar los recorridos son los siguientes:

1. *Normal*. La llamada fue originada y completada como fue especificada en la configuración de programación del equipo, sin presentarse ninguna situación anormal, es el tipo de terminación ideal.

2. **Ans Term (terminación por el equipo en tierra).** La llamada fue terminada por el equipo en tierra. Esto pudo haber ocurrido por las siguientes razones:
 - ⇒ El cronómetro (timer) de llamada del equipo en tierra transcurrió, sin poder establecer comunicación con el equipo de campo.
 - ⇒ El programa fue terminado por el usuario.
 - ⇒ El equipo en tierra no reconoció la llamada entrante como generada por el equipo de campo.

3. **Caída.** La llamada fue terminada por pérdidas de la señal de radiofrecuencia entre la estación móvil y la estación base. Esto pudo haber ocurrido por las siguientes razones:
 - ⇒ Pérdida del SAT, o DVCC.
 - ⇒ Problemas en el canal piloto.
 - ⇒ Niveles bajos de RSSI.
 - ⇒ Transferencias de llamada no otorgadas o mal realizadas.
 - ⇒ Interferencia co-canal y/o de canal adyacente.

4. **Reorder (congestión en la estación base).** La llamada fue bloqueada porque el teléfono no se pudo comunicar con la estación base.

El *reorder* pudo haber ocurrido debido a que en la estación base no había canales de voz disponibles, en otras palabras debido a la congestión. También debido a problemas con el teléfono, porque la estación móvil fue incapaz de tomar un canal de acceso antes de un tiempo determinado.

El *reorder* también se pudo haber presentado debido a problemas en el medio de transmisión:

 - ⇒ Niveles bajos de RSSI.
 - ⇒ Asignación de muchas llamadas al mismo tiempo.
 - ⇒ Interferencia co-canal.
 - ⇒ Interferencia de canal adyacente.

5. **Fast Busy (congestión en interconexión con la RTPC).** La llamada fue bloqueada porque todas las trayectorias hacia o desde la estación base de una central en particular estaban ocupadas. Esta es una condición del sistema de conmutación, y pudo haber ocurrido por lo siguiente:
 - ⇒ Ocupación total de las troncales.
 - ⇒ Bloqueo del equipo.
 - ⇒ Código marcado no asignado.
 - ⇒ Registro incompleto de dígitos en la central.

6. **Sin servicio.** La llamada no pudo tener acceso a un canal de control. Esto pudo ser debido a las siguientes condiciones:
 - ⇒ No hay servicio celular en el área, o el servicio fue interrumpido temporalmente.
 - ⇒ Niveles muy bajos de RSSI.

7. **Busy (número discado ocupado).** La llamada fue terminada porque el teléfono recibió un tono de ocupado indicando que el número llamado estaba en uso. Esto también puede ser causado si ocurre una llamada caída, y la siguiente llamada es realizada antes de que el equipo en tierra cuelgue la llamada anterior.

8. **Tiempo de conexión excedido (TCE).** La llamada fue terminada porque no hubo contestación del equipo en tierra dentro del tiempo especificado en la configuración del equipo. Esto puede ocurrir por cualquiera de las siguientes razones:
 - ⇒ El equipo en tierra no fue llamado.
 - ⇒ La central de conmutación estuvo muy congestionada para enlazar la llamada en el tiempo asignado.
 - ⇒ La línea telefónica estuvo desconectada.
9. **Número máximo de reintentos (MNR).** La llamada fue terminada porque el número máximo de reintentos fue excedido. Este número es variable.
10. **Terminación intencional (TI).** La llamada fue terminada por la computadora portátil en campo. Esto pudo ocurrir porque:
 - ⇒ El ingeniero de campo (*drive tester*) finalizó manualmente la prueba.
 - ⇒ El ingeniero de campo suspendió manualmente la prueba.
11. **Canal de Voz.** La llamada fue terminada cuando ésta obtuvo un canal de voz (porque esto fue configurado para que sucediera en la configuración del equipo).
12. **Tono de error/voz.** La llamada fue terminada porque fue detectado un tono de voz externo o de error por el equipo en tierra.
13. **Tono de falla de sincronía.** La llamada fue terminada porque un tono de sincronización entre la estación móvil y el equipo en tierra fue perdido durante las pruebas de MOS de los enlaces de subida/bajada.
14. **Falta de corriente en la línea.** La llamada fue terminada porque se perdió corriente en la línea de la RTPC del equipo en tierra.
15. **Tono de marcación no detectado.** La llamada fue terminada porque no fue detectado el tono de marcado en el equipo en tierra.

⇒ Estadísticas de llamadas (todas las tecnologías)

Los resultados de llamadas más relevantes en un recorrido que deben ser incluidos en los mapas, y que son la base para detectar problemas en la red son los siguientes:

1. Normal.
2. Caída.
3. Reorder.
4. Fast busy.
5. Sin servicio.

⇒ Transferencia de llamada (handoffs), AMPS e IS-136

Esta información indica el comportamiento de la red en cuanto a transferencias de llamada (*handoffs*) para el análisis en línea. Una de las principales debilidades que puede presentarse en una red celular es la retenibilidad de llamadas, la cual es baja si están mal definidos los parámetros de *handoff* y las vecindades entre células.

⇒ Diferencia de Nivel de Señal en la Transferencia de Llamada (Delta Handoffs), AMPS e IS-136

Aquí podemos observar la diferencia del nivel de señal (en decibeles) entre los canales saliente y entrante durante los procesos de transferencia de llamada. Esta información es de gran utilidad para verificar el comportamiento del *handoff* y nos brinda la posibilidad de poder intuir problemas en el valor de los parámetros de *histéresis* que lo definen.

⇒ Transferencias de Llamada (Handovers) IS-95

Para un análisis de las redes CDMA también se debe presentar la actividad de sus transferencias de llamada.

5.5.2 Tablas Estadísticas de Benchmarking

Es muy útil e ilustrativo generar un conjunto de tablas que permitan saber el comportamiento de las redes para los criterios del análisis de benchmarking.

Estas tablas, contendrán los resultados condensados de la información recolectada tanto en campo como en tierra, los cuales nos darán una excelente referencia del estado de las redes, reportándonos sus puntos fuertes y sus debilidades, siendo estos últimos donde se requerirá un análisis más profundo de los resultados, con el objetivo de generar recomendaciones que sean útiles para mejorar el desempeño de la red.

5.5.2.1 Estadísticas de Cobertura para Análisis de Benchmarking

⇒ Estadísticas de Cobertura para AMPS e IS-136

La cobertura es medida monitoreando el RSSI para el enlace de bajada en los canales de voz y control. La estación móvil es capaz de medir el nivel de intensidad de señal de la estación base a la cual está amarrada. La clasificación subjetiva del RSSI se muestra a continuación en la tabla (5.1).

Cobertura (dBm)	Clasificación Subjetiva
≥ -75	Muy buena
$-85 \text{ a } < -75$	Buena
$-95 \text{ a } < -85$	Aceptable
≤ -95	Pobre

Tabla(5.1). Clasificación subjetiva para cobertura en AMPS e IS-136.

Teniendo esta clasificación subjetiva, podemos presentar los niveles de RSSI del canal de control que sea el mejor servidor en el tramo recorrido obtenidos por el scanner, tanto para la banda A como para la banda B en 800 MHz, mostrando el número total de muestras, su porcentaje y su acumulativo, tabla (5.2).

Zona	Operador Banda A			Operador Banda B		
	Muestras	Porcentaje	Acumulativo	Muestras	Porcentaje	Acumulativo
Muy buena	#	%	%	#	%	%
Buena	#	%	%	#	%	%
Aceptable	#	%	%	#	%	%
Pobre	#	%	%	#	%	%
Total	#	100%	100%	#	100%	100%

Tabla(5.2). Cobertura del Canal de Control.

Es muy útil e ilustrativo poder obtener información por separado del RSSI en los canales de voz y el mejor servidor de canal de control de la banda. Por un lado, el mejor servidor nos muestra la cobertura del sistema, y por otra parte el RSSI en los canales de voz nos muestra que tan bien o que tan mal los abonados experimentan el uso de la red, tabla (5.3).

Zona	Operador Banda A			Operador Banda B		
	Muestras	Porcentaje	Acumulativo	Muestras	Porcentaje	Acumulativo
Muy buena	#	%	%	#	%	%
Buena	#	%	%	#	%	%
Aceptable	#	%	%	#	%	%
Pobre	#	%	%	#	%	%
Total	#	100%	100%	#	100%	100%

Tabla(5.3). Cobertura de los Canales de Voz.

Analizando esta información, se pueden observar las zonas donde se requiera hacer una optimización. Si el mejor servidor está mostrando buenos valores y se tienen problemas en los resultados de llamadas, esto puede ser causado por varias situaciones:

- ⇒ Saturación de la estación móvil por exceso de potencia recibida.
- ⇒ Congestión en el sistema.
- ⇒ Malas o inexistentes definiciones de vecindades.
- ⇒ Deficientes umbrales de histéresis para transferencias de llamada.
- ⇒ Grandes diferencias en nivel de intensidad de señal entre canales de voz y control, debidas a malas definiciones de potencias o problemas de equipo (*hardware*) en las estaciones base.
- ⇒ Mala planeación y asignación de frecuencias, SAT, DVCC, etc., provocando caídas en el RSSI.

Es importante contar con estadísticas de niveles de cobertura promedio, los cuales nos dan un buen parámetro del desempeño de la red, tabla (5.4).

Datos de Cobertura	Operador Banda A	Operador Banda B
RSSI (en canales de voz) promedio	[] dBm	[] dBm
% tiempo para canales de voz con < -95 dBm	%	%
Estadísticas de canal adjacente (dB)		
Relación promedio (C - 1)	[] dB	[] dB
Relación promedio (C + 1)	[] dB	[] dB
% tiempo de relación de canal adjacente < 5 dBm		
Relación (C-1)	%	%
Relación (C + 1)	%	%

Tabla(5.4). Estadísticas de niveles de cobertura promedio.

⇒ Estadísticas de Cobertura para IS-95

En la tecnología IS-95, la cobertura es medida monitoreando la intensidad de señal del canal piloto como función de la densidad de interferencia total en la banda del operador, conocida como E_c/I_o . La estación móvil usa la E_c/I_o para comunicarse al sistema IS-95. La clasificación subjetiva de calidad del pilot más fuerte (*strongest pilot*) se muestra en la tabla (5.5).

Strongest Pilot (dB)	Clasificación Subjetiva
≥ -6	Muy buena
$-9 \text{ a } < -6$	Buena
$-12 \text{ a } < -9$	Aceptable
≤ -12	Pobre

Tabla(5.5). Clasificación Subjetiva para el Piloto más Fuerte.

Teniendo esta clasificación, podemos plasmar los resultados de las muestras obtenidas en campo en la tabla (5.6).

Zona	Strongest Pilot (Piloto CDMA)		
	Muestras	Porcentaje	Acumulativo
Muy buena	#	%	%
Buena	#	%	%
Aceptable	#	%	%
Pobre	#	%	%
Total	#	100%	100%

Tabla (5.6). Cobertura para una Red Digital IS-95.

⇒ Estadísticas de Ocupación Digital contra Analógica (Redes Duales)

En este punto del análisis es muy importante no confundirse entre ocupación y capacidad. En redes duales, se pueden tener estaciones base con el siguiente equipamiento:

1. Totalmente digitales.
2. Duales, con dispositivos digitales y analógicos.
3. Totalmente analógicas.

Tomando en cuenta que en un análisis de benchmarking se recorre la ruta una sola vez y en un solo sentido, en una estación base dual se puede presentar alguno de los siguientes casos de ocupación:

1. *La estación móvil inicia la llamada con un canal de voz digital.* Los teléfonos duales, siempre tratarán de tomar un canal de voz digital.
2. *La estación móvil inicia la llamada con un canal analógico.* Por ejemplo, si la red es dual AMPS/IS-136, los teléfonos pueden programarse para que trabajen con los estándares AMPS ó IS-136. La primer diferencia entre estos estándares es la modalidad del canal de control, siendo analógico y digital respectivamente. Teniendo un móvil programado en IS-136, siempre tomará un canal de control digital, pudiendo ocupar canales de voz digitales y analógicos, y siempre tratando de tomar un canal de voz digital. Sin embargo, si la red está muy congestionada y no encuentra ningún canal de voz digital disponible para iniciar la llamada, buscará entonces ocupar un canal de voz analógico.

Cuando una llamada ya está establecida, es factible que realice los siguientes tipos de transferencia de llamada (*handoff*):

1. Un intracell *handoff* (transferencia de llamada a un canal diferente del mismo sector).
2. Un *handoff* a otro sector de la misma célula.
3. Un *handoff* a otra célula.

Los casos de transferencia de llamada en analógico y digital que se presentan en redes duales son los siguientes:

1. *La llamada ya establecida con un canal de voz digital, realiza handoff permaneciendo en digital.* Estas transferencias de llamada se realizan por alguna de las siguientes causas:
 - ⇒ Niveles bajos de RSSI.
 - ⇒ Malos niveles de BER para IS-136 o de FER para IS-95.
2. *La llamada ya establecida con un canal de voz analógico, realiza handoff permaneciendo en analógico.* Estas transferencias de llamada se realizan por alguna de las siguientes causas:

- ⇒ Niveles bajos de *RSSI*.
 - ⇒ Malos niveles de *C/I*.
 - ⇒ Congestión en los canales de voz digitales.
3. La llamada ya establecida con un canal de voz digital, realiza handoff a analógico (IS-136 a AMPS o IS-95 a AMPS). Estas transferencias de llamada se realizan por alguna de las siguientes causas:
- ⇒ Niveles bajos de *RSSI*.
 - ⇒ Malos niveles de *BER* para IS-136 o de *FER* para IS-95.
 - ⇒ Congestión en los canales de voz digitales.
- ⇒ La llamada ya establecida con un canal de voz analógico, realiza handoff a digital (AMPS a IS-136). Estos handoffs se realizan por alguna de las siguientes causas:
- ⇒ Niveles bajos de *RSSI*.
 - ⇒ Disponibilidad de canales de voz digitales con buenos niveles.

Lo anterior nos indica que al llevarse una llamada en analógico, no significa necesariamente que la estación base tenga cobertura solamente analógica, siendo la congestión el principal motivo de esta ocupación. Por lo tanto, los resultados obtenidos en esta parte del análisis reflejan cómo se está ocupando el sistema, y no cómo está compuesta la infraestructura, tabla (5.7).

	AMPS	IS-136 ó IS-95
Operador A	%	%
Operador B	%	%

Tabla(5.7). Ocupación analógica vs. digital.

5.5.2.2 Estadísticas de Calidad para Análisis de Benchmarking

5.5.2.2.1 Estadísticas de Calidad Digital

Es muy difícil y no conveniente comparar dos tecnologías digitales analizando el *BER* y el *FER*. Una mejor alternativa es comparar la calidad de audio, sin embargo el *BER* y el *FER* son una buena medición para observar la calidad digital a cada operador por separado, sin realizar una comparación directa entre los sistemas.

⇒ Estadísticas de Calidad para IS-136

Los efectos del medio ambiente en la señal producen interferencia y elevan la *tasa de bits erróneos (BER)*, *bit error rate*. El *BER* se define como la tasa del número de bits incorrectos contra el número total de bits recibidos. La *clase de BER* representa al *BER* antes de cualquier corrección de errores en el enlace de bajada. El *BER* es calculado una vez cada 20 ms. Se consideran buenos niveles de *BER* cuando las muestras tienen valores de 3 o menores. La clasificación de los diferentes niveles de *BER* en clases subjetivas se muestra en la tabla (5.8).

Clase de BER	% BER	Clase Subjetiva
0	%BER < 0.01	Muy Buena
1	0.01 %BER < 0.1	Muy buena
2	0.1 %BER < 0.5	Buena
3	0.5 %BER < 1	Buena
4	1 %BER < 2	Aceptable
5	2 %BER < 4	Pobre
6	4 %BER < 8	Pobre
7	> 8 %BER	Muy Pobre

Tabla (5.8). Clasificación subjetiva del BER.

Por lo tanto, podemos plasmar los resultados obtenidos en campo con la tabla (5.9).

Zona	BER		
	Muestras	Porcentaje	Acumulativo
Muy buena	#	%	%
Buena	#	%	%
Aceptable	#	%	%
Pobre	#	%	%
Muy Pobre	#	%	%
Total	#	100%	100%

Tabla (5.9). BER, Calidad digital para IS-136.

⇒ Estadísticas de Calidad para IS-95

La calidad de voz para el sistema IS-95 es a menudo medida usando la tasa errónea de tramas FER (Frame Error Rate). FER se refiere al número de tramas recibidas con errores con respecto al total de tramas transmitidas. Sin embargo, en la práctica es frecuente que sólo se pueda medir el FER en el enlace de bajada. El nivel de FER en redes IS-95 que corresponde a una aceptable calidad de voz está dentro del rango de 2% a 3% o menor. La clasificación subjetiva de los diferentes niveles de FER se muestra en la tabla (5.10).

% FER	Clase subjetiva
%FER < 1	Muy Buena
1 %FER < 2	Buena
2 %FER < 3	Buena
3 %FER < 5	Aceptable
5 %FER < 10	Pobre
> 10 %FER	Muy Pobre

Tabla (5.10). Clasificación subjetiva del FER.

Aquí, podemos mostrar los resultados obtenidos con el equipo de medición con la tabla (5.11).

Zona	FER		
	Muestras	Porcentaje	Acumulativo
Muy buena	#	%	%
Buena	#	%	%
Aceptable	#	%	%
Pobre	#	%	%
Muy Pobre	#	%	%
Total	#	100%	100%

Tabla (5.11). FER, Calidad digital para IS-95.

5.5.2.3 Estadísticas de Resultados de Llamadas para Análisis de Benchmarking

Anteriormente se describieron todos los tipos de eventos de llamada que se pueden presentar cuando se realizan los recorridos en campo. Sin embargo, hay eventos que son más significativos que otros, y que reflejan claramente la calidad del desempeño de las redes. Dichos eventos, deben ser analizados con más detenimiento y con herramientas e información adicionales, para poder dar recomendaciones y sugerencias acertadas, las cuales dándoles un seguimiento adecuado realmente ayuden a mejorar la calidad del servicio de las redes. Los eventos más importantes que deben presentarse en una tabla de estadísticas de llamadas son los siguientes:

1. Normal.

Una llamada con terminación *normal* es el resultado ideal para un evento de llamada, cuando el usuario realiza su conversación íntegramente desde que la inicia, hasta que él decida terminarla. Con esta terminación se alcanza una de las metas de desempeño para la red: *la retenibilidad*.

Con un resultado de llamada normal se puede suponer que la red está trabajando de manera optima. Al decir suponer, estamos dando una conclusión la cual es obtenida de realizar un recorrido en una vía en la cual se maneja una sola ocasión y en un solo sentido.

2. Caída.

La mala cobertura de un sistema es reflejada inmediatamente en los resultados de llamadas, teniendo porcentajes significativos de llamadas caídas (*dropped*), las cuales son muy penalizadas por un usuario y deben de serlo también en un análisis de benchmarking.

Además de ser el primer reflejo de una zona con mala cobertura o interferencias, las llamadas caídas, nos dan la oportunidad de poder detectar posibles errores y olvidos en las definiciones de parámetros de radiofrecuencia:

- ⇒ Potencias mal definidas.
- ⇒ Vecindades no definidas.
- ⇒ Vecindades mal definidas.
- ⇒ Histéresis de transferencia de llamada (*handoff*) mal definidas.

Adicionalmente, pueden llegar a detectarse problemas de hardware en las estaciones base, específicamente en los casos cuando se lleva una llamada al pie de una estación base con niveles de señal muy bajos, lo cual no es normal.

3. Congestión en la Estación Base (Reorders)

Otro evento muy importantes son los *reorders*, que son causados por la congestión en las estaciones base. Los *reorders* se tienen que analizar con las estadísticas de tráfico generadas por los programas de medición de las centrales, los cuales nos deben de mostrar el tráfico máximo promedio que se está manejando en cada sector de las estaciones base, tanto en analógico como en digital, corroborando si realmente fue la congestión de la red celular la causante del evento.

4. Congestión en interconexión con la RTPC (Fast Busy)

También pueden llegar a presentarse frecuentemente *fast busy*, los cuales son causados principalmente por congestión en las centrales y en los enlaces de transmisión. Al igual que con los *reorders*, hay que realizar un análisis detallado del tráfico que está cursando la red, para recomendar, en dado caso de encontrar rutas congestionadas, expansiones en los enlaces.

5. Sin Servicio (No Service)

Un resultado de llamada muy común en tramos carreteros, es el evento llamado *sin servicio*, el cual nos indica que no hay cobertura en el tramo recorrido, con lo cual se debe sugerir la integración a la red de nuevos sitios. Dicha sugerencia, debe ser analizada por varias áreas de ingeniería, ya que se debe realizar una evaluación desde varios enfoques, desde la infraestructura necesaria para poder agregar una estación base a la red, el costo de la misma, hasta la importancia desde el punto de vista de mercadotecnia que tenga para la compañía el prestar o no el servicio en dicha zona.

En ciudades, no es muy común encontrar zonas con este tipo de resultados, los cuales únicamente se pueden llegar a presentar en lugares con una topografía muy accidentada, con zonas en donde los obstáculos naturales y los hechos por el hombre hacen muy difíciles las comunicaciones inalámbricas móviles.

Para dar un resumen general de los resultados de llamadas, es conveniente crear una tabla con estadísticas de los eventos anteriores, con el fin de presentar un estado de los resultados de llamadas más significativos, tanto para las áreas de ingeniería como para un usuario tabla (5.12).

Resultados de Terminación de llamadas	Operador Banda A		Operador Banda B	
	Número de Eventos	Porcentaje	Número de Eventos	Porcentaje
Normal	#	%	#	%
Caída	#	%	#	%
Reorder	#	%	#	%
Fast Busy	#	%	#	%
Sin Servicio	#	%	#	%
Total	#	100 %	#	100 %

Tabla (5.12). Estadísticas de llamadas.

5.5.2.4 Estadísticas de Calidad Subjetiva de Audio para Análisis de Benchmarking

En todos los sistemas de transmisión de voz, incluyendo la RTPC y las redes celulares, la meta es obtener la máxima calidad en la voz sobre un ancho de banda limitado. Hoy, una señal digitalizada puede ser reducida en ancho de banda con un codificador de voz (*vocoder*), que es un algoritmo de compresión que reduce la información redundante de la señal.

Ya que los codificadores de voz producen distorsiones que no están correlacionadas con la señal de audio, la única forma efectiva de evaluar la calidad de audio de un *vocoder* es escuchar la señal por medio del oído humano, el cual es un instrumento efectivo para determinar la degradación de una señal audible.

La *Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)*, *International Telecommunications Union*, ha propuesto métodos y procedimientos que conducen a una evaluación subjetiva de la calidad de audio en su recomendación *ITU-T P.800 "Métodos para la Determinación Subjetiva de la Calidad de Transmisión"*. Esta recomendación detalla diferentes métodos de medición de la calidad de voz transmitida.

Un método es la *Valuación de Categoría Absoluta (ACR)*, *Absolute Category Rating*, el cual produce un número conocido como la *Nota Media de Opinión (MOS)*, *Mean Opinion Score*. El método ACR consiste de un gran número de medidores que clasifican la calidad de conversaciones especialmente preparadas para este propósito. Las calificaciones subjetivas son transferidas a una escala numérica y el valor aritmético es el resultado de la calificación del MOS, tabla (5.13).

Calificación del MOS	Calidad de Voz
5	Excelente
4	Buena
3	Aceptable
2	Pobre
1	Mala

Tabla (5.13). Clasificación Subjetiva del MOS.

El Instituto de Ciencias de la Telecomunicación, ITS (Institute of Telecommunication Sciences) ha desarrollado un algoritmo, conocido como *Bloque Normalizado Medido (MNB)*, *Measured Normalized Block*, internacionalmente acreditado para desarrollar un algoritmo de clasificación de MOS para redes inalámbricas.

Basados en recorridos de campo, se recomiendan los siguientes rangos para la calificación del MOS, tabla (5.14).

Calificación Mínima	Calificación Máxima	Rango
3.75	5.0	Excelente
3.25	3.75	Bueno
2.75	3.25	Aceptable
2.25	2.75	Pobre
1.0	2.25	Malo

Tabla (5.14). Clasificación Subjetiva de la Calidad de Audio.

Por su parte, la recomendación ITU P.800 para calidad subjetiva de voz emplea una sola palabra para la definición.

A continuación se dan unas definiciones no oficiales:

Excelente	Perfecto.
Bueno	Una persona en la RTPC no reconocería que está hablando a un teléfono celular.
Aceptable	Una persona en la RTPC reconoce que está hablando a un teléfono celular, pero no le molesta.
Pobre	Degradación suficiente para molestarle al usuario de la red celular.
Malo	Degradación suficiente para colgar y llamar nuevamente.

⇒ Estadísticas de Nota Media de Opinion (MOS), Mean Opinion Score

Con esto, podemos mostrar los resultados obtenidos tanto para el enlace de bajada como para el de subida en la tabla (5.15).

Zona	Operador Banda A			Operador Banda B		
	Muestras	Porcentaje	Acumulativo	Muestras	Porcentaje	Acumulativo
Excelente	#	%	%	#	%	%
Bueno	#	%	%	#	%	%
Aceptable	#	%	%	#	%	%
Pobre	#	%	%	#	%	%
Malo	#	%	%	#	%	%
Total	#	100 %	100 %	#	100 %	100 %

Tabla(5.15). Calidad Subjetiva de Audio.

5.5.2.5 Estadísticas de Tiempos de Acceso para Análisis de Benchmarking

Otro punto muy importante para satisfacer a los usuarios es el *tiempo de acceso*, o también llamado *tiempo de establecimiento de llamada*, el cual es el tiempo transcurrido desde que se da la orden al teléfono para ejecutar la marcación "send", hasta que el móvil recibe el tono que le indica cualquier comunicación con la línea destino en la RTPC, sin importar el tipo de este tono:

1. Llamando.
2. Línea ocupada.
3. Enrutamiento hacia un sistema de contestación automática.

⇒ Estadísticas de Tiempo de Acceso Promedio (TAP)

Para el análisis de Benchmarking, el *tiempo de acceso promedio* será el tiempo transcurrido desde que el equipo de medición da la orden a la estación móvil para ejecutar la marcación "send", hasta que el móvil recibe el tono de respuesta del equipo de medición en tierra, con el cual confirma que el enlace es exitoso. Las estadísticas de tiempo de acceso máximo, promedio y mínimo se presentan en la tabla (5.16).

Tiempo de acceso	Operador Banda A	Operador Banda B
Mínimo	[] seg	[] seg
Promedio	[] seg	[] seg
Máximo	[] seg	[] seg

Tabla(5.16). Estadísticas de Tiempos de Acceso.

5.6 Propuesta de Evaluación de Calidad de Redes de Telefonía Celular de Diferentes Tecnologías

De acuerdo a las definiciones de calidad de servicio dadas por la UIT, y a los eventos de llamadas que pueden presentarse en un recorrido durante un Benchmarking, en este trabajo se propone calificar la calidad del servicio de una red telefónica celular móvil con las siguientes fórmulas (ecuaciones 5.1):

Accesibilidad

$$\text{Accesibilidad} = \frac{\text{Normal} + \text{AnsTerm} + \text{Caída} + \text{Busy} + \text{TCE} + \text{NMR} + \text{TI}}{\text{Total}} * 100$$

Servibilidad

$$\text{Servibilidad} = \frac{\text{Normal} + \text{Busy} + \text{TI}}{\text{Total}} * 100$$

Retenibilidad

$$\text{Retenibilidad} = 1 - \left(\frac{\text{Caída}}{\text{Normal} + \text{AnsTerm} + \text{Caída} + \text{TI}} \right) * 100$$

Ecuaciones (5.1). Fórmulas propuestas para evaluar la calidad de redes de telefonía celular.

Estas fórmulas, de acuerdo a las definiciones de la UIT, nos muestran la calidad del servicio que está ofreciendo el operador celular, con la única herramienta que tiene un usuario común, que es su teléfono, y las muestras que puede obtener con él, que son los resultados de llamadas.

A su vez, éstas fórmulas se pueden aplicar a cualquier operador celular, sin importar la tecnología que hayan elegido para prestar su servicio: AMPS, IS-136 ó IS-95; sin importar que la red sea analógica, digital o dual; sin importar que el ambiente sea rural o urbano y sin importar la marca y modelo del teléfono.

De acuerdo a lo anterior, es posible comparar la calidad del servicio de *n* operadores celulares que presten un servicio de telefonía celular móvil con la siguiente tabla (5.16):

<i>Calidad de Servicio Celular</i>	<i>Operador A</i>	<i>Operador B</i>	<i>Operador n</i>
<i>Accesibilidad</i>	%	%	%
<i>Serviabilidad</i>	%	%	%
<i>Retenibilidad</i>	%	%	%

Tabla(5.16). Evaluación de Calidad de Servicio Celular.

Capítulo 6. Conclusiones y Resultados

De la propuesta de Evaluación de Calidad de Servicio de Redes de Telefonía Celular presentada en este trabajo de tesis, se generan las siguientes conclusiones y resultados:

6.1 Desempeño de los Estándares de Telefonía Celular que Trabajan en México

Actualmente en nuestro país están en operación los siguientes tres estándares celulares:

- ⇒ AMPS.
- ⇒ IS-136 TDMA.
- ⇒ IS-95 CDMA.

Las primeras redes de banda A y banda B comenzaron operando hace poco más de diez con infraestructura totalmente analógica. Posteriormente, tras varios años de operar únicamente bajo esta modalidad, los operadores se vieron en la necesidad de comenzar a digitalizar sus redes con dos motivos principales:

1. Poder atender la cada vez más grande demanda de tráfico de voz.
2. Comenzar a ofrecer servicios digitales de valor agregado: buzón de voz y mensajes escritos cortos.

Además técnicamente hablando, AMPS tiene las siguientes desventajas contra los estándares digitales:

- ⇒ Espectralmente es el menos eficiente.
- ⇒ Su transferencia de llamada la menos eficiente, por lo que tiene una mayor probabilidad de presentar llamadas caídas por *handoffs* no exitosos.
- ⇒ Debido a que para tareas de supervisión usa el SAT, su administración más laboriosa, lo cual da pie a que se presente un mayor número de errores.
- ⇒ Las baterías de los equipos tienen menos tiempo de vida cuando trabajan en analógico.

Aunque el estándar analógico AMPS es el menos eficiente de los tres en varios aspectos, todavía compone un porcentaje muy importante de la infraestructura de los operadores que prestan sus servicios en las bandas de los 800 MHz en nuestro país, soportando el tráfico de los equipos móviles analógicos existentes aún en el mercado, ayudando también a la infraestructura digital cuando presenta congestión, lo cual ocurre muy frecuentemente.

Aunque el estándar IS-136 teóricamente ofrece menos capacidad que el estándar IS-95, se ha observado en pruebas de campo que la calidad del enlace de radiofrecuencia de las redes que trabajan con IS-95 se degrada considerablemente en condiciones de saturación de la red, lo cual no ocurre con IS-136. La clara desventaja de IS-136 es el hecho que siempre se tiene que estar optimizando el plan de frecuencias, lo cual se vuelve muy complicado para ciudades con una infraestructura de tamaño considerable, requiriendo para su elaboración muchos recursos económicos, de tiempo y humanos.

Una clara desventaja del estándar IS-136, la cual influye en que la *retenibilidad* de estas redes sea muy frecuentemente inferior a la de las redes IS-95, es el proceso de transferencia de llamada (*handoff*), que para la primer tecnología involucra un cambio de frecuencia, lo cual significa que por lo menos un instante durante la resintonización del equipo móvil este no estará sintonizado a ninguna de las dos

frecuencias, ni de la célula donante, ni de la célula receptora, lo cual incrementa la probabilidad de que esta transferencia no se lleve a cabo exitosamente. Este problema no existe en las redes IS-95, ya que en la transferencia de llamada, denominada en este caso *handover* o *handoff suave*, debido a que ambas células usan la misma frecuencia, el móvil está en contacto con ambas células durante este proceso.

De la experiencia obtenida en pruebas de mediciones en campo, se ha encontrado que las redes que emplean espectro esparcido tienen mejor calidad subjetiva de audio, obteniendo muestras de *Nota Media de Opinión (MOS) Mean Opinion Score*, con valores más altos que los obtenidos por redes IS-136. A su vez, las redes analógicas obtienen menor calidad subjetiva de audio que las redes digitales.

Por otra parte, a favor de la tecnología analógica, se ha observado que en condiciones de mala cobertura, las llamadas que se llevan a cabo en analógico presentan un mejor desempeño que las realizadas en digital, independientemente del estándar, ya que la degradación del audio de las llamadas llevadas a cabo en digital, hace imposible el entender una conversación con mala calidad, y la probabilidad de que el sistema corte la llamada es mayor.

6.2 Aplicación de la Teoría de Propagación y Radiofrecuencia en el Área de Diseño y Optimización de los Operadores Celulares en México

La teoría de propagación es muy importante para poder comprender el comportamiento que tienen en campo los equipos móviles, sin embargo en las empresas de telefonía celular de nuestro país no existe la cultura de capacitar a sus ingenieros de radiofrecuencia y optimización con cursos que sean cien por ciento teóricos.

Existen en el mercado una variedad de programas (*software*) de planeación, las cuales emplean los modelos teóricos descritos en el presente trabajo, y también en ocasiones emplean modelos híbridos propietarios, los cuales son una herramienta muy importante para las áreas de optimización y diseño de radiofrecuencia. Además, algunas de estas herramientas tienen la versatilidad de poder personalizar los modelos de propagación, dependiendo de las necesidades de los usuarios.

Aunque en la actualidad hay muchos desarrollos de estudios, pruebas y modelados de propagación para interiores, en nuestro país los operadores no realizan un análisis especial de planeación para estos casos, ni se utiliza un modelo de propagación diferente para macrocélulas y microcélulas, siendo hechas todas las predicciones con modelos para macrocélulas en exteriores. Sería muy conveniente realizar un estudio con las microcélulas por separado, con el fin de eliminar interferencias que se presentan por un mal diseño, y también con el fin de mejorar la ubicación de sitios nuevos, los cuales frecuentemente no se instalan en el lugar más adecuado.

Por otra parte, es importante enfatizar que para un buen desempeño de los programas de planeación, es de vital importancia realizar una buena calibración con mediciones realizadas en campo, lo cual permite hacer un ajuste entre las pérdidas por propagación obtenidas por el modelo teórico y las obtenidas en recorridos con el equipo apropiado. Cabe mencionar que los recorridos de medición son diferentes a los que se realizan en un benchmarking, ya que en las mediciones requeridas para la calibración no se requieren hacer llamadas, además que la velocidad debe ser muy controlada, ya que se deben recolectar la mayor cantidad de muestras de nivel de señal, para tener una buena caracterización de la cobertura que se tiene en la ciudad a calibrar. También es muy importante contar con bases de datos de topografía y morfología actualizadas, ya que debido al ágil crecimiento que tienen las ciudades en nuestro país corrigiendo.

6.3 Metodología de Evaluación de Calidad de Servicio de la Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL)

La metodología que emplea la *Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL)* está basada en un análisis estadísticos de llamadas, lo cual da un reflejo de cómo los usuarios perciben la calidad de la red. Sin embargo, su metodología no cubre por completo los conceptos de desempeño de la *ITU*, faltando la evaluación de *integridad*. Los parámetros de evaluación que usa la comisión son los siguientes:

1. Intentos de llamadas no completadas.
2. Llamadas caídas.
3. Tiempo de establecimiento de llamada.

La duración promedio de las llamadas es de 75 segundos, utilizando teléfonos con números pertenecientes a las modalidades de prepago y plan tarifario. Los horarios son de lunes a viernes, entre las 8 y las 20 horas, considerando únicamente llamadas locales, limitando el área de las mediciones al área de cobertura garantizada proporcionada por cada operador para cada ciudad en específico.

El periodo de análisis fijado es de 5 días, con llamadas de 60 y 120 segundos. La comisión propone una muestra semanal de 1825 llamadas por operador, por ciudad, la cual se obtiene realizando 365 llamadas diarias, con un espacio mínimo entre llamadas de 3 minutos, midiendo los tres índices de calidad ya mencionados. Adicionalmente, la *COFETEL* pide a los operadores que reporten estadísticas de sus centrales del monitoreo de los equipos adjudicados a las pruebas.

Como aportación, se sugiere que la metodología de evaluación de calidad de la *COFETEL* se complemente con mediciones del enlace de radiofrecuencia, para evaluar la calidad de la cobertura de las redes celulares, y tener un punto de evaluación adicional, lo cual hace más completa dicha metodología, y apoyaría a que la comisión realizara una evaluación más completa, apoyando a los operadores con sugerencias técnicas específicas para mejorar la calidad de su cobertura.

Se considera conveniente que además de evaluar con estadísticas de eventos de llamadas, la *COFETEL* realice evaluaciones de calidad subjetiva de audio con equipos apropiados, lo cual enriquecería las evaluaciones de la comisión, e incentivaría a los operadores a optimizar su red para además de tener buena cobertura, se tenga buena calidad de audio, lo cual implicaría que se destinaran mayores recursos humanos y económicos para optimizar.

6.4 Ejemplos de Mapas de Benchmarking

A continuación se presentan algunos ejemplos de mapas de Benchmarking, obtenidos de mediciones de campo realizadas en la zona de Polanco, en las cuales se evaluó el desempeño de los dos operadores de las bandas A y B que ofrecen su servicio en la ciudad de México (figuras 6.1 a la 6.8).

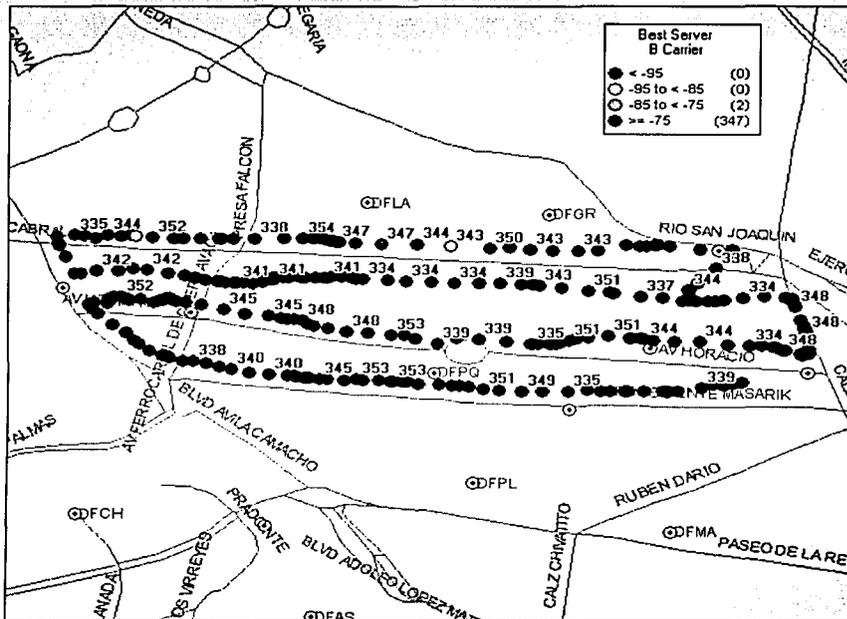


Figura 6.1. Mapa de Cobertura de Canal de Control Banda B.

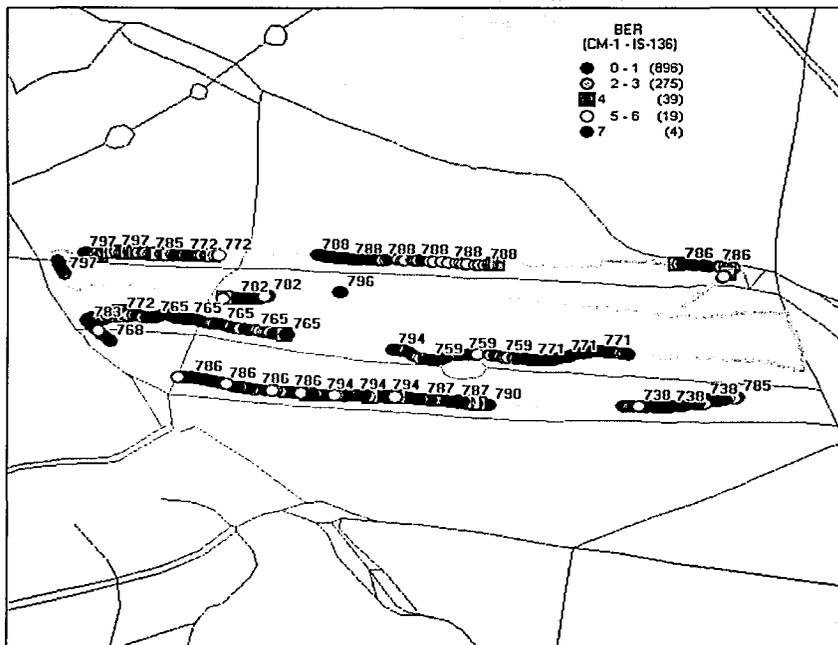


Figura 6.4. Mapa de BER para IS-136.

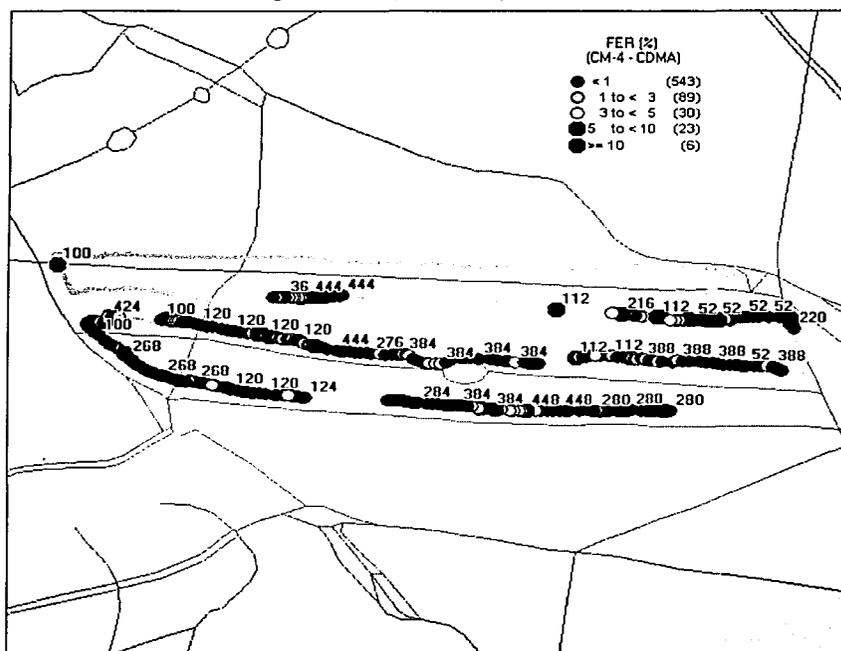


Figura 6.5. Mapa de FER para IS-95.

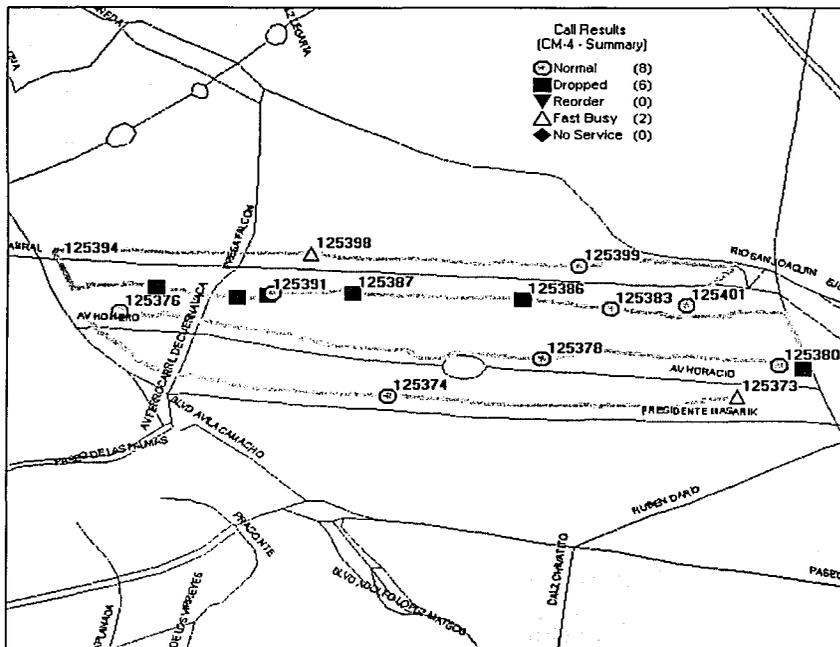


Figura 6.6. Mapa de Resultados de Llamadas.

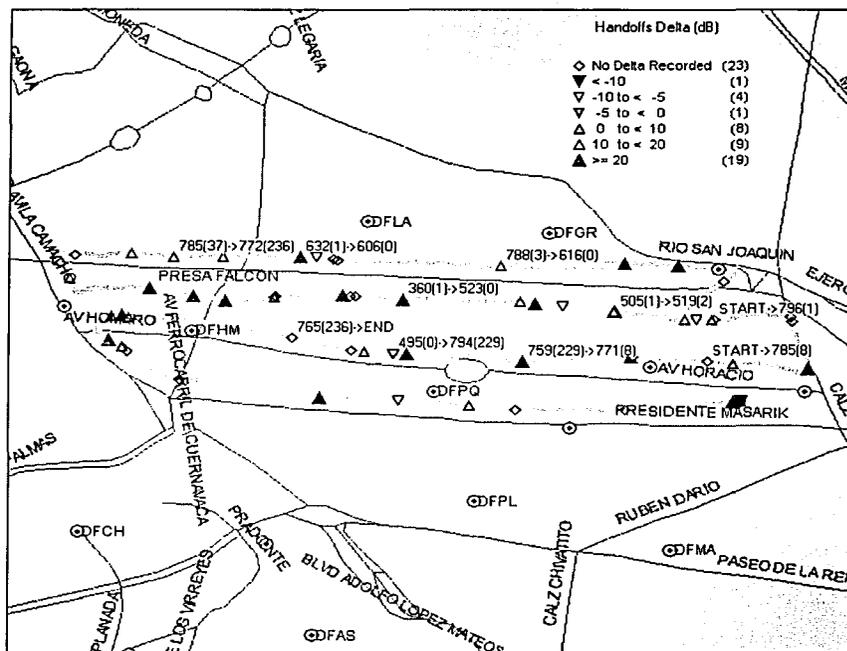


Figura 6.7. Mapa de Delta Handoff.

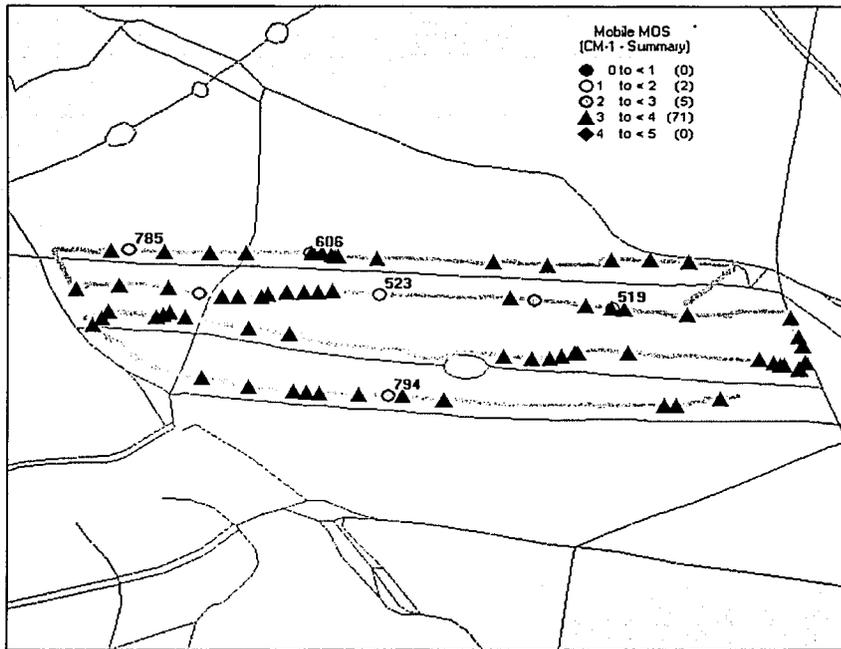


Figura 6.8. Mapa de Calidad de Audio Subjetiva MOS.

6.5 Ejemplos de Estadísticas de Benchmarking

A continuación se presentan estadísticas de Benchmarking, obtenidas de mediciones de campo realizadas en la totalidad del Periférico del Distrito Federal, en las cuales se evaluó el desempeño de los dos operadores de las bandas A y B que ofrecen su servicio en la ciudad de México (tablas 6.1 a la 6.4).

Módulo	Banda B (Prepago) Nokia 6120	Banda B (Postpago) Nokia 6161	Banda A (Prepago) Qualcomm QCP	Banda A (Postpago) Qualcomm QCP
Equipo				
Estándar	AMPS, IS-136	AMPS, IS-136	AMPS, CDMA	AMPS, CDMA
Banda de Frecuencia	800 MHz	800 MHz	800 MHz	800 MHz
Intentos Totales de Acceso	49	51	51	52
Tiempo Total en Línea	146.08	146.01	149.96	149.73
Estadísticas de Llamadas				
Tiempo de Acceso Promedio	14.42	14.55	16.00	14.18
Normal	41	41	50	51
Reorder	3	2	0	0
Fast Busy	0	2	0	0
Sin Servicio	0	0	0	0
Llamadas Caídas				
	5	4	1	1
MOS (Enlace de Bajada)				
Muy Bueno (>3.75)	53.68%	53.65%	61.06%	65.94%
Bueno (3.25 to 3.75)	28.95%	32.29%	26.99%	25.76%
Aceptable (2.75 to 3.25)	9.47%	6.25%	6.19%	3.49%
Pobre (2.25 to 2.75)	5.26%	1.56%	3.54%	1.31%
Muy Pobre (< 2.25)	2.63%	6.25%	2.21%	3.49%
MOS (Enlace de Subida)				
Muy Bueno (>3.75)	9.79%	12.76%	20.54%	19.43%
Bueno (3.25 to 3.75)	65.98%	72.96%	46.49%	53.08%
Aceptable (2.75 to 3.25)	12.89%	6.12%	21.62%	18.48%
Pobre (2.25 to 2.75)	2.58%	3.57%	5.41%	5.69%
Muy Pobre (< 2.25)	8.76%	4.59%	5.95%	3.32%

Tabla 6.1. Estadísticas de Llamadas y Calidad Subjetiva de Audio.

Utilización de Canales de Voz

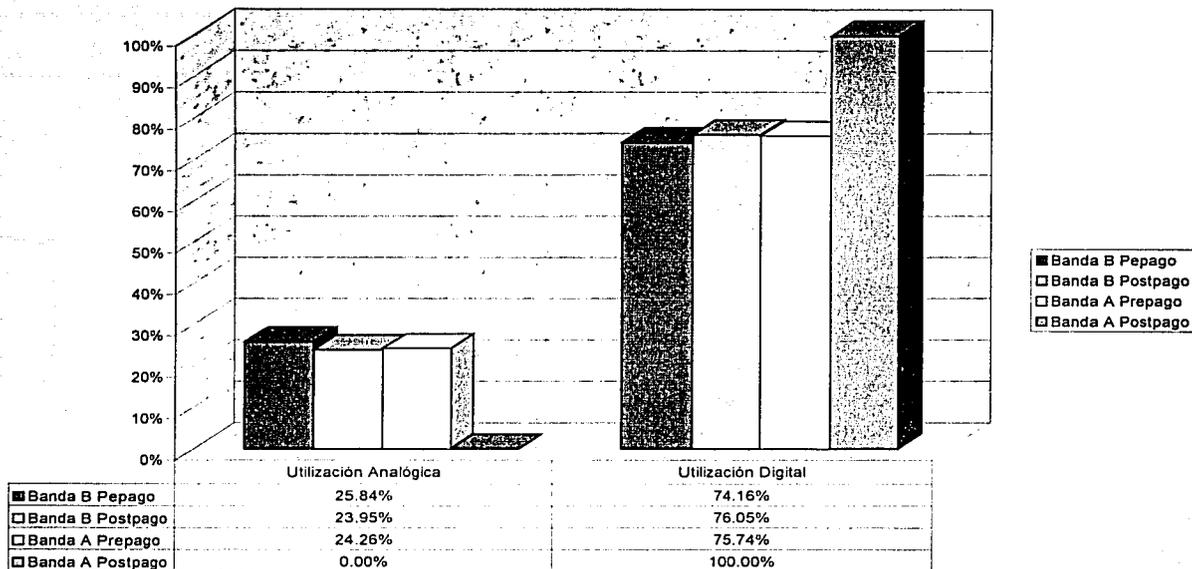


Tabla 6.2. Estadísticas de Ocupación Digital Contra Analógica.

Calidad

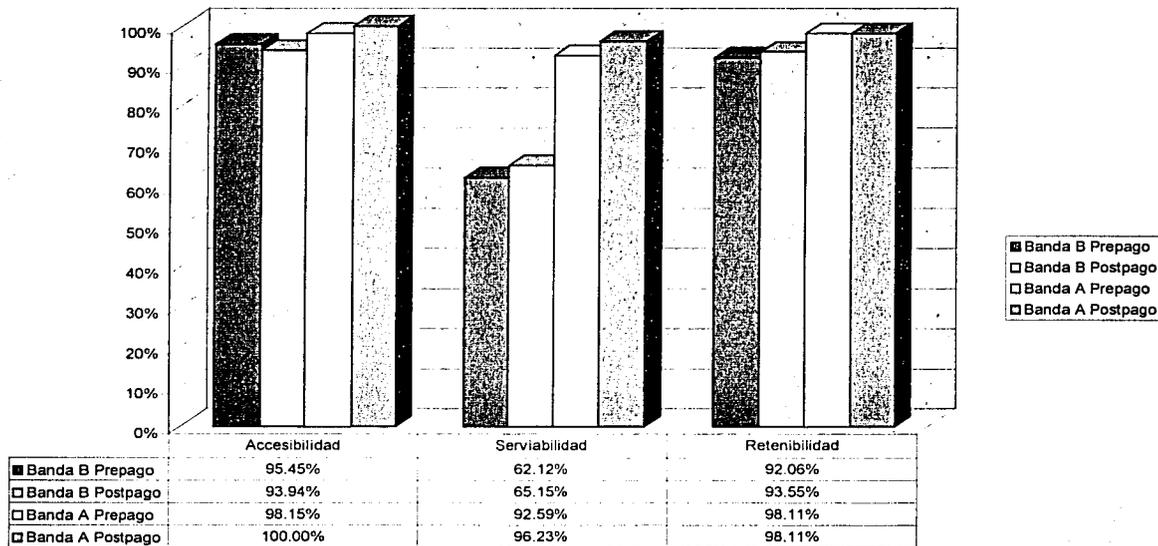


Tabla 6.3. Estadísticas de Evaluación de Calidad de Servicio Celular.

Tiempos de Acceso

	Banda B Prepago	Banda B Postpago	Banda A Prepago	Banda A Postpago
Mínimo	11.32	11.32	9.83	9.29
Promedio	14.42	14.55	16.00	14.18
Máximo	19.45	28.45	38.55	29.71

Tabla 6.4. Estadísticas de Tiempos de Acceso.

Bibliografía

Libros

1. **Wireless Communications Principles and Practice**
Rappaport, Theodore S.
Prentice Hall
1996
2. **Foundations of Mobile Radio Engineering**
Yacoub, Michel Daoud
CRC Press
1993
3. **Cell Planning for Wireless Communications**
Cátedra, Manuel F.
Pérez Arriaga, Jesús.
Artech House
1999
4. **Mobile Cellular Telecommunications Analog & Digital Systems**
Lee, William C.
2nd. Edition
Mc Graw-Hill, Inc.
1995
5. **IS-136 TDMA Technology, Economics and Services**
Harte, Laurence
Smith, Adrian
Jacobs, Charles A.
Artech House
1998
6. **CDMA RF System Engineering**
Yang, Samuel C.
Artech House
1998
7. **Understanding Cellular Radio**
Webb, William
Artech House
1998
8. **The Complete Wireless Communications Professional: A Guide for Engineers and Managers**
Webb, William
Artech House
1999

Manuales

9. RF Module
CMS 8800
Binder 1 of 3
Radio Network Design
001 52-EN/LZB 119 3739 Uae Rev B 1999-04-19
Ericsson Radio Systems AB 1999
10. RF Module
CMS 8800
Binder 1 of 3
Radio Network Performance
1/1551-EN/LZB 119 3744 Uae Rev 1999-03-15
Ericsson Radio Systems AB 1999
11. Metodología de Evaluación de la Calidad de Servicio de las Redes Móviles de Servicio Local para el Año 2001
Comisión Federal de Telecomunicaciones
2001

Artículos

12. Recent Advances in Cellular Wireless Communications
Zeng, M.
Annamalai, A.
Bhargava, Vijay K
IEEE Communications Magazine
Septiembre 1999
13. Time Division Multiple Access Methods for Wireless Personal Communications
Falconer, David.
Adachi, Fumiyuki.
Gudmundson, Björn.
IEEE Communications Magazine
January 1995
14. An Overview of CDMA Evolution Toward Wideband CDMA
Prasad, Ramjee
Ojanperä, Tero
IEEE Communications Surveys
Fourth Quarter 1998
Vol. 1 No. 1

Tutoriales en Internet

Web ProForum Tutorials
The International Engineering Consortium
<http://www.iec.org>

15. Cellular Communications

16. Time Division Multiple Access (TDMA)

17. Fundamentals of Telecommunications