

23

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE RADIOFRECUENCIA DE
UNA RED DE SERVICIOS DE
COMUNICACIÓN PERSONAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A N:
DANIEL REYES SÁENZ
GUILLERMO SALINAS GONZÁLEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
ING. MAURO CASTILLO COLLADO**

**CODIRECTOR DE TESIS:
DR. VICTOR GARCIA GARDUÑO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F., JULIO DE 2001



36



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.

*A ti Mamá, que siempre me tuviste paciencia y calma para enseñarme lo mas elemental,
que con cariño siempre has dado todo por nosotros, tus hijos,*

*A ti Papá, que con tu ejemplo me ayudaste a formarme y no importando lo que fuera
siempre estuviste dispuesto a sacrificarte por mis hermanos y por mí*

A ustedes Victor, Quique y Hugo, por todos los momentos que hemos pasado juntos,

A ustedes familia, que me han mostrado lo importante que es la unión y el apoyo,

A Guillermo, por nunca dejar de empujar para la realización de este trabajo,

*A mis amigos, que siempre han estado junto a mí, apoyándome en todo momento,
demostrándome que la amistad que me han ofrecido es para siempre,*

Con cariño a todos ustedes, gracias

Daniel

Dios Mío,
Gracias

A mi madre,
Por tus manos llenas de dulzura,
por impulsarme durante toda mi vida
a creer en mí.
Mil gracias Ma.

A mi abuelita,
Por tu esfuerzo cotidiano.
Porque sin tu ayuda no
hubiera sido posible este sueño.
Gracias Tita, te llevo en el corazón.

A la memoria de mi padre,
Gracias por haber sido tan
generoso con nosotros.
Hoy te extraño.

A mi esposa Nelly,
Gracias por ser mi inspiración, mi
compañera y amiga, quien en los
momentos de duda me alienta
para seguir adelante. Te amo

A mi hermano Rafa,
Por compartir la infancia.
Gracias por soportarme y
enseñarme a ser paciente.

A mi hermano Leo,
Al querer mostrarte el camino
me di cuenta que eras tú quién me
guiabas. Gracias Nano.

A mi mejor amigo Daniel,
Por tu gran apoyo y por compartir
este triunfo. Lo logramos
Gracias por todo.

A mis amigos, familiares y
maestros que me han brindado
su consejo desinteresadamente.
Gracias.

Guillermo

Al Ingeniero Mauro Castillo, nuestro asesor. Por su valiosa experiencia, su profundo conocimiento en la materia y mucha paciencia. Gracias

Al M.I. Luis Marcial quien nos inspiró profundamente, adonde quiera que se encuentre. Gracias

A la Universidad, que siempre hemos sentido como nuestra casa. El lugar donde algún día volveremos para aportar algo de lo mucho que nos dio.

Daniel

Guillermo

INTRODUCCIÓN	I
OBJETIVOS	II
RESUMEN	III
CAPÍTULO I	1
BREVE HISTORIA DE LA TELEFONÍA	1
1.1 DEL TELÉGRAFO AL TELÉFONO	1
1.2 LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	5
1.3 LA TELEFONÍA EN MÉXICO	16
CAPÍTULO II	26
RADIOPROPAGACIÓN	26
2.1 ANÁLISIS DEL ENLACE	26
2.2 MODELOS	29
2.2.1 EL MODELO DEL ESPACIO LIBRE	29
2.2.2 EL MODELO DE OKUMURA-HATA	30
2.2.3 EL MODELO DE LEE	32
2.2.3.1 Una condición estándar	32
2.2.3.2 Obtención de curvas de predicción área a área para estructuras humanas	33
2.2.3.3 La diferencia de fase entre una trayectoria directa y una trayectoria reflejada en tierra	35
2.2.3.4 La línea recta de la pendiente de pérdida de trayectoria	38
2.2.3.5 Fórmula general para propagación radio móvil	38
2.2.3.6 Pérdida por follaje	39
2.2.3.7 Propagación en distancia cercana	39
2.2.3.8 Propagación en grandes distancias	41
2.2.3.9 Obtención de la pérdida de trayectoria de un modelo de predicción punto a punto. Condición sin obstrucciones	42
2.2.3.10 Obtención de la pérdida de trayectoria de un modelo de predicción punto a punto. Condición con obstrucciones	43
2.2.3.11 Fórmula general del modelo de Lee	46
2.3 ENSOMBRECIMIENTO (SHADOWING)	47
2.4 DESVANECIMIENTO RAYLEIGH POR MULTITRAYECTORIA (MULTIPATH RAYLEIGH FADING)	48
2.5 DISPERSAMIENTO POR RETARDO DE MULTITRAYECTORIA (MULTIPATH DELAY SPREAD)	50

CAPÍTULO III 52

FUNDAMENTOS DE LA COMUNICACIÓN DE RF DIGITAL..... 52

3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA 54

3.2 CODIFICACIÓN DE FUENTE 55

3.3 CODIFICACIÓN DE CANAL 58

3.4 ACCESO MÚLTIPLE 59

3.4.1 CÓDIGOS DE WALSH 62

3.4.1.1 Generación de códigos de Walsh 62

3.4.1.2 Canalización usando códigos de Walsh 64

3.4.2 CÓDIGOS DE RUIDO PSEUDOALEATORIO (PN) 66

3.4.2.1 Generación de códigos pseudoaleatorios (PN) 66

3.4.2.2 Canalización usando códigos PN 68

3.4.2.3 Observaciones concluyentes 69

3.5 MODULACIÓN..... 70

3.5.1 MODULACIÓN BINARIA POR CAMBIO DE FASE (BPSK, BINARY PHASE-SHIFT KEYING)..... 71

3.5.2 MODULACIÓN EN CUADRATURA POR CAMBIO DE FASE (QPSK, QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYING)72

3.5.3 APLICACIONES EN EL SISTEMA IS-95 CDMA 74

CAPÍTULO IV..... 75

PRINCIPIOS DE LAS TÉCNICAS DE ACCESO..... 75

4.1 SISTEMA TDMA 77

4.1.1 IS-136..... 77

4.1.2 CARACTERÍSTICAS..... 78

4.1.3 ESTRUCTURA..... 78

4.2 SISTEMA CDMA 86

4.2.1 CAPACIDAD..... 87

4.2.1.1. Efectos de carga..... 89

4.2.1.2. Efectos de sectorización..... 90

4.2.1.3. Efectos de la actividad de voz..... 92

4.2.2 CONTROL DE POTENCIA 93

4.2.2.1 importancia del control de potencia 93

4.2.2.2 Pruebas de Acceso 96

4.2.2.3 Lazo abierto..... 97

4.2.2.4 Lazo cerrado..... 98

4.2.2.5 Implementación de lazo abierto y lazo cerrado..... 100

4.2.2.6 Enlace de Bajada..... 100

4.3.1 HANDOFF..... 101

4.3.1.1 El móvil en el handoff..... 104

4.3.1.2 El proceso de transferencia de la llamada..... 105

4.4.1 ESTRUCTURA DEL ENLACE 107

4.4.1.1 Enlace de Bajada..... 108

4.4.1.2 Enlace de Subida..... 115

4.5.1 PROCESAMIENTO DE LA LLAMADA 119

4.5.1.1 Estado de inicialización 121

4.5.1.2 Estado inactivo 122
 4.5.1.3 Estado de acceso 124
 4.5.1.4 Estado de canal de tráfico 126

CAPÍTULO V 129

DISEÑO DE LA RED DE RF 129

5.1 DISEÑO DE RF 129
 5.2 PARÁMETROS DE PROPAGACIÓN 132
 5.2.1 PÉRDIDAS 132
 5.3 HERRAMIENTA DE DISEÑO 134
 5.3.1 EL MODELO APLICADO 134
 5.3.2 ELEMENTOS EXTERNOS DEL MODELO 136
 5.3.3 CRITERIO DE ELECCIÓN 140
 5.3.3.1 General 140
 5.3.3.2 Análisis de propagación 140
 5.3.3.3 Modelo de tráfico 142
 5.3.3.4 Modelo de demanda 143
 5.3.3.5 CDMA 144
 5.4 ADMINISTRACIÓN DE DISEÑO 145
 5.4.1 ADQUISICIÓN DE SITIOS 145
 5.4.2 BASE DE DATOS 146
 5.5 COBERTURA 147
 5.5.1 OBJETIVOS DE COBERTURA 147
 5.5.2 LÍMITES DE COBERTURA 148
 5.5.3 DESPEJE DE BANDA 148
 5.6 PRUEBA DE CAMPO 149
 5.6.1 DEFINICIÓN 150
 5.6.2 PROCEDIMIENTOS 151
 5.6.2.1 Zonas 151
 5.6.2.2 Rutas 151
 5.6.2.3 Conexiones de Rx 152
 5.6.2.4 Muestreo 153
 5.6.2.5 Conexiones de Tx 154
 5.6.3 LA INTEGRACIÓN DE DATOS 156
 5.7 ANTENAS 158
 5.7.1 DEFINICIÓN 158
 5.7.2 GANANCIA DE LA ANTENA 161
 5.7.3 ANCHO DE HAZ 161
 5.7.4 VSWR 162
 5.7.5 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN 163
 5.7.6 POTENCIA MÁXIMA 165
 5.7.7 RAZÓN DE LÓBULO FRONTAL Y LÓBULO POSTERIOR 165
 5.7.8 INCLINACIÓN DE LA ANTENA 165
 5.8 DESARROLLO 166
 5.8.1 VERIFICACIÓN DE DESPEJE DE BANDA DE FRECUENCIA 166
 5.8.2 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS 167
 5.8.3 DISEÑO 168
 5.8.3.1 Selección del sitio 170
 5.8.3.2 Estudio de campo 171

5.8.3.3 Anillos de búsqueda 172
5.8.3.4 Resultados..... 174

CONCLUSIONES..... 175

APÉNDICE A..... 192

REFERENCIAS..... 194

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS..... 195

Introducción

Desde la década pasada, la implementación de las comunicaciones inalámbricas en Norteamérica, Europa y en general en el mundo ha sido exponencial. La tecnología que soporta las comunicaciones inalámbricas ha evolucionado a lo largo de un camino lógico, desde unos productos analógicos simples, de primera generación diseñados para el uso exclusivo de negocios, transformándose en sistemas de telecomunicaciones inalámbricos digitales de segunda generación que incluyeran ambientes residenciales. De igual manera, en México se ha visto el crecimiento acelerado en esta década de las comunicaciones inalámbricas y por ello uno de los fines del presente trabajo es emplear los conocimientos adquiridos en los sistemas que se desarrollan en nuestro país para comprender mejor las soluciones tecnológicas.

Mientras la industria planeó e implementó la segunda generación de redes digitales alámbricas a mediados de los 90's, surgieron las redes de información inalámbrica. Estos sistemas de comunicación ya comenzaban a ganar cierto mercado en la telefonía pero seguían siendo exclusivos para algunos sectores muy específicos de la población.

Desde el año pasado y ahora en este, hemos visto algunos sistemas que son celulares en frecuencias nuevas (1.9GHz) y otros que incluyen servicios nuevos como correo electrónico, vídeo, etc. Para finales de este año, los sistemas de la verdadera tercera generación ofrecerán aplicaciones multimedia con un alto ancho de banda que se tornarán los más importantes en las telecomunicaciones.

Pero ¿Cuáles son estos sistemas? ¿Acaso son sistemas con nueva tecnología? ¿O simplemente en frecuencias más altas? La respuesta al nuevo tipo de sistemas es que no es solo una nueva tecnología ni más ancho de banda ni una frecuencia alta, simplemente es la unificación de muchos de ellos ya existentes con los nuevos sistemas de comunicación, es el concepto de un enfoque hacia el usuario final que le permita a este ver al mundo de sistemas que hay en su entorno como uno solo, y por lo tanto, comunicarse desde el lugar donde se encuentre a cualquier otra parte. A este concepto se le ha denominado Sistema de Comunicación Personal.

“Los Servicios de Comunicación Personal (PCS, *Personal Communication Services*), permitirán a todos los usuarios transferir de una manera económica cualquier forma de información

entre dos lugares cualesquiera deseados”¹. La nueva red se construirá sobre y con una interfase entre primera y segunda generación (que antes estaban separadas) de servicios celulares e inalámbricos pero a diferencia de sistemas anteriores los PCS incluirán sistemas alámbricos de diferentes tipos según la necesidad del usuario y de los sistemas que ya existen tales como las redes de fibra óptica, sistemas de televisión privada por cable, Redes de Área Local (LANs), etc.

Como se puede observar, el concepto de PCS abarca múltiples sistemas y sería imposible escribir en una sola tesis las características de todas las tecnologías de los diferentes sistemas porque sería demasiado extenso. Se pueden contar al menos 15 tecnologías que mencionamos en el capítulo uno de esta tesis, tan solo de sistemas inalámbricos. Para hacer el concepto fácil de manejar, nos enfocaremos en la historia de un sistema sustentado por una tecnología y analizaremos sus características, veremos como se diseña dicho sistema bajo el punto de vista de la ingeniería de radio frecuencia, esta tecnología es el Acceso Múltiple por División de Código y el sistema que soporta para nuestro caso será uno en la banda de 1.9GHz para servicios PCS.

Objetivos

La presente tesis tiene como objetivo general ejemplificar la creación de los Servicios de Comunicación Personal para esta nueva era y lo que el fenómeno de los PCS significa para México y el mundo (los perfiles de otras compañías y tecnologías se pueden consultar en muchas fuentes públicas pero creemos que la tecnología CDMA es la más representativa para su momento).

Y tiene como objetivo específico demostrar el proceso que se lleva a cabo para diseñar un sistema CDMA desde el punto de vista de la cobertura o propagación de las señales de Radio Frecuencia o RF que las estaciones base proporcionan a las estaciones móviles, así como ejemplificar que un método llamado Prueba de Campo es la mejor forma de retroalimentación para el buen diseño del modelo de propagación.

¹ Garg, Vijay K., Wilkes, Joseph E. *Wireless and Personal Communications Systems*. E.E.U.U. Prentice Hall PTR, 1996

Resumen

Para llevar a cabo los objetivos de cualquier demostración en la ingeniería, se deben tener conocimientos de antecedentes históricos y de principios básicos sobre ese campo en específico. El campo que abordamos en esta tesis es el de las comunicaciones. En el capítulo 1 hacemos un breve repaso de lo que han sido los medios de comunicación básicos que nos proporcionan bases sólidas para darnos cuenta como ha evolucionado el hombre en este campo y además, nos permite saber hacia donde vamos. Este capítulo habla de la evolución del telégrafo, del teléfono y de su aparición en América Latina. Habla del desarrollo de los sistemas inalámbricos en todo el mundo y en nuestro país, de los sistemas que se desarrollarán en el futuro, así como de la forma en que están siendo distribuidos hoy en día entre las diferentes compañías que existen en México.

El capítulo 2 se enfoca a las características de propagación de la señal puesto que este conocimiento nos permitirá contar con elementos suficientes para definir otros aspectos tales como cobertura deseada y niveles con que llegará la señal en determinados lugares; inicia con el análisis del enlace entre transmisor y receptor y prosigue con un análisis de las pérdidas de trayectoria que sufre la señal al viajar en el ambiente, esto se estudia desde el punto de vista de 3 modelos de propagación, modelo del espacio libre, el modelo de Okumura-Hata y el modelo de Lee, haciendo un estudio mayor en este último. Finalmente se termina el capítulo con la mención de fenómenos que impactan principalmente en un ambiente móvil como desvanecimiento Rayleigh por multitraectoria (*multipath Rayleigh fading*), y dispersamiento por retardo de multitraectoria (*Multipath delay spread*) que influyen en la propagación de la señal.

En el capítulo 3, nos enfocaremos a algunas de las características fundamentales en comunicación digital, particularmente a las aplicaciones de RF tal como radio móvil digital. Nos acercaremos al tema desde una perspectiva de sistema. Particularmente, trataremos el objetivo en términos de subsistemas y diagramas de bloque que llevarán funciones específicas en el esquema general de mover información desde el transmisor al receptor. Nos adentraremos a cada uno de los bloques que conforman el sistema y en cada uno se hará mención de las características que corresponden al sistema CDMA. Sobre todo se hará hincapié en la parte correspondiente a acceso múltiple donde se analizarán las características correspondientes a códigos de Walsh y de ruido

pseudoaleatorio (PN, *Pseudorandom noise*), elementos clave que forman junto con las características de este bloque las diferencias esenciales frente a otros sistemas.

En el capítulo 4 podemos adentrarnos en las tecnologías dominantes de esta época y que serán la base de la tercera generación. El modo de acceso por división de tiempo será el primero en considerarse por su rápido crecimiento y apoyo considerable por grandes compañías como *AT&T*. Sin embargo, nos enfocaremos al modo de acceso por división de códigos y sus características que le dan ventaja en el manejo del espectro como capacidad y control de potencia. Hablaremos de dos puntos muy importantes y que definen a un sistema celular: la movilidad y la estructura del enlace entre la estación móvil y la estación base. En cuanto a la movilidad describimos como es que no se interrumpe la comunicación mientras el teléfono cambia de posición y porque es posible inclusive enviar datos como un facsímil por ejemplo, aunque exista el proceso de transferencia o “*handoff*”. En cuanto a la estructura de los enlaces se abundará en la asimetría de ellos y en cada uno de sus canales y sus funciones específicas. Para finalizar este capítulo mas que nada descriptivo de la tecnología y de los estándares, hablamos del proceso de una llamada, sus etapas y subestados específicos dependiendo como sea su evolución. Todo este análisis le permitirá al ingeniero que diseñe la red celular un mejor conocimiento de la ubicación de las células para responder a problemas comunes como conocer con exactitud la altura de las antenas, sin embargo hace falta el reconocimiento del ambiente real, esto es, en ningún libro o computadora existe una base de datos que indique como se comporta la señal en una ciudad en un área en específico En ellos, solo existen modelos de prueba y error que necesitan retroalimentarse con datos reales y esto es de lo que tratará nuestro capítulo siguiente.

En el capítulo 5 se habla del diseño de RF de una red celular. Por cierto se asemeja mucho al título de la tesis ya que nosotros, los autores, consideramos que es la parte medular de todo sistema celular y demostraremos que, si existe un buen diseño desde el principio, la red no solo será estable sino muy productiva económicamente ya que se podrá aumentar la capacidad de usuarios de manera constante y sin inversiones fuertes posteriores.

Comenzamos con un modelo que se crea para el comportamiento de las ondas de radiofrecuencia en una área específica. Se retoma pero de forma práctica un modelo de propagación que estudiamos en el capítulo 2. Analizamos su funcionamiento, estudiamos las partes que lo forman, como los tipos de suelo, la herramienta que lo ejecuta, el objetivo del diseño que es la cobertura, el método de recolección de datos y finalmente el elemento principal que conduce la

señal de radio: la antena, de la cual se debe tener conocimiento de sus parámetros porque finalmente serán los que se implementen para el funcionamiento real del diseño.

En resumen, se estudia en este capítulo la forma en que se diseña una red celular desde el punto de vista de RF y se vislumbra una metodología que produce un diseño apropiado para cualquier red telefónica inalámbrica.

Finalmente concluimos nuestro trabajo haciendo énfasis en los sistemas de tercera generación y la aplicación de los procedimientos de diseño que se usaron en los elementos de segunda generación modificados para los nuevos conceptos que las nuevas tecnologías nos exigen. Así como una visión de los servicios que los sistemas de comunicación personal son capaces de proveer, demostrando así que: la evolución en la tecnología afecta directamente al usuario final y por ende tiene sentido.

CAPÍTULO I

Breve historia de la telefonía

1.1 Del telégrafo al teléfono

La historia de la voz a distancia comienza desde que el hombre ha querido comunicarse a distancias lejanas. Se puede decir que Francis Bacon predijo el teléfono en 1627, sin embargo en su libro *Utopía* solo describía un tubo de gran longitud por el que se podía hablar.

El descubrimiento y aplicación de la electricidad representó un cambio en las comunicaciones con un nuevo estilo. En 1729, el químico inglés, Stephen Gray transmitió por primera vez electricidad por medio de un cable. Más tarde Musschenbroeck y Kleisten en 1746 desarrollaron el Frasco de Leyden,¹ llamado así por la ciudad holandesa donde se inventó, éste era un tipo de condensador o batería que almacenaba electricidad estática. Este invento se usó a través de los años en diversos experimentos como fuente de energía eléctrica.

En 1753, el físico Charles Morrison sugirió en la Revista de Scott que la electricidad podría transmitir mensajes². En 1800, finalmente Alessandro Volta produjo la primera batería; esta, produjo corriente eléctrica continua de manera sostenida, aunque con un costo elevado. En 1820, el físico danés Christian Oersted³ en su salón de clase en la Universidad de Copenhague demostró que la corriente eléctrica producía un campo magnético al acercar una brújula a este y desviar la aguja; y Michael Faraday (1791-1867)⁴ en 1821 invirtió el experimento de Oersted creando una corriente en un alambre que se movía alrededor de una fuente magnética permanente.

¹ Kelly, *Leyden Jar* [en línea]; Description and construction Enero 2000. <<http://www.alaska.net/~natnkell/leyden.htm>> [Consulta: Marzo 2000]

² Farley, Tom, *Telephone History Series* [en línea]; Telephone History since Graham Bell Septiembre 1999. <<http://www.privatelinc.com/TelephoneHistory/HistoryI.htm>> [Consulta: Marzo 2000]

³ De Silva, Clarence, *Biography of Hans Christian Oersted*. [en línea]. Cover Story, Abril 1997. <<http://www.mac-med.com/M%26C%20FILES/04maccs.html>> [Consulta: Marzo 2000]

⁴ Symons, Lenore *Michael Faraday 1791-1867*. [en línea]; Institution of Electrical Engineers Agosto 1997 <<http://www.ice.org.uk/publish/faraday/faraday1.html>> [Consulta: Marzo 2000]

No fue hasta 1830 cuando Joseph Henry (1797-1878)⁵ transmitió la primera señal eléctrica un poco antes de haber inventado el electromagneto, pero lo relevante de Henry recae en descubrir la capacidad del electromagnetismo de comunicar. En una impresionante demostración en su Academia de Albany, Henry creó el antecesor del telégrafo; y no obstante no inventó un código de señalización, ayudó a Samuel Finley Breese Morse (1791-1872)⁶ a crear uno.

En 1837 Samuel Morse inventó el primer telégrafo funcional, pidió su patente en 1838 y le fue otorgada en 1848. Joseph Henry ayudó a Morse a construir un repetidor para el telégrafo que permitiera largas distancias. La telegrafía se convirtió en un gran negocio porque desplazó a los mensajeros.

Charles Bourseul⁷ escribió en 1854 acerca de la transmisión del habla por un medio eléctrico. En su artículo, el inventor e ingeniero describía un disco flexible que establecería y rompería una conexión eléctrica para reproducir el sonido. Y por último tenemos a Johann Phillip Reis⁸ quién completó el primer teléfono, que no obstante no funcionaba creó el concepto al llamarlo teléfono, del griego “hablar a lo lejos”. Este físico alemán y maestro de escuela, utilizó un corcho, una aguja de tejer, una cubierta de salchicha y una pieza de platino para transmitir cortos de música y otros sonidos. El método, sin embargo, era incorrecto porque el invento de Reis solo funcionaba cuando los sonidos eran suaves para que el contacto con el transmisor del circuito permaneciera conectado.

En 1870 los inventores se enfocaron en encontrar mejoras para el telégrafo pero Graham Bell y Elisha Gray estaban decididos a una comunicación que no fuera punto a punto sino con capacidad de “multiplexaje” a otros usuarios.

Elisha Gray fue un inventor profesional nacido en 1835 en Barnesville, Ohio. Fue una persona educada que estudió en el Colegio de Oberliny y sobretodo alguien que enfocó sus esfuerzos al telégrafo. Su primera patente de este, fue en 1868. Experto en electricidad funda la

⁵ Rothenberg, Marc. rothenbergm@osia.si.edu *JOSEPH HENRY* [en línea]: Smithsonian Institutional History Division. Octubre 1997. <<http://www.si.edu/organiza/offices/archive/ihd/jhp/index.htm>> [Consulta: Marzo 2000]

⁶ The Lemelson MIT Program's Invention Dimension. *Samuel F.B. Morse*. [en línea]: Inventor of the Week. Enero 2000 <<http://web.mit.edu/invent/www/inventors/I-Q/morse.html>> [Consulta: Marzo 2000]

⁷ Oberlies, Rolf *History of Telecommunications from 1874 to 1930* [en línea]: Fachhochschule für Technik Esslingen, Germany <<http://www.fht-esslingen.de/telehistory/1870-.html>> [Consulta, Marzo 2000]

⁸ Naughton, Russell *Adventures in Cybersound* [en línea]: Scientists and Engineers. Trabajo de Post-Doctorado. Diciembre 1999 <http://www.cinemedia.net/SFCV-RM11-Annex/naughton/REIS_BIO.html> [Consulta: Marzo 2000]

compañía de equipo telegráfico llamada *Gray and Barton*, la cuál en 1872 cambió su nombre a *Western Electric Manufacturing Company*. Aquí se vislumbra que para Gray la transmisión del habla no era tan importante como lo fue para el maestro Bell, pues Elisha ya creía en el telégrafo más que en nada.

Alexander Graham Bell (1847-1922) por otra parte, un maestro de sordomudos en Quebec, era quien realizaría el invento del siglo. Bell nació en Edinburgo, Escocia, de familia envuelta en la música y en la palabra hablada para sordos. Hay una frase que dijo Graham alguna vez que resume su perfil de educación: “Ahora me doy cuenta que nunca hubiera inventado el teléfono si hubiera sido un electricista. ¿Qué electricista hubiera sido tan tonto para intentar tal cosa? la ventaja que yo tuve fue que el sonido ha sido el estudio de mi vida: el estudio de las vibraciones”. Enseñó a los sordos el sistema de lenguaje visual durante el día y durante la noche se la pasaba trabajando en un proyecto que nombró el telégrafo musical.

El sistema elemental que fabricó lo patentó bajo el título “Mejoramiento de transmisores y receptores para telégrafos eléctricos”. También patentó otro avance llamado: “Mejoras a la telegrafía”. Al mismo tiempo Bell profundizó sus investigaciones para perfeccionar la transmisión de la voz humana, aunque estos sistemas no funcionaban como él quería. Fue entonces cuando trabajó en un dispositivo muy burdo llamado *fono autógrafo* hecho de la oreja de un hombre muerto. Hablarle al dispositivo provocaba que la membrana del oído vibrara y esto se convertía en un movimiento de palanca. Entonces especuló, ¿sería posible utilizar una membrana en la telefonía para que variara la intensidad de una corriente eléctrica con el sonido del habla? dicha membrana podría entonces replicar el habla de nuevo en otro lugar. Bell había descubierto el principio de la telefonía, la teoría de la resistencia variable⁹.

En la primavera de 1875, ya con la ayuda de Thomas A. Watson, buscó consejo y el primero de marzo conoció a Joseph Henry en Washington D.C. a quien confesó que temía no poseer los conocimientos necesarios para desarrollar su invento y Henry simplemente le contestó: pues obténgalos¹⁰. Bell estuvo escribiendo como podría hacerse la transmisión de la voz humana aunque no pudiera construir el dispositivo todavía y el 14 de Febrero de 1876 su abogado llenó la patente aunque esta no viniera acompañada de un modelo operando. Esto fue tan solo unas horas antes que la forma presentada por Elisha Gray. Finalmente, el 10 de marzo del mismo año, obtuvo la patente y

⁹ Brooks, John *Telephone The First Hundred Years*. New York: Harper and Row, 1975. p. 45-48

al ir perfeccionando su invento utilizó un líquido transmisor, algo que no había incluido en su patente pero que sí lo había descrito Gray en el suyo.

Mediante este sistema su ayudante llamado Thomas Watson, quien diseñó la caja, sólo recibía señales audibles muy débiles por lo que, para reforzarlas, se le ocurrió aumentar la densidad de la pila eléctrica y le agregó el líquido que era ácido sulfúrico, parte del ácido se derramó y le quemó la pierna: “*Mr. Watson, come here, I want you.*” Watson escuchó el llamado con insólita claridad... el teléfono había nacido.

Bell solicitó la patente 178399, el 8 de abril de 1876, para su invento al que llamó “Receptores telegráficos telefónicos”, pero se la concederían hasta el 6 de junio por el problema con Gray. A pesar de ello, el 10 de mayo de 1876, en la Academia de Artes y Ciencias de Boston, Bell presentó y demostró su sistema y sus fundamentos científicos, ganándose la admiración de todos. Tiempo después, ya con la patente, el 12 de febrero de 1877, Bell llevó a cabo la primera comunicación de larga distancia y habló por teléfono desde Boston, a través de una línea telegráfica, con un periodista que estaba en Salem a 25 kilómetros de distancia.

George W. Coy construyó, en New Haven, la primera central telefónica, con una veintena de clientes. Así surgió la *Bell Telephone System Co.*, que posteriormente se convertiría en la *National Bell Telephone Company*.

Pronto ingresó a la compañía Francis Blake, quien en 1882 introdujo el transmisor Blake, éste hacía que los teléfonos de Bell utilizaran potencia en la línea. El llamado circuito de batería local utilizaba una batería en el teléfono para energizar la línea y mandar la voz al conmutador local, esto permitía una comunicación bastante más clara. Éste fue el detonador para que el teléfono adquiriera popularidad en las grandes ciudades de Estados Unidos y algunas de América Latina.

En Europa el impacto fue inmediato. En Gran Bretaña se instaló una central telefónica y luego el servicio pasó a ser monopolio gubernamental, situación similar a la que se produjo en Francia y Alemania.

A partir de entonces el avance no cesó, la vida del ser humano había cambiado, al fin lograba rebasar con su voz las distancias.

¹⁰ Gibson, Stephen W. *Cellular Mobile Radiotelephones*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987

1.2 Las tecnologías inalámbricas

El sueño del hombre por comunicarse a largas distancias no cesó en los teléfonos alámbricos sino que pensó en un aparato que no importando donde estuviera pudiera comunicarse. Esto incluye movimiento, cambio de un país a otro y hasta en el agua o espacio.

En lo que se refiere al uso comercial de una tecnología inalámbrica, *AT&T* introdujo el primer servicio telefónico inalámbrico en los Estados Unidos el 17 de junio de 1946 en San Luis, Missouri. El sistema operaba con 6 canales en la banda de 150MHz con un espacio entre canales de 60KHz y una antena de 250W de potencia. Este sistema se utilizó para interconectar usuarios móviles (usualmente autos) con la red telefónica pública, permitiendo así, llamadas entre estaciones fijas y usuarios móviles. Un año después, el servicio telefónico inalámbrico se ofreció en más de 25 ciudades de los EE.UU. y unos 44,000 usuarios en total aunque por desgracia había 22,000 más en una lista de espera de cinco años.

Este sistema telefónico inalámbrico se basa en la transmisión de una Frecuencia Modulada (FM, por sus siglas en inglés). La mayoría de estos sistemas utilizaban un solo transmisor muy poderoso para proveer cobertura a más de 50 millas desde la base. Los canales telefónicos móviles de FM evolucionaron a 120KHz del espectro para transmitir la voz con un ancho de banda de 3KHz. Aunque se esperaban mejoras en la estabilidad del transmisor, en la figura de ruido del receptor, y en el ancho de banda del receptor.

La demanda para el servicio de telefonía móvil creció rápidamente y permaneció por detrás de la capacidad disponible en muchas de las ciudades de gran tamaño. Es increíble que a pesar de la demanda hayan pasado más de 30 años para cubrir las necesidades de telefonía móvil. La capacidad del sistema era menor que el tráfico que tenía que soportar, por ello, la calidad del servicio era terrible, las probabilidades de bloqueo eran del 65% o más altas. La inutilidad del teléfono móvil disminuyó la frecuencia de su uso ya que los suscriptores encontraron que era mejor prevenir que se cortara la llamada no hablando en horas pico. Los usuarios y las compañías telefónicas se dieron cuenta que un conjunto de canales no sería suficiente para desarrollar un servicio telefónico móvil útil. Se necesitarían grandes bloques del espectro para satisfacer la demanda en áreas urbanas o mejorar la tecnología que hacía posible el servicio.

En 1949, la Comisión Federal de Comunicaciones de los EE.UU. o FCC por sus siglas en inglés (*Federal Communications Commission*) dispuso más canales y la mitad se los dio a la compañía *Bell System* y la otra mitad a compañías independientes como la RCC o *Radio Common Carriers*, con la intención de crear la competencia y evitar los monopolios.

Fue a mediados de los 50 cuando se creó el primer equipo para viajar en auto de menor tamaño. Esto sucedió en Estocolmo, en las oficinas centrales de Ericsson, pero no fue sino 10 años después cuando los transistores redujeron el equipo en peso, tamaño y potencia para poder introducirlos al mercado.

Es aquí donde nace el concepto de célula. Un sistema maneja la cobertura de radio mediante un número grande de transmisores de baja potencia en vez de un solo transmisor como los de radio y televisión. Estos transmisores crean áreas pequeñas de cobertura llamadas células. Cuando el usuario sale del área de cobertura de una célula entonces se hace la transferencia de la llamada o *handoff* (ver capítulo 4) mediante un control central. Una vez que el sistema tiene los usuarios que ocupan todos sus recursos se hace un crecimiento del sistema dividiendo el área de una célula en otras células con un área de cobertura más pequeña.

En 1956, la *Bell System* comenzó a dar servicio en los 450MHz, que era una nueva banda para tener una mayor capacidad. En 1958, la *Richmond Radiotelephone Co.* mejoró su sistema de marcado conectando rápidamente las llamadas de móvil a móvil¹¹.

A mediados de los 60's la *Bell System* introdujo el Servicio Telefónico Móvil Mejorado (IMTS por sus siglas en inglés) con características mejoradas, incluyendo marcación directa. Las mejoras en el diseño del transmisor y del receptor permitieron una reducción en el ancho de banda del canal de FM de 25KHz a 30KHz. IMTS mostró la viabilidad fundamental de un canal de FM de banda angosta, interconexión automática, y otras características clave más modernas.

¹¹ McDonald, Ramsey. "Dial Direct" *Automatic Radiotelephone System* IRE Transactions on Vehicle Communications, Julio, 1958, p. 80-81

A finales de los 60's y principios de los 70's el trabajo comenzó con los primeros sistemas de telefonía celular. El término celular como ya se mencionó, se refiere a dividir el área de servicio en muchas pequeñas regiones (células) cada una servida por un transmisor de baja potencia con una altura moderada de la antena. Una característica importante de estos sistemas era el que las frecuencias no eran reutilizadas en células adyacentes para evitar interferencia. La *Bell System*, en enero de 1969, aplicó por primera vez el rehúso de frecuencias en un servicio comercial para teléfonos públicos de la línea del tren de NY. a Washington, D.C. Para desarrollar este sistema se utilizaron 6 canales en la banda de 450MHz en nueve zonas a lo largo de una ruta de 225 millas¹².

Se debe reconocer que la primera generación de radio celular analógico no fue una nueva tecnología pero si una nueva idea: reorganizar la tecnología existente IMTS a gran escala.

Mientras que las comunicaciones de voz utilizaron la misma Modulación en Fase que se había estado usando desde la II Guerra Mundial, dos mejoras importantes hicieron el concepto celular realidad. A principios de los 70's se inventó el microprocesador; aunque los complejos algoritmos de control se implementaban en lógica con cables, el microprocesador hizo más fácil la vida de todos. La segunda mejora fue en el uso de un enlace de control digital entre el teléfono móvil y la estación base (o sitio celular como sería llamada más tarde). En IMTS, la estación base transmite un tono de desocupado o *idle* para informar a un teléfono móvil que el canal esta en modo *idle*. El teléfono móvil en turno transmite pulsos de marcado utilizando tonos y transmite su propia identificación ID como un número de cuatro dígitos. Esta transferencia de poca información entre la estación base y el teléfono móvil limita severamente los servicios disponibles a los usuarios.

En el servicio celular, los canales se asignaron para intercambiar datos entre la estación celular en ambos sentidos usando transmisiones de datos digitales. Ahora, el teléfono móvil podía funcionar como una línea telefónica alámbrica, y se podían ofrecer verdaderos servicios telefónicos a las personas en automóviles y transeúntes en las calles de la ciudad.

No fue sino hasta marzo de 1977 cuando la FCC aprobó que la *Bell System* probara un sistema celular en Chicago¹³.

¹² Paul, C.E. *Telephones aboard the Metro liner*. Bell Laboratories Record. Marzo 1969, p.77.

En 1978, en EE.UU. comenzó a operar el Servicio Telefónico Móvil Avanzado o AMPS por sus siglas en inglés (*Advanced Mobile Phone Service*). En ese año, 10 células cubrían 21,000 millas cuadradas en el área de Chicago, operando en las nuevas frecuencias en la banda de 800MHz. Esta red utilizaba circuitos integrados de gran escala o LS por sus siglas en inglés (*Large Scale*), una computadora dedicada y un sistema de conmutación, lo que probó que los sistemas celulares podían funcionar.

El desarrollo de AMPS fue muy rápido, un sistema comenzó a operar en mayo de 1978 en Arabia Saudita, otro en Tokio en diciembre de 1979 y el primero en nuestro país en 1981. Entonces, surgió por parte de la FCC otro requisito de competencia. Un proveedor de servicio celular tenía que coexistir con la *Bell System* en el mismo mercado (Bandas A y B); por ello *Ameritech* entró en Chicago el 12 de octubre de 1983.

AT&T desarrolló otro modelo junto con *Motorola* conocido como Sistema de Comunicaciones de Acceso Total o Dyna-TACS o TACS por sus siglas en inglés (*Total Access Communications System*), el cual se puso en marcha en Baltimore y en Washington D.C. por la compañía *CellularOne* el 16 de diciembre de 1983.

Otro estándar que surgió fue el de AURORA-400 que operó en Canadá en febrero de 1983 utilizando equipo de *GTE* y *NovAtel*. Este sistema llamado descentralizado operaba en los 420MHz y utilizaba 86 células, funcionando mejor en áreas rurales por su poca capacidad pero amplia cobertura.

En Europa, el sistema celular Telefonía Móvil Nórdica o *Nordic Mobile Telephone System* NMT450 inició operaciones en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega en el rango de 450MHz. En 1985, la Gran Bretaña empezó a usar TACS en la banda de 900MHz. Más tarde, Alemania Occidental implementó C-Netz, Los franceses Radiocom 2000, y los Italianos RTMI/RTMS. Todos ellos ayudaron a que hubiera nueve sistemas incompatibles en Europa, a diferencia de los EE.UU. que no sufrían de este problema. Desde aquí los europeos pensaron en un plan para crear un sistema digital único.

En los Estados Unidos, la decisión de la FCC de requerir un estándar con el fin de crear un servicio que permitiera al usuario moverse entre regiones en cualquier sistema en el país sin tener que adquirir un nuevo aparato para cada región donde operara una compañía diferente, resultó en el

¹¹ Young, W.R. *Advanced Mobile Phone Service: Introduction, Background, and Objectives*. Bell System Technical

rápido desarrollo de los sistemas celulares, a esto se le llamó servicio viajero o *roaming*. A diferencia de Europa, ya que en este continente varias naciones construyeron sus propios sistemas incompatibles entre sí. De la misma forma, Japón construyó su propio sistema celular.

Por ello, alrededor del mundo, existen por lo menos 5 estándares celulares de primera generación incompatibles. Cada uno de esos estándares depende de la modulación en frecuencia y de señales analógicas para la transmisión del habla y de la señalización para mandar la información de control entre una Estación Móvil (MS por sus siglas en inglés) y el resto de la red durante una llamada. En la tabla 1.1 se resumen algunas características de dichos sistemas de primera generación:

Parámetros del sistema	Norte América (AMPS)	R.U. (TACS)	Península escandinava (NMT)	Alemania Oriental (C450)	Japón (NTT)
Frecuencias de Transmisión (MHz) Estación Base Estación Móvil	870-890 825-845	935-960 890-915	463-467.5 453-457.5	461.3- 465.74 451.3- 455.74	870-885 925-940
Espacio entre frecuencia de transmisor y receptor	45 (MHz)	45(MHz)	10 (MHz)	10 (MHz)	55 (MHz)
Espacio entre canales	30 (MHz)	25(MHz)	25 (MHz)	20 (MHz)	25 (MHz)
Número de canales	666/832	1000	180	222	600
Radio de cobertura por una estación base (Km)	2-25	2-20	1.8-40	5-30	5 urbano 10 suburb.
Señal de audio Modulación Máxima desviación de frecuencia (Khz.)	FM ±12	FM ±9.5	FM ±5	FM ±4	FM ±5
Control de señales Modulación Máxima desviación de frecuencia (Khz.)	FSK ±8	FSK ±6.4	FSK ±3.5	FSK ± 2.5	FSK ±4.5
Tasa de Transmisión de datos (Kbps)	10	8	1.2	5.28	0.3
Control de error en canales de control	Se usa el principio de decisión por mayoría	Se usa el principio de decisión por mayoría	Se fijan niveles predeterminados de acuerdo al contenido del mensaje	El mensaje se envía otra vez cuando se detecta un error	La señal transmitida la revisa el transmisor en lazo cerrado

Tabla 1.1

Para ejemplificar el desarrollo del mercado, la industria celular creció de menos de 204,000 suscriptores en 1985 a 1,600,000 en 1988 en EE.UU.

A finales de los 80's el interés emergió hacia los sistemas celulares de tipo digital, donde ambos, la voz y el control fueran digitales. El uso de tecnología digital para reproducción de discos compactos popularizó la calidad del audio digital. La idea de eliminar el ruido y proveer el habla clara hasta los límites de cada área de servicio fueron atractivos para los ingenieros y usuarios comunes.

Debido a que ya había un estándar nacional en los Estados Unidos, con *roaming*, el empuje por los sistemas digitales de segunda generación no fue tan fuerte en este país como lo fue en Europa y Japón quienes desarrollaron sus sistemas de comunicaciones móviles digitales de segunda generación utilizando nuevas bandas de frecuencias; mientras que los estándares de Norteamérica especificaban compartir las bandas de frecuencia con los sistemas celulares analógicos ya exitosos.

Hablando específicamente, los estándares Norteamericanos permiten la coexistencia con el estándar de la primera generación, el Sistema de Telefonía Móvil Avanzado (AMPS), y agregan una capacidad de transmisión de voz digital hecha por equipo nuevo de formato digital.

La investigación europea para telefonía celular digital comenzó en el Reino Unido y Suecia a principios de los 80's. En 1985, la CEPT (*Conference Europeene des Postes et Telecommunications*) comenzó la estandarización de la segunda generación de teléfonos celulares. Los estándares celulares digitales se publicaron por primera vez en el Reino Unido en 1987. Estos estándares nacionales especificaron parámetros asociados con la frecuencia de operación, potencia de transmisión y espectro, e interconexión con la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC), pero dejando las interfaces de radio abiertas a los fabricantes ya que no había especificaciones de interfaz de aire comunes. El debate continuó acerca de los méritos relativos de diferentes soluciones técnicas con Suecia empujando por una solución de Acceso Múltiple por División de Tiempo o TDMA por sus siglas en inglés (*Time Division Multiple Access*).

En Enero de 1988, la CEPT se decidió por los nuevos estándares Europeos basados en el método '*Time Division Multiple Access/Time-Division Duplex/Multiple Carrier*' (TDMA/TDD/MC) operando justo abajo de la frecuencia de 2GHz, después conocida como el

estándar DECT por sus siglas en inglés (*Digital European Cordless Telecommunications*). DECT se creó para soportar datos y comunicaciones de voz.

En 1988, con la formación del '*European Telecommunications Standards Institute*' (ETSI), la responsabilidad de DECT de la estandarización se cambió al subcomité 3 de Sistemas y Equipo de Radio o RES por sus siglas en inglés, de la ETSI. En agosto de 1992, la DECT se convirtió en un estándar de las Telecomunicaciones Europeas ETSI 300-175. La DECT ha garantizado la colocación de frecuencias pan-europeas soportadas por los miembros de la ETSI y reforzadas por la Comisión Europea Directiva 91/287.

En 1990, el sistema celular en EE.UU. agregó una nueva característica, el tráfico de la voz se convirtió en digital. El IS-54 o AMPS digital (TD-AMPS) fue el primer estándar celular digital de modo dual. Se sobrepuso al NAMPS de *Motorola* que incrementaba la capacidad por medio de dividir los canales de voz de 30KHz a 10KHz.

El IS-54 separa las llamadas por tiempo, poniendo partes de diferentes conversaciones en la misma frecuencia. Esto triplicó la capacidad con el muestreo, digitalización y multiplexaje de las conversaciones; a esta técnica se le llamó Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA). Sin embargo, IS-54 continuaba con rutinas analógicas para iniciar las llamadas. El IS-54 ya incluía el proceso de autenticidad que, se puede decir, es la bala de plata en contra de los fraudes.

Para 1991, el servicio celular digital comenzó a emerger reduciendo el costo de las comunicaciones inalámbricas y mejorando la capacidad de manejar llamadas de los sistemas celulares analógicos.

Por otra parte, en 1989 surge GSM, primero conocido como Grupo Especial Móvil y luego como Sistema Global para Comunicaciones Móviles aunque la C no aparece en sus siglas. Este sistema también se basa en un acceso por división de tiempo y su logro principal fue la unificación de los países europeos bajo este estándar digital. Más de 120 países hoy en día tienen un sistema GSM operando en ellos.

Desde 1993 los sistemas se estaban desbordando de usuarios en EE.UU., estos crecieron de medio millón en 1989 a más de trece millones en 1993. En 1994, *Qualcomm, Inc.* propuso un escenario de espectro disperso para incrementar la capacidad. Construido en conocimientos anteriores, el Acceso Múltiple por División de Código o CDMA por sus siglas en inglés (*Code Division Multiple Access*), sería en todos sus elementos digital, además de que prometía de 10 a 20 veces mayor capacidad. En estos días más de la mitad de los teléfonos en el mundo operaban de acuerdo a los estándares de AMPS, y en su inicio más humilde nadie pensó que sería el que conviviría con TDMA o CDMA para obtener sistemas duales con tecnología analógica y digital. La tabla 1.2 resume algunas de las características técnicas de los sistemas digitales de segunda generación.

Sistema País	IS-54 EE. UU.	GSM Europa	IS-95 EE. UU.	CT-2 Europa-Asia	CT-3 DCT-900 Suecia	DECT Europa
Tecnología de Acceso	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA	CDMA (DS)/FDMA	FDMA	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA
Uso principal	Celular	Celular	Celular	Inalámbrico	Inalámbrico	Inalámbrico / celular
Banda de frecuencias Estación base	869-894	935-960	869-894	864-868	862-866	1800-1900
Estación móvil	824-849	890-915	824-849			
Duplexaje	FDD	FDD	FDD	TDD	TDD	TDD
Espacio entre canales de RF (KHz)	30	200	1250	100	1000	1728
Modulación	$\pi/4$ DQPSK	GMSK	BPSK/QPSK	GFSK	GFSK	GFSK
Potencia máxima/mW promedio (mW)	600/200	1000/125	600	10/5	80/5	250/10
Asignación de frecuencias	Fija	Dinámica	-	Dinámica	Dinámica	Dinámica
Control de Potencia Estación base	Si	Si	Si	No	No	No
Estación móvil	Si	Si	Si	No	No	No
Codificación de la voz	VSELP	RPR-LTP	QCELP	ADPCM	ADPCM	ADPCM
Tasa de voz [kbps]	7.95	13	8 (tasa variable)	32	32	32
Canal de voz por canal de RF	3	8	-	1	8	12
Tasa de bits del canal (kbps)	48.6	270.833	-	72	640	1152
Codificación de canal	Tasa convolucional de $1/2$	Tasa convolucional de $1/2$	Tasa de bajada de $1/2$, tasa de subida de $1/3$, CRC	ninguna	CRC	CRC
Duración de la trama (ms)	40	40615	20	2	16	10

Tabla 1.2

El 14 de enero de 1997, la FCC abrió un nuevo grupo de frecuencias inalámbricas que permitiría el desarrollo de tecnologías como CDMA: la banda de 1900. El PCS 1900 es la contraparte en frecuencia de GSM. Este último sistema es el que se tomará como ejemplo para la presente tesis y junto con GSM, creemos que serán la base para la tercera generación de sistemas inalámbricos de comunicación. La tabla 1.3 corresponde a algunas bandas celulares y de PCS comunes en el mundo.

Bloque designador	Frecuencia de transmisión de la EM [MHz]	Frecuencia de transmisión de la EB [MHz]
PCS (Korea)	1750-1780	1840-1870
ARDIS (Pan América)	806-824	851-869
RAM Mobítex (Pan América)	896-901	935-940
PCS (EE UU y Pan América)	1850-1910	1930-1990
FPLMTS	1885-2025	2110-2200
FPLMTS (Satélite)	1980-2010	2170-2200
PDC 990	940-956	810-826
PDC 1500 Malasia. Moscú	1477-1501	1429-1453
Japón Marinet	887-889	832-834
Japón analógico	898-901, 915-940	843-846, 8600-885
DECT (Sistemas TDD)	1880-1900	1880-1900
PHS (Sistemas TDD)	1895-1918	1895-1918

Tabla 1.3

Los sistemas de primera generación analógicos (AMPS, TACS, etc.) y los digitales de segunda generación (TDMA, CDMA, GSM, etc.) se diseñaron con el propósito de transportar voz y muy pocos datos.

Los sistemas de tercera generación se proponen por los cambios que ha experimentado la sociedad y por las nuevas necesidades que exigen las empresas; estos sistemas serán capaces de proveer tasas de transmisión muy elevadas y a un costo menor, así como aplicaciones integradas multimedia. Los servicios que se pretende puedan ser proveídos por los sistemas de tercera generación se describen en la tabla 1.4. Muchos de ellos son extensiones de la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI), en donde los servicios de navegación son más específicos.

Teleservicios	Throughput (kbps)	Objetivo de Tasa de Error de bits
Telefonía	8-32	10^{-3}
Teleconferencia	32	10^{-3}
Correo de Voz	32	10^{-3}
Sonido programado	128	10^{-6}
Videotelefonía	64	10^{-7}
Videoconferencia	384-768	10^{-7}
Terminal remota	1.2-9.6	10^{-6}
Edición del perfil del usuario	1.2-9.6	10^{-6}
Telefax (grupo 4)	64	10^{-6}
Acceso a bases de datos	2.4-768.0	10^{-6}
Mensaje de "broadcast"	2.4	10^{-6}
Información digital no restringida	64-1920	10^{-6}
Navegación	2.4-64	10^{-6}
Localización	2.4-64	10^{-6}

Tabla 1.4

Los usuarios de la red inalámbrica esperan una calidad de servicio similar a la que proveen las redes digitales alámbricas como la RDSI. Los proveedores de servicios requerirán de protocolos más complejos en la capa física por la naturaleza impredecible de la interfase aérea y la radio propagación en ella, así como la movilidad inherente del sistema. Los protocolos usarán correcciones de error y técnicas de interpolación de la voz para alcanzar la calidad del servicio que brinda una red alámbrica.

1.3 La telefonía en México

En nuestro país, el primer enlace telefónico se realizó el 13 de marzo de 1878 entre la Ciudad de México y la población de Tlalpan (a una distancia de 16 kilómetros), con una nación asombrada por la noticia y que después no aceptaría la instalación de los postes telefónicos.

En un par de meses *Alfred Westrup & Co.* obtuvo permiso para instalar una red de teléfonos para la policía y el gobierno. De manera privada en 1881, el empresario Greenwood obtuvo otro para instalar una red telefónica en la Ciudad de México con lo que inició el tendido del cableado público. Nació entonces La Compañía Telefónica Mexicana (asociada con la *Western Electric Telephone Co.*) para constituir una nueva empresa en 1882.

Otra compañía naciente era la Compañía de Teléfonos *Ericsson*, S.A., la cual tenía 650 usuarios para 1907. En 1911 la *Ericsson* construyó líneas de Tlalnepantla a Cuautitlán, para iniciar así el servicio interurbano.

Para 1914 los materiales telefónicos escaseaban por la Revolución y la Primera Guerra Mundial porque la materia prima de éstos se destinó a la fabricación de armamentos. Por ello a la Compañía Telefónica y Telegráfica Mexicana se le intervino el servicio por diez años.

Ericsson consiguió 32 concesiones para ofrecer servicio público y privado en comunicaciones eléctricas con ondas portadoras, adquirió dos estaciones portátiles inalámbricas con un radio de comunicación de 200 kilómetros.

Fue aquí donde nació en México el uso de las señales de RF en las telecomunicaciones. Estas ondas trabajaban en el sistema telefónico automático, que sustituiría gradualmente al sistema de operadoras.

Para 1924 la compañía *Ericsson* inauguró la primera central telefónica automática, conocida como la central Roma, que tendría capacidad para conectar diez mil líneas. En este tiempo la Compañía Telefónica y Telegráfica Mexicana, S. A. fue adquirida por la *International Telephone and Telegraph Co.* (ITT), para que pudiera competir en un mismo nivel con la *Ericsson*.

El primero de julio de 1928 se logró una comunicación telefónica con Europa mediante un sistema que consistía en una combinación de líneas telefónicas de tierra y circuitos radiotelefónicos a través del Atlántico. En el nuevo servicio telefónico transoceánico se incluyeron la Ciudad de México, Querétaro, San Luis Potosí, Saltillo, Monterrey, Tampico y Nuevo Laredo, localidades que se podrían comunicar, en Europa, con Inglaterra, Escocia, Gales, Alemania, Holanda, Bélgica, Francia, Suecia y Dinamarca. Con España se entró en contacto el 30 de noviembre del mismo año.

Hasta esos momentos los únicos países de América con los que se había logrado establecer comunicación telefónica eran Estados Unidos, Canadá y Cuba. No fue sino hasta 1930 cuando se enlazaron Norte y Sudamérica gracias al circuito transmisor y receptor entre la Compañía Internacional de Radio (de Argentina) y la *American Telephone and Telegraph Co.* (de Estados Unidos).

En 1936, se crea el proyecto de unir a la Compañía Ericsson con la Compañía Telefónica y Telegráfica Mexicana, S.A. Sin embargo, éste fue suspendido debido a la Segunda Guerra Mundial.

El 2 de agosto de 1946, se anunció el enlace de ambas compañías con números telefónicos de 6 cifras; dando lugar a la constitución de una de las empresas más grandes en la historia de México el día 23 de diciembre de 1947: Teléfonos de México, S.A., TELMEX.

Durante su primer año como compañía, TELMEX enlazó los dos sistemas telefónicos existentes en enero de 1948, con un aproximado de 150,000 abonados.

En abril de 1952, los servicios telefónicos serían gravados con 10% para larga distancia y 5% por el servicio local. Este ingreso junto con la colocación en el mercado de acciones y obligaciones, permitiría que TELMEX obtuviera recursos para establecer 25,000 abonados por año.

El 5 de diciembre de 1956, se constituye la empresa Industria de Telecomunicación, S.A. de C.V., la cual proveería de equipo telefónico, hecho en México, para cubrir las necesidades del mercado.

En 1968, Teléfonos de México inició el sistema de emergencia con la clave 07, transmitió la XIX Olimpiada y consolidó los servicios fuera del país vía satélite, logrando comunicaciones hacia Europa y Sudamérica.

Dos años más tarde, participó en la transmisión del Mundial de Fútbol, México 1970. Para ello instaló miles de líneas en 5 ciudades diferentes, cientos de casetas de larga distancia, así como líneas privadas para el uso de télex y telefoto. En este mismo año, en la Ciudad de México se antepuso el número 5 para llegar a 7 cifras debido al aumento de abonados de alrededor de millón y medio. A finales de este mismo año, el sistema automático de L.D. llamado Lada 95, entró en operación, utilizando principalmente redes de microondas.

En agosto de 1972, el gobierno compró el 51% de las acciones de TELMEX. Desde entonces el servicio de larga distancia nacional se amplió en áreas rurales del país, y se instaló un nuevo equipo para larga distancia y servicio de operadora.

En 1975, inició el servicio de larga distancia a Venezuela con la clave lada 98, así mismo participó en la transmisión de los juegos panamericanos e instaló el aparato 3 millones. En los siguientes 10 años trabajó en la telefonía rural, puso en marcha varias centrales telefónicas automáticas; entraron en operación 6 sistemas de microondas de alta capacidad, obtuvo la concesión para prestar servicio en Baja California e instaló el primer aparato multilínea rural en la población de Los Reyes, Estado de México.

En 1980, TELMEX incorpora sistemas digitales, con tecnologías como modulación por impulsos codificados, lo que le permite obtener menor sensibilidad a la distorsión e interferencia, aumentar su capacidad, reducir el espacio para colocar equipo, y muchas otras.

En 1985, se derrumbó la Central Victoria por un temblor que sacudió a la Ciudad de México, afectando los servicios de larga distancia y servicio local para 12,000 abonados. Como medida de ayuda se suspendió el cobro en los teléfonos públicos de alcancía. También se canceló la comunicación en varios estados de la República, dañándose en total 26 edificios y 13 centrales. A causa de la incomunicación que sufrió México, debido a este desastre natural, se tomó la decisión de descentralizar el sistema telefónico.

En 1987, TELMEX ofrece servicios en los teléfonos públicos como lada 91, 95 y 98, adquiere el abonado 8 millones y pone en operación el servicio de larga distancia automática por cobrar lada 800. Lleva acabo la primer video conferencia telefónica e instala la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI).

Con el fin de mejorar su actividad interna, TELMEX inicia un programa de automatización para los procesos básicos de atención al cliente, tales como la recepción de solicitudes de líneas y servicios, quejas y aclaraciones, reparación, instalación y cobranza.

En septiembre de 1989, el gobierno anuncia la venta de su participación en el capital de la empresa. El 15 de noviembre se reciben las ofertas y el 9 de diciembre, el consorcio integrado por el Grupo Carso, *Southwestern Bell International Holdings* y *France Cables et Radio*, adquieren TELMEX.

En 1991, se inicia la construcción de la red nacional de fibra óptica de larga distancia, que enlaza a 54 ciudades del país con 37 mil kilómetros de cable de fibra. Así es como se prepara TELMEX para la fuerte competencia que llegaría en pocos años.

En 1995, crea el centro de administración de la red en la Ciudad de México y otros 7 en diferentes ciudades del país. En dicho centro se monitorea y se analiza la red telefónica para establecer un control mas estricto de ella. Supervisando la operación de las centrales telefónicas con el objetivo de reducir el tiempo en la solución de problemas. Se puso en marcha un protocolo de comunicación de datos de alta velocidad que permite ofrecer servicios avanzados de telecomunicaciones en forma masiva, obteniendo ISO9002. A finales de este año se instaló el sistema trasatlántico de cable submarino llamado Columbus II.

TELMEX se preparó para la apertura de 1996 del mercado de larga distancia. Amplió su red de telefonía pública utilizando una tecnología chip, actualizó sus centros de atención al cliente y creó el proyecto Cable Submarino Mar de Cortés.

En 1999, Teléfonos de México suministraba servicios de telecomunicaciones a 24,711 poblaciones en la República Mexicana, instalando 4 mil líneas diarias para alcanzar el abonado 10 millones. Todo esto con una inversión, en los últimos 8 años, de 17 mil millones de dólares.

A la fecha, TELMEX sigue siendo la empresa dominante en el servicio de telefonía local, se necesitarán muchos años para que la forma de proveer este servicio cambie.

Todos los avances de TELMEX ya involucraban enlaces de comunicación por medio de ondas electromagnéticas pero había otras empresas que se dedicaban más en específico a comunicaciones de radio; y es aquí, en este punto, cuando damos un giro a las comunicaciones puramente inalámbricas en México.

El 6 de octubre de 1955 la Compañía Servicio Organizado Secretarial S.A. de C.V. (S.O.S.) se dedica a realizar la compraventa, distribución, instalación, arrendamiento e importación en general de aparatos de radiocomunicación móvil con enlace a la red pública telefónica.

SOS sería la compañía de la que nace Iusacell 34 años después.

En 1984 la antecesora de Telcel, obtiene la concesión para explotar la red de servicio radiotelefónico móvil en el área metropolitana de la Ciudad de México, bajo la denominación de "Radiomóvil Dipsa S.A. de C.V.", filial de TELMEX, operando en las bandas radiofónicas de 450-470MHz y 470-512MHz.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes convocó la introducción de la telefonía celular en nuestro país en las nueve diferentes regiones en que fue dividido. Cada región recibiría servicio de dos operadores en competencia, tal y como lo establecía el estándar AMPS.

Aquí nace Iusacell, convirtiéndose en la primera compañía de telefonía celular en ofrecer el servicio en la Ciudad de México y en ese mismo año surge la marca Telcel ofreciendo los servicios de telefonía celular en la ciudad de Tijuana BC. A partir de 1990 Telcel y Iusacell expanden los servicios de telefonía celular en el Distrito Federal y su zona metropolitana y paulatinamente, Telcel llega a ofrecer el servicio a escala nacional.

En los pocos años que transcurrieron desde entonces, la aceptación fue y ha sido extraordinaria. A fines de 1992, el número aproximado de suscriptores al servicio, sumando ambos operadores de cada región, era el siguiente (ver tabla 1.5)¹⁴:

¹⁴ COFETEL. *Empresas Concesionarias de Telefonía Celular* [en línea] Índice de servicios: Banda celular Enero 2000 Actualizada Enero 2001 < http://www.cft.gob.mx/html/la_era/info_tel/t31.html > [Consulta: Marzo 2000]

Región	Número aproximado de suscriptores
Baja California	10,000
Noroeste	8,000
Norte	16,000
Noreste	30,000
Occidente	26,000
Centro	16,000
Golfo y Sur	16,000
Sureste	11,000
Distrito Federal y alrededores	181,000
Total	314,000

Tabla 1.5

Cada uno de los dos operadores regionales tiene asignadas dos bandas en la región que le corresponde: una para la comunicación del equipo móvil hacia las bases y otra para la comunicación de las bases hacia las unidades móviles. La asignación se muestra en la tabla 1.6:

Banda	Móvil (MHz)	Base (MHz)
A	824-835	869-880
A'	845-846.5	890-891.5
B	835-845	880-890
B'	846.5-849	891.5-894

Tabla 1.6

La tabla de asignación de concesiones que se ha dado en México en el ramo de la telefonía celular se puede observar en las tablas 1.7 y 1.8¹⁵:

Concesionarios de radiotelefonía móvil con tecnología celular en la banda A (800MHz):	Número de Región
Baja Celular Mexicana, S.A. de C.V.	Región 1
Movitel del Noroeste, S.A. de C.V.	Región 2
Telefonía Celular del Norte, S.A. de C.V.	Región 3
Celular de Telefonía, S.A. de C.V.	Región 4
Comunicaciones Celulares de Occidente, S.A. de C.V. (IUSACELL)	Región 5
Sistemas Telefónicos Portátiles Celulares, S.A. de C.V. (IUSACELL)	Región 6
Telecomunicaciones del Golfo, S.A. de C.V. (IUSACELL)	Región 7
Portatel del Sureste, S.A. de C.V.	Región 8
SOS Telecomunicaciones, S.A. de C.V. (IUSACELL)	Región 9

Tabla 1.7

¹⁵ COFETEL., *Empresas Concesionarias de Telefonía Celular* [en línea]. Índice de servicios Banda celular Enero 2000 Actualizada Enero 2001. <<http://www.cft.gob.mx/conse/celular.html>> [Consulta: Marzo 2000]

Concesionarios de radiotelefonía móvil con tecnología celular en la banda B (800MHz)	Número de Región
Radio Móvil Dipsa, S.A. de C.V.	Regiones 1 a 9

Tabla 1.8

El día 31 de mayo de 1990 se presentó el "Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994" donde menciona la importancia de las telecomunicaciones destacando los siguientes puntos¹⁶:

- Múltiples empresas podrán desarrollar los servicios de transmisión conmutada de: datos, teleinformática, telefonía celular y otros.
- Las concesiones de telefonía celular se sujetarán a concurso de manera abierta, y así se garantizará la mejor oferta de servicios y contraprestación económica al Estado.

Las concesiones anteriores eran las únicas en su tipo hasta hace un par de años pero ahora, precisamente debido a las nuevas tecnologías y a la demanda servicio, en México como en todo el mundo, se abrieron nuevas concesiones en otras bandas que se presentan en las tablas 1.9 y 1.10.

Concesionarios para la prestación del servicio de acceso inalámbrico móvil (PCS) Banda 1.9GHz
• Sistemas Profesionales de Comunicación, S.A. de C.V. (UNEFON)
• Radiomóvil Dipsa, S.A. de C.V. (Telcel)
• Iusacell PCS, S.A. de C.V. (Iusacell)
• Pegaso Comunicaciones y Sistemas, S.A. de C.V. (Pegaso)
• Servicios de Acceso Inalámbricos, S.A. de C.V. (Grupo Hermes)
• Miditel, S.A. de C.V. (Midicell)

Tabla 1.9

¹⁶ COFETEL. *Cronología de la telefonía en México* [en línea].]: Información sobre telecomunicaciones. C.F. México 1997 <http://www.cft.gob.mx/html/la_era/mfo_tel2/aus7.html> [Consulta: Marzo 2000]

Concesionarios para la prestación del servicio de acceso inalámbrico fijo Banda 3.4GHz	
•	Sistemas Profesionales de Comunicación, S.A. de C.V.
•	Telefonía Inalámbrica del Norte S.A. de C.V. (antes Telinor, hoy Axtel)
•	Teléfonos de México, S.A. de C.V.
•	Miditel, S.A. de C.V. (Midicell)

Tabla 1.10

El 14 de noviembre de 1997, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, la Resolución por la que se establecen los lineamientos para llevar a cabo el despeje de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, ubicadas dentro de los rangos de los 1850MHz - 1990MHz, 440MHz - 450MHz y 485MHz - 495MHz, así como 3.4GHz - 3.7GHz, para la prestación del servicio de acceso inalámbrico fijo o móvil.

Las bandas de frecuencias 1850MHz - 1910MHz y 1930MHz - 1990MHz se destinan para servicios de comunicación fija o móvil incluyendo los Servicios de Comunicación Personal PCS (ver tabla 1.11). Se ha adoptado la subdivisión de la banda 1850MHz - 1990MHz como se muestra en la Recomendación CCP.III/REC.11 (III-95), aprobada por la Tercera Reunión del Comité Consultivo Permanente III: Radiocomunicaciones de CÍTEL¹⁷:

Bloque	Sub-banda (MHz)	Sub-banda apareada (MHz)
A	1850-1865	1930- 1945
B	1870-1885	1950- 1965
C	1895-1910	1975- 1990
D	1865-1870	1945- 1950
E	1885-1890	1965- 1970
F	1890-1895	1970- 1975
G	1910-1930 (no apareada)	

Tabla 1.11

¹⁷ COFETEL. *Atribución del espectro radioeléctrico 1999 para México*. [en línea]. Área general de Ingeniería y Tecnología. 1999 <http://www.agitec.gob.mx/cuadro/index_espectro.html> [Consulta: Marzo 2000]

Este preámbulo nos sirve para saber donde estamos ubicados en el mundo inalámbrico. Ahora nos adentraremos en el mundo de la ingeniería para el desarrollo de una red celular que soportará los Servicios de Comunicación Personal o PCS.

CAPÍTULO II

Radiopropagación

En un sistema inalámbrico, ya sea celular, satelital, fijo, etc., la característica común a todos es el uso del mismo canal como medio de comunicación, el aire. Sin importar que tipo de servicio se proveerá con cada uno, la señal al viajar por este medio sufrirá una degradación al momento de ser recibido en el receptor con respecto a como fue transmitida la señal en un inicio. Esta degradación puede ser un cambio en la amplitud de la señal, de la fase o de la frecuencia.

Dada la importancia que tienen actualmente estos sistemas por los servicios que ofrecen, se ha realizado una extensiva investigación para modelar el comportamiento de la señal para cada uno de estos sistemas, partiendo todos de la relación portadora a ruido en el receptor. De forma particular a cada uno de ellos, se han desarrollado modelos específicos que nos ayudan a diseñar mejor el enlace que existirá entre transmisor y receptor.

Como se mencionó, la presente tesis se enfoca al estudio de la propagación de la señal electromagnética para un sistema de Servicios de Comunicación Personal o PCS por sus siglas en inglés (*Personal Communication Services*), haciendo énfasis en el método de acceso múltiple por división de código o CDMA por sus siglas en inglés (*Code Division Multiple Access*), por lo que el presente capítulo desarrollará los modelos que más se ocupan para simular el comportamiento de la señal para este sistema.

2.1 Análisis del enlace

En cualquier sistema de comunicaciones estamos interesados en un parámetro crítico, C/N , que es la relación portadora a ruido en el receptor. Este parámetro describe que tanta potencia de la señal hay en el canal comparada con la potencia del ruido, por lo que esta relación puede ser considerada como una figura de mérito para el sistema de comunicaciones.

La ecuación llamada de enlace es una ecuación que calcula la relación C/N usando otros parámetros del sistema de comunicaciones, tal que:

$$\frac{C}{N} = \frac{(ERP)L_p G_r}{N} \quad (2.1)$$

donde ERP es la potencia radiada efectiva de la antena que transmite, L_p es la pérdida por propagación en el canal, G_r es la ganancia de la antena receptora, y N es la potencia de ruido efectiva. En particular, la ERP puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$ERP = P_t L_c G_t \quad (2.2)$$

donde P_t es la potencia a la salida del amplificador de potencia del transmisor, L_c es la pérdida del cable entre el amplificador de potencia y la antena transmisora, y G_t es la ganancia de la antena transmisora.

Existen muchas definiciones de potencia de ruido efectiva, por lo que enfocaremos nuestra atención al ruido térmico¹, el cual está definido como:

$$N = kTW \quad (2.3)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de ruido del receptor, y W es el ancho de banda del sistema.

Existe otro parámetro similar, C/I o relación de portadora a interferencia. Este parámetro difiere de C/N en que el denominador de C/I incluye no únicamente la potencia de ruido térmico sino también la potencia de interferencia de otras fuentes.

Como vemos en la ecuación (2.1), la calidad del enlace depende de parámetros como ganancia de las antenas receptora y transmisora, potencia del transmisor y temperatura de ruido del receptor. Todos estos parámetros están dentro del control del diseñador del sistema y pueden cambiarse para optimizar el funcionamiento del mismo. Sin embargo, el diseñador no puede controlar uno de los parámetros en (2.1); este parámetro es la pérdida por propagación, o pérdida

por trayectoria. Esta pérdida se refiere a la atenuación que la señal sufre en su trayectoria del transmisor al receptor.

Las pérdidas por propagación en (2.1) engloban todas las pérdidas que se esperan que la señal sufra mientras viaja del transmisor al receptor. Hay muchos modelos de predicción que se utilizan para predecir la pérdida de trayectoria (*path loss*). Y aunque los modelos difieren en las metodologías, todos tienen como un parámetro crítico la distancia entre el transmisor y el receptor.

En otras palabras, la pérdida de trayectoria es totalmente dependiente de la distancia entre Tx y Rx. En las figuras 2.1 y 2.2 se pueden observar (los valores en dBm) las pérdidas por trayectoria con respecto al terreno considerando la distancia en millas y en pies.

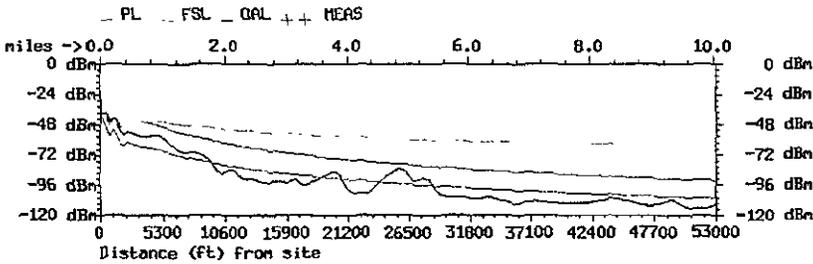


Figura 2.1

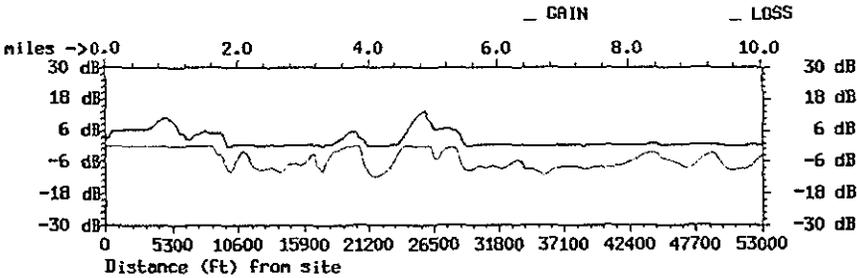


Figura 2.2

¹ Lee, William *Mobile Cellular Telecommunications Analog and Digital Systems* 2^a ed EE.UU. Airtouch Communications, 1995, p 23

Otros factores que también pueden tener algún efecto además de la distancia, por ejemplo en comunicaciones satelitales, son los atmosféricos y la absorción por lluvia que son definitivos en la determinación de la potencia de la señal. En este documento se hará una descripción de 3 modelos representativos: el del espacio libre, el modelo de Lee, y el modelo de Okumura-Hata.

2.2 Modelos

2.2.1 El modelo del espacio libre

En el espacio libre², las ondas electromagnéticas se debilitan como función del inverso del cuadrado de la distancia, o $1/d^2$, donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor. En su forma lineal, la pérdida de trayectoria en el espacio libre es

$$L_p = \frac{4\pi\lambda^2}{d^2} \quad (2.4)$$

donde λ es la longitud de onda de la señal. La ecuación (2.4) se puede también escribir en decibeles

$$L_p = -32.4 - 20\log(f) - 20\log(d) \quad (2.5)$$

donde d esta en kilómetros, f es la frecuencia de la señal en Megahertz, y la pérdida de trayectoria L_p esta en decibeles. En la derivación (2.5), usamos el hecho de que la velocidad de la luz es un producto de la frecuencia y la longitud de onda (es decir, $c=\lambda f$). Note que una vez que la frecuencia de la portadora de la señal, f , se conoce, el primer y segundo términos de (2.5) son constantes, y L_p varía estrictamente como una función de d en el tercer término. Si graficamos (2.5), entonces la pendiente de la curva sería -20dB/década.

El modelo del espacio libre se basa en el concepto de un frente de onda esférico expansivo ya que la señal radia de un punto fuente en el espacio. Se utiliza mucho en comunicaciones satelitales y de espacio profundo. En un sistema de comunicaciones móviles donde las pérdidas adicionales son introducidas principalmente por obstáculos terrestres, se requieren modelos alternativos para predecir de manera más exacta las pérdidas de propagación.

² Ibidem p 158.

2.2.2 El modelo de Okumura-Hata

El ambiente de propagación en comunicación terrestre es peor que el de espacio libre. Hay obstáculos entre la estación base y el usuario móvil con mucha frecuencia dando como resultado que la señal recibida esté formada por señales que viajan por trayectorias directas e indirectas. Las señales que viajan por trayectorias directas son aquellos en línea de vista LOS por sus siglas en inglés (*Line of Sight*), y señales viajeras en trayectorias indirectas son aquellas que involucran refracción y reflexión de objetos (tales como edificios, árboles y montañas) entre el transmisor y el receptor. Por ello, la pérdida de trayectoria en un ambiente terrestre es más alto que en el espacio libre, y la magnitud de las pérdidas es aún más fuerte influenciado por la distancia entre el transmisor y el receptor. Un modelo de propagación adecuado debe ser una función de los parámetros necesarios para describir las condiciones de propagación; para estos casos, el modelo de Okumura-Hata es el adecuado. El modelo de Okumura-Hata se basa en mediciones empíricas tomadas en ambientes urbanos hechas por Okumura-Hata.

El análisis realizado por Okumura-Hata³ se restringió a frecuencias debajo de los 1000MHz, por lo que en Europa como resultado de la investigación del programa de Cooperación en el área de la investigación Técnica y Científica o COST por sus siglas en inglés (*Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*), y en particular del proyecto 231 cuyo objetivo es la recomendación de modelos de propagación para aplicaciones celulares y PCS, propuso un modelo mejorado para áreas urbanas que puede aplicarse arriba de los 1500MHz. Como el modelo de Okumura-Hata, el modelo de propagación COST-231 se basa en las mediciones realizadas por Okumura-Hata. El modelo de propagación COST-231 se derivó al analizar las curvas de propagación de Okumura-Hata en la banda de frecuencia alta para extender el rango de parámetros e incluir la banda de los 1500 a 2000MHz. El modelo modificado se basó en la fórmula de Okumura-Hata para pérdida de transmisión básica en áreas urbanas,

Para área urbana:

$$L_U = 46.3 + 33.9 \times \log(f_c) - 13.82 \times \log(H_b) - A_{Hm} + [44.9 - 6.55 \times \log(H_b)] \times \log(r)$$

³ M. Hata. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-29, 1980, p. 317-325.

Para área suburbana:

$$L_s = L_U - 2 \times [\log(f_c/28)]^2 - 5.4$$

Para área quasi abierta:

$$L_q = L_U - 4.78 \times [\log(f_c)]^2 + 18.33 \times \log(f_c) - 35.94$$

Para área rural:

$$L_q = L_U - 4.78 \times [\log(f_c)]^2 + 18.33 \times \log(f_c) - 40.94$$

donde,

- A_{Hm} es el factor de corrección para la altura de la antena de la estación móvil.

Para una ciudad pequeña-mediana: $A_{Hm} = [1.1 \times \log(f_c) - 0.7] \times H_m - [1.56 \times \log(f_c) - 0.8]$

Para un centro metropolitano: $A_{Hm} = [1.1 \times \log(f_c) - 0.7] \times H_m - [1.56 \times \log(f_c) - 0.8] - 3$

- L_u, L_s, L_q = valores isotrópicos de pérdida de trayectoria
- f_c = frecuencia portadora en MHz (válido de 1500MHz a 2000 MHz)
- H_b = altura de la antena de la estación base en metros (válido de 30m a 200m)
- H_m = altura de la antena de la estación móvil en metros (válido de 1m a 10m)
- r = radio del sitio en kilómetros (válido de 1km a 20km)

Una comparación entre los modelos de Okumura-Hata y COST-231 muestra que son similares excepto por los dos siguientes términos:

Okumura-Hata: $69.55 + 26.16\log(f_c)$

COST-231: $46.3 + 33.9\log(f_c)$

2.2.3 El modelo de Lee

Este modelo es un modelo punto a punto y se obtiene mediante tres pasos:

- generar una condición estándar
- obtener un modelo de predicción área a área
- obtener el modelo punto a punto usando el modelo área a área como base.

La filosofía del desarrollo de este modelo es tratar de separar dos efectos, uno causado por el contorno natural del terreno y el otro por las estructuras humanas, en la fuerza de la señal recibida.

2.2.3.1 Una condición estándar

Para generar una condición estándar y proveer los factores de corrección⁴, necesitamos usar la tabla 2.1. La ventaja de usar esos valores estándar es para obtener directamente un valor preestablecido en decibeles sobre 1mW en dBm.

⁴K. Kelly II *Flat Suburban Area Propagation of 820 MHz* IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol VT-27, Noviembre 1978

Tabla 2.1 Generación de una condición estándar

Condición estándar	Factores de corrección*
Estación Base	
Potencia transmitida $P_t=10W$ (40dBm)	$\alpha_1 = 10 \log \frac{P_t}{10}$
Altura de antena $h_1=100ft$ (30m)	$\alpha_2 = 20 \log \frac{h_1}{h_1}$
Ganancia de antena $g_t=6dB/dipolo$	$\alpha_3=g_t-6$
Unidad móvil	
Altura de antena $h_2=10ft$ (3m)	$\alpha_4 = 10 \log \frac{h_2}{h_2}$
Ganancia de antena $g_m=0dB/dipolo$	$\alpha_5=g_m$
*Todos los parámetros con primas son las nuevas condiciones	

2.2.3.2 Obtención de curvas de predicción área a área para estructuras humanas

Las curvas de predicción área a área son diferentes en áreas diferentes. En una predicción área a área, todas las áreas se consideran planas aunque los datos se pueden obtener de áreas no planas. La desviación estándar de los valores promedio indica el grado de lo escabroso del terreno.

Efecto de las estructuras humanas

Dado que la configuración del terreno de cada ciudad es diferente, y las estructuras humanas en cada ciudad son también únicas, tenemos que encontrar un medio para separarlas. El medio para separar el efecto debido a la configuración del terreno de las estructuras humanas es encontrar un método para obtener la curva de pérdida de trayectoria para el área como si el área fuera plana, aún si no lo es. La curva de pérdida de trayectoria que se obtiene en un terreno plano indica virtualmente los efectos de la pérdida de la señal debida solamente a las estructuras humanas. Esto significa que las diferentes curvas de pérdida de trayectoria obtenidas en cada ciudad muestran las diferentes estructuras humanas en la misma. Para hacer esto, tenemos que medir la fuerza de la señal en aquellos sitios altos y también en los bajos alrededor de los sitios celulares. Entonces la pendiente de la pérdida de trayectoria promedio, la cual es una combinación de las medidas de los

sitios altos y bajos a lo largo de diferentes radios de trayectorias en un área general, representa la señal recibida como si esta fuera de un área plana afectada únicamente por un ambiente de estructuras locales humanas.

A partir de esto, las diferencias en las curvas de predicción área a área se deben a las estructuras humanas. Debemos considerar que las medidas hechas en áreas urbanas son diferentes de aquellas hechas en áreas suburbanas y abiertas. La curva de predicción área a área se obtiene del valor medio de los datos medidos y es usado para futuras predicciones en esa área. Cualquier modelo de predicción área a área se puede usar como un primer paso para lograr un modelo de predicción punto a punto.

El modelo de predicción área a área que se estudia aquí se puede representar por dos parámetros: (1) el punto de obstáculo de 1mi (o 1km) y (2) la pendiente de pérdida de trayectoria. El punto de obstáculo 1mi es la potencia recibida a una distancia de 1mi desde el transmisor. Hay dos formas generales para encontrar los valores de los dos parámetros experimentalmente:

1. Compare el área de interés con un área similar de estructuras humanas de la cual se tenga conocimiento que se han efectuado estudios, con la finalidad de determinar la pendiente de pérdida de trayectoria y así poder consultar las curvas correspondientes. La curva de área suburbana es una curva que se usa comúnmente.
2. Si las estructuras humanas de una ciudad son diferentes de las ciudades en que se ha realizado el estudio, o si se desea tener una mayor exactitud, se debe llevar a cabo una medición simple. Coloque una antena transmitiendo en el centro de un área general. Mientras la altura del edificio sea comparable a la de los otros en el área, la colocación de la antena no es crítica. Tome seis o siete puntos para datos de medición alrededor de la obstrucción de 1mi y alrededor de los límites de 10mi basado en los lugares altos y bajos. Entonces calcule el promedio de los puntos de datos de 1mi y de los puntos de datos de 10mi. Al unir los dos valores, se obtiene la pendiente de pérdida de trayectoria. Si el área es muy accidentada, entonces los puntos de datos a una distancia dada desde la estación base en diferentes ubicaciones puede variar mucho. En este caso, tomaremos mas mediciones en diversos puntos para obtener la pendiente promedio de pérdida de trayectoria.

Si el terreno del área accidentada es inclinado, entonces tenemos que convertir los puntos de datos que fueron medidos en el terreno inclinado a un terreno ficticio plano en esa área⁵. La conversión se basa en la ganancia de la altura de antena efectiva como:

$$\Delta G = \text{Ganancia de altura de antena efectiva} = 20 \log \frac{h_e}{h_1} \quad (2.7)$$

donde h_1 es la altura actual y h_e es la altura de la antena efectiva en los lugares a 1mi o 10mi. El método para obtener h_e se mostrará mas adelante.

Para entender el fenómeno de pérdida de trayectoria hay que señalar que cuando la antena de la estación base se localiza en la ciudad, entonces la obstrucción de 1mi pudiera ser muy baja y la pendiente se aplanan. Cuando la estación base se localiza fuera de la ciudad, la obstrucción pudiera ser mucho mas grande y la pendiente es pronunciada. Cuando las estructuras están uniformemente distribuidas, dependiendo de la densidad (separación promedio entre edificios), la obstrucción de 1mi pudiera ser alta o baja, pero la pendiente puede aún mantenerse en 40dB/dec.

2.2.3.3 La diferencia de fase entre una trayectoria directa y una trayectoria reflejada en tierra

Basados en una trayectoria directa y en una trayectoria reflejada en tierra, como lo muestra la figura 2.3, obtenemos la siguiente relación:

$$P_r = P_o \left(\frac{1}{4\pi d / \lambda} \right)^2 \left| 1 + a_v e^{j\Delta\phi} \right|^2 \quad (2.8)$$

donde a_v = coeficiente de reflexión

$\Delta\phi$ = diferencia de fase entre una trayectoria directa y una trayectoria reflejada

P_o = Potencia transmitida

d = distancia

λ = la longitud de onda

⁵ K. Allsebrook, J.D. Parsons, *Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in the VHF and UHF Bands* IEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. VF-26, No 4, 1977

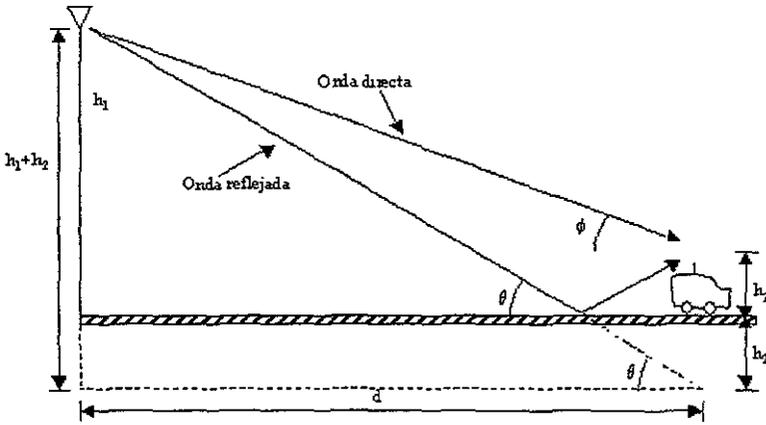


Figura 2.3

La ecuación (2.8) indica un modelo de dos ondas el cual se usa para entender el fenómeno de pérdida de trayectoria en un ambiente de radio móvil. En un ambiente móvil $a_w = -1$ debido a lo pequeño del ángulo incidente de la onda de tierra causado por una relativamente baja altura de la antena del sitio.

Entonces,

$$P_r = P_o \left(\frac{1}{4\pi d / \lambda} \right)^2 |1 - \cos\Delta\phi - j\text{sen}\Delta\phi|^2$$

$$= P_o \frac{2}{(4\pi d / \lambda)^2} (1 - \cos\Delta\phi) = P_o \frac{4}{(4\pi d / \lambda)^2} \text{sen}^2 \frac{\Delta\phi}{2} \quad (2.9-1)$$

donde $\Delta\phi = \beta\Delta d$ (2.9-2)

y Δd es la diferencia, $\Delta d = d_1 - d_2$, de la figura 2.3

$$d_1 = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2} \quad \text{y} \quad d_2 = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}$$

dado que Δd es mucho mas pequeño que d_1 o d_2 ,

$$\Delta\phi = \beta\Delta d \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_1 h_2}{d} \quad (2.9-3)$$

Entonces la potencia recibida de la ecuación (2.9-1) es

$$P_r = P_o \frac{4\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \text{sen}^2 \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (2.10)$$

Si $\Delta\phi$ es menor a 0.6rad, entonces $\text{sen}(\Delta\phi/2) \approx \Delta\phi/2$ y la ecuación (2.10) se simplifica a

$$P_r = P_o \frac{4}{16\pi^2 (d/\lambda)^2} \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right)^2 = P_o \left(\frac{h_1 h_2}{d^2} \right)^2 \quad (2.11)$$

de la ecuación (2.11), podemos deducir las dos relaciones siguientes :

$$\Delta P = 40 \log \frac{d_1}{d_2} \quad (\text{una pérdida de trayectoria de } 40\text{dB/dec}) \quad (2.12)$$

$$\Delta G = 20 \log \frac{h_1}{h_1'} \quad (\text{una ganancia de altura de antena de } 6\text{dB/oct}) \quad (2.13)$$

donde ΔP es la diferencia de potencia en decibeles entre dos diferentes trayectorias y ΔG es la ganancia (o pérdida) en decibeles que se obtiene entre dos diferentes alturas de antenas en el sitio.

De estas medidas, la ganancia de una altura de antena móvil es únicamente 3dB/oct, la cual es diferente de los 6dB/oct para h_1' que se muestra en la ecuación (2.13).

Entonces,

$$\Delta G' = 10 \log \frac{h_2'}{h_2} \quad (\text{una ganancia de altura de antena de } 3\text{dB/oct}) \quad (2.14)$$

2.2.3.4 La línea recta de la pendiente de pérdida de trayectoria

Como se describió anteriormente, las curvas de pérdida de trayectoria se obtienen de varias pruebas en áreas diferentes. Dado que las distancias de la trayectoria de radio del sitio celular a la unidad móvil son las mismas en diferentes pruebas, los datos de la fuerza de la señal medidos a una distancia se usarán para calcular el valor medio para la pérdida de trayectoria a esa distancia. En el dato experimental, la desviación de pérdida de trayectoria es de 8dB a través de la distancia de 1.6km a 15km (1mi a 10mi) donde los contornos del terreno general no son generalmente planos. La curva de pérdida de trayectoria se define por γ , y la potencia recibida puede ser expresada como

$$P_r = P_o - \gamma \log \frac{r}{r_o} \quad (2.15)$$

La pendiente γ cambia de acuerdo al área, pero esta es siempre una línea recta en una escala logarítmica. Si $\gamma=20$, es una pérdida de trayectoria de espacio libre, $\gamma=40$, es una pérdida de trayectoria móvil. P_o , r_o se refieren a las condiciones de obstrucción a una distancia dada (por ejemplo 1mi), y r es la distancia en la que estamos interesados en obtener la potencia recibida.

2.2.3.5 Fórmula general para propagación radio móvil

Aquí estamos interesados únicamente en una fórmula de pérdida de trayectoria de propagación general en un ambiente de radio móvil cualquiera, que podría ser un área suburbana. El nivel de obstáculo de 1mi en un área suburbana puede ser por ejemplo -61.7dBm bajo las condiciones estándar mostradas en la tabla 2.1. Combinando esos datos con la ecuación mostrada en (2.13) del modelo de predicción teórica, y las ecuaciones (2.14) y (2.15) de los datos medidos, la potencia recibida P_r en el área suburbana se puede expresar como

$$P_r = (P_t - 40) - 61.7 - 38.4 \log \frac{r_1}{1\text{mi}} + 20 \log \frac{h_1}{100\text{ft}} + 10 \log \frac{h_2}{10\text{ft}} + (G_t - 6) + G_m \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) se puede simplificar a

$$P_r = P_t - 157.7 - 38.4 \log r_1 + 20 \log h_1 + 10 \log h_2 + G_t + G_m \quad (2.17)$$

donde P_t es la potencia en decibels sobre un mW, r_1 está en mi, h_1 y h_2 están en pies, y G_t y G_m están en decibels. La ecuación (2.17) se usa para áreas suburbanas. A partir de lo anterior, la fórmula general se expresa como

$$P_r = P_t - K - \gamma \log r_1 + 20 \log h_1 + 10 \log h_2 + G_t + G_m \quad (2.18)$$

Los valores de K y γ serán diferentes y requieren que se obtengan en diferentes ambientes de estructuras humanas.

2.2.3.6 Pérdida por follaje

La pérdida por el follaje es un tema muy complicado que tiene muchos parámetros y variaciones⁶. El tamaño de las hojas, ramas, y troncos, la densidad y distribución de las hojas, ramas y troncos y la altura de los árboles relativa a la altura de la antena son consideradas. Para un diseño del sistema, la estimación de la señal debido a la pérdida de follaje no necesita algún grado de exactitud.

Algunas veces la pérdida por follaje puede ser tratada como pérdida en una línea alámbrica, en decibels por pie o decibels por metro, cuando el follaje es uniformemente denso y las longitudes de trayectoria son cortas.

2.2.3.7 Propagación en distancia cercana

Dentro del radio de 1mi, el ancho de haz de la antena, especialmente de una antena omnidireccional de alta ganancia, es angosta en el plano vertical. Así la recepción de la señal en una unidad móvil a menos de 1mi será reducida por el gran ángulo de elevación que causa a la unidad móvil estar en la región de sombra (fuera del haz principal). Entre mas grande sea el ángulo de elevación, más débil el nivel de recepción debido al patrón vertical de la antena.

Hay pocas trayectorias dentro del radio de 1mi alrededor del sitio celular. Los datos son insuficientes para crear una curva estadística. También la orientación de la trayectoria, en línea o

perpendicular, cercanos al sitio celular pueden causar una gran diferencia en los niveles de recepción de la señal (10dB-20dB) en los mismos.

Los alrededores a la célula pueden inclinar el nivel de recepción hacia arriba o abajo cuando la unidad móvil está dentro del radio de 1mi. Cuando la unidad móvil esta mas alejada de 1mi del sitio celular, el efecto debido a los alrededores se puede omitir.

La propagación en distancias cercanas se determinará usando el área suburbana como un ejemplo. En el obstáculo de 1mi el nivel recibido es -61.7dBm basados en el conjunto de referencia de parámetros; por ejemplo la antena tiene una altura de 30m, si incrementamos la altura de la antena a 60m, obtenemos una ganancia de 6dB. De 60m a 120m, obtenemos otros 6dB. A los 120m de altura de la antena, la señal recibida del móvil es la misma que la recibida en el espacio libre.

A una distancia de 100m (altura de la antena del móvil = 3m), los ángulos incidentes y de elevación son 11.77° y 10.72° respectivamente.

Dado que el ángulo de incidencia es más grande, la pendiente de 40dB/dec ya no es válida. Si el haz de la antena se apunta al móvil, observaremos 24dB/dec para una altura de antena de 30m, 22dB/dec para una altura de antena de 60m, y 20dB/dec para una altura de antena de 120m. La pendiente de 20dB/dec es la pendiente de espacio libre.

El rango d_F de campo cercano se puede obtener al poner $\Delta\phi$ en la ecuación (2.9-3) igualada a π

$$\Delta\phi = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d_F} = \pi \quad (2.19)$$

$$d_F = \frac{4h_1 h_2}{\lambda} \quad (2.20)$$

La señal recibida dentro del campo cercano ($d < d_F$) usa la fórmula de pérdida en el espacio libre definida como

^oG. Hagn *Radio System Performance Model for Predicting Communications Operational Ranges in Irregular Terrain* 29th. IEEE Vehicular Technology Conference Record, 1970

$$P_r = \frac{P_t}{(4\pi d / \lambda)^2} \quad (2.21)$$

y la señal recibida fuera del campo cercano ($d > d_f$) puede usar la fórmula de pérdida de trayectoria de radio móvil (2.17), para una mejor aproximación.

2.2.3.8 Propagación en grandes distancias

La ventaja de un sitio celular alto es que cubre la señal en un área grande, especialmente en un sistema limitado de ruido donde usualmente diferentes frecuencias son repetidamente usadas en diferentes áreas. Sin embargo, tenemos que prever el fenómeno de propagación en grandes distancias. Un sistema limitado en ruido gradualmente llega a ser un sistema limitado en interferencia conforme el tráfico se incrementa. La interferencia se debe no únicamente a la existencia de muchos cocanales y canales adyacentes en el sistema, sino también a la propagación a grandes distancias que también afecta la interferencia.

Para un sitio alto, el fenómeno de la baja atmósfera pudiera causar a la trayectoria de la onda de tierra propagarse en una forma diferente a una línea recta⁷. El fenómeno es mas pronunciado sobre el agua de mar porque la situación de la atmósfera sobre el océano puede variar basado en las diferentes altitudes. La trayectoria de la onda puede curvarse para arriba o para abajo. Entonces debemos tener la capacidad para lograr que en un lugar la señal sea fuerte en un tiempo y débil en otro.

⁷ Idem

2.2.3.9 Obtención de la pérdida de trayectoria de un modelo de predicción punto a punto. Condición sin obstrucciones

En esta condición, la trayectoria directa desde el sitio celular a la unidad móvil no es obstruida por el contorno del terreno. Aquí hay dos términos que deben distinguirse:

- trayectoria directa sin obstrucciones
- trayectoria en línea de vista

La primera es una trayectoria sin obstrucciones por el contorno del terreno. La trayectoria en línea de vista, es una trayectoria la cual no está obstruida por el contorno del terreno ni por estructuras humanas. En el caso formal, la antena del sitio celular no puede ser vista por el usuario móvil mientras que en el último caso, esto sí puede ocurrir, por lo que, la recepción de la señal es muy fuerte en este último caso.

En el ambiente móvil, frecuentemente no tenemos condiciones de línea de vista. Por esto usamos condiciones de trayectoria directa las cuales no están obstruidas por el contorno del terreno. Bajo estas condiciones, la ganancia de altura de antena se calcula para cada lugar en el que la unidad móvil viaje. El método para encontrar la ganancia de altura de antena es el siguiente:

1. Encuentre el punto de reflexión especular. Tome dos valores desde dos condiciones establecidas como sigue.

- a. Conecte la imagen de la antena del sitio celular a la antena del móvil; el punto de intersección en el nivel de tierra se considera como un punto de reflexión potencial.
- b. Conecte la imagen de la antena del móvil a la antena del sitio celular; el punto de intersección en el nivel de tierra también se considera un punto de reflexión potencial.

Entre los dos puntos de reflexión potenciales seleccionamos el punto que este mas cercano a la unidad móvil para ser el único real porque mas energía es reflejada a la unidad móvil en ese punto.

2. Extienda el plano de tierra reflejado. El plano de tierra reflejado en el cual el punto de reflexión puede ser generado al dibujar una línea tangente al punto donde este la curvatura de tierra, entonces se extiende el plano de tierra reflejado al lugar de la antena del sitio celular.

3. Mida la altura de la antena efectiva. La altura de la antena efectiva se mide desde el punto donde se encuentran el plano de tierra reflejado y la antena del sitio celular.

4. Calcule la ganancia de la altura de la antena ΔG . La fórmula de ΔG esta expresada como sigue (ver ecuación 2.13):

$$G = 20 \log \frac{h_e}{h_1} \quad (2.22)$$

Tenemos que considerar que la ganancia de la altura de la antena ΔG cambia conforme la unidad móvil se mueve a lo largo de la trayectoria. En otras palabras, la altura de la antena efectiva en el sitio celular cambia conforme la unidad móvil se mueve a otra ubicación, aunque la antena actual permanezca sin cambios.

Si no tomamos en cuenta los cambios en la ganancia de la altura de la antena debido al contorno del terreno entre el sitio celular y la unidad móvil, la pendiente de pérdida de trayectoria tendrá una desviación estándar de 8dB. Si tomamos en cuenta la ganancia de altura de antena, los valores generalmente tendrán una desviación estándar dentro de los 2dB a 3dB. Ahora podemos visualizar la diferencia entre una predicción área a área (usa una pendiente de pérdida de trayectoria) y una predicción punto a punto (después de la corrección de la ganancia de altura de la antena). La predicción punto a punto esta basada en el contorno del terreno actual a lo largo de una trayectoria particular de radio (en este caso, la trayectoria de radio y la trayectoria del móvil son la misma por simplicidad), pero la predicción área a área no. Esto es por lo que una predicción área a área tiene una desviación estándar de 8dB pero la predicción punto a punto tiene una desviación estándar de 2dB a 3dB.

2.2.3.10 Obtención de la pérdida de trayectoria de un modelo de predicción punto a punto. Condición con obstrucciones

En esta condición, la trayectoria directa del sitio celular a la unidad móvil esta obstruida por el contorno del terreno. Trataremos esta condición como sigue.

1. Aplicar predicción área a área. Primero, solo aplique los mismos pasos en la predicción área a área como si la condición de obstrucción no existiera. Todos los factores de corrección se aplicarán para encontrar la predicción área a área para una situación particular.
2. Obtener la pérdida de difracción. La pérdida de difracción se puede encontrar a partir de la figura 2.4

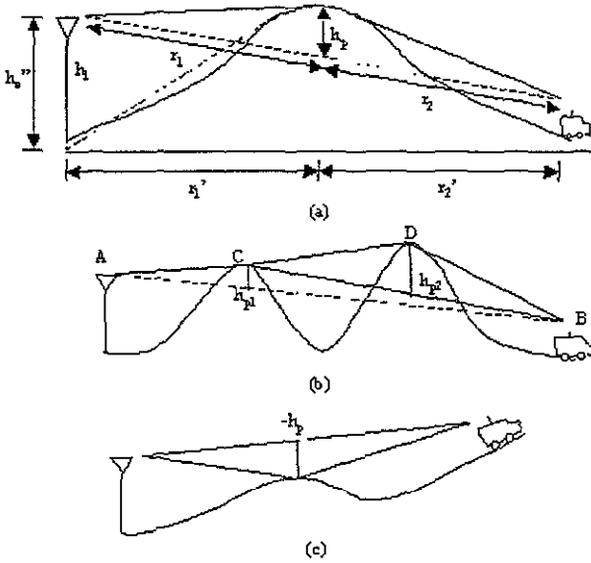


Figura 2.4

a. Encuentre los cuatro parámetros para un caso de cima simple. Los cuatro parámetros, las distancias r_1 y r_2 de la cima al sitio celular y a la unidad móvil, la altura de la orilla filosa h_p , y la longitud de onda operante λ se usan para encontrar un nuevo parámetro v

$$v = -h_p \sqrt{2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} \quad (2.23)$$

donde h_p es un número positivo como se muestra en la figura 2.4a, y h_p es un número negativo como se muestra en la figura 2.4c. Tan pronto como el valor de v se obtiene, la pérdida de difracción L se puede encontrar de las curvas mostradas en la figura 2.5.

La fórmula aproximada indicada enseguida puede ser usada con diferentes valores de v para representar la curva

$$\begin{aligned}
 1 \leq v \quad L &= 0\text{dB} \\
 0 \leq v < 1 \quad L &= 20\log(0.5 + 0.62v) \\
 -1 \leq v < 0 \quad L &= 20\log(0.5e^{0.95v}) \\
 -2.4 \leq v < -1 \quad L &= 20\log(0.4 - \sqrt{(0.1184 - (0.1v + 0.38)^2)}) \\
 v < -2.4 \quad L &= 20\log(-0.225/v)
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

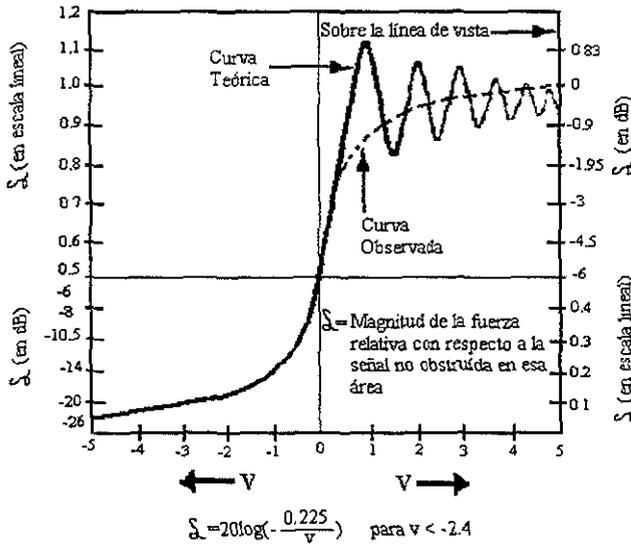


Figura 2.5

b. Caso de doble cima. Dos cimas se pueden formar por los triángulos ACB y CDB mostrados en la figura 2.4b. Cada uno se puede usar para calcular v como v_1 y v_2 . Los correspondientes L_1 y L_2 se pueden encontrar de la figura 2.5. La pérdida de difracción total de este modelo de doble cima es la suma de las dos pérdidas de difracción.

$$L_t = L_1 + L_2$$

2.2.3.11 Fórmula general del modelo de Lee

El modelo punto a punto de Lee se ha descrito a lo largo de las secciones anteriores. La fórmula del modelo se puede establecer simplemente en tres casos:

1. Caso de onda directa. La altura de la antena efectiva es un factor principal el cual varía con la posición de la unidad móvil mientras viaja.
2. Caso de sombra. No existe altura de antena efectiva. La pérdida es debida totalmente a la pérdida de difracción de la cima.
3. Condición sobre el agua. Se aplica la pérdida de trayectoria en el espacio libre.

Formamos el modelo como sigue

$$P_r = \begin{cases} \text{trayectoria sin obstrucciones} \\ = \underbrace{P_{r_0} - \gamma \log \frac{r}{r_0}}_{\text{por estructuras humanas}} + \underbrace{20 \log \frac{h_e'}{h_1}}_{\text{por contorno del terreno}} + \alpha \\ \text{trayectoria con obstrucciones} \\ = P_{r_0} - \gamma \log \frac{r}{r_0} + 20 \log \frac{h_e''}{h_1} + L + \alpha \quad (\text{donde } h_e'' \text{ se muestra en la figura 2.4a)} \\ = \underbrace{P_{r_0} - \gamma \log \frac{r}{r_0}}_{\text{por estructuras humanas}} + \underbrace{L + \alpha}_{\text{por contorno del terreno}} \quad (\text{cuando } h_e'' \approx h_1) \\ \text{trayectoria tierra a móvil sobre agua} \\ = \text{fórmula de espacio libre} \end{cases} \quad (2.25)$$

A partir de la fórmula anterior podemos señalar lo siguiente:

- La P_r no puede ser mayor que la de la pérdida de trayectoria en espacio libre.
- La orientación del camino, cuando esta dentro de 2mi alrededor del sitio celular, afectará la potencia recibida en la unidad móvil. La potencia recibida en la unidad móvil viajando a lo largo de una trayectoria en línea puede ser 10dB mayor que a lo largo de una trayectoria perpendicular.
- α es el factor de corrección (ganancia o pérdida) obtenida de la condición estándar.
- La pérdida de follaje debe ser agregada dependiendo de cada situación individual. Asegurarse que la altura de la antena en el sitio celular es mas alta que el tope de los árboles.
- Dentro de 1mi (o 1km) en un ambiente de estructuras humanas, la señal recibida es afectada por los edificios y orientaciones de las calles. La fórmula de predicción de macrocélula (2.25) no se puede aplicar en tal área.

El modelo área a área únicamente provee una exactitud de predicción con una desviación estándar de ± 8 dB, lo que significa que el 68% de los datos actuales de pérdida de trayectoria están dentro del ± 8 dB del valor predicho. El rango de incertidumbre es muy grande. El modelo punto a punto reduce el rango de incertidumbre al incluir la información del contorno del terreno detalladamente en las predicciones de pérdida de trayectoria.

El modelo de predicción punto a punto es una herramienta básica que se usa para generar un mapa de cobertura de la señal, o una configuración de diseño de sistema óptima, por mencionar algunas aplicaciones.

Los modelos de predicción tienen sus limitaciones cuando se usan en modelos de propagación de pérdidas en ambientes humanos. La exactitud de estos modelos varía típicamente entre 6 y 8 dB cuando se comparan con mediciones de campo. Sin embargo, la exactitud puede ser incrementada cuando se integran los resultados de las mediciones de campo con los resultados del modelo. Por ejemplo, es una práctica común en la industria tomar mediciones de campo y calcular la pendiente del modelo que se utiliza sobre ciertas distancias de la estación base.

Otra limitación es que las predicciones de los modelos presentados no se pueden utilizar sobre regiones de microcélulas. Las regiones de microcélulas se refieren a aquellas distancias que están muy cerca a una estación base, típicamente menos de una milla de distancia. Otro fenómeno de propagación predomina cuando uno quiere predecir la pérdida de trayectoria muy cerca de la estación base y es la propagación en distancia cercana que se vio párrafos arriba.

2.3 Ensombrecimiento (Shadowing)

La potencia de la señal en la trayectoria directa decrece relativamente despacio mientras el receptor se aleja del transmisor. Sin embargo, mientras que el receptor se aleja, los obstáculos pueden bloquear parcialmente la trayectoria de la señal (tal como árboles, edificios, y camiones en movimiento) causando caídas ocasionales en la potencia recibida. Este decremento en potencia ocurre sobre muchas longitudes de onda de la portadora y a esto se le llama desvanecimiento lento (*slow fading*). El *slow fading* se modela usualmente por una distribución lognormal con potencia y desviación estándar media (por ejemplo, la distribución de probabilidad de la variación de potencia

está distribuida como $10^{\xi/10}$, donde ξ es una variable aleatoria normal o gaussiana con media m y desviación estándar σ). La desviación estándar en un ambiente celular es típicamente alrededor de 8dB. Nosotros sabemos que la potencia promedio recibida decrece (debido a pérdida de trayectoria) conforme el móvil se retira de la estación base. Otra forma para visualizar el *slow fading* es imaginar que hay una variación lenta de potencia (ocurriendo sobre muchas longitudes de onda) en el máximo del promedio, y esa variación se puede describir por una distribución de probabilidad lognormal.

La razón por la que el *slow fading* tiene distribución lognormal es que la señal recibida es el resultado de la señal transmitida pasando a través de o reflejándose por muchos diferentes objetos, tales como árboles y edificios. Cada objeto atenúa la señal en alguna amplitud, y la potencia de la señal recibida final es la suma de los factores de transmisión de todos esos objetos. Como consecuencia, el logaritmo de la señal recibida equivale a la suma de un gran número de factores de transmisión, cada uno de los cuales se expresa en decibeles. Como el número de factores llega a ser grande, el teorema del límite central establece que la distribución de la suma se aproxima a una gaussiana, aún si los términos individuales no son gaussianos.

2.4 Desvanecimiento Rayleigh por Multitrayectoria (Multipath Rayleigh Fading)

Hay veces cuando un receptor móvil está completamente fuera de vista del transmisor de la estación base (por ejemplo, no hay trayectoria de señal viajando al receptor vía línea de vista). En este caso, las señales recibidas están hechas de un grupo de reflexiones desde objetos, y ninguna de las trayectorias reflejadas es más dominante que los otros. Las diferentes trayectorias de la señal reflejada llegan en tiempos ligeramente diferentes, con diferentes amplitudes, y con diferentes fases.

Fue verificado, tanto teórica como experimentalmente, que la envolvente recibida de la señal portadora para un móvil moviéndose tiene distribución Rayleigh. Por eso, este tipo de desvanecimiento se llama Rayleigh. El modelo teórico hace uso del hecho que hay muchas trayectorias de señales reflejadas desde diferentes direcciones (por ejemplo, N trayectorias de señal).

La señal recibida compuesta es

$$r(t) = \sum_{n=1}^N R_n \cos(2\pi f t - 2\pi f_{D,n} t) \quad (2.26)$$

Note que la señal recibida está hecha de N señales reflejadas; cada trayectoria reflejada tiene una amplitud R_n y f es la frecuencia de la portadora. El desplazamiento de frecuencia $f_{D,n}$ de cada señal reflejada está dada por el efecto Doppler cuando el usuario móvil está en movimiento. Si la señal está viajando paralelamente a la dirección de movimiento del móvil, entonces el desplazamiento de frecuencia Doppler es

$$f_{D,n} = \frac{v}{\lambda} \quad (2.27)$$

donde v es la velocidad del móvil. La representación en fase y cuadratura de la señal recibida en (2.26) es

$$r(t) = R_I(t)\cos(2\pi f t) + R_Q(t)\sin(2\pi f t) \quad (2.28)$$

donde la componente en fase es

$$R_I(t) = \sum_{n=1}^N R_n \cos 2\pi f_{D,n} t \quad (2.29)$$

y la componente en cuadratura es

$$R_Q(t) = \sum_{n=1}^N R_n \sin 2\pi f_{D,n} t \quad (2.30)$$

Los términos en las sumatorias de (2.29) y (2.30) son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d.). Por lo que, si N es grande, R_I y R_Q llegarán a ser variables aleatorias gaussianas con media cero. La envolvente de la señal es

$$R(t) = \sqrt{R_I^2(t) + R_Q^2(t)} \quad (2.31)$$

entonces tiene una distribución de Rayleigh. Incidentalmente, la distribución de Rayleigh tiene la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$p(R) = \frac{R}{\sigma^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}} \quad \text{para } 0 \leq R \quad (2.32)$$

y $p(R) = 0$ para $R < 0$. Una forma para visualizar este tipo de fading es imaginar una estación base transmitiendo un portadora sin modular con una envolvente constante. La forma de onda recibida en el móvil tendría una envolvente variable; la variación de la envolvente está distribuida de acuerdo a la distribución de Rayleigh. El ancho de banda de esta variación de envolvente está determinada por la máxima frecuencia de desplazamiento Doppler, la cual esta dada por la velocidad del móvil.

Debido a que hay muchas trayectorias diferentes de señal, esto puede resultar en interferencia constructiva y destructiva. Así, otra forma de visualizar este fenómeno particular de desvanecimiento es imaginar campos electromagnéticos radiados por una estación base combinándose constructiva y destructivamente, formando un patrón de onda estacionaria alrededor del área. Cuando un receptor móvil se mueve a través del campo, ocurren sucesivas caídas en amplitudes, o "*fades*". La distancia y espaciamento entre cada *fade* depende de la frecuencia portadora. Conforme un receptor se mueve a través del campo, la tasa de cambio de la amplitud y fase recibidas dependen de la frecuencia portadora y la velocidad del receptor. En un ambiente móvil, la variación de la amplitud debido a este fenómeno de fading podría ser del orden de 50dB. Como este tipo de fading podría ocurrir muy rápidamente, se llama algunas veces desvanecimiento rápido (*fast fading*).

2.5 Dispersamiento por Retardo de Multitrayectoria (Multipath Delay Spread)

La multitrayectoria ocurre cuando las señales llegan al receptor directamente desde el transmisor e, indirectamente debido a la transmisión a través de objetos o reflexión. La cantidad de reflexión de la señal depende de factores tales como el ángulo de llegada, frecuencia de la portadora, y polarización de la onda incidente. Debido a que las longitudes de la trayectoria son diferentes entre la trayectoria directa y la(s) trayectoria(s) reflejada(s), diferentes trayectorias de señal podrían llegar al receptor en diferentes tiempos por diferentes distancias. Un impulso se transmite en el tiempo 0; asumiendo que hay una multitud de trayectorias reflejadas presentes, un receptor a aproximadamente 1km detectará una serie de pulsos, o delay spread.

Si la diferencia de tiempo Δt es significativa comparada a un período de símbolo, puede ocurrir interferencia entre símbolos o ISI del inglés *Intersymbol interference*. En otras palabras, los símbolos arribando significativamente antes o después que sus propios períodos de símbolos pueden corromper los símbolos precedentes o siguientes. Para una diferencia de trayectoria fija y un *delay spread* dado, un sistema de tasa de datos más alta es más probable a sufrir ISI debido al *delay spread*. Para un sistema de tasa de datos fija, un ambiente de propagación con diferencias de trayectoria más grande (y así *delay spread* más alto) es más probable a causar ISI.

CAPÍTULO III

Fundamentos de la comunicación de RF digital

En este capítulo, nos enfocaremos a algunas de las características fundamentales en comunicación digital, particularmente a las aplicaciones de RF tal como radio móvil digital, y enfocado principalmente a CDMA puesto que es el propósito principal para el presente trabajo. Nos acercaremos al tema desde una perspectiva de sistema y particularmente, trataremos el objetivo en términos de subsistemas y diagramas de bloque que llevarán funciones específicas en el esquema general de enviar información desde el transmisor al receptor.

Antes de comenzar, es importante entender porque la industria de las comunicaciones personales inalámbricas se esta moviendo de la tecnología FM analógica tradicional a tecnologías digitales tales como Acceso Múltiple por División de Tiempo y por División de Código (TDMA y CDMA). Hay muchas ventajas en migrar a lo digital, pero mencionaremos las 4 razones principales por las cuales se esta dando esta tendencia en la industria:

- La primera es la calidad del servicio. Los sistemas de comunicación digital, como se manifiestan en muchas tecnologías, tienen el potencial de ofrecer una alta calidad de servicio. Esto es particularmente cierto en ambientes de radio rígidos tal como el canal móvil. Este servicio mejorado se hace posible por una capacidad inherente del sistema digital para regenerar la señal. La figura 3.1 ilustra el punto.

En este sistema simplificado de comunicación digital, un pulso positivo (el cual puede ser designado como 1) se envía desde el transmisor. Como el pulso viaja al receptor, este sufre deterioros en la amplitud y forma. El deterioro en la amplitud del pulso se debe a la pérdida de propagación, la cual es típicamente una función de la distancia. La forma del pulso también se distorsiona, debido a la naturaleza de paso bajas del canal.

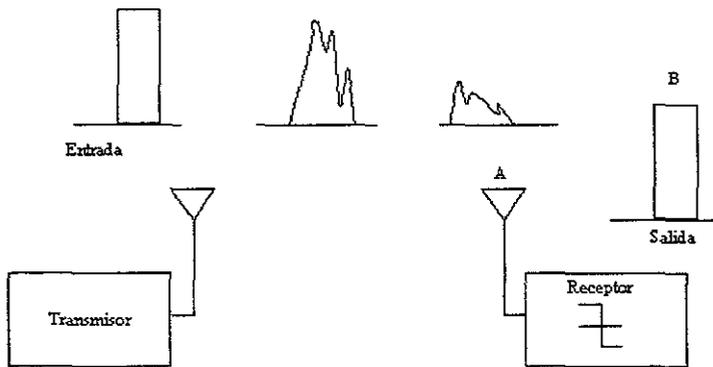


Figura 3.1

En el punto A, la señal ha sufrido mucha degradación y si fuera una señal analógica, la baja relación señal a ruido resultaría en una pobre calidad de la señal. Sin embargo, el sistema de comunicación digital que se muestra tiene un receptor que contiene un detector de umbral. El detector se programa para sacar un 1 si la energía acumulada sobre un período específico de bit es mayor que 0 y para sacar un -1 si la energía acumulada sobre el periodo es menor que 0. En este caso, la energía acumulada es mayor que 0, así el detector de umbral toma una decisión de 1 y regenera perfectamente el pulso transmitido.

En este ejemplo, la información esta contenida en la amplitud de la señal. Otros sistemas de comunicación digital, tal como el sistema CDMA, usan modulación por cambio de fase o PSK por sus siglas en inglés (*Phase Shift Keying*), donde la información se encuentra en la fase de la señal.

- La segunda razón es el incremento de la capacidad. Debido a que los sistemas de comunicación digital transmiten su información en unidades discretas, particularmente 1 y -1 (o 1 y 0), la información fuente es también convertida a unidades discretas. En un sistema de comunicación de voz, la información fuente es la voz humana; la voz es inherentemente analógica y debe ser convertida (codificada) a forma digital antes de que esta pueda ser transmitida vía el sistema digital. Esta codificación de información fuente, o codificación fuente, puede usar compresión de voz para reducir el número de bits necesarios para representar la voz. Por ejemplo, el sistema AMPS transmite voz usando un ancho de banda de 30kHz. El sistema IS-95 CDMA usa un *vocoder*, o codificador de voz, para convertir la voz humana a 9.6kbps de cadena digital.

Por esto, el *vocoder* usa un ancho de banda más pequeño para transmitir la información de la voz. Sin embargo, el *vocoder* empleado en CDMA es de tasa variable, lo cual significa que durante períodos de silencio de voz humana, la tasa de bit de salida disminuye. El *vocoder* IS-95 soporta cuatro tasas diferentes (9600, 4800, 2400, y 1200bps). La característica de tasa variable ayuda a reducir el ancho de banda requerido para transmitir voz. Si hay únicamente una cantidad fija de ancho de banda total, una reducción en los anchos de banda de canales de voz individuales implica un incremento en el número total de canales de voz disponibles.

- La tercera razón es la privacidad. Privacidad es una característica importante en cualquier sistema de comunicación. En el sistema FM analógico convencional, cualquiera que tenga un escáner de FM escucha una conversación. Un sistema de comunicación digital provee una plataforma útil donde las técnicas de encriptación se pueden usar para salvaguardar la información que se transmite sobre el aire. En un sistema complejo tal como CDMA, sería difícil para cualquiera construir un receptor y escuchar una conversación, aún si la característica de encriptación no está activada.

- Quizás la mejor razón para la reciente migración de la industria es la ventaja tecnológica y económica. Los sistemas de comunicación digital complejos, especialmente los de espectro disperso, se hacen con tecnologías tal como técnicas de procesamiento digital de señales (DSP) y su implementación en circuitos integrados de aplicación específica (ASIC). El costo de esas tecnologías fue históricamente grande para que ellas fueran únicamente soportadas por clientes militares y de gobierno. Sin embargo, en años recientes, el costo de inversión para usar estas tecnologías las ha hecho factibles para su uso en aplicaciones comerciales en una escala en masa.

3.1 Componentes del sistema

La figura 3.2 muestra un diagrama funcional de bloques de un sistema típico de comunicación digital¹. La fuente de información, tal como la voz humana, primero se convierte a forma digital por la función codificación de fuente. Entonces la función codificación de canal codifica la información digital con el propósito de combatir varios efectos degradantes del canal. La información pasa a la función acceso múltiple para que más de un usuario pueda compartir el

espectro. La función modulación convierte la información de banda base a una forma de onda paso banda (RF) que puede ser transmitida por el transmisor. En el lado del receptor, la forma de onda paso banda es interceptada por el receptor. Las señales son primero demoduladas de RF a banda base, entonces la función acceso múltiple separa a los diferentes usuarios que están compartiendo el espectro particular. Entonces, la función decodificación de canal intenta corregir los errores que han sido introducidos por el canal. La función decodificación de fuente convierte la información banda base y la regresa a voz analógica.

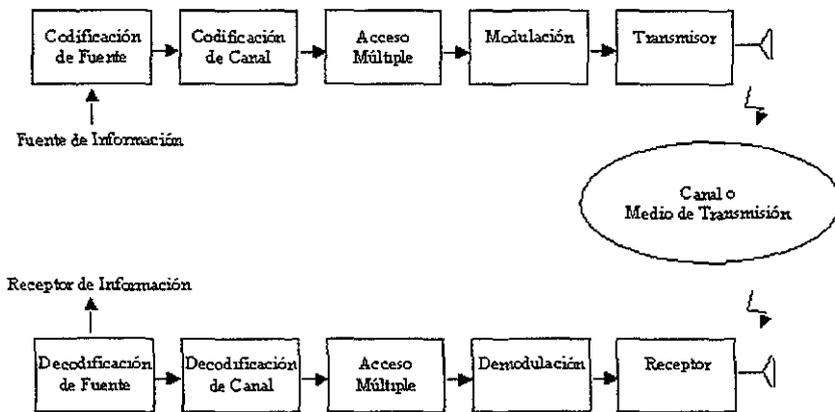


Figura 3.2

3.2 Codificación de fuente

La fuente de información tiene que ser codificada a una forma digital para ser procesada después por el sistema de comunicación digital. Una de las técnicas usadas en aplicaciones alámbricas es la modulación por codificación de pulsos (PCM), donde la voz analógica se convierte a una cadena de bits de 64kbps. Otras técnicas alámbricas que también se usan son la modulación por codificación de pulsos adaptiva (ADPCM) y la modulación delta (DM). Estos esquemas de codificación de fuente para voz usan algo llamado "codificación de forma de onda", donde el objetivo es replicar la forma de onda de la fuente de información.

¹ Blahut, Richard E. *Digital Transmission of Information* 1ª Ed. I.T. UU., Addison-Wesley Publishing Co, 1990, p.7.

PCM no es factible en aplicaciones inalámbricas porque hay un ancho de banda limitado disponible. Transmitir 64kbps de información sobre el aire demanda más ancho de banda del que puede ser concedido por muchos proveedores del servicio. Por esta razón, son necesarias técnicas alternativas en codificación de fuente para representar la información fuente (voz humana en este caso) usando menos ancho de banda. Un *vocoder* ofrece una solución atractiva. Este explota las características de la voz humana y usa menos bits para representar y replicar los sonidos humanos. Representa las características de frecuencia y temporales de la voz a partir del modelado de los sonidos vocales y no vocales que se producen en la traquea.

La traquea se puede modelar por un filtro lineal que es variable en el tiempo. Esto es, la respuesta del filtro varía con el tiempo. Esto se hace al actualizar periódicamente los coeficientes del filtro. Este filtro es típicamente todos polos porque un filtro todos polos requiere menos potencia computacional que un filtro con polos y ceros. Así, el filtro modelando la traquea se puede representar como $1/T(z)$. Si representamos la señal de excitación como $E(z)$, entonces el espectro de la señal del habla $S(z)$ se puede describir como:

$$S(z) = \frac{E(z)}{T(z)} \quad (3.1)$$

El filtro todos polos $1/T(z)$ se puede escribir como

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^K b_k z^{-k}} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.1) se puede también escribir como

$$E(z) = S(z)T(z) \quad (3.3)$$

Al filtro todos ceros $T(z)$ lo llaman algunas veces el filtro de análisis, y (3.3) representa el proceso de análisis del habla. Al filtro todos polos $1/T(z)$ se le llama el filtro de síntesis; este se usa en conjunto con la señal de excitación $E(z)$ para sintetizar la señal del habla $S(z)$. La ecuación (3.1) representa entonces el proceso de síntesis del habla. A este tipo de técnica de codificación se le llama algunas veces codificación de análisis-síntesis. La figura 3.3 muestra como el habla se analiza al final de la transmisión y se sintetiza al final de la recepción. El codificador de voz analiza

el habla y produce parámetros de excitación (tales como decisiones de excitación para vocales o consonantes) y coeficientes del filtro válidos sobre el intervalo de 20ms. Los parámetros de excitación y los coeficientes del filtro son las salidas del codificador del habla. En el sistema IS-95 CDMA, estos parámetros y los coeficientes son la información que se comunica entre el transmisor y el receptor. El decodificador de voz al final de la recepción usa estos parámetros y los coeficientes para construir la fuente de excitación y el filtro de síntesis. El resultado es la voz estimada \hat{S} a la salida del decodificador de voz.

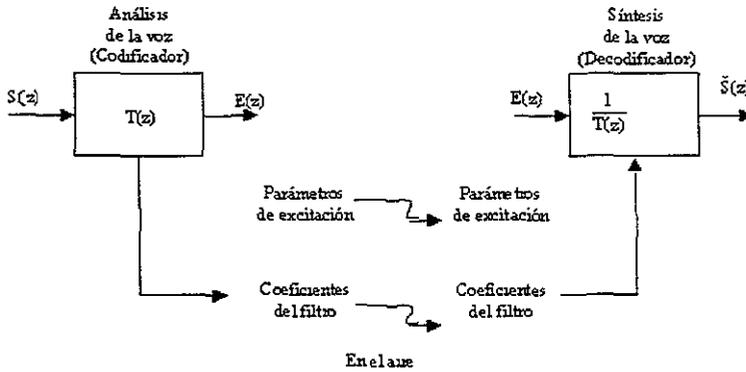


Figura 3.3

La codificación predictiva lineal² (LPC) se usa ampliamente para estimar los coeficientes de filtro. Una malla de realimentación en el codificador se usa para comparar la voz actual y la voz estimada. La diferencia entre la voz actual y la voz estimada es el error. La LPC se usa para generar los coeficientes del filtro para que este error sea minimizado. Estos coeficientes de filtro, junto con los parámetros de excitación, se usan entonces por el decodificador para síntesis del habla.

El sistema IS-95 CDMA usa una variante de la LPC que se llama predicción lineal por código excitado (CELP). En lugar de tomar una decisión de vocal o consonante, la CELP tiene una forma de excitación diferente para el filtro todos polos. Específicamente, el decodificador CELP usa un libro de códigos para generar entradas de excitación al filtro de síntesis.

² Gibson, Jerry D. *The Communications Handbook*. 1ª Ed. EE.UU., CRC Press e IEEE Press, 1996, p.1248

3.3 Codificación de canal

Después de que la información de la fuente se codifica en forma digital es necesario agregar cierta redundancia a esta señal digital en banda base. Esto se hace para mejorar la calidad del sistema de comunicación al permitir una mejor resistencia a los efectos de deterioro del canal, tales como ruido y desvanecimiento. El objetivo de la codificación de canal es que, dada una probabilidad deseada de error, reducir la E_b/N_0 requerida, o alternativamente, dada una E_b/N_0 , reducir la probabilidad de error. El costo de este objetivo es un mayor ancho de banda, o más bits de redundancia que el sistema tiene que transmitir.

Los códigos de corrección de errores se aplican a la codificación de canal para mejorar la calidad de error del sistema. El propósito es agregar bits extra a los bits de información tal que los errores puedan ser encontrados y corregidos en el receptor. Hay dos clases principales de códigos correctores de error: códigos de bloque y códigos convolucionales.

IS-95 CDMA usa codificación de bloque para indicar la calidad de cada trama o *frame* transmitido (el cual contiene un bloque de bits de información). El sistema usa un código de redundancia cíclica (CRC), el cual es uno de los códigos de bloque más común. Para CRC, los bits de información se tratan como un número binario. Este número se divide por un número primo único que también es binario, y el residuo se agrega a los bits de información como bits de redundancia. Cuando el *frame* se recibe, el receptor realiza la misma división usando el mismo divisor primo y compara el residuo calculado con el residuo recibido en el *frame*.

Se dice que los códigos de bloque no tienen memoria, lo cual significa que la palabra código o los bits CRC adicionales (en el caso de IS-95) son únicamente una función del bloque actual. Los códigos convolucionales, por otro lado, tienen memoria. En adición al uso de CRC, IS-95 CDMA usa codificación convolucional para además mejorar la calidad del error. Para códigos convolucionales, los bits codificados son funciones de los bits de información y funciones de la longitud de los registros de corrimiento (*constraint*)³. Específicamente, cada bit codificado (a la salida del codificador convolucional) es una combinación lineal de algunos bits de información

³ Richard Blahut, op. cit., p 220.

previos. El enlace de bajada (estación base a estación móvil) usa un código convolucional de una tasa de $1/2$ y una longitud *constraint* $k=9$.

Las señales que viajan a través de un canal de comunicación móvil son susceptibles al desvanecimiento. Los códigos de corrección de errores están diseñados para combatir errores resultados de desvanecimientos y, al mismo tiempo, mantener la potencia de la señal a un nivel razonable. Muchos códigos de corrección de errores se aplican bien al corregir errores aleatorios. Sin embargo, pueden hacer menos útil la función de corrección de errores durante períodos de profundos desvanecimientos, grandes cadenas de errores sucesivos o cuando aparecen en gran cantidad y al mismo tiempo.

Una técnica para aleatorizar los bits en una cadena de mensaje es mezclarlos (*interleaving*), tal que los errores repentinos que son introducidos por el canal puedan ser convertidos a errores aleatorios. Una forma de mezclar (*interleave*) el mensaje consiste en cargar el mensaje en una matriz truncando el mensaje en partes y después cargándolo en renglones. El canal introduce varios errores repentinos dentro del mensaje. Como resultado, el mensaje se recibe con errores. Al final de la recepción, un ordenador (*deinterleaver*) reconstruye el mensaje usando la misma matriz, excepto que en este caso el ordenador carga el mensaje recibido primero en columnas y después lee el mensaje de los renglones. El sistema IS-95 CDMA usa un mezclador para el mismo propósito. El mezclador para el canal de tráfico de subida usa una matriz de 32 renglones por 18 columnas (a tasa completa). El mezclador para el canal de tráfico de bajada usa una matriz de 24 renglones por 16 columnas (a tasa completa).

3.4 Acceso Múltiple

Después de que la señal en banda base fue codificada para el control de error del canal, la señal se transforma para permitir acceso múltiple por diferentes usuarios. El acceso múltiple se refiere a compartir un recurso común para permitir comunicaciones simultáneas por múltiples usuarios, y este recurso es el espectro de radiofrecuencia (RF).

En el esquema tradicional de Acceso Múltiple por División de Frecuencia o FDMA por sus siglas en inglés (*Frequency Division Multiple Access*), se asigna a cada usuario una banda particular de frecuencia en la que la transmisión se puede llevar a cabo (ver figura 3.4). Una porción del espectro de frecuencias se divide en canales diferentes. Las diferentes señales de usuarios se filtran

con pasabajas y se modulan en una frecuencia portadora asignada f_c de un canal particular. De esta forma pueden compartir simultáneamente el espectro de frecuencia múltiples usuarios.

En TDMA, cada usuario se asigna a una ranura de tiempo (*time slot*) diferente en la cual pueden transmitir; en este caso, la división de los usuarios ocurre en el dominio del tiempo (ver figura 3.4).

En CDMA, cada señal de banda angosta del usuario se dispersa sobre un amplio ancho de banda. Este amplio ancho de banda es más grande que el mínimo ancho de banda requerido para transmitir la información. Esto es que, cada señal de usuario de banda angosta se dispersa por un código diferente de banda ancha, cada uno de los códigos es ortogonal a los otros, y la canalización de usuarios simultáneos se logra por el uso de este conjunto de códigos ortogonales. Todas las señales de banda ancha dispersas (de diferentes usuarios) se agregan juntas para formar una señal compuesta, y la señal compuesta se transmite sobre el aire en la misma banda de frecuencia. El receptor es capaz de distinguir entre los diferentes usuarios al usar una copia del código original. El receptor separa al usuario deseado de la señal compuesta al correlacionar la señal compuesta con el código original. Todos los otros usuarios con códigos que no igualan el código del usuario deseado se rechazan.

El sistema IS-95 CDMA tiene enlaces asimétricos (por ejemplo, los enlaces de subida y de bajada tienen diferentes estructuras de enlace). Las diferencias van desde el esquema de modulación hasta los métodos de control de errores. En suma, cada enlace usa códigos diferentes para canalizar usuarios individuales. El enlace de bajada usa códigos de Walsh, mientras que el enlace de subida usa códigos de ruido pseudoaleatorio (PN) para canalización.

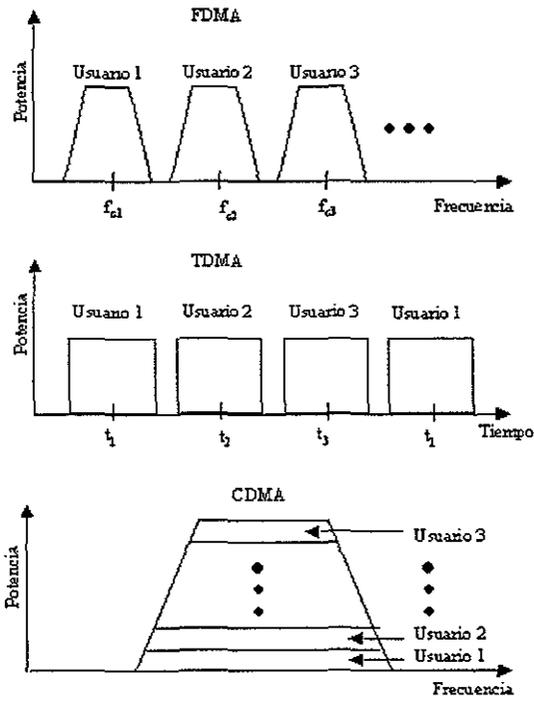


Figura 3.4

3.4.1 Códigos de Walsh

3.4.1.1 Generación de códigos de Walsh

La figura 3.4 muestra que en un sistema CDMA, todos los usuarios se transmiten en la misma banda de RF. Para evitar interferencia mutua en el enlace de bajada, los códigos de Walsh⁴ se usan para separar usuarios individuales mientras ellos ocupan simultáneamente la misma banda de RF. Los códigos de Walsh que se usan en IS-95 son un conjunto de 64 secuencias ortogonales binarias. Estas secuencias son ortogonales a cada una, y ellas se generan al usar la matriz Hadamard⁵. Se usa recursión para generar matrices de orden más alto desde unas de orden más pequeño; esto es,

$$H_{2N} = \begin{bmatrix} H_N & H_N \\ H_N & \overline{H_N} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

donde $\overline{H_N}$ contiene los mismos elementos pero invertidos de H_N . La matriz primitiva es

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

Por tanto, para derivar un conjunto de cuatro secuencias ortogonales Walsh w_0 , w_1 , w_2 , y w_3 , únicamente necesitamos generar una matriz Hadamard de orden 4, o

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

Las cuatro secuencias ortogonales en este conjunto de código de Walsh se toman de los renglones de la matriz H_4 ; esto es,

$$\begin{aligned} w_0 &= [0 & 0 & 0 & 0] \\ w_1 &= [0 & 1 & 0 & 1] \\ w_2 &= [0 & 0 & 1 & 1] \\ w_3 &= [0 & 1 & 1 & 0] \end{aligned}$$

⁴ Glover, Ian Grant, Peter. *Digital Communications*. 1ª Ed, Inglaterra, Prentice Hall, 1998. p. 597-599

⁵ *Ibidem* p.601.

Para acceso múltiple por secuencia directa (DS-SS), una de las formas de implementación de la división por código, se especifican tres condiciones que se deben encontrar en un conjunto de secuencias ortogonales y son⁶:

1. La correlación cruzada debe ser cero o muy pequeña.
2. Cada secuencia en el conjunto tiene un número igual de 1's y -1's, o el número de 1's difiere del número de -1's por lo mas en uno.
3. El producto punto escalar de cada código debe ser igual a 1.

Al cambiar los 0's por -1's en cada una de las cuatro secuencias anteriores, esto es,

$$\begin{aligned} w_0 &= [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \] \\ w_1 &= [-1 \ 1 \ -1 \ 1 \] \\ w_2 &= [-1 \ -1 \ 1 \ 1 \] \\ w_3 &= [-1 \ 1 \ 1 \ -1 \] \end{aligned}$$

podemos facilitarnos el cálculo del producto punto y producto cruz. Se puede verificar fácilmente que todas las secuencias anteriores excepto w_0 satisfacen las condiciones. En general, la secuencia de Walsh 0 tiene todos sus elementos igual a -1 y no puede ser usada para canalización. En el sistema IS-95 CDMA, w_0 no se usa para transmitir información en banda base.

La matriz (3.4) se puede usar recursivamente para generar matrices Hadamard de órdenes más altos para obtener conjuntos más grandes de secuencias ortogonales. Por ejemplo, 8 secuencias ortogonales, cada una de longitud 8, se puede obtener al generar H_8 ; 16 secuencias ortogonales, cada una de longitud 16, se puede obtener al generar H_{16} . El enlace de bajada IS-95 usa un conjunto de 64 secuencias ortogonales Walsh, así la limitación física en el número de canales en el enlace de bajada es 63 porque en un sistema IS-95, w_0 no se usa para transmitir alguna información en banda base.

⁶ Rodger, Ziemer E. y Peterson, Roger L. *Introduction to Digital Communication* 1ª Ed, EE UU Macmillan Publishing Co, 1992. p 525.

3.4.1.2 Canalización usando códigos de Walsh

El siguiente ejemplo ilustra como los códigos de Walsh se pueden usar para acceso múltiple por secuencia directa. Suponga que hay tres usuarios diferentes, y cada usuario desea enviar un mensaje separado. Los mensajes separados son:

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

a cada uno de los usuarios se le asigna un código de Walsh respectivamente:

$$\begin{aligned} w_1 &= [-1 \ 1 \ -1 \ 1 \] \\ w_2 &= [-1 \ -1 \ 1 \ 1 \] \\ w_3 &= [-1 \ 1 \ 1 \ -1 \] \end{aligned}$$

Cada mensaje se dispersa por su código de Walsh asignado, por lo que a partir de este momento, a cada bit se le llama ahora chip. Note que la tasa chip del código de Walsh es cuatro veces la tasa de bit del mensaje, contribuyendo a una ganancia de procesamiento de 4. Para el mensaje uno:

$$\begin{array}{rcccc} m_1(t) & & 1 & & -1 & & & & 1 \\ m_1(t) & & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ w_1(t) & & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ m_1(t)w_1(t) & & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{array}$$

Note que $m_1(t)w_1(t)$ es la señal de espectro disperso del primer mensaje. De forma similar para el mensaje dos:

$$\begin{array}{rcccc} m_2(t) & & 1 & & 1 & & & & -1 \\ m_2(t) & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ w_2(t) & & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ m_2(t)w_2(t) & & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{array}$$

Para el mensaje tres:

$$\begin{array}{rcccc} m_3(t) & & -1 & & 1 & & & & 1 \\ m_3(t) & & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ w_3(t) & & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ m_3(t)w_3(t) & & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{array}$$

Las señales de espectro disperso para los tres mensajes, $m_1(t)w_1(t)$, $m_2(t)w_2(t)$, y $m_3(t)w_3(t)$, se combinan para formar una señal compuesta $C(t)$; esto es,

$$C(t) = m_1(t)w_1(t) + m_2(t)w_2(t) + m_3(t)w_3(t)$$

La $C(t)$ resultante es:

$$C(t) = \begin{matrix} -1 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 \end{matrix}$$

$C(t)$ es la señal compuesta que se transmite en la banda de RF. Si no hay errores importantes durante el proceso de transmisión, el receptor intercepta $C(t)$.

Para separar los mensajes originales $m_1(t)$, $m_2(t)$, y $m_3(t)$ de la señal compuesta $C(t)$, el receptor multiplica $C(t)$ por el código de Walsh que fue asignado a cada mensaje:

$$\begin{array}{rcl} C(t)w_1(t) & = & \begin{matrix} 1 & -1 & 1 & 3 & 1 & -1 & -3 & -1 & 1 & 3 & 1 & -1 \end{matrix} \\ C(t)w_2(t) & = & \begin{matrix} 1 & 1 & -1 & 3 & 1 & 1 & 3 & -1 & 1 & -3 & -1 & -1 \end{matrix} \\ C(t)w_3(t) & = & \begin{matrix} 1 & -1 & -1 & -3 & 1 & -1 & 3 & 1 & 1 & 3 & -1 & 1 \end{matrix} \end{array}$$

Entonces el receptor integra, o suma, todos los valores en cada periodo de bit. Las funciones $M_1(t)$, $M_2(t)$, y $M_3(t)$ son los resultados:

$$\begin{array}{rcl} C(t)w_1(t) & = & \begin{matrix} 1 & -1 & 1 & 3 & 1 & -1 & -3 & -1 & 1 & 3 & 1 & -1 \end{matrix} \\ M_1(t) & & \begin{matrix} & & & 4 & & & -4 & & & & & 4 \end{matrix} \\ C(t)w_2(t) & = & \begin{matrix} 1 & 1 & -1 & 3 & 1 & 1 & 3 & -1 & 1 & -3 & -1 & -1 \end{matrix} \\ M_2(t) & & \begin{matrix} & & & 4 & & & 4 & & & & & -4 \end{matrix} \\ C(t)w_3(t) & = & \begin{matrix} 1 & -1 & -1 & -3 & 1 & -1 & 3 & 1 & 1 & 3 & -1 & 1 \end{matrix} \\ M_3(t) & & \begin{matrix} & & & -4 & & & 4 & & & & & 4 \end{matrix} \end{array}$$

Finalmente se aplicará un "umbral de decisión" a las funciones integradas $M_1(t)$, $M_2(t)$, y $M_3(t)$. Las reglas de decisión usadas son:

$$\begin{array}{ll} \bar{m}(t) = 1 & \text{si } M(t) > 0 \\ \bar{m}(t) = -1 & \text{si } M(t) < 0 \end{array}$$

Después de aplicar las reglas anteriores, obtenemos los siguientes resultados:

$$\begin{array}{rcccl} \overline{m_1(t)} & 1 & -1 & 1 & \\ \overline{m_2(t)} & 1 & 1 & -1 & \\ \overline{m_3(t)} & -1 & 1 & 1 & \end{array}$$

3.4.2 Códigos de Ruido Pseudoaleatorio (PN)

Una diferencia entre el enlace de bajada de IS-95 CDMA es que tiene canales piloto (*pilot*) y de sincronía (*sync*) para ayudar a la sincronización, mientras que el enlace de subida no los tiene. Las estaciones móviles transmiten a discreción, y no intentan sincronizar sus transmisiones. De esta forma, los códigos de Walsh no se usan en el enlace de subida. La naturaleza incoherente del enlace de subida implica el uso de otra clase de códigos, códigos PN, para canalización.

3.4.2.1 Generación de códigos pseudoaleatorios (PN)

Los conjuntos de códigos PN se pueden generar por un registro de corrimiento de realimentación lineal⁷. Un ejemplo (registro de 3 estados) se muestra en la figura 3.5. Los bits binarios se desplazan a través de los diferentes estados del registro. La salida del último estado y la salida de un estado intermedio se combinan y se alimentan como entrada al primer estado.

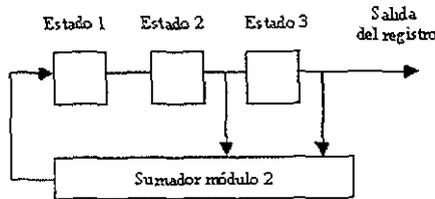


Figura 3.5

⁷ Ian Glover, Peter Grant. op. cit. p. 485

El registro empieza con una secuencia inicial de bits, o estado inicial, almacenada en sus estados, entonces el registro se activa, y los bits se mueven a través de los estados; de esta forma, el registro continúa generando bits de salida y alimenta bits de entrada a su primer estado. Los bits de salida del último estado forman el código PN.

Debe notarse que existe un corrimiento, en el cual el registro retorna a su estado inicial, y los siguientes desplazamientos de bits darán otra secuencia idéntica de salidas. Así, la longitud efectiva del código PN que se genera es la del corrimiento en la que se repitió el estado inicial. La salida del registro forma el código PN, el cual se considera sin el bit en que se volvió a repetir el estado.

El código que se genera de esta forma se llama código de registro de corrimiento de longitud máxima⁸, y la longitud L de un código de longitud máxima es:

$$L = 2^N - 1 \quad (3.5)$$

donde N es el número de estados, u orden, del registro. La estructura del código PN está determinada por la lógica de realimentación (por ejemplo, cuales estados se seleccionan para realimentación) y el estado del registro inicial.

Debe observarse que estos códigos satisfacen las condiciones establecidas anteriormente⁹ para acceso múltiple por secuencia directa, esto es,

1. La correlación cruzada debe ser cero o muy pequeña
2. Cada secuencia en el conjunto tiene un número igual de 1's y -1's, o el número de 1's difiere del número de -1's por mucho en uno.
3. El producto punto escalar de cada código debe ser igual a cero.

⁸ Ibidem p 488.

⁹ Ziener Rodger. Roger Peterson, op. cit , p 526

3.4.2.2 Canalización usando códigos PN

Se usará un ejemplo para ilustrar como los códigos PN se pueden usar para acceso múltiple. Suponga que los mismos tres usuarios desean enviar tres mensajes separados. Estos mensajes son:

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

A cada uno de los tres usuarios se le asigna un código PN, respectivamente:

$$P_0 = [1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1]$$

$$P_3 = [1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1]$$

$$P_6 = [-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1]$$

El mensaje 1 se asigna al código PN 0, el mensaje 2 se asigna al código PN 3, y el mensaje 3 se asigna al código PN 6. Cada mensaje se dispersa por su propio código PN. Note que la tasa chip del código PN es siete veces la tasa de bit del mensaje, contribuyendo a una ganancia de procesamiento de 7. Para el mensaje 1:

$$m_1(t) \quad 1 \quad \quad \quad -1 \quad \quad \quad 1$$

$$m_1(t) \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$$

$$P_0 \quad 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \quad 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \quad 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1$$

$$m_1(t)P_0 \quad 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \quad -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \quad 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1$$

Note que $m_1(t)P_0$ es la señal de espectro disperso del primer mensaje. De manera similar para el mensaje 2:

$$m_2(t) \quad 1 \quad \quad \quad 1 \quad \quad \quad -1$$

$$m_2(t) \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1$$

$$P_3 \quad 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \quad 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \quad 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1$$

$$m_2(t)P_3 \quad 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \quad 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \quad -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1$$

Para el mensaje 3:

$$m_3(t) \quad -1 \quad \quad \quad 1 \quad \quad \quad 1$$

$$m_3(t) \quad -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1$$

$$P_6 \quad -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \quad -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \quad -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1$$

$$m_3(t)P_6 \quad 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \quad -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \quad -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1$$

Las señales de espectro disperso para los tres mensajes $m_1(t)P_0$, $m_2(t)P_3$, y $m_3(t)P_6$ se combinan para formar una señal compuesta $C(t)$; esto es,

$$C(t) = m_1(t)P_0 + m_2(t)P_3 + m_3(t)P_6$$

La $C(t)$ resultante es:

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

$C(t)$ es la señal compuesta que se transmite en la banda de RF. Si no hay errores importantes durante el proceso de transmisión, el receptor intercepta $C(t)$. Para separar los mensajes originales $m_1(t)$, $m_2(t)$ y $m_3(t)$ de la señal compuesta $C(t)$, el receptor multiplica $C(t)$ por el código PN asignado a cada mensaje.

Entonces el receptor integra, o suma, todos los valores sobre cada periodo de bit. Las funciones $M(t)$ son los resultados.

Finalmente, un "umbral de decisión" se aplicará a las funciones integradas $M(t)$. Las reglas de decisión que se usan son:

$$\begin{aligned} \bar{m}(t) &= 1 && \text{si } M(t) > 0 \\ \bar{m}(t) &= -1 && \text{si } M(t) < 0 \end{aligned}$$

3.4.2.3 Observaciones concluyentes

Definimos la autocorrelación en tiempo discreto de una secuencia real x como¹⁰

$$R_x(i) = \sum_{j=0}^{j-1} x_j x_{j-1} \quad (3.6)$$

En otras palabras, para cada cambio sucesivo i , calculamos la sumatoria del producto de x_j y su versión desplazada x_{j-i} . La propiedad de autocorrelación es importante porque ayuda a la

¹⁰ Ian Glover, Peter Grant op. cit., p 121

adquisición inicial y sincronización del código PN en el receptor. Una alta correlación ocurre únicamente cuando los códigos están alineados; si los códigos no están alineados, resulta en una correlación baja.

En la práctica, el receptor posee una copia original del código PN. El receptor adquirirá una secuencia $p_{0,j-1}$ entrante en una fase arbitraria. El receptor únicamente tiene un "lado" de la secuencia entrante y calcula la autocorrelación. Cuando la autocorrelación alcanza un máximo, entonces los dos códigos están en fase y tienen un desplazamiento de tiempo de cero. En un sistema IS-95 CDMA, esto lo hace una estación móvil para adquirir el canal piloto sin modular. Este esquema de adquisición también se puede usar cuando la longitud del código disperso es igual al período de bit del dato.

En IS-95 CDMA, el enlace de subida usa el código PN "largo" o "*long*" para canalización. Se llama código *long* porque su longitud es literalmente muy larga. El código *long* tiene una longitud de 2^{42-1} chips y se genera usando un registro de 42 estados.

En la sección 3.4.1 vimos que el enlace de bajada usa el código de Walsh para canalizar usuarios individuales de una estación base particular. Sin embargo, el enlace de bajada también usa el código PN. A cada estación base le es asignada un código único PN que se coloca en la parte superior del código de Walsh. Esto se hace para proveer aislamiento entre las diferentes estaciones base (o sectores); el aislamiento es necesario porque cada estación base usa el mismo conjunto de 64 códigos de Walsh. El código PN en el enlace de bajada es llamado el código "corto" o "*short*". Se llama así porque su longitud es relativamente corta. El código *short* se genera usando un registro de 15 estados y tiene una longitud de 2^{15-1} chips.

3.5 Modulación

La cadena de bits digitales tiene que modular en una portadora de RF para ser transmitida. La señal modulada se transmite entonces a través del espacio en la forma de un campo electromagnético propagándose.

Necesitamos modular la cadena de bits en una portadora de RF por dos razones muy importantes,

- Primero, la agencia regulatoria gubernamental, COFETEL, especifica la frecuencia a la cual un servicio particular se puede transmitir. Así, no cualquiera puede transmitir a la frecuencia en banda base.
- Segundo, para transmitir en banda base, que es a una frecuencia mucho menor, el tamaño de la antena requerida sería enorme para permitir un acoplamiento eficiente entre el transmisor y el espacio libre.

Por ejemplo, para acoplar eficientemente la potencia al espacio libre, el tamaño de la antena necesita ser al menos del orden de la longitud de onda. Si uno desea transmitir una señal en banda base a 9.6kHz, el tamaño de la antena sería 31.25km

Hay una diferencia entre las técnicas de modulación analógica y digital. En la modulación analógica, la información está contenida en la forma de onda continua de la señal. Los esquemas de modulación digital, por otro lado, se usan para transmitir unidades discretas de información llamadas símbolos, y la información puede estar en la amplitud, la fase o la amplitud y fase de la señal.

3.5.1 Modulación Binaria por Cambio de Fase (BPSK, Binary Phase-Shift keying)

Cuando el transmisor quiere enviar un +1, transmitirá una cosenoide positiva; cuando desee enviar un -1, transmitirá una cosenoide negativa. La expresión analítica para BPSK es¹¹

$$\text{Para } s = +1: s_{+1}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft) \quad 0 < t < T \quad (3.7)$$

$$\text{Para } s = -1: s_{-1}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft + \pi) = -\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft) \quad 0 < t < T \quad (3.8)$$

donde E es la energía por símbolo, y T es la duración del tiempo de cada símbolo. De estas expresiones, podemos ver que la información se almacena en la fase de las señales moduladas.

El modulador BPSK es fácil de implementar. El modulador por sí mismo no es más que un multiplicador. La figura 3.6 muestra el diagrama de bloques de un modulador BPSK. La entrada del modulador consiste de los símbolos de datos. Los datos pueden ser ya sea +1 o -1. Los datos se

¹¹ Sklar, Bernard *Digital Communications Fundamentals and Applications*, 1ª Ed. Et: UCI, Prentice Hall, 1988, p. 138

multiplican por la portadora $\cos(2\pi ft)$ multiplicados por el coeficiente $(2E/T)^{1/2}$. La salida del multiplicador es la correspondiente señal modulada.

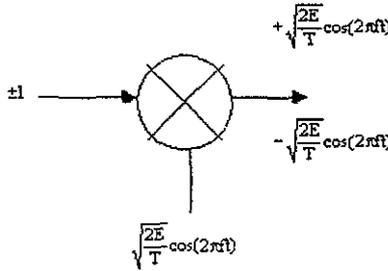


Figura 3.6

3.5.2 Modulación en Cuadratura por Cambio de Fase (QPSK, Quadrature Phase-Shift keying)

BPSK es capaz de transmitir un bit de información (+1 o -1) por período de símbolo T , a diferencia de QPSK que hace uso de la componente en cuadratura en adición a la componente en fase. Las componentes en fase y cuadratura se pueden combinar sin interferir con la otra porque las dos son ortogonales a la otra¹². Entonces, una segunda señal BPSK en cuadratura se puede agregar a la primera sin introducir interferencia a la otra. Esta técnica, conocida como QPSK, efectivamente dobla la eficiencia de BPSK porque es capaz de transmitir un bit adicional durante T .

Para enviar dos bits de información, el sistema QPSK necesita usar cuatro símbolos: símbolos 0, 1, 2, y 3.

Para transmitir cuatro símbolos diferentes, el transmisor QPSK necesita ser capaz de enviar cuatro formas de onda diferentes: $s_0(t)$, $s_1(t)$, $s_2(t)$, y $s_3(t)$. Cada señal corresponde a uno de los cuatro símbolos, esto es,

¹² Ibidem p 171

$$\text{Símbolo 0: } s_0(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft + \pi/4) \quad 0 < t < T \quad (3.9)$$

$$\text{Símbolo 1: } s_1(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft + (3\pi/4)) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \text{sen}(2\pi ft + \pi/4) \quad 0 < t < T \quad (3.10)$$

$$\text{Símbolo 2: } s_2(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft + (5\pi/4)) = -\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft + \pi/4) \quad 0 < t < T \quad (3.11)$$

$$\text{Símbolo 3: } s_3(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi ft + (7\pi/4)) = -\sqrt{\frac{2E}{T}} \text{sen}(2\pi ft + \pi/4) \quad 0 < t < T \quad (3.12)$$

donde E es la energía por símbolo. El transmisor cambia la fase de la forma de onda coseno, dependiendo de cual símbolo será transmitido.

La figura 3.7 muestra el diagrama de bloques de un modulador QPSK. La entrada al modulador son los bits de datos $\{a_n\}$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. El bit de dato puede ser ya sea a_n o a_{-1} . Los bits de datos se alimentan a un demultiplexor, donde la cadena de bits se separa en cadena de bits par y cadena de bits impar. La cadena de bits par se multiplica por la portadora en fase, y la cadena de bits impar se multiplica por la portadora cuadratura. La salida de los multiplicadores se combina en el sumador para formar la señal QPSK.

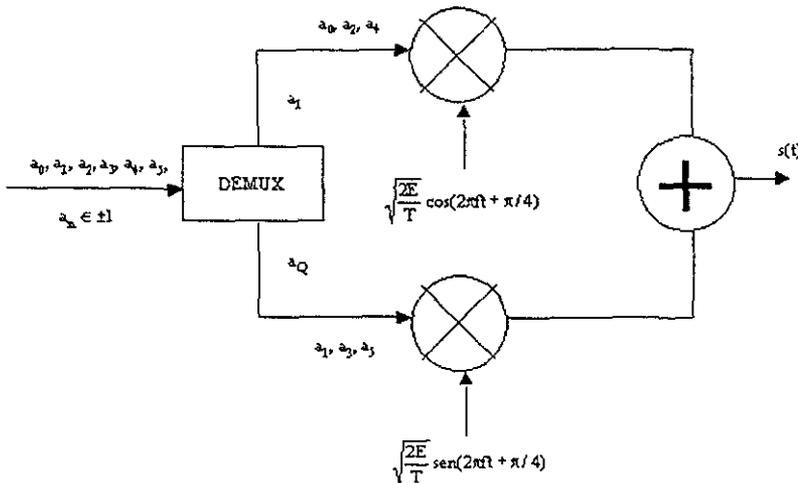


Figura 3.7

3.5.3 Aplicaciones en el sistema IS-95 CDMA

El sistema IS-95 CDMA usa QPSK para sus enlaces de subida y bajada. El enlace de subida, de forma particular, usa una variante de QPSK llamada Modulación en Cuadratura por Cambio de Fase con Retraso (OQPSK, *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*). OQPSK difiere del convencional QPSK en que anterior a la multiplicación de portadora, se coloca un retardo de un intervalo de medio bit (con respecto a la trayectoria en fase) en la trayectoria cuadratura. Esto se hace para evitar una fase de 180° de transición que ocurre en los sistemas convencionales QPSK.

CAPÍTULO IV

Principios de las técnicas de acceso

En los sistemas de comunicación inalámbricos, siempre es deseable permitir al suscriptor el enviar información a la estación base y simultáneamente recibir información de la misma. Por ejemplo, en el sistema convencional telefónico, es posible hablar y escuchar al mismo tiempo, y este efecto, llamado duplexaje, se requiere también en los sistemas telefónicos inalámbricos. El duplexaje puede hacerse al usar técnicas del dominio de la frecuencia o del tiempo.

El duplexaje por división de frecuencia o FDD por sus siglas en inglés (*Frequency Division Duplex*) provee dos bandas distintas de frecuencias a cada usuario. La banda de bajada o *forward band* provee el tráfico de la estación base al móvil, y la banda de subida o *reverse band* provee el tráfico del móvil a la estación base.

En FDD, cualquier canal dúplex consiste actualmente de dos canales simplex, y un dispositivo llamado duplexor se usa dentro de cada unidad móvil y estación base para permitir la transmisión y recepción de radio simultánea en el canal dúplex. La división de frecuencias entre los canales de subida y de bajada es constante en todo el sistema, sin importar el canal que se este usando.

El duplexaje por división de tiempo o TDD por sus siglas en inglés (*Time Division Duplex*) usa el tiempo en lugar de la frecuencia para proveer los enlaces de subida y de bajada. Si la división del tiempo entre las ranuras de tiempo o *time slots* de subida y de bajada es pequeña, entonces la recepción y transmisión de los datos le parece simultánea al usuario. El TDD permite la comunicación en un mismo canal (opuesto a los dos simplex o dedicados requeridos en FDD), y simplifica el equipo del usuario dado que el duplexor no se necesita.

Las técnicas de acceso que más se utilizan en la segunda generación para compartir el ancho de banda en un sistema de comunicación inalámbrica son el acceso múltiple por división de tiempo y por división de código (TDMA y CDMA, respectivamente). Estas técnicas pueden agruparse en sistemas de banda ancha y angosta (*wideband* y *narrowband*, respectivamente), dependiendo del

ancho de banda que se asigna al usuario. Estos métodos de acceso engloban casi todos los sistemas de segunda generación pero existen otros como N-AMPS o E-TDMA¹. Por ejemplo, N-AMPS desarrollado por Motorola se creó dividiendo un canal analógico en tres de banda angosta². N-AMPS se hizo estándar con el nombre de EIA/TIA IS-88, IS-89 e IS-90 a finales de 1992. En 1993 se convirtió en uno solo junto con AMPS en el estándar IS-91 agregándose tan solo como canales en una banda superior³. Otro ejemplo es E-TDMA creado como un intento de la *General Motors* de entrar en esta área de las comunicaciones. E-TDMA utiliza la mitad de la codificación de 4.5kbs que requiere una ranura de tiempo de IS-54 y por ello es capaz de alojar 6 llamadas por frecuencia en vez de tres. Esta tecnología no fue exitosa por la carencia técnica en cuanto a la calidad de la voz se refiere y a otras razones externas a la *tecnología per se* que se apuntarán en las conclusiones⁴.

La técnica de duplexaje de un sistema de acceso múltiple se describe en conjunto al esquema de acceso múltiple particular. En un sistema de acceso múltiple de banda angosta, el espectro de radio disponible se divide en un gran número de canales de ancho de banda angostos. Los canales se operan usualmente usando FDD. Para minimizar la interferencia entre los enlaces de subida y de bajada en cada canal, la división de frecuencia se hace tan grande como es posible dentro del espectro de frecuencias. En los sistemas de acceso múltiple de banda ancha, a los usuarios y a las estaciones base se les permite transmitir en una gran parte del espectro.

Como una nota al lector queremos aclarar algo que determinó el curso de esta investigación cargando la balanza al acceso múltiple por división por código mas que a la división por tiempo.

El análisis más profundo en CDMA se debe a la connotación que lleva cuando se habla del concepto PCS. Los autores Vijay y Wilkes señalaban en el año de 1996: "Aún con el desarrollo limitado en las frecuencias de los celulares, CDMA se ha convertido en un estándar para el uso en los PCS"⁵. Además de nuestra vecindad con los EE.UU. donde encuentran más próspero esta última tecnología que cualquier otra para migrar a la tercera generación.

¹ Vijay, Garg K. Wilkes, Joseph E. *Wireless and Personal Communications Systems* EE UU. Prentice Hall PTR, AT&T, 1996, p. 12.

² *Ibidem* p.13

³ *Idem*.

⁴ *Ibidem* p 14.

⁵ *Idem*

Sin embargo, dado que GSM, la tecnología que compite con CDMA por el futuro del mercado de los Servicios de Comunicación Personal en la tercera generación, ocupa TDMA, y además dado que actualmente la mayor cantidad de teléfonos móviles que existen hoy día se basa en el acceso múltiple por división de tiempo, consideramos que también debe estudiarse dentro del estudio del presente trabajo.

4.1 Sistema TDMA

El sistema celular digital de acceso Múltiple por División de Tiempo Norteamericano o NA-TDMA por sus siglas en inglés (*North American Time Division Multiple Access*) también llamado ADC (*American Digital Cellular*) o bien, *Digital AMPS*, o sistema IS-54 fue diseñado y aprobado en 1987 por un grupo llamado TR45-3 después de un debate en la industria por la elección entre división por frecuencia y división por tiempo⁶.

Los sistemas TDMA dividen el espectro de radio en ranuras de tiempo o *time slots*, y en cada ranura se permite un usuario ya sea para transmitir o recibir. Cada usuario ocupa cíclicamente una ranura de tiempo, así un canal puede pensarse como una ranura única de tiempo que vuelve a repetirse cada trama o *frame*, donde N ranuras de tiempo constituyen una trama o *frame*. En Norteamérica, los sistemas celulares digitales TDMA se construyeron de acuerdo al estándar IS-54 a partir de la aparición de este en 1992. Los teléfonos actuales se basan en el estándar IS-54 rev.B, en la cual comparten el canal de control con los teléfonos analógicos y usan tecnología digital TDMA para los canales de tráfico. Este estándar es modo dual lo cual significa que al operar en el espectro actual de los sistemas telefónicos móviles avanzados (AMPS, por sus siglas en inglés) permite la operación entre los sistemas analógicos y digitales; además mantiene el espaciamiento de 30kHz de AMPS para facilitar la transición de los sistemas analógicos a los digitales. Con el nuevo concepto de Servicios de Comunicación Personal (PCS), surgió el estándar IS-136 ocupando TDMA como tecnología de acceso.

4.1.1 IS-136

El estándar IS-136 o D-AMPS 1900 es una tecnología digital en modo dual y banda dual para PCS. Las características que lo definen son su operación tanto en la banda celular (800MHz)

como en la banda PCS (1850-1990MHz) además de que permite su funcionamiento tanto en modo analógico como en modo digital.

Una de las principales diferencias entre el estándar IS-54 e IS-136 es el uso de un canal de control digital o DCC por sus siglas en inglés (*Digital Control Channel*) por parte del IS-136 permitiendo una señalización de 48.6kb/s mientras que su antecesor ocupaba la especificación del canal de control de AMPS, 10kb/s. Además de este incremento, el DCC ofrece características como mensajes cortos punto a punto, mensajes tipo *broadcast*, direccionamiento de grupo, grupos de usuario privados, estructuras de celda jerárquicas, y canales de radiolocalización, los cuales permiten al teléfono permanecer en modo inactivo lo cual lleva a un ahorro en el consumo de la batería.

4.1.2 Características

Las principales características que definen al estándar IS-136 son:

- Crecimiento en capacidad, lo cual permite que futuros suscriptores se puedan agregar por el uso de canales de tráfico de la mitad de la tasa lo cual lleva a doblar la capacidad de los sistemas anteriores.
- Cobranzas, al permitir el uso de redes privadas y residenciales, ofrece una variedad de servicios al cliente, y dado que las tasas de datos son cobradas de acuerdo a su ubicación, éstas pueden cambiar si se encuentran en casa o en algún otro lugar.
- Rehusos de infraestructura, puesto que se puede utilizar la infraestructura de la red IS-54, esto permite grandes ahorros monetarios y en tiempo de implementación.
- Interoperabilidad, la cual está dada por el *handoff* que se permite entre AMPS, D-AMPS y D-AMPS 1900. Esta característica permite a los operadores de PCS el brindar cobertura completa a partir del primer día mediante convenios con las compañías celulares ya establecidas.

4.1.3 Estructura

El sistema TDMA se basa en el uso de tramas, bloques y ranuras. Una trama tiene una duración de 40ms, y está formado por 2 bloques, cuya estructura tiene 6 ranuras de una duración de 6.67ms y 324 bits (ver figura 4.1).

^o Lee, William. *Mobile Cellular Telecommunications. Analog and Digital Systems*. 2ª ed EE UU. Airtouch Communications, 1995. 665p

La tasa completa del codificador de voz o *vocoder* produce una salida de 8 kbps. Los códigos trabajan en muestras de voz de 20ms y los comprimen en 159 bits. Los codificadores a media tasa comprimen aún mas la señal de voz y tienen una salida de cerca de 4kbps. Actualmente los canales de media tasa no están en uso, pero cuando se pongan en servicio, la estación móvil transmitirá en una ranura de tiempo en el enlace de subida y recibirá en una ranura de tiempo en el enlace de bajada. Este formato incrementará la capacidad dado que los sistemas de media tasa pueden soportar seis usuarios por canal de radio comparados a los tres usuarios por canal para los sistemas de tasa completa. Un canal de tasa completa usa dos de las seis ranuras de tiempo para transmitir en el radio de subida y dos de las seis ranuras de tiempo para recepción en el enlace de bajada. Para eliminar la necesidad de un duplexor donde la estación móvil tiene que recibir y transmitir al mismo tiempo (esto se hace en AMPS), las ranuras de tiempo para los enlaces de subida y de bajada se desplazan 8.5ms. La estructura de la trama de seis ranuras, con dos ranuras por canal de voz de tasa completa provee una migración fácil a una ranura por canal de voz⁷.

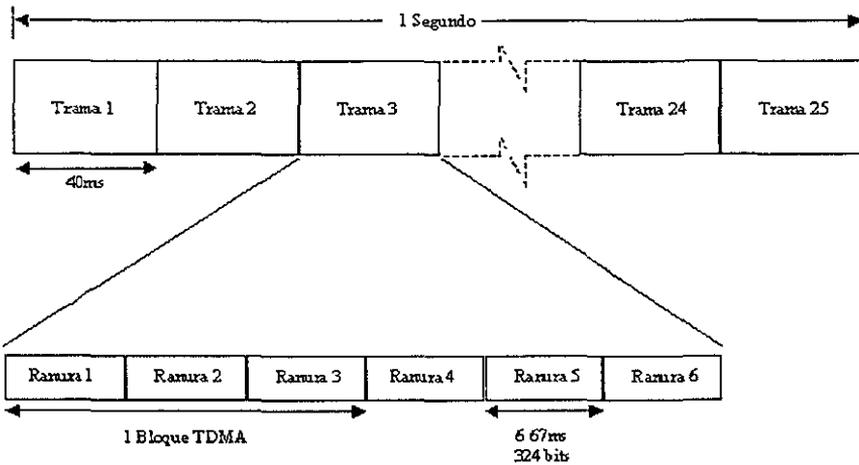


Figura 4.1

El control de error del canal para los datos del codificador de voz emplea 3 mecanismos para la mitigación de errores de canal.

- El primero es usar un código convolucional de media tasa para proteger los bits más vulnerables de la cadena de datos del codificador de voz.

⁷ TIA/EIA IS-136-430 US1 (*Vocoder*) 20 de noviembre de 1998

- La segunda técnica mezcla los datos transmitidos para cada trama del codificador de voz sobre dos ranuras de tiempo para mitigar los efectos del desvanecimiento de Rayleigh.
- La tercera técnica emplea el uso de una revisión de redundancia cíclica sobre algunos de los bits perceptualmente más significativos del codificador de la voz. Después la corrección del error se aplica en el receptor, esos bits de redundancia cíclica se revisan para ver si los bits perceptualmente más significativos se recibieron apropiadamente.

El método de modulación empleado en IS-54 se conoce como Modulación Diferencial por cambio de fase o DQPSK por sus siglas en inglés (*Differentially Encoded Quadrature Phase Shift Keying*) desplazado $\pi/4$. Su uso resulta en una eficiencia espectral dado que cada símbolo lleva información acerca de 2 bits.

Los bits de datos son los bits del codificador de voz o *vocoder* los cuales se mezclan y están protegidos contra error. El código de color de tráfico digital codificado o CDVCC por sus siglas en inglés (*Coded Digital Traffic Color Code*) es esencialmente el código de color de voz digital o DVCC por sus siglas en inglés (*Digital Voice Color Code*) sumado con 4 bits de paridad para formar los 12 bits del CDVCC.

La sincronización se usa para alineación del tiempo y provee la secuencia de bit conocido al ecualizador.

El tiempo de guarda se agrega para calcular las diferentes distancias en que las estaciones móviles pudieran estar de la estación base. Note que el tiempo de guarda esta presente únicamente para los ranuras de tiempo de subida. Esto previene la extensión de ráfagas recibidas debido al tiempo de tránsito de la señal de radio.

En lo que respecta a los canales de tráfico digital hay tres clases de estructuras:

- Ranura de voz para canal de tráfico digital de bajada o FDTC (*Forward Digital Traffic Channel*)
- Ranura de voz para canal de tráfico digital de subida o RDTC (*Reverse Digital Traffic Channel*)
- Ranura de ráfaga limitada

Cada tipo de ranura tiene campos dedicados, y las ranuras están compuestas por 324 bits (162 símbolos).

El canal de tráfico digital usa dos canales para soportar el control y la supervisión de la estación móvil durante una llamada: canal de control asociado rápido o FACCH (*Fast Associated Control Channel*) y canal de control asociado lento o SACCH (*Slow Associated Control Channel*). El SACCH, se envía cada ranura de tiempo, y provee un canal de señalización en paralelo con la voz digital; es un canal de señalización para transmisión de mensajes de control y supervisión entre el móvil digital y el sistema. Este usa 12 bits codificados por ráfagas TDMA. Este transmite voz en paralelo sin reemplazar información de voz. Uno de estos canales se hace posible por la dedicación de 12 bits por ranura, así la información se puede enviar mientras la información de la voz se procesa ininterrumpidamente. Debido al pequeño número de bits colocado en el canal SACCH por ranura de tiempo (12 bits), le toma hasta 22 ranuras a un mensaje SACCH simple para transmitirse. Los datos son medio codificados convolucionalmente y la tasa de datos neta son 300 bps. El FACCH, se usa para enviar datos de control importantes y urgentes o de tráfico especializado entre la estación base y las unidades móviles. El dato FACCH, cuando se transmite, toma el lugar de datos de información del usuario (tal como voz) dentro de una trama. El bloque reemplaza el bloque de información del usuario en cualquier tiempo que sea transmitido. No hay límites en el número de tramas de voz que pueden ser reemplazadas y la degradación de la calidad del codificador de voz o *vocoder* con las tramas perdidas no es lineal. Los mensajes FACCH, reemplazando las tramas de voz (260 bits), se mezclan y un mensaje esta compuesto sobre dos ranuras exactamente como se hace para la voz.

A continuación, se muestra un esquema de las ranuras antes mencionadas para los canales de subida y de bajada (Figura 4.2)

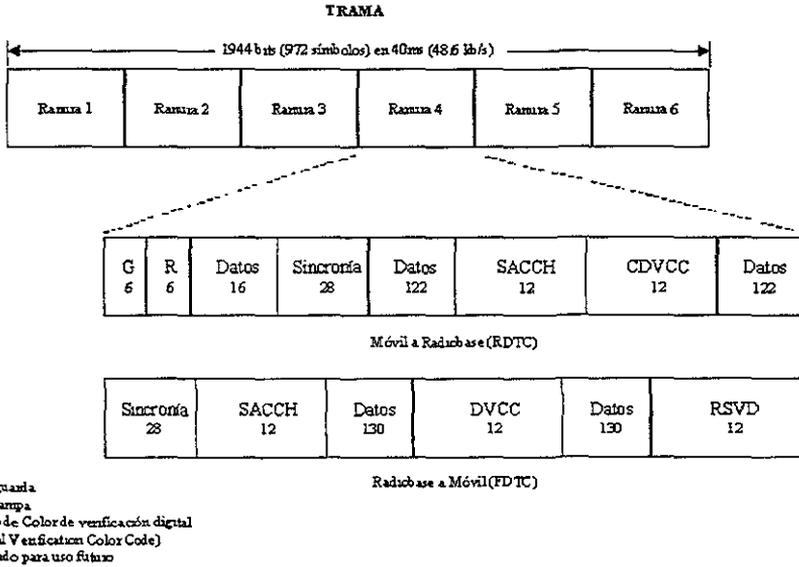


Figura 4.2

El canal de control digital o DCCH (*Digital Control Channel*), está formado por los siguientes canales lógicos:

- Canal de acceso aleatorio o RACH (*Random Access Channel*),
- Canal de servicio de mensajes cortos punto a punto, radiolocalización y respuesta de acceso o SPACH (*SMS Point to Point, Paging and Access Response Channel*),
- Canal de control de broadcast o BCCH (*Broadcast Control Channel*),
- Canal de retroalimentación compartido o SCF (*shared channel feedback*)⁸.

El subcanal RACH, se usa para hacer peticiones de acceso al sistema. Es unidireccional (de subida solamente), compartido (por todos los móviles en una célula intentando acceder), y es un canal punto a punto (Estación móvil o MS a Estación Base o BS). Los mensajes de acceso tal como

⁸ ITU/EIA IS-136-131-A. *Digital Traffic Channel Layer 1*. 7 de octubre de 1998

origen, registro, respuesta a localización, confirmación de audio, número serial y confirmación de mensaje se envían en este canal. Este canal también lleva mensajes que proveen información en autenticación, actualización de parámetros de seguridad, y servicio de mensajes cortos o SMS (*Short Message Services*). El subcanal SPACH se puede considerar que está formado por tres canales lógicos: canal de respuesta de acceso o ARCH (*Access Response Channel*), canal de radiolocalización o PCH (*Paging Channel*), canal de servicio de mensajes cortos o SMSCH (*Short Message Services Channel*). El SPACH se usa para transmitir información a una estación móvil específica; la información transmitida está en la forma de mensajes punto a punto SMS, mensajes de radiolocalización o mensajes de respuesta de acceso. Cada uno de estos tipos de mensajes se envía en su subcanal lógico individual. El canal SPACH es unidireccional (de bajada únicamente), compartido (por todos los móviles en la célula) y punto a punto (estación base a móviles individuales). El PCH está dedicado a entregar mensajes y órdenes como: mensajes de localización, mensajes de espera de mensajes, mensajes de alerta de usuario, actualizaciones de conteo de historia de llamadas, actualización de datos secretos compartidos, usados para el proceso de autenticación y proceso de encriptación. Los mensajes enviados en ARCH se refieren a: la asignación a un móvil de un canal de voz analógica o de tráfico digital, redireccionar al móvil a una célula diferente, registro de acceso (aceptación, rechazo, o liberación). El SMSCH se usa para entregar mensajes cortos a una estación móvil específica, en el contexto de servicios de mensajes cortos (SMS). Cada mensaje puede llevar hasta un máximo de 200 caracteres.

El BCCH, es un acrónimo usado para referirse a los tres subcanales lógicos: canal de control de *broadcast* rápido o F-BCCH (*Fast-BCCH*), canal de control de *broadcast* extendido o E-BCCH (*Extended-BCCH*), canal de control de *broadcast* de servicio de mensajes cortos o S-BCCH (*SMS-BCCH*). Estos canales se usan para llevar información genérica y relacionada al sistema. Este canal es unidireccional (de bajada únicamente), compartido (entre todas las estaciones móviles de una célula) y canal multipunto a punto (una BS a múltiples MS).

El *Fast BCCH* se usa para hacer un *broadcast* de los parámetros de la estructura DCCH y aquellos que son esenciales para acceder al sistema. Los parámetros de la estructura DCCH incluyen información acerca del número de ranuras de F-BCCH, E-BCCH y S-BCCH en el DCCH. La estación móvil usa esta información cuando esta accede al sistema para determinar el inicio y final del canal lógico en el DCCH.

El *Extended BCCH* lleva información *broadcast* que es menos crítica en tiempo que F-BCCH para las estaciones móviles. Este canal lleva información acerca de las células vecinas analógicas y TDMA. Mensajes opcionales llevan información de emergencia, tiempo y de información de fecha.

El *SMS BCCH* se usa para el servicio de SMS. Los mensajes cortos individuales para la estación móvil se envían en este canal. El SCF se usa para soportar la operación del canal de acceso aleatorio. Este provee información acerca de cuales ranuras de tiempo la estación móvil puede utilizar para intentar acceder y también si una transmisión de un RACH de la estación móvil fue exitoso o no lo fue.

El formato de ranura abreviado se usa por la estación móvil cuando el avance de tiempo exacto no se conoce. Esto usualmente ocurre cuando la estación móvil accede al sistema por primera vez. Dado que el avance de tiempo no se conoce, este formato de *burst* tiene un periodo de guarda grande conocido como el campo de guarda abreviado. Este campo tiene una longitud de 38 bits y mitiga las colisiones de *bursts* en la estación base. Si las colisiones ocurren, ellas ocurrirán mientras la estación base esta decodificando el campo de guarda abreviado; dado que no hay información útil en este campo, no hay datos perdidos.

El canal de control digital a tasa completa tiene una tasa de bit de 13kbps, la misma que un canal de tráfico digital a tasa completa. Este es similar a un canal de tráfico digital en el uso de las ranuras de tiempo. La información de DCCH se envía en ranuras de tiempo las cuales se agrupan como bloques TDMA y tramas TDMA. Para propósitos de organizar los datos enviados en el canal de control digital de bajada o FDCCH (*Forward DCCH*), las tramas TDMA se agrupan en supertramas o SF (*superframes*). Cada SF consiste de 16 tramas TDMA y tiene una duración de 640ms. Cada *superframe* en el canal FDCCH se compone de una secuencia ordenada de canales lógicos. La fase del *superframe* o SFP (*Superframe Phase*) se incrementa en cada bloque TDMA. La primer ranura en un *superframe* (SFP = 0) es siempre una ranura de F-BCCH, y seguida por una E-BCCH, S-BCCH reservado y canales lógicos SPACH. Las ranuras de tiempo usadas por el F-DCCH se pueden usar por otros E-DCCH en la misma frecuencia o como canales de tráfico. La selección del canal de control se efectúa una vez que la estación móvil ha buscado en la banda de frecuencias y localizado un DCCH, este determina si es elegible para alojarse en ese DCCH particular. IS-136 usa dos criterios para determinar cual DCCH elegir, la fuerza de la señal y el

criterio de los aspectos en el servicio. El criterio de la fuerza de la señal se basa en un conjunto de parámetros y una ecuación compleja que la estación móvil usa para determinar la elegibilidad del actual DCCH para que le sirva. Con la ayuda de esos parámetros se puede optimizar la célula para el acceso móvil. La fuerza de la señal recibida se toma para realizar los cálculos de elegibilidad; si la estación móvil no tiene una buena recepción del canal de control (el cual es típicamente radiado en el máximo nivel de potencia de la célula), entonces esta no lo usa para alojarse puesto que mensajes subsecuentes de tráfico y señalización no se recibirán a un nivel aceptable. Antes de cualquier intento de acceso, la estación móvil tiene que leer un ciclo completo de información *broadcast* F-BCCH y E-BCCH en el BCCH para obtener todos los parámetros necesarios para el acceso y estar seguros de la estructura del canal de control de la célula.

En 1997 se introdujo un codificador de voz mejorando el anterior, además se modificó la estructura de las ranuras, así como los mezcladores. En general el estándar no ha permanecido estático, ha evolucionado y mejorado sustancialmente⁹.

El rendimiento en general del modo de acceso por tiempo ha sido la base para los sistemas de segunda generación en Europa pero ahora observaremos el funcionamiento del acceso por códigos que se está convirtiendo en un estándar en los Estados Unidos. Este modo tiene algunas características más eficientes que TDMA. Aunque el uso de una u otra tecnología se debe, como veremos en las conclusiones, más a una situación de proveedores, estándares locales y sobretodo de mercado, que de aplicaciones óptimas de la tecnología.

⁹ Austin, Mark Buckley, Adrian, Coursey, Cameron *Service and System Enhancements for TDMA Digital Cellular Systems* IEEE Personal Communications The Magazine of Nomadic Communications and Computing. EE.UU IEEE COMSOC, Vol 6 No 3 1999, p 21-24

4.2 Sistema CDMA

A grandes rasgos se puede decir que CDMA es un esquema por el cual a múltiples usuarios se les asignan recursos de radio usando técnicas de espectro disperso. Aunque todos los móviles están transmitiendo en la misma banda de RF, los usuarios están separados de otros vía el uso de códigos ortogonales. El estándar especifica que cada usuario transmite información en banda base a 9.6kbps o 14.4kbps, la cual es la tasa de salida del codificador de voz. La tasa de la señal dispersa final es 1.2288Mbps, resultando en un ancho de banda de RF aproximadamente de 1.25MHz¹⁰.

Qualcomm, Inc. desarrolló el protocolo IS-95 como una alternativa a los sistemas celulares de tipo de acceso TDMA¹¹.

El desarrollo de CDMA comenzó a principios de 1989 después de que se estableciera el estándar IS-54 en los Estados Unidos. La primera prueba de demostración del funcionamiento de esta técnica de acceso se llevo a cabo en Noviembre de 1989. Esta prueba se llamó "*Mobile Station Base-Station Compatibility Standard for Dual Mode Wide Band spread Spectrum Cellular system*" y se liberó como el estándar IS-95 (PN-3118, el 9 de diciembre de 1992)¹²

En esta tecnología de acceso hay dos parámetros que definen al sistema y son los siguientes: la capacidad y calidad del sistema, los cuales están limitados por la cantidad de interferencia de potencia presente en la banda ¹³. La capacidad está definida como el número total de usuarios simultáneos que el sistema puede soportar, y la calidad está definida como la condición percibida de un enlace de radio asignado a un usuario en particular; esta calidad de enlace percibida está directamente relacionada a la probabilidad de bit por error o BER (*Bit Error Rate*). Ambos conceptos los desarrollaremos a continuación y veremos que están estrechamente ligados con el diseño de radio de la red.

¹⁰ TIA/EIA IS-95A. *Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual Mode Wide Band Spread Spectrum Cellular System*. EE.UU. Telecommunication Industry Association, 1995.

¹¹ William Lee. op cit , p 14

¹² Idem.

¹³ Yang, Samuel C. *CDMA RF System Engineering*. EE.UU. Artech House Mobile Communications Library, Mayo de 1998

4.2.1 Capacidad

A continuación se presenta una descripción de la capacidad del sistema CDMA usando la cantidad de interferencia del usuario en la banda de operación. La capacidad actual de una célula CDMA depende de muchos factores, tal como la demodulación en el receptor, exactitud en el control de potencia, e interferencia de potencia actual que introducen otros usuarios en la misma célula y células vecinas.

En las comunicaciones digitales, nos interesa un parámetro de enlace llamado¹⁴ E_b/N_0 , o energía por bit por densidad de potencia de ruido, tal como se vio en el capítulo 2. Esta cantidad se identifica con la relación señal a ruido (SNR) convencional al reconocer que la energía por bit iguala a la potencia promedio de la señal modulada distribuida en cada duración de bit; esto es,

$$E_b = ST \quad (4.1)$$

donde S es la potencia promedio de la señal modulada y T es el tiempo de duración de cada bit. Nótese que (4.1) es consistente con el análisis dimensional, el cual establece que la energía es equivalente a la potencia multiplicada por tiempo. Podemos manipular (4.1) al sustituir la tasa de bit R , la cual es la inversa de la duración de bit T ;

$$E_b = S/R$$

E_b/N_0 es entonces

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{RN_0} \quad (4.2)$$

Podemos sustituir la densidad de potencia de ruido N_0 , la cual es la potencia de ruido total N dividido por el ancho de banda W ; esto es,

$$N_0 = \frac{N}{W} \quad (4.3)$$

¹⁴ Motorola Cellular Infrastructure Group, *Manual de CDMA, versión 1.3 1998*

sustituyendo (4.3) en (4.2) nos resulta

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \frac{W}{R} \quad (4.4)$$

La ecuación (4.4) relaciona la energía por bit E_b/N_0 a dos factores: la relación señal a ruido S/N del enlace y la razón del ancho de banda transmitido W a la tasa de bit R. La relación W/R se conoce también como la ganancia de procesamiento del sistema¹⁵.

Consideramos la capacidad del enlace de subida dado que en CDMA este es frecuentemente el enlace que limita en términos de capacidad. El enlace de subida es aquel que va del móvil a la estación base. Asumimos que el sistema posee un control de potencia perfecto, lo cual significa que las potencias transmitidas de todos los usuarios móviles están controladas para que en el receptor de la estación base, las potencias que se reciben de todos los usuarios móviles sean iguales. Basados en esto, la SNR de un usuario se puede escribir como

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{M-1} \quad (4.5)$$

Donde M es el número total de usuarios presentes en la banda. Esto es porque la potencia de interferencia total en la banda es igual a la suma de las potencias de los usuarios individuales. Note que (4.5) también ignora otras fuentes de interferencia tales como el ruido térmico.

Sustituyendo (4.5) en (4.4), obtenemos

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{(M-1) R} \quad (4.6)$$

$$M-1 = \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \quad (4.7)$$

si M es grande, entonces

$$M \approx \frac{(W/R)}{(E_b/N_0)} \quad (4.8)$$

¹⁵ Samuel Yang, op cit., p 75

4.2.1.1. Efectos de carga

La ecuación (4.8) es un modelo que describe el número de usuarios con los que una célula CDMA se puede comunicar. Esta célula es una suposición teórica haciendo las siguientes consideraciones: es única y omnidireccional y no tiene células vecinas, y los usuarios están transmitiendo el 100% del tiempo. En la realidad, hay muchas células en un sistema CDMA. La figura 4.3 muestra que una célula en particular (la llamaremos célula A) está rodeada por otras células CDMA que también tienen usuarios en comunicación.

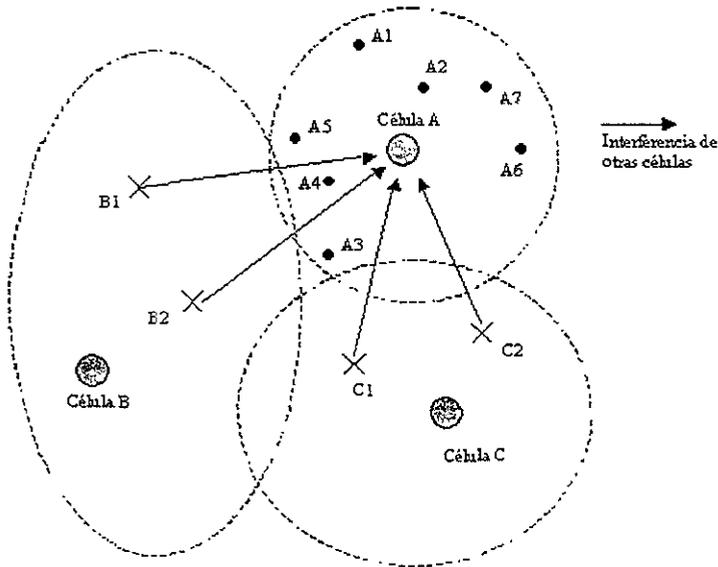


Figura 4.3

Definiremos como célula de casa todo móvil que sostenga su enlace primario con dicha célula. Por ejemplo, para los móviles A1, A2, etc, su célula de casa será la célula A. Pero aunque los usuarios de otras células se controlan en potencia por sus respectivas células de casa, las potencias de las señales de estos usuarios constituyen una interferencia a la célula A, para el ejemplo de la figura 4.3 serían B1, C1, etc, quienes producen interferencia. Por esto, la célula A se dice que está *cargada* por usuarios de otras células. Modificamos entonces la ecuación (4.6) para considerar el efecto de la carga:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \quad (4.9)$$

donde η es el factor de carga. η es un factor entre 0% y 100%. Si el factor de carga es 0.5 resulta en $(1 + 0.5)$, o un incremento de 150% de interferencia sobre la interferencia que ya producían los usuarios de la célula de casa o *home*.

El inverso del factor $(1 + \eta)$ se conoce como el factor de rechazo de frecuencia F ; esto es,

$$F = \frac{1}{(1 + \eta)} \quad (4.10)$$

El factor de rechazo de frecuencia idealmente es 1 en el caso de la célula individual ($\eta = 0$). En el caso multicelular, como se incrementa la carga η , el factor de rechazo de frecuencia correspondiente decrece.

4.2.1.2. Efectos de sectorización

La interferencia de otros usuarios de otras células disminuye si la célula en cuestión se divide en sectores. En lugar de tener una antena omnidireccional, la cual tiene un patrón de 360° , la célula A puede dividirse en tres partes para que cada sector reciba señales en 120° como lo muestra la figura 4.4. En efecto, una antena “sectorizada” rechaza interferencia de usuarios que no están dentro de su patrón de interferencia. Este arreglo disminuye el efecto de la carga por un factor de aproximadamente 3. Si la célula se divide en 6 sectores, entonces el efecto de carga decrece por un factor de 6. Este factor se llama ganancia de sectorización λ .

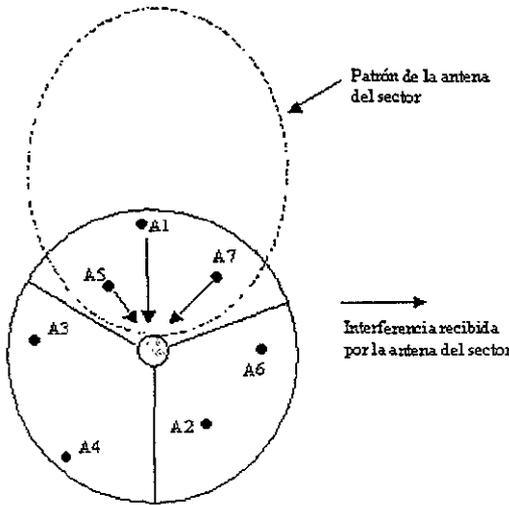


Figura 4.4

Para una célula, el λ exacto se obtiene al dividir la potencia de interferencia total de todas las direcciones por las potencias de interferencia percibidas por el sector de la antena; esto es,

$$\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} c}{\int_0^{2\pi} \left(\frac{G(\theta)}{G(0)} \right) I(\theta) d\theta} \quad (4.11)$$

donde $G(\theta)$ es el patrón horizontal de la antena del sector; $G(0)$ es la ganancia de antena pico, que se asume ocurre al frente ($\theta = 0$); e $I(\theta)$ es la potencia de interferencia recibida de los usuarios de otras células como función de θ . Las integrales en (4.11) son evaluadas desde 0 a 360°. La ecuación (4.11) calcula la ganancia de sectorización exacta, la cual depende fuertemente de la ganancia de la antena que se use, así como de la distribución espacial y distancia de los usuarios interfiriendo de otras células. Note que (4.11) no toma en cuenta el patrón vertical de la antena de sector, debido a que el efecto es bastante pequeño al calcular la ganancia de sectorización. En realidad, λ es típicamente alrededor de 2.5 para los 3 sistemas configurados en tres sectores y 5 para sistemas configurados en seis sectores.

La ecuación (4.9) se modifica para calcular el efecto de sectorización:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \quad (4.12a)$$

4.2.1.3. Efectos de la actividad de voz

La ecuación (4.12a) asume que todos los usuarios están transmitiendo el 100% del tiempo. En la práctica, el sistema usa el codificador de voz de IS-95 de tasa variable, lo que significa que la tasa de salida del codificador de voz se ajusta de acuerdo al patrón del habla del usuario. Por ejemplo, si el usuario no está hablando durante una parte de la conversación, la tasa de salida del codificador de voz disminuye para prevenir que la potencia se transmita innecesariamente.

Las tasas que comúnmente se utilizan para enviar la información del móvil a la estación base son 9600bps, 4800bps, 2400bps o 1200bps y 14400bps, 7200bps, 3600bps o 1800bps en tramas de 20ms. Estas tramas están compuestas de tres grupos de bits. El primer grupo son los bits de información, el segundo los bits de calidad de la trama y el tercero los bits de la cola de la trama. Por lo tanto, se observa que los grupos disminuyen de acuerdo a la tasa que se este enviando y, esta disminución es mucho más obvia en el grupo de bits de información ¹⁶.

El efecto de esta tasa variable del codificador de voz es la reducción de la potencia “sobre transmitida” lo que conduce a menor interferencia. Las estadísticas del habla muestran que un usuario típico en una conversación habla entre el 40% y 50% del tiempo¹⁷. Al emplear la tasa variable del codificador de voz, el sistema reduce la potencia de interferencia total por este factor de actividad de voz.

Así, (4.12a) se modifica para calcular el efecto de la actividad de voz:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left(\frac{1}{1+\eta} \right) \lambda \left(\frac{1}{\nu} \right) \quad (4.12b)$$

¹⁶ William Lee op.cit., p. 516-517

¹⁷ Samuel Yang op.cit., p.75

donde v es el factor de actividad de voz. Note que el efecto de la actividad de voz reduce el denominador, o la porción de interferencia de la ecuación.

Resolviendo (4.12b) para M obtenemos

$$M = 1 + \frac{\left(\frac{W}{R}\right)}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)} \left(\frac{1}{1+\eta}\right) \lambda \left(\frac{1}{v}\right) \quad (4.13)$$

si M es grande, entonces

$$M \approx \frac{\left(\frac{W}{R}\right)}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)} \left(\frac{1}{1+\eta}\right) \lambda \left(\frac{1}{v}\right) \quad (4.14)$$

4.2.2 Control de Potencia

4.2.2.1 Importancia del control de potencia

El control de potencia es esencial para la operación de manera uniforme en un sistema CDMA. Debido a que todos los usuarios comparten la misma banda de RF a través del uso de códigos PN o de pseudoruido, cada usuario parece ruido aleatorio a los otros usuarios. La potencia de cada usuario individual, se controla para que ningún usuario interfiera innecesariamente con otros en el sistema.

Para ilustrar como es que el control de potencia en CDMA es tan importante, se considera el caso de una célula sin vecinos que tiene dos usuarios hipotéticos (ver figura 4.5). Examinemos solo el enlace de subida dado que este enlace es el que fija los límites de propagación de la señal en CDMA. El usuario 2 está mucho más cerca de la estación base que el usuario 1. Si no hay control de potencia, ambos usuarios transmitirán una cantidad fija de potencia (la llamaremos p_1); sin embargo, debido a la diferencia en distancia, la potencia recibida del usuario 2, o p_{r2} , será mucho

más grande que la potencia recibida del usuario 1, o p_{r1} . Si asumimos que la diferencia en distancia es tal que p_{r2} es 10 veces mas que p_{r1} , entonces el usuario 1 tendrá una gran desventaja.

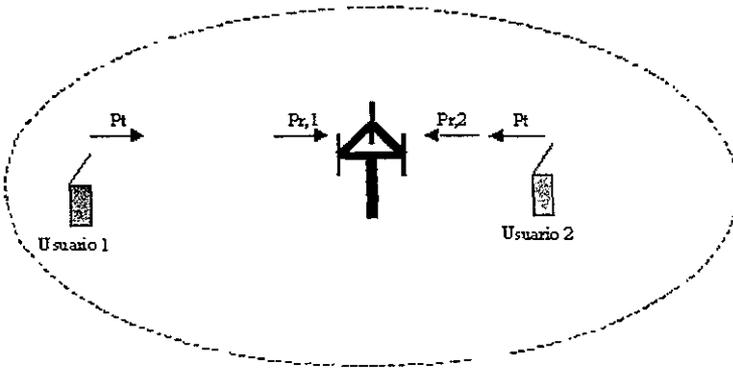


Figura 4.5

Si la SNR que la radio base requiere como mínimo, $(SNR)_{requerida}$ es $(1/10)$, entonces podemos ver inmediatamente la disparidad entre las SNRs de los dos usuarios (ver figura 4.6). Si ignoramos el ruido térmico, entonces la SNR del usuario 2, $(SNR)_2$, será 1, y la SNR del usuario 1, $(SNR)_1$, será $(1/10)$. El usuario 2 tiene una mayor SNR y disfruta de una gran calidad de voz, pero la SNR del usuario 1 está cumpliendo apenas la $(SNR)_{requerida}$. Esta inequidad se conoce como el problema clásico de cerca- lejos o *near-far* en un sistema de acceso múltiple.

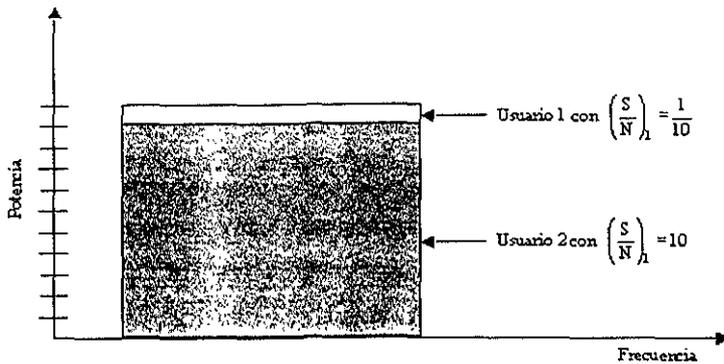


Figura 4.6

El sistema en este punto se dice que ha alcanzado su capacidad total. La razón es que si queremos agregar un tercer usuario transmitiendo p_b en cualquier lugar de la célula, entonces la SNR del tercer usuario no será capaz de alcanzar la $(SNR)_{requerida}$. De hecho, si forzamos a un tercer usuario dentro del sistema, ese tercer usuario no solo no alcanzará el nivel de $(SNR)_{requerida}$, sino que también causará que la SNR del usuario 1 caiga debajo del $(SNR)_{requerida}$.

Entonces, para superar el problema de cerca-lejos¹⁸ y para maximizar la capacidad se implementa el control de potencia. Se puede hacer que cada usuario transmita P_t a un nivel adecuado a la estación base para de esta forma controlar la potencia. La figura 4.7 ilustra el concepto.

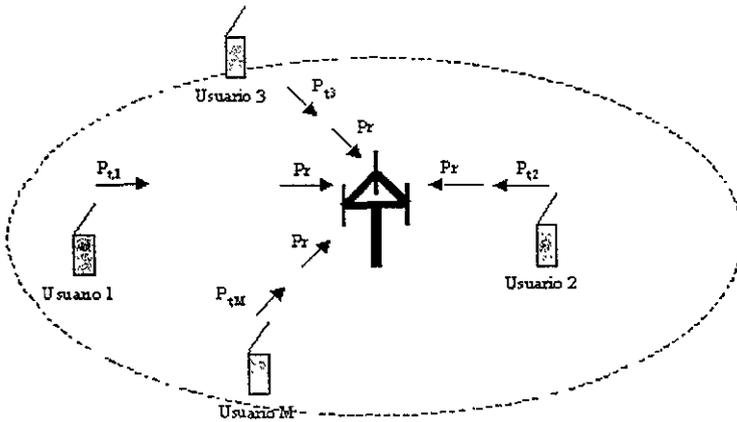


Figura 4.7

Si la potencia que transmite cada usuario se controla, tal que la potencia que se recibe de cada usuario en la estación base es igual a p_r , entonces el sistema puede acomodar más usuarios en cada célula. La conclusión entonces, es que la capacidad aumenta debido al control de potencia (ver figura 4.8).

¹⁸ Pichholtz, R.L. Milstein, L.B. Schilling, D.L. *Spread Spectrum for Mobile Communications*. IEEE: Trans. Vehic Tech, EE-UU IEEE, p. 313-322 V1-40.

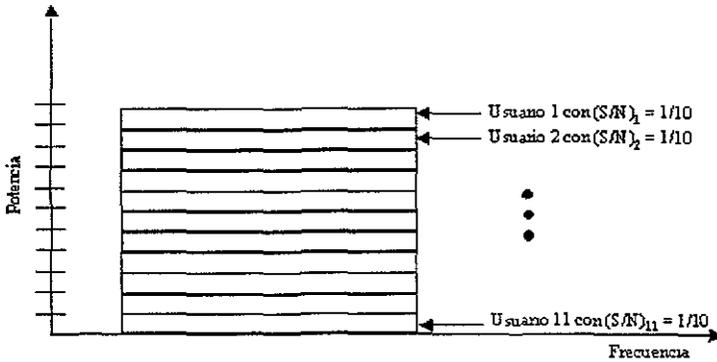


Figura 4.8

4.2.2.2 Pruebas de Acceso

La primera intervención del control de potencia comienza resolviendo el problema de la potencia inicial que transmita el móvil. Antes que el móvil establezca contacto con la estación base, el móvil no sabe a que potencia transmitirá hacia la estación base. En este punto, la estación base aún no ha hecho contacto con el usuario, y la estación base no tiene idea de la localización del móvil. Hay dos opciones: la primera opción es que el móvil puede intentar acceder a la estación base con una potencia elevada de transmisión. La potencia tan alta incrementa la probabilidad de que la estación base reciba la petición de acceso del móvil. Sin embargo, la desventaja de una potencia alta de transmisión inicial es que representa interferencia para otros usuarios en la misma célula. La segunda opción es que el móvil puede pedir acceso a la estación base con una baja potencia de transmisión. De esta forma, se reduce la probabilidad de que la estación base reciba la petición de acceso del móvil. Pero la ventaja es que este móvil no causará mucha interferencia a otros usuarios.

La solución como se especifica en el estándar IS-95, es que cuando el móvil intenta por primera vez acceder el sistema, este transmita una serie de pruebas de acceso. Las pruebas de acceso son series de transmisiones de potencias progresivamente más altas. El móvil transmite su primera prueba de acceso a una potencia baja, entonces espera por una respuesta de parte de la estación base. Si después de un intervalo de tiempo aleatorio el móvil no recibe un reconocimiento de la estación base, entonces el móvil transmite una segunda prueba de acceso a una potencia

ligeramente mayor. El proceso se repite hasta que el móvil recibe un reconocimiento de parte de la estación base. La diferencia de potencia entre la prueba de acceso actual y la prueba de acceso previa se llama corrección de prueba de acceso. El incremento para una corrección de prueba de acceso individual se especifica mediante el parámetro del sistema PWR_STEP .

El estándar especifica que el móvil usará el nivel de potencia que reciba de la estación base para estimar cuanto transmita inicialmente. En otras palabras, si el móvil ve una señal fuerte de la estación base, entonces este asume que la estación base está cerca y así transmite inicialmente a un nivel bajo. Si el móvil ve una señal débil de la estación base, entonces este asume que la estación base está lejos y transmite a un nivel relativamente alto. Conociendo la potencia que recibe de la estación base, el móvil puede estimar la pérdida de trayectoria entre la estación base y él mismo. Si este conoce el ERP transmitido de la estación base, entonces el móvil sabrá que tanto necesita transmitir para compensar la pérdida de trayectoria. El móvil no conoce el ERP real de la estación base, tampoco sabe que tanta potencia recibe de las otras estaciones base vecinas. Por ello se especifica una constante por *default* usando suposiciones genéricas de carga típica así como del ERP estándar de las estaciones base. Específicamente, la potencia inicial transmitida del móvil, $P_{T, inicial}$ en decibelios, será

$$P_{T, inicial} = - p_r - 73 + NOM_PWR + INIT_PWR \quad [dB] \quad (4.15)$$

Como vemos, la constante por *default* es -73 para celular. Para PCS se usa un valor de -76. Los dos ajustes adicionales, NOM_PWR e $INIT_PWR$, se pueden establecer por los operadores del sistema para un ajuste más delicado. Los valores de esos dos factores de ajuste, NOM_PWR e $INIT_PWR$, así como el parámetro PWR_STEP se radian desde la estación base (en el mensaje de parámetros de acceso) y recibidos por el móvil antes de acceder a la transmisión de prueba. Cuando recibe esos dos factores de ajuste, el móvil los usa en (4.15) para determinar su potencia inicial de transmisión.

4.2.2.3 Lazo abierto

El proceso anterior se llama control de potencia en lazo abierto, el cual es una operación de control exclusiva del móvil que no involucra a la estación base. Este proceso de lazo abierto

continúa después de que la estación base tiene conocimiento de la petición de acceso del móvil y después que el móvil comienza a transmitir en un canal de tráfico.

Después que se establece una llamada y que el móvil se mueve dentro de la célula, la pérdida de trayectoria entre el móvil y la estación base continuará cambiando. Como resultado, la potencia que recibe el móvil cambiará y el control de potencia en lazo abierto continuará monitoreando la potencia que recibe el móvil p_r y ajustará la potencia que el móvil debe transmitir de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_T = -p_r - 73 + \text{NOM_PWR} + \text{INIT_PWR} \\ + (\text{suma de todas las correcciones de prueba de acceso}) \quad (4.16)$$

donde P_T es el cálculo continuo de la potencia a transmitir por el móvil en lazo abierto. La diferencia entre (4.16) y (4.15) es que (4.16) contiene un término adicional especificando la suma de todas las correcciones de prueba de acceso que se hacen durante la transmisión de prueba de acceso.

El control de potencia de lazo abierto, como se especifica en (4.16), se basa en un estimado de las pérdidas en la trayectoria. Este control de potencia se usa para compensar los efectos de desvanecimiento lento (*slow fading*) y desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria (*Multipath Rayleigh Fading*) que estudiamos en el capítulo 2 de la presente tesis.

4.2.2.4 Lazo cerrado

El control de potencia en lazo cerrado se usa para compensar las fluctuaciones debidas al desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria. Es aquí, en el lazo cerrado donde el proceso envuelve a la estación base y al móvil. Una vez que el móvil obtiene un canal de tráfico y comienza a comunicarse con la estación base, el proceso de control de potencia de lazo cerrado opera en conjunto con el control de potencia de lazo abierto. En el control de potencia de lazo cerrado, la estación base continuamente monitorea el enlace del móvil hacia ella y mide su calidad. Si la calidad del enlace es mala, entonces la estación base ordenará al móvil aumentar la potencia. Si la calidad del enlace es muy buena, entonces hay un exceso de potencia en la comunicación con el móvil; en este caso, la estación base ordenará al móvil disminuir su potencia. Idealmente, el

parámetro llamado tasa de errores en la trama o FER (*frame error rate*) es un buen indicador de la calidad del enlace. Pero como le toma mucho tiempo a la estación base acumular suficientes bits para calcular el FER, se usa en su lugar la E_b/N_0 como indicador de la calidad del enlace del móvil a la estación base.

La estación base envía las órdenes de control de potencia al móvil usando el enlace que va de la estación al móvil y que en las comunicaciones inalámbricas se le llama de bajada o hacia adelante, el análisis oportuno de este término se llevará a cabo en la sección de estructura del enlace de este capítulo.

El control de potencia de lazo cerrado tiene un lazo interior y uno exterior. La premisa de un lazo interior es que existe un umbral de SNR predeterminado por el cual se decide si se aumenta o disminuye la potencia. Dado que estamos tratando siempre de mantener un FER aceptable, y como en un ambiente móvil no hay una relación uno a uno entre el FER y la E_b/N_0 , el umbral del E_b/N_0 se tiene que ajustar dinámicamente para mantener el FER aceptable. A este ajuste del umbral del E_b/N_0 (que usa el control de potencia de lazo interior) se le llama lazo exterior del control de potencia de lazo cerrado. El proceso de lazo exterior no está definido en el estándar IS-95, y cada fabricante puede implementar sus propios algoritmos de lazo exterior.

El punto final concierne al control de potencia de lazo cerrado durante un *soft handoff*. El sistema CDMA IS-95 utiliza el *soft handoff* cuando un móvil se mueve dentro de dos o tres células. *Soft handoff* es el proceso por el cual un móvil mantiene conexión con dos o tres estaciones base así como sus transiciones entre ellas (este término se explicará ampliamente en la siguiente sección de la tesis). Durante el *soft handoff*, el móvil recibe tramas del canal de tráfico de dos o tres estaciones base, y en esos canales de tráfico puede haber conflicto con los comandos de control de potencia (por ejemplo, una estación base puede estarle diciendo al móvil que suba la potencia mientras que la otra estación base puede estarle diciendo que la baje). En este tipo de situaciones, el móvil sigue esta regla: si cualquier estación base ordena al móvil bajar la potencia, el móvil bajará la potencia. El móvil aumentará únicamente la potencia si todas las estaciones base envueltas en el *soft handoff* ordenan al móvil subir la potencia.

4.2.2.5 Implementación de lazo abierto y lazo cerrado

La potencia que transmite el móvil es una función del control de potencia de lazo cerrado y lazo abierto del sistema. La ecuación (4.16) se puede modificar para incluir la corrección de potencia de lazo cerrado; esto es,

$$\begin{aligned}
 P_t = & -p_r - 73 + \text{NOM_PWR} + \text{INIT_PWR} \\
 & + (\text{suma de todas las correcciones de prueba de acceso}) \\
 & + (\text{corrección de lazo cerrado}) \qquad \qquad \qquad (4.17)
 \end{aligned}$$

Resumiendo, en el control de potencia de lazo cerrado, la estación base controla el lazo exterior y parte del lazo interior; el móvil maneja la otra parte del lazo interior. Para el control de potencia de lazo abierto, la porción de lazo abierto entera reside en el móvil.

4.2.2.6 Enlace de Bajada

El control de potencia no es necesario en este enlace en un caso ideal. La razón es que la estación base está transmitiendo todos los canales coherentemente en la misma banda de radiofrecuencia. Si el ruido térmico y el ruido del ambiente son despreciables, entonces todas las señales se desvanecen juntas conforme la señal compuesta llega al móvil. Sin embargo, en la vida real, un móvil en particular puede estar cerca de un obstáculo mayor y experimentar una gran pérdida de señal, o un móvil puede sufrir una gran pérdida de trayectoria tal que al llegar la señal compuesta esté en el orden de ruido térmico. Por ello se necesita el control de potencia en el enlace de bajada.

El estándar IS-95 especifica que el móvil tiene que reportar a la estación base la calidad del enlace de bajada. El móvil continuamente monitorea el FER del enlace de bajada, y reporta este FER a la estación base en un mensaje llamado el mensaje de reporte de medida de potencia o PMRM (*Power Measurement Report Message*). Este puede enviar este reporte en dos formas: una es que el móvil periódicamente reporte el PMRM, y la otra es que el móvil reporte el PMRM únicamente si el FER excede cierto umbral. La estación base, conociendo la calidad del enlace de bajada, ajusta su potencia transmitida a ese móvil en particular y se completa el ciclo de control de potencia en el enlace de bajada.

4.3.1 Handoff

En un ambiente de comunicaciones móviles, lo que se desea es la libertad del usuario para moverse sin restricciones a lo largo del sistema. Cuando un usuario se mueve dentro del área de cobertura de una estación base no necesariamente se tiene o quiere quedar ahí, usualmente se moverá al área de cobertura de otra estación base. A este proceso se le llama *handoff* y se define como la transición del enlace de comunicación de una estación base a la siguiente. El sistema CDMA como lo define el IS-95 soporta diferentes procesos de *handoff*.

Antes de explicar que es un *handoff* cabe aclarar que se utilizará el anglicismo por falta de una palabra que le represente con precisión.

El primero es el *soft handoff* o *handoff* de software. Durante el *handoff*, un móvil mantiene simultáneamente conexión con dos o tres estaciones base. Cuando el móvil se mueve de su célula actual (célula fuente) a la siguiente célula (célula objetivo), siempre se mantiene una conexión de canal de tráfico con ambas células (ver figuras 4.9a y 4.9b). En el enlace de bajada, el móvil usa el receptor múltiple o *rake receiver* para demodular dos señales separadas de dos estaciones base diferentes. Las dos señales se combinan para obtener una señal compuesta de mejor calidad. En el enlace de subida, la señal que transmite el móvil se recibe por ambas estaciones base. Las dos células demodulan la señal por separado y envían las tramas demoduladas al centro de conmutación móvil o MSC (*mobile switching center*). El MSC contiene un selector que obtiene la mejor trama de las dos.

El segundo es el *softer handoff*. Este tipo de *handoff* ocurre cuando un móvil hace una transición entre dos sectores de la misma célula. En el enlace de bajada, el móvil realiza el mismo proceso de combinación de señales como en el *soft handoff*. En este caso, el móvil usa su receptor múltiple para combinar las señales recibidas de los dos sectores. En el enlace de subida, sin embargo, dos sectores de la misma célula reciben simultáneamente las dos señales del móvil. Estas señales son demoduladas y combinadas dentro de la célula, y únicamente se envía una trama al MSC.

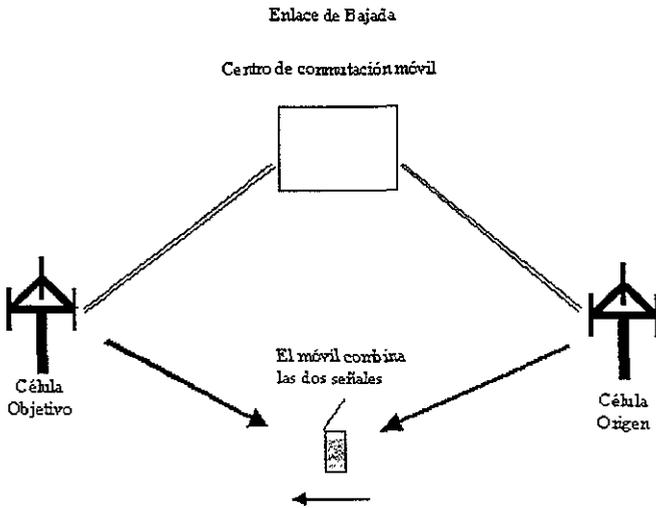


Figura 4.9a

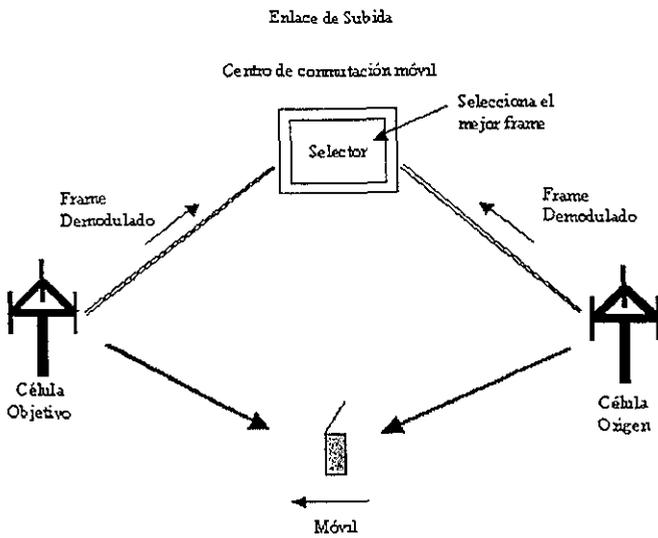


Figura 4.9b

El tercero es el *hard handoff* o *handoff* de *hardware*. El sistema CDMA hace dos tipos de *hard handoffs*. Un *handoff* CDMA-a-CDMA ocurre cuando el móvil hace una transición entre dos portadoras CDMA (por ejemplo, dos canales de espectro disperso que están centrados en diferentes frecuencias). Este *hard handoff* ocurre también cuando el móvil hace una transición entre dos sistemas diferentes de operadores. Al *handoff* CDMA-a-CDMA también se le llama *D-a-D handoff*. Y el *handoff* CDMA-a-analógico ocurre cuando una llamada CDMA se guía a una red analógica. Esto puede ocurrir cuando el móvil viaja en un área donde hay servicio analógico pero no hay servicio CDMA. El *handoff* CDMA-a-analógico se le llama *handoff* D-a-A.

Antes de describir el proceso de *soft handoff* en detalle, es importante notar que cada sector en un sistema CDMA se distingue de cualquier otro por el canal piloto de ese sector. Como la figura 4.10 lo muestra, el canal piloto es uno de los cuatro canales –piloto (*pilot*), búsqueda (*paging*), sincronía (*sync*) y canales de tráfico (*traffic*)– en el enlace de bajada. El canal piloto sirve como un "faro" para el sector y ayuda al móvil a adquirir otros canales lógicos del sector. El piloto no contiene información más que en el código corto PN (pseudoruido o *pseudonoise*) con un desplazamiento (*offset*) específico asignado a cada sector en particular.

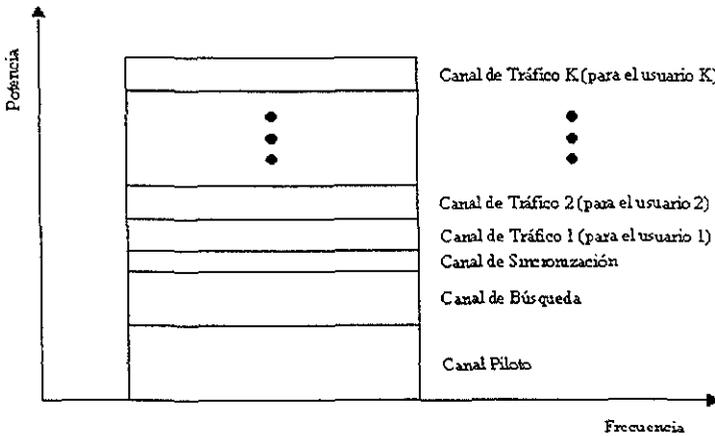


Figura 4.10

Se usa un término especial para describir la SNR del canal piloto: energía por chip por densidad de interferencia, o E_c/I_0 . La energía por chip E_c es diferente de la energía por bit E_b , en que *chips* se refiere a los bits en las secuencias dispersas PN. Dado que no hay información en banda base contenida en el canal piloto, el piloto no pasa por el proceso opuesto al dispersamiento y estos bits no se recobran.

4.3.1.1 El móvil en el *handoff*

En CDMA, el móvil es un participante esencial en el proceso del *soft handoff*. El móvil constantemente notifica a la estación base las condiciones de la propagación local; la estación base hace uso de esta información para tomar decisiones sobre el *handoff*. Este *handoff* asistido del móvil o MAHO (*mobile-assisted handoff*) actúa cuando el móvil toma una medida del E_c/I_0 del enlace de bajada y reporta el resultado de la medición a la estación base. Dado que cada estación base transmite su propio piloto en un diferente *offset* PN, el E_c/I_0 de un piloto da una buena indicación de si un sector en particular puede o no ser el sector más apropiado para servir al móvil.

En el manejo del proceso de *handoff*, el móvil mantiene en su memoria cuatro listas que se excluyen entre sí compuestas por los sectores de las estaciones base. Los sectores se almacenan en la forma de PN *offsets* del piloto de dichos sectores. A estas listas también se les llama conjuntos. Los cuatro conjuntos son conjunto activo (*active*), conjunto candidato (*candidate*), conjunto vecino (*neighbor*), y conjunto residuo (*remaining*).

El conjunto activo contiene los canales piloto de aquellos sectores que se están comunicando con el móvil en los canales de tráfico. Si el conjunto activo contiene únicamente un piloto, entonces el móvil no está en *soft handoff*. Si el conjunto activo contiene más de un canal piloto, entonces el móvil mantiene la conexión con todos esos sectores en canales de tráfico separados. La estación base controla esencialmente el proceso de *handoff* porque se puede agregar únicamente un piloto al conjunto activo si la estación base envía un mensaje de dirección de *handoff* (*handoff direction message*) al móvil y el mensaje contiene el piloto en particular que se va a agregar al conjunto activo. El conjunto activo puede contener a lo más seis pilotos.

El conjunto candidato contiene aquellos pilotos cuyos E_c/I_0 son suficientes para hacerlos candidatos de *handoff*. Esto significa que si el E_c/I_0 de un piloto en particular es más grande que el

umbral de detección de piloto (*pilot detection threshold*) T_{ADD} , entonces ese piloto se agrega al conjunto candidato. El conjunto candidato puede contener hasta seis pilotos.

El conjunto vecino contiene aquellos pilotos que están en la lista vecino del actual sector servidor del móvil. Inicialmente, el conjunto vecino contiene aquellos pilotos que son enviados al móvil en el mensaje lista de vecinos por la estación base servidora. El conjunto vecino contiene a lo más 20 pilotos.

El conjunto residuo contiene todos los posibles pilotos en el sistema para esta frecuencia portadora CDMA, excluyendo a los pilotos que están en los conjuntos activo, candidato y vecino.

4.3.1.2 El proceso de transferencia de la llamada

La manera más sencilla de presentar el proceso de *handoff* es mediante una explicación paso por paso de lo que sucede entre el móvil y dos estaciones base. Una de ellas es la célula de donde partirá el móvil y la otra donde será transferido. Como muestra la figura 4.11, el móvil se está moviendo desde el área de cobertura de la célula origen A al área de cobertura de la célula objetivo B. A continuación se presentan los eventos que ocurren durante la transición:

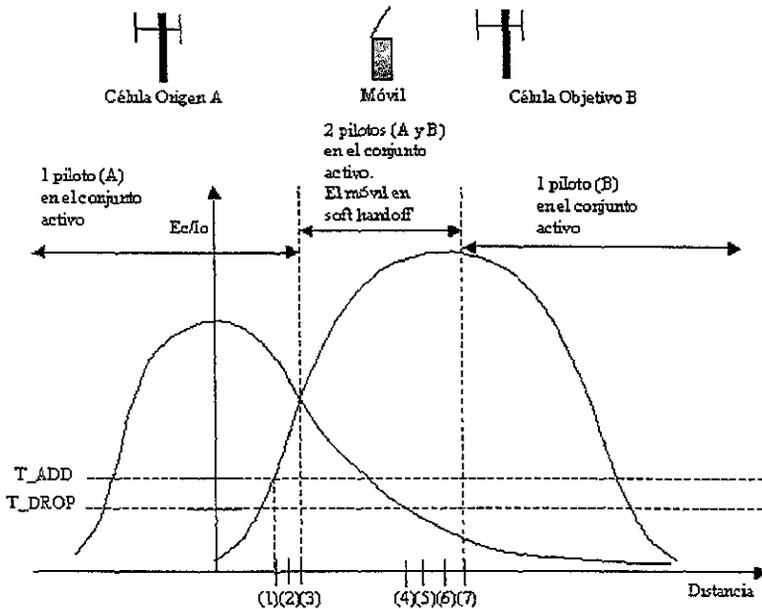


Figura 4.11

1. En primera instancia el móvil se encuentra alimentado únicamente por la célula A, y su conjunto activo contiene tan solo al piloto A. El móvil mide el nivel de E_c/I_0 del piloto B y lo encuentra mayor que T_ADD . Es aquí cuando el móvil envía un mensaje de medida de fuerza de piloto (*pilot strength measurement message*) y transfiere al piloto B del conjunto vecino al conjunto candidato.
2. Ahora el móvil recibe un mensaje de dirección de *handoff* (*handoff direction message*) de la célula A. Dicho mensaje ordena al móvil a comenzar la comunicación en un nuevo canal de tráfico con la célula B. El mensaje contiene el *PN offset* de la célula B y el código de Walsh del nuevo canal de tráfico.
3. Entonces el móvil mueve el piloto del conjunto candidato al conjunto activo. En este momento el móvil envía un mensaje de acabado *handoff* (*handoff completion message*) inmediatamente después de adquirir el canal de tráfico de bajada especificado en el mensaje de dirección de *handoff* (*handoff direction message*). Ahora el conjunto activo contiene dos canales pilotos en su lista

4. Después de que tiene dos pilotos, el móvil detecta que el piloto A ha caído por debajo de T_DROP y es entonces cuando el móvil inicia el contador de tiempo o *drop timer*.
5. Cuando el *drop timer* alcanza el valor correspondiente a T_TDROP el móvil envía un mensaje de medida de fuerza de piloto.
6. Una vez que el móvil recibe un mensaje de dirección de *handoff*, el mensaje contiene únicamente el PN *offset* de la célula B.
7. Y finalmente el móvil tiene que cambiar el piloto A del conjunto activo al conjunto vecino, así como enviar un mensaje para indicar que el *handoff* ha terminado¹⁹

Hay otro mecanismo que puede disparar la transmisión de un mensaje de medida de fuerza de piloto por el móvil. Si la fuerza de un piloto en el conjunto candidato excede la fuerza de un piloto en el conjunto activo por el umbral de comparación conjunto activo versus conjunto candidato $T_COMP \times 0.5\text{dB}$, entonces el móvil envía un mensaje de medida de fuerza de piloto.

4.4.1 Estructura del enlace

El sistema CDMA IS-95 es único; ya que sus enlaces de bajada y subida tienen diferentes estructuras. Un enlace es la vía de comunicación entre el elemento móvil y la estación base. Esta diferencia o asimetría en los enlaces mejora las necesidades de un sistema de comunicación tierra-móvil.

En el caso de un sistema celular se definen dos enlaces de comunicación básicos. Tomando como referencia a la estación base, se dice que el enlace que va de dicha estación hacia la estación móvil se llama enlace de bajada (*forward* o *downlink*). Y el enlace que va de la estación móvil a la estación base se le llama enlace de subida (*reverse* o *uplink*)²⁰.

Dentro de cada enlace existen elementos de comunicación llamados canales. Estos canales se definen como una ráfaga de datos codificados designados para el uso del móvil.

El enlace de bajada tiene cuatro tipos de canales: piloto, sincronización, búsqueda y tráfico. Por cada enlace de bajada hay un canal piloto, un canal de sincronización, hasta siete canales de búsqueda, y los restantes, según la capacidad de la radio base, son canales de tráfico. Cada uno de

¹⁹ William Lee op cit , p 531-534.

estos canales del enlace de bajada se dispersan primero de forma ortogonal por la función de Walsh que le corresponde, y después se dispersa por un par de secuencias en cuadratura PN cortas. Todos los canales se agregan juntos para formar la señal compuesta que será transmitida en el enlace de bajada.

El enlace de subida consiste en dos tipos de canales: canales de acceso y de tráfico. Cada uno de estos canales del enlace de subida se dispersa ortogonalmente por una única secuencia llamada PN larga. Cada canal se identifica usando un código PN largo distinto²¹.

4.4.1.1 Enlace de Bajada

El sistema CDMA IS-95 usa una matriz 64x64 para generar 64 funciones Walsh que son ortogonales entre ellas, y cada uno de los canales lógicos en el enlace de bajada se puede identificar por la función Walsh que tiene asignada. Ahora se estudiarán los canales lógicos.²²

- **Canal piloto**

El canal piloto se transmite constantemente como un faro. El móvil usa la señal del piloto para adquirir el sistema. Después de que el móvil ha adquirido el sistema, el piloto se usa para medir la intensidad de la señal. La intensidad del piloto se utiliza para determinar la potencia requerida para la transmisión del móvil.

El piloto no contiene información pero es la señal más potente en el enlace de bajada, esta contiene por lo menos un 20% del total de la potencia del enlace de bajada.

El canal piloto se identifica por la función Walsh 0 (w_0). El canal en si no contiene información de banda base. La secuencia de banda base es una cadena de 0s que se dispersan por la función Walsh 0, la cuál es también una secuencia de 0s. La secuencia resultante (aún todos 0s) se dispersa o multiplica, por un par de secuencias en cuadratura PN. Por esto, el canal piloto es efectivamente la secuencia PN por sí misma (ver figura 4.12). La secuencia PN con un *offset* específico únicamente identifica el sector particular que esta transmitiendo la señal. Después del

²⁰ TIA/EIA IS-95A op cit

²¹ Rappaport, Theodore S *Wireless Communications* EE UU. Prentice Hall, 1ª Ed. Enero de 1996, p 641.

²² Samuel Yang op cit , p 75

dispersamiento PN se usan filtros en banda base para moldear los pulsos digitales. El canal piloto provee al móvil la referencia de tiempo y fase y transmite una tasa de 19.2kbps.

- **Canal de sincronización**

A diferencia del canal piloto el canal de sincronización lleva la información en banda base. La información está contenida en el mensaje del canal de sincronía (*sync channel message*) que notifica al móvil de información importante acerca de la sincronización del sistema y parámetros del mismo. La figura 4.13 muestra que la información en banda base se protege contra error. Entonces, se dispersa por la función de Walsh 32 y enseguida por la secuencia PN que se identifica con el sector que está sirviendo. La información en banda base se encuentra a una tasa de 1.2kbps.

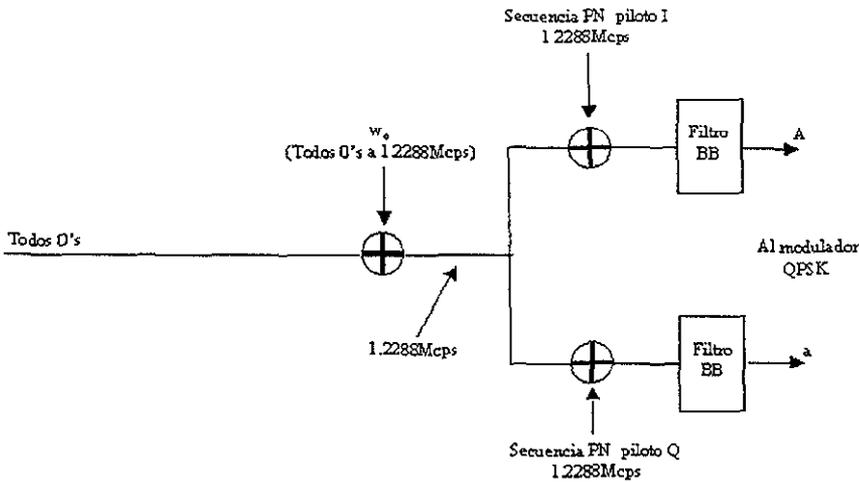


Figura 4.12

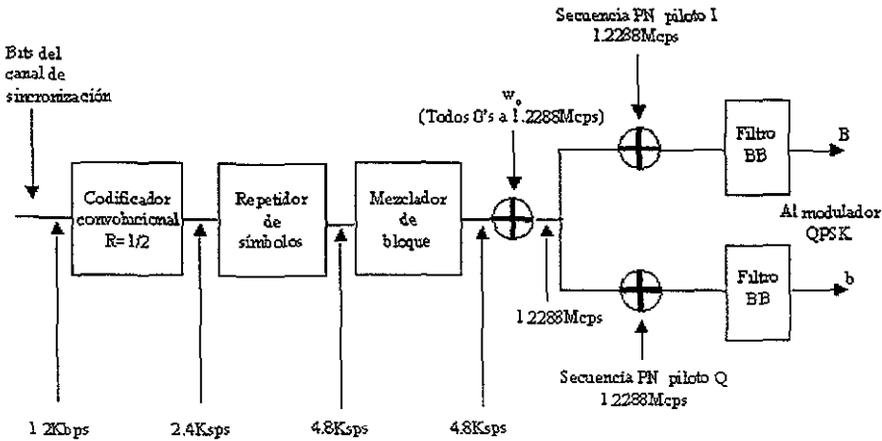


Figura 4.13

A nivel de bit, el canal sincronización se transmite en grupos de supertramas de canal de sincronía (*sync channel superframes*), cada supertrama contiene 96 bits y dura 90ms, resultando en una tasa de 1200bps. Cada supertrama contiene tres tramas de canal de sincronía de igual longitud y duración. Cada trama del canal de sincronización se alinea con la secuencia PN corta asociada con el sector que transmite. Cada período de la secuencia PN corta esta sincronizada con cada trama de canal de sincronización. Por esto, una vez que el móvil obtiene sincronización mediante el canal piloto, se conoce la alineación para el canal de sincronización. Una vez que el móvil logra alinearse con el canal de sincronización, el móvil puede comenzar a leer el mensaje de este canal. Una vez que el móvil esta sincronizado con la estación base se ignora el canal de sincronización.

- **Canal de búsqueda**

Similar al canal de sincronización, el canal de búsqueda también lleva información en banda base. Pero a diferencia del canal anterior, el canal de búsqueda transmite a tasas más altas; este puede transmitir ya sea a 9.6kbps, 4.8kbps e inclusive a 2.4kbps.

Como se muestra en la figura 4.14, la información en banda base primero se protege contra error, entonces si la tasa de datos es 4.8kbps, los bits se repiten una vez. Los datos se mezclan primero por una secuencia PN larga, y entonces se dispersan por una función de Walsh específica asignada al canal de búsqueda y después dispersa por la secuencia PN corta asignada al sector que esta sirviendo. También nótese de la figura 4.14 que el código PN largo sostiene una tasa de 64:1 (por ejemplo de 1.2288Mcps a 19.2kbps). El generador de códigos largo por si mismo se enmascara con un número de canal de búsqueda único. Por esto, la máscara de código largo que se usa para el canal de 'búsqueda 1' (disperso por una función de Walsh 1) es diferente al que utiliza el canal de 'búsqueda' 3 (disperso por una función de Walsh 3), por ejemplo.

El canal de búsqueda esta dividido en ranuras de 80ms. A un grupo de 2048 ranuras se le llama un ciclo de ranura máximo (*maximum slot cycle*). Una ranura de 80ms se divide en 4 tramas de canal de búsqueda, y cada trama de canal de búsqueda está dividida en dos medias tramas. El primer bit de cada trama media se llama el indicador de cápsula sincronizada o SCI (*synchronized capsule indicator*).

Los mensajes de señalización y búsqueda se envían en el canal de búsqueda. La información de señalización se utiliza para notificar al móvil parámetros de configuración importantes del sistema. Algunos ejemplos de mensajes de señalización son el mensaje de parámetros del sistema, mensaje de parámetros de acceso, y el mensaje de lista de vecinos.

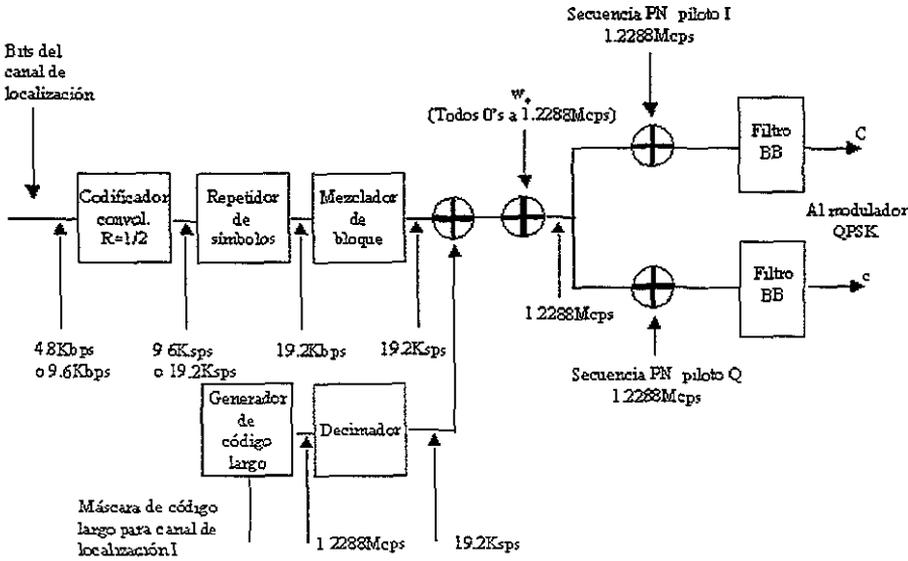


Figura 4.14

• Canal de Tráfico

El canal de tráfico de bajada se usa para transmitir datos y voz del usuario; los mensajes de señalización también se envían sobre el canal de tráfico. La estructura del canal de tráfico de bajada es similar al del canal de búsqueda. La única diferencia es que el canal de tráfico de bajada contiene Bits de control de Potencia o PCBs (Power Control Bits) multiplexados.

La figura 4.15 muestra el canal de tráfico de bajada para el conjunto de tasa 1. Para esta tasa de transmisión, el codificador de voz es capaz de variar su tasa de datos de salida en respuesta a las actividades del habal. Se pueden manejar hasta cuatro tasas de datos diferentes para un vocoder de 8kbps: 9.6kbps, 4.8kbps, 2.4kbps y 1.2kbps. Por ejemplo, durante períodos cortos de calma de la voz, el codificador puede elegir el código del habla a la tasa mas baja de 1.2kbps.

La tasa en banda base de la voz se codifica por medio de una convolución contra error. Para el conjunto de tasa 1, se usa un codificador convolucional de tasa 1/2. La codificación efectivamente duplica la tasa de datos. Después del codificador convolucional, los datos sostienen

una repetición de símbolos, la cual repite los símbolos cuando el codificador de voz produce los datos a una tasa más baja.

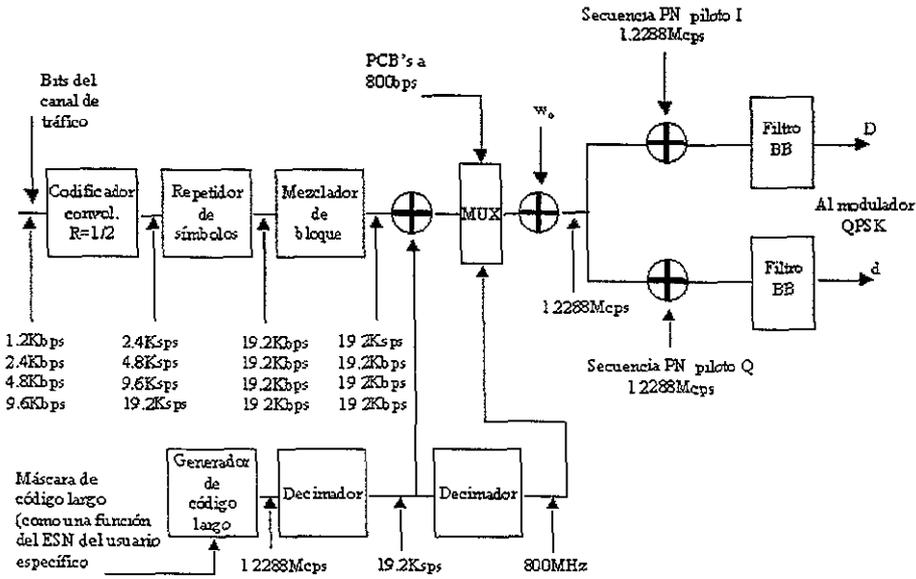


Figura 4.15

Cuando la tasa de datos es 9.6kbps, la tasa de símbolos del código (a la salida del codificador convolucional) es 19.2ksps (kilosímbolos por segundo). En este caso, no se implementa la repetición.

Cuando la tasa de datos es 4.8kbps, la tasa de símbolos del código es 9.6ksps. Se repite cada símbolo una vez, logrando una tasa de símbolo de modulación final de 19.2ksps.

Cuando la tasa de datos es 2.4kbps, la tasa de símbolos del código es 4.8ksps. Se repite cada símbolo tres veces, logrando una tasa de símbolo de modulación final de 19.2ksps.

La razón para la repetición de símbolos es el reducir la potencia de interferencia en un tiempo dado cuando los datos son transmitidos a una tasa más baja

El esquema es efectivamente un medio de tomar ventaja del factor de actividad de voz en la implementación del *hardware* (por ejemplo, cuando el codificador de voz está transmitiendo a tasa mas bajas, la potencia transmitida de bajada se reduce).

En un sistema real CDMA, cuando el codificador de voz está transmitiendo a 4.8kbps, la energía por símbolo transmitida es la mitad de 9.6kbps. Cuando el codificador de voz está transmitiendo a 2.4kbps, la energía por símbolo es una cuarta parte de 9.6kbps, y cuando el codificador de voz está transmitiendo a 1.2kbps, la energía por símbolo transmitida es un octavo de la de 9.6kbps.

Después de la repetición de símbolos, los datos se mezclan para combatir el desvanecimiento, entonces los datos mezclados se revuelven mediante una secuencia PN larga. La secuencia PN larga se produce mediante un generador de códigos PN largos. El generador saca una secuencia PN larga a 1.2288Mcps. Como la tasa de datos a la salida del mezclador es 19.2ksps, la secuencia PN se convierte a una tasa de 64:1 para también lograr los 19.2kcps; la secuencia PN larga a 19.2kcps se multiplica por la cadena de datos de 19.2ksps. El generador de códigos largos produce la secuencia PN larga usando una máscara que es específica al móvil. En realidad, la máscara es una función del número de serie electrónico o ESN (*electronic serial number*) del móvil.

Los PCBs a 800bps se multiplexan con la cadena de datos mezclados a 19.2ksps. Es importante reconocer que la localización exacta del PCB en el Grupo de Control de Potencia o PCG (*Power Control Group*) no es fija, esta se determina de una manera pseudoaleatoria.

Hasta este punto, la función de Walsh asignada dispersa de manera ortogonal la cadena de datos multiplexada (aún a 19.2ksps). Cada canal de tráfico de bajada se identifica por su función de Walsh asignada. La función de Walsh dispersa tiene entonces una tasa de 1.2288Mcps; cada símbolo es disperso por un factor de 64, y el resultado es una cadena de datos dispersos a una tasa de 1.2288Mcps.

La cadena de datos se dispersa después por la secuencia PN corta asignada del sector que esta transmitiendo. La secuencia PN corta provee una segunda capa de aislamiento que distingue entre los diferentes sectores. De esta forma, todas las 64 funciones de Walsh disponibles se pueden

rehusar en cada sector. Hay que recordar que los PN *offsets* de caracterizan cada secuencia corta PN única.

La estructura del canal de tráfico bajada es similar para el conjunto de tasa 2. El codificador de voz para el conjunto de tasa 2 codifica el habla a tasas mas altas, y este entrega una mejor calidad de voz que la del conjunto de tasa 1. El codificador de voz del conjunto de tasa 2 soporta cuatro tasas variables: 14.4kbps, 7.2kbps, 3.6kbps, y 1.8kbps.

La salida de los canales lógicos es la que alimenta el modulador. La ganancia de cada canal lógico, incluyendo el piloto, el canal de sincronización, el de búsqueda, y todos los canales de tráfico, se ajusta primero mediante la función de control de ganancia. La ganancia de cada canal establece cuanta potencia se puede transmitir por cada canal. Las ganancias para los canales de tráfico individuales están cambiando dinámicamente²³.

Ya que las ganancias de los canales se ajustan, las señales se suman coherentemente para formar la señal compuesta de espectro disperso. Después de la suma, las trayectorias I y Q se convierten por sus respectivas portadoras. Las señales convertidas se suman para formar la señal QPSK pasabanda final.

4.4.1.2 Enlace de Subida

El enlace de subida soporta dos tipos de canales lógicos: canales de acceso y canales de tráfico. Debido a la naturaleza no coherente del enlace de subida, las funciones de Walsh no se usan para formar los canales. Para distinguir a los usuarios en vez de las funciones de Walsh se usan las secuencias PN largas

- **Canal de acceso**

El móvil usa el canal de acceso para comunicarse con la estación base cuando este no tiene asignado un canal de tráfico. El móvil usa este canal para realizar la "originación" de llamadas y responder a búsquedas o *pages* o así como a órdenes. La tasa de datos en banda base del canal de acceso es fija a 4.8kbps.

²³ Ibidem, tablas 15.7-15.9

Como se muestra en la figura 4.16, la información en banda base se protege primero contra error por un codificador convolucional $R=1/3$. La tasa de codificación más baja hace la protección contra error más robusta en el enlace de subida, el cual es el más débil de los dos enlaces. La función de repetición de símbolos repite el símbolo una vez, logrando una tasa de símbolo de código de 28.8kbps. Los símbolos a la salida se mezclan para combatir el desvanecimiento²⁴.

Después de la mezcla, se codifican los datos por un modulador ortogonal 64. Se usa el conjunto de funciones de Walsh 64, pero aquí las funciones de Walsh se usan para modular, o representar, grupos de seis símbolos. La razón de la modulación ortogonal de los símbolos se debe nuevamente a la naturaleza no coherente del enlace de subida. Cuando una transmisión de usuario es no coherente, el receptor (en la estación base) aún puede detectar cada símbolo correctamente. Tomar una decisión de si un símbolo es +1 o -1 puede ser difícil durante un período de símbolo.

Sin embargo, si un grupo de seis símbolos se representa por una única función de Walsh, entonces la estación base puede fácilmente detectar seis símbolos en un tiempo al decidir cual función de Walsh se envió durante ese período. El receptor puede decidir fácilmente cual función de Walsh se envió al correlacionar la secuencia que recibió con el conjunto de las 64 funciones de Walsh conocidas. En el enlace de bajada, las funciones de Walsh se usan para distinguir entre los diferentes canales. En el enlace de subida, las funciones de Walsh se usan para distinguir entre los diferentes símbolos (o entre grupos de seis símbolos).

²⁴ Ibidem, p. 511-513

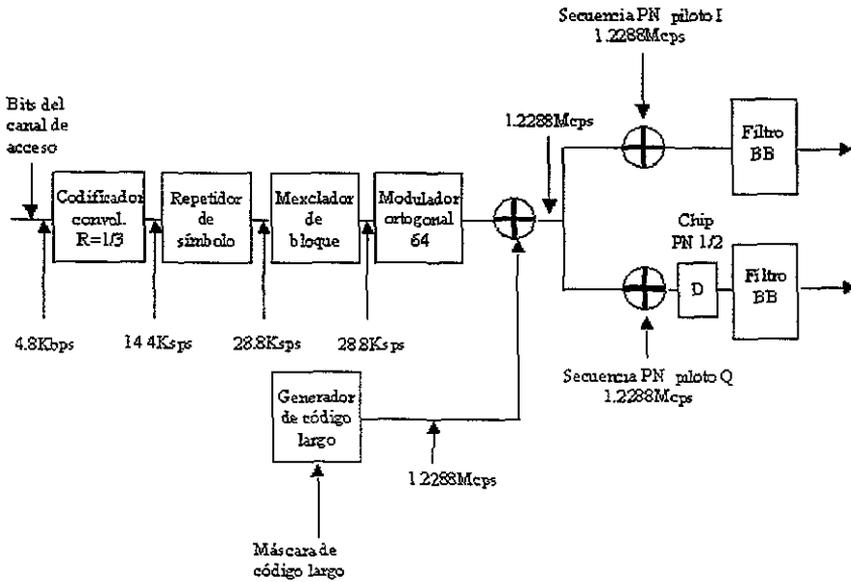


Figura 4.16

El grupo de seis símbolos binarios corresponde a un valor decimal entre 0 y 63. El patrón del grupo de seis símbolos establece cual función de Walsh (0 a 63) se usa para representar ese grupo de seis símbolos.

Ejemplo: $+-+-$ se traduce como $010110_{\text{binario}} = 22_{\text{decimal}}$. Lo que significa que la función de Walsh número 22 es la salida del modulador ortogonal.

Los datos modulados ortogonalmente a 4.8kps (símbolos modulados) o a 307.2kps (símbolos de código) se dispersan entonces por la secuencia PN larga. La secuencia PN larga está corriendo a 1.2288Mcps, y el ancho de banda de los datos después del dispersamiento es 1.2288Mcps. Recuerde que la secuencia PN larga se usa para distinguir el canal de acceso de todos los otros canales que ocupan el enlace de subida.

Los datos se revuelven después en las trayectoria I y Q por las secuencias PN cortas (también corriendo a 1.2288Mcps) definidas en el estándar IS-95. Debido a que el enlace de subida usa Modulación en Cuadratura por Cambio de Fase con Retraso (OQPSK, *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*), los datos en la trayectoria Q están retrasados por una mitad de *chip* PN. El propósito principal de este retraso de chip es asegurar que la envolvente de la señal QPSK no se colapse a cero²⁵. Esta propiedad es importante porque el amplificador de potencia del móvil es típicamente pequeño y limitado en capacidad. Si el amplificador permanece lineal sobre un rango dinámico pequeño se puede asegurar que la envolvente de la señal nunca alcance el cero y siempre permanezca sobre un cierto nivel.

Finalmente los mensajes que se envían en el canal de acceso son dos: un mensaje respuesta (en respuesta al mensaje estación base) o un mensaje de petición (enviado por la estación móvil). Dichos mensajes, así como cualquier otra información en el canal de acceso se transmite por medio de ranuras (*access channel slots*) que componen tramas (*access channel frames*). Ahora veremos la importancia que tiene el canal de tráfico sabiendo de antemano que para el diseño de la red es aquel que se puede modificar con el fin de lograr la correcta capacidad de tráfico de dicha red.

- **Canal de tráfico**

El canal de tráfico de subida se usa para transmitir datos del usuario y voz. Los datos modulados ortogonalmente se alimentan en el transformador de tramas de datos aleatorio. La función del transformador de tramas de datos aleatorio es tomar ventaja del factor de actividad de la voz en el enlace de subida. Recordemos que el enlace de bajada tiene un esquema diferente para tomar ventaja del factor de actividad de la voz - cuando el codificador de voz esta operando a una tasa mas baja, el enlace de bajada transmite los símbolos repetidos a una energía reducida por símbolo y por eso se reduce la potencia del enlace de bajada durante cualquier período dado.

El esquema que se describe para el enlace de bajada es inadecuado para el enlace de subida. La razón es que el requerimiento de velocidad del control de potencia es mucho más exigente en el enlace de subida. La estación base mide el E_b/N_0 (una cantidad que se mide rápidamente) en el enlace de subida, entonces la estación base inmediatamente hace una decisión de control de potencia y envía un PCB de regreso al móvil. La estación base necesita detectar rápidamente cada

²⁵ *Ibidem*, p 16 Figura 15.29.

símbolo, aún cuando el codificador de voz está operando a una tasa mas baja, y la estación base no puede esperar al integrador

La finalidad de llevar a cabo un acercamiento para reducir la potencia en el enlace de subida durante períodos de calma del habla es para enmascarar pseudoaleatoriamente los símbolos redundantes que se producen por la repetición de símbolos. Esto lo efectúa el transformador de tramas de datos aleatorio. El transformador de tramas de datos aleatorio genera un patrón enmascarado de 0s y 1s que aleatoriamente enmascaran los datos redundantes. El patrón de enmascaramiento esta parcialmente determinado por la tasa del codificador de voz. Si el codificador de voz esta operando a 9.6kbps, entonces los datos no se enmascaran. Si el codificador de voz esta operando a 1.2kbps, entonces los símbolos se repiten siete veces, y el transformador de tramas de datos aleatorio enmascara, en promedio, siete de ocho grupos de símbolos.

4.5.1 Procesamiento de la llamada

El procesamiento de la llamada se refiere a todas las funciones que el sistema necesita llevar a cabo para establecer, mantener y terminar una llamada entre un móvil y otro teléfono. Se pueden realizar dos tipos de conexiones: una llamada de un móvil a tierra “*móvil-tierra*” y una llamada de un móvil a otro móvil “*móvil-móvil*”. En el caso de móvil a tierra, la llamada se establece entre un móvil y un teléfono alámbrico, en cuyo caso la llamada se enruta a través de la Red Telefónica Pública Conmutada o PSTN (*Public switched telephone network*). El sistema CDMA IS-95 adopta una descripción del procesamiento de la llamada. Dado que el móvil es el elemento común en los dos tipos de conexiones, el estándar IS-95 especifica los estados de la llamada desde la perspectiva de la estación móvil CDMA.

Es importante notar que el estándar no especifica los estados de la llamada para la estación base. Obviamente, cualquiera que sean las funciones que la estación base lleve a cabo deben trabajar con los estados de la llamada del móvil especificados; los fabricantes son libres de implementar sus propias funciones de la estación base para satisfacer los requerimientos del procesamiento de la llamada.

Durante la operación normal, el móvil puede ocupar cualquiera de los siguientes estados:

Estado de inicialización de la estación móvil,

Estado de inactivo de la estación móvil;

Estado de acceso al sistema;

Estado de control de la estación móvil en el canal de tráfico.

La figura 4.17 ilustra gráficamente estos estados y las transiciones asociadas.

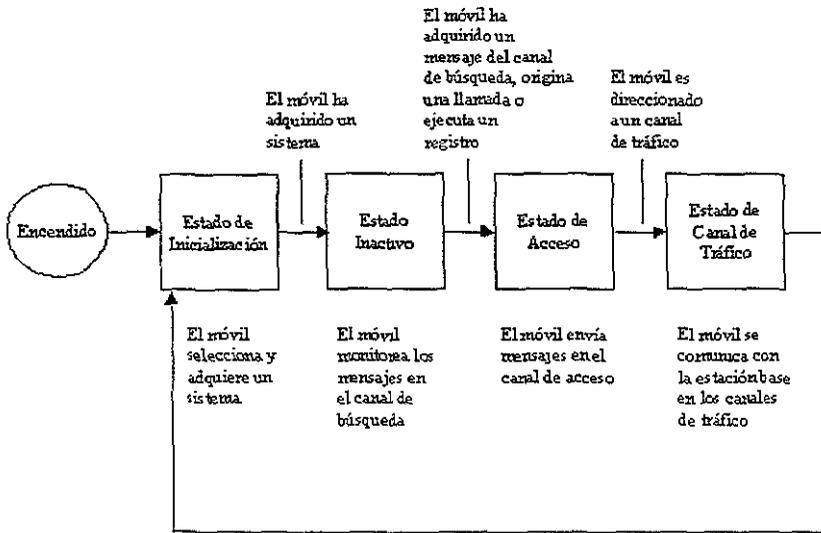


Figura 4.17

Después del encendido, el móvil primero entra al estado de inicialización de la estación móvil (o estado de inicialización), donde el móvil selecciona y alcanza un sistema. Al salir del estado de inicialización, el móvil tiene totalmente acceso al sistema y su sincronización. Entonces el móvil entra al estado de inactivo de la estación móvil (o estado inactivo), donde el móvil monitorea mensajes en el canal de búsqueda

Cualquiera de los tres siguientes eventos causará al móvil la transición del estado inactivo al estado de acceso al sistema (o estado de acceso):

- 1) el móvil recibe un mensaje de canal de búsqueda pidiendo un reconocimiento o respuesta
- 2) el móvil origina una llamada
- 3) el móvil ejecuta un registro

En el estado de acceso, el móvil envía mensajes a la estación base en el canal de acceso. Cuando el móvil se dirige al canal de tráfico, este entra al estado de control de la estación móvil en el canal de tráfico (o estado de canal de tráfico), donde el móvil se comunica con la estación base usando los canales de tráfico de bajada y subida. Cuando se termina la llamada el móvil regresa al estado de inicialización.

4.5.1.1 Estado de inicialización

Después de encenderse, el móvil entra al estado de inicialización. Este estado contiene cuatro subestados, los cuales el móvil sigue secuencialmente:

1. Subestado de determinación del sistema;
2. Subestado de adquisición del canal piloto;
3. Subestado de adquisición del canal de sincronización;
4. Subestado de cambio de sincronización²⁶.

1. Subestado de determinación del sistema

El subestado de determinación del sistema es el primer subestado al que el móvil entra dentro del estado de inicialización. En este subestado, el móvil selecciona cual sistema usar (por ejemplo, sistema A o sistema B en la banda celular). Debido a que todos los teléfonos celulares CDMA tienen capacidad de modo dual, el móvil también decide si estará en modo CDMA o analógico. Si se selecciona el modo CDMA, el móvil procede a seleccionar cual portadora CDMA usará. Entonces el móvil entra al siguiente subestado.

2. Subestado de adquisición del canal piloto

En el subestado de adquisición del canal piloto, el móvil demodula y obtiene el canal piloto del sistema seleccionado CDMA. El móvil tiene que leer el canal piloto dentro de un cierto límite de tiempo; si el móvil alcanza el piloto dentro del límite de tiempo, entonces entra al subestado de adquisición del canal de sincronización. Si el móvil no alcanza el piloto dentro del límite de tiempo, entonces regresa al subestado de determinación del sistema.

²⁶ Ibidem, p 529.

3. Subestado de adquisición del canal de sincronización

En este subestado, el móvil toma el canal de sincronización del sistema CDMA. El móvil obtiene información de la configuración del sistema y sincronización al leer el mensaje del canal de sincronización. El móvil también necesita leer este canal y el mensaje dentro de cierto límite de tiempo. Si el móvil no recibe el mensaje del canal de sincronización dentro del límite de tiempo, entonces retorna al subestado de determinación del sistema. Si el móvil recibe el mensaje de canal de sincronización dentro del tiempo permitido, y si el nivel de revisión del protocolo propio del móvil es más grande o igual al nivel de revisión de protocolo mínimo que soporta la estación base, entonces el móvil entra al siguiente subestado.

4. Subestado de cambio de sincronización.

En el subestado de cambio de sincronización, el móvil sincroniza su tiempo al tiempo del sistema CDMA y su fase de código largo al del sistema CDMA. En este punto, el móvil ya demoduló el mensaje del canal de sincronización y posee todos los parámetros del mensaje.

Después que el móvil obtiene completamente el sistema CDMA, este entra al estado de inactividad de la estación móvil.

4.5.1.2 Estado inactivo

En el estado inactivo, el móvil monitorea el canal de búsqueda en el enlace de bajada. Para recibir mensajes y recibir una llamada entrante, el móvil necesita monitorear el canal de búsqueda. La transmisión del canal de búsqueda está dividida en ranuras que tienen 80ms de longitud. Hay dos formas en que el móvil puede monitorear el canal de búsqueda: monitorear en modo no ranurado o *nonslotted* o en modo ranurado o *slotted*.

En modo *nonslotted*, el móvil monitorea el canal de búsqueda todo el tiempo.

En modo *slotted*, el móvil monitorea el canal de búsqueda únicamente durante los canales de búsqueda asignados. Debido a que el móvil no tiene que monitorear todas las ranuras todo el tiempo, el móvil operando en el modo *slotted* puede ahorrar energía de la batería²⁷.

²⁷ *Ibidem*, p. 530.

Cuando el móvil está en el estado inactivo y tiene que moverse del área de cobertura de una estación base al área de cobertura de otra estación base, ocurre un *handoff* inactivo (*idle handoff*). Si el móvil detecta que la fuerza del canal piloto de otra estación base es mayor a la estación base actual, entonces el móvil ejecuta un *handoff* inactivo. Al hacerlo, el móvil mantiene tres conjuntos de PN *offsets* del canal piloto de la estación base (o sectores):

El conjunto activo contiene el PN *offset* del canal piloto del sector cuyo canal de búsqueda monitorea el móvil.

El conjunto vecino contiene los PN *offsets* del canal piloto de aquellos sectores que son probables candidatos para *handoff* inactivo. El mensaje de lista de vecinos especifica los pilotos en el conjunto vecino.

El conjunto residuo contiene todos los posibles PN *offsets* del canal piloto en el sistema, excluyendo los pilotos del conjunto activo y conjunto vecino.

Si el móvil determina que una de las señales piloto del conjunto vecino o conjunto residuo es mayor al piloto del conjunto activo, el móvil ejecuta un *handoff* inactivo. El *handoff* inactivo no es más que el inicio para monitorear el canal de búsqueda de un nuevo sector cuya fuerza del piloto es mayor a la del sector actual.

El móvil monitorea el canal de búsqueda de una sola estación base. Por esto, el *soft handoff* no es aplicable en el estado inactivo.

Hay un total de seis mensajes de cabecera que se envían al móvil en el canal de búsqueda:

- Mensaje de parámetros del sistema
- Mensaje de lista de vecinos
- Mensaje de lista de canales CDMA
- Mensaje de parámetros de sistema extendido
- Mensaje de redirección del servicio global
- Mensaje de parámetros de acceso

Los primeros cinco mensajes se refieren como los mensajes de configuración. El móvil está constantemente recibiendo estos mensajes en el canal de búsqueda, y dentro de esos mensajes hay muchos campos que se necesitan para actualizar y cargar en la memoria del móvil

El móvil pide que la estación base asigne un número de secuencia al conjunto de los mensajes de configuración. Cuando el contenido de uno o mas de los mensajes de configuración cambia, el número de secuencia de mensaje de configuración se incrementa.

4.5.1.3 Estado de acceso

En el estado de acceso, el móvil transmite mensajes a la estación base usando el canal de acceso. El móvil también recibe mensajes de la estación base en el canal de búsqueda. Hay seis subestados que el móvil puede ocupar dentro del estado de acceso:

1. Subestado de información de actualización de cabecera;
2. Subestado de respuesta a la búsqueda;
3. Subestado de intento de originación de la estación móvil;
4. Subestado de acceso de registro
5. Subestado de respuesta de mensaje/petición de estación móvil;
6. Subestado de transmisión de mensaje de estación móvil.

1. Subestado de información de actualización de cabecera

Después que el móvil recibe los mensajes de configuración actuales en el canal de búsqueda, el móvil compara los números de secuencia para determinar todos los mensajes de configuración. Los procedimientos de actualización se usan para actualizar todos los números de secuencias almacenados localmente. El móvil también checa si tiene o no los últimos parámetros de acceso al verificar su número de secuencia de mensaje de parámetros almacenado localmente.

Aparte de recibir los mensajes de configuración y los mensajes de parámetros de acceso, el móvil puede también recibir los siguientes mensajes de búsqueda:

- Mensaje de búsqueda
- Mensaje de búsqueda por ranuras;

- Mensaje de búsqueda general.

Cualquiera que sea el mensaje de búsqueda que reciba el móvil, la estación móvil lee en cada mensaje para determinar si este contiene la identificación de la estación móvil internacional o IMSI (*International Mobile Station Identity*). Si es así, entonces el móvil cambia al subestado de respuesta de búsqueda y transmite un mensaje de respuesta a la búsqueda en el canal de acceso.

2. Subestado de respuesta de búsqueda

En este subestado, el móvil envía un *mensaje de respuesta de búsqueda* en respuesta a los mensajes de búsqueda enviados por la estación base. El móvil envía el mensaje de respuesta de búsqueda usando los procedimientos de acceso.

Después de recibir el mensaje de respuesta de búsqueda, la estación base envía al móvil un mensaje de asignación de canal en el canal de búsqueda para comenzar a establecer la llamada. El mensaje de asignación de canal contiene parámetros como asignación de frecuencia y código de canal, y el móvil utiliza estos parámetros para sintonizarse a la frecuencia RF asignada y al canal de código CDMA para comenzar a recibir el canal de tráfico de bajada.

3. Subestado de intento de originación de la estación móvil

En este subestado, el móvil envía un mensaje de originación a la estación base para originar una llamada. El móvil envía el mensaje de originación usando los procedimientos de acceso.

Después de recibir el mensaje de originación, la estación base puede enviar al móvil un mensaje de asignación de canal en el canal de búsqueda para comenzar a establecer la llamada.

4. Subestado de acceso de registro

En este subestado, el móvil envía un mensaje de registro a la estación base. El registro es el proceso donde el móvil informa a la estación base acerca de la identificación del móvil, status, localización y otra información pertinente.

5. Subestado de respuesta del mensaje/petición de la estación móvil

En este subestado, el móvil envía una respuesta a cualquier otro mensaje enviado por la estación base.

6. Subestado de transmisión de mensaje de la estación móvil

Un teléfono móvil no tiene que soportar este subestado en particular. En este subestado, el móvil envía un mensaje de ráfaga de datos a la estación base.

Cuando el móvil envía mensajes a la estación base en el canal de acceso, hay un problema fundamental de acomodar más de un solo móvil. Por ejemplo, hay por lo general muchos móviles que desean acceder a una estación base. Para algunas magnitudes, este problema de congestión se puede resolver al separar los móviles al asignarles canales de acceso diferentes. La estación base lo hace al especificarlo en un parámetro en el mensaje de parámetros de acceso.

Sin embargo, si más de un móvil usa el mismo canal de acceso, sus transmisiones en el canal de acceso pueden colisionar en el tiempo. Este problema de colisión se puede resolver al hacer aleatorio el tiempo de transmisión de los diferentes móviles tal que la probabilidad de colisión se reduzca.

Hay dos tipos de mensajes que se envían en el canal de acceso: un mensaje de respuesta y un mensaje de petición. Un mensaje de respuesta se envía en respuesta a un mensaje de la estación base (un ejemplo es el mensaje de respuesta de cambio de autenticación). Por otro lado, un mensaje de petición se envía autónomamente por el móvil (un ejemplo es el mensaje de originación del mensaje de petición). Ahora bien, se usan diferentes procedimientos de acceso para enviar estos dos tipos de mensajes.

4.5.1.4 Estado de canal de tráfico

El móvil puede entrar al estado de canal de tráfico desde dos subestados dentro del estado de acceso:

- subestado de respuesta de búsqueda
- subestado de intento de originación de la estación móvil.

En otras palabras, después que el móvil ha respondido satisfactoriamente a la búsqueda de la estación base o después que el móvil ha originado satisfactoriamente, el móvil puede entrar al estado de canal de tráfico. En el estado de canal de tráfico, el móvil se comunica con la estación base usando los canales de tráfico de subida y bajada. Este estado consiste de cinco subestados:

1. Subestado de inicialización de canal de tráfico;
2. Subestado de espera para orden;
3. Subestado de espera para respuesta de la estación móvil;
4. Subestado de conversación;
5. Subestado de liberación.

1. Subestado de inicialización de canal de tráfico.

En el subestado de inicialización de canal de tráfico, el móvil revisa si puede realmente recibir información en el canal de tráfico de bajada. Para hacerlo, el móvil verifica que este pueda recibir dos tramas buenas consecutivas en el canal de tráfico de bajada dentro de 200ms. Si este puede, entonces el móvil comienza a transmitir en el canal de tráfico subida.

Si el móvil recibe una orden de reconocimiento de la estación base dentro de dos segundos después de entrar en este subestado, entonces ocurrirá lo siguiente:

Si la llamada es terminada en el móvil, entonces el móvil entrará al subestado de espera para orden.

Si la llamada la origina el móvil, entonces el móvil entrará al subestado de conversación.

De hecho, las cosas pueden ir mal mientras el móvil está en este subestado. Si el móvil no recibe dos tramas buenas consecutivas dentro de 200ms, o si el móvil no recibe una orden de reconocimiento de la estación base dos segundos después de entrar a este subestado, el móvil regresará al subestado de determinación de sistema del estado de inicialización.

2. Subestado de espera para orden.

Si la llamada es terminada en el móvil, el móvil entra a este subestado desde el subestado de inicialización de canal de tráfico. En este subestado, el móvil espera por un mensaje de alerta con información (enviado en el canal de tráfico de bajada) desde la estación base. Este mensaje básicamente transmite una alerta o un timbre al móvil. Si el móvil recibe el mensaje de alerta, entonces el móvil entrará al subestado de espera para respuesta de estación móvil.

Si el móvil no recibe el mensaje de alerta dentro de cinco segundos después de entrar a este subsistema, entonces el móvil retornará al subestado de determinación de sistema del estado de inicialización.

3. Subestado de espera para respuesta de la estación móvil.

Normalmente el móvil entra a este subestado desde el subestado de espera para orden. En este subestado, el móvil espera a que el usuario responda la llamada. El móvil puede únicamente entrar a este subestado si la llamada es terminada en el móvil. Si el usuario responde la llamada, entonces el móvil detiene el timbre y envía una orden de conexión de regreso a la estación base en el canal de tráfico de subida; entonces, el móvil entra al subestado de conversación.

4. Subestado de conversación.

Si la llamada la origina el móvil, entonces el móvil entra al subestado de conversación desde el subestado de inicialización de canal de tráfico. Si la llamada es terminada en el móvil, entonces el móvil entra a este subestado desde el subestado de espera para respuesta de la estación móvil. En este subestado, el móvil y la estación base intercambian bits de tráfico primario en los canales de tráfico de subida y bajada.

5. Subestado de liberación

En este subestado, el móvil libera o desconecta la llamada. Si el móvil inicia la liberación, entonces el móvil primero envía una orden de liberación a la estación base en el canal de tráfico de subida. Si la estación base inicia la liberación, entonces la estación base envía una orden de liberación al móvil en el canal de tráfico de bajada.

CAPÍTULO V

Diseño de la red de RF

Como parte esencial en todo campo de ingeniería: la aplicación de la teoría, en este caso de la propagación de una señal de radiofrecuencia, se convierte en el objetivo principal para encontrar un plan o diseño para la construcción de una red celular. Todas las características mencionadas en los capítulos pasados nos servirán como referencia para tomar decisiones del diseño en la red celular como las siguientes:

¿Cuántos sitios se necesitan para cubrir el área deseada? ¿Dónde van ubicados? ¿Cuántos sectores llevan? ¿Qué tipo de antena e inclinación llevan éstas? ¿A qué potencia y frecuencia se transmite? ¿Cuándo se necesitará otra frecuencia portadora? ¿Qué tipos de amplificadores y cables se utilizarán para conectar el equipo de radio? ¿Se necesitarán repetidores de cobertura?

Para dar respuesta a todas estas preguntas se necesitan tener los conocimientos teóricos de los tres capítulos anteriores. Además de los elementos prácticos que se presentan en las siguientes secciones de este capítulo. Entonces, se obtendrá un diseño de alta calidad y de alta confiabilidad para que cuando se construya la red provea de buena señal a toda estación móvil que se encuentre en el área de cobertura.

5.1 Diseño de RF

Para describir el comportamiento de los canales de radio de un sistema móvil se utiliza una descripción estadística del canal de radio, el cuál modela la señal como una combinación de varios componentes entre los que se encuentran el desvanecimiento rápido, lento y pérdidas por propagación como se estudió en el capítulo dos. De igual forma para el diseño de un sistema celular se toma como modelo básico el comportamiento descrito en Rayleigh¹ y no el de trayectoria directa o de Rice.

¹ Lee, William *Mobile Cellular Telecommunications Analog and Digital Systems*, 2ª, ed. EE UU. Artech Communications, 1995

El modelo por excelencia en el ambiente que hemos escogido de 800/1900 MHz, es el de Okumura-Hata modificado o COST-231 HATA².

Recordemos la fórmula del capítulo 2:

$$L_U = 46.3 + 33.9 \times \log(f_c) - 13.82 \times \log(H_b) - A_{Hm} + [44.9 - 6.55 \times \log(H_b)] \times \log(r) \quad (5.1)$$

De forma práctica, el modelo se puede emplear de la siguiente forma: calculando la distancia máxima que se necesita entre el móvil y la estación base para que aún con una pérdida de trayectoria determinada exista cobertura.

Como se puede observar, la pérdida de trayectoria es de suma importancia para el diseño de la red.

Existen entonces tres niveles de diseño. El primer nivel es el proceso llamado balance de los enlaces. Este balance utiliza un modelo de propagación estadístico (como por ejemplo el de COST-231 HATA) como medio para estimar la cobertura individual de los sitios y cuantos de ellos se requieren para cubrir un sistema determinado. Este tipo de modelo de propagación tiene una pendiente y una ordenada en el origen para cada tipo de ambiente (urbano, suburbano, abierto, etc.) y no incluye efectos del terreno. Este método permite un proceso que se llama conteo de células, el cual se usa para hacer un estimado rápido de la cobertura. Este método lo usan por ejemplo, las empresas contratistas con las operadoras clientes o la operadora para hacer un presupuesto, etc.

El siguiente nivel de diseño requiere un modelo de propagación más complejo. Este modelo de propagación toma en consideraciones factores tales como: las características de la antena seleccionada, el terreno, el mapa de tipo de suelo, la topografía urbana, etc. (estos elementos se explican en el apartado 5.3 de la presente tesis). Para llevar a cabo este procedimiento se requiere de una herramienta de diseño. En el proceso se involucra primero el enlace de subida y después el de bajada. Esto se debe a que el móvil es siempre quien limita el enlace porque ayuda determinar la pérdida de trayectoria

² Hata, M. *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*. IEEE Trans. On Vehicular and Technology, VT-29, EE.UU. 1980, p. 317-325

El tercer nivel es el más exacto de todos ya que incluye un módulo de simulación del comportamiento de la red. En CDMA por ejemplo, se simulan señales de ruido en las radiobases como si fueran usuarios en su máxima capacidad. Esta simulación se lee en el Switch o conmutador central y se importa en el formato de la herramienta de diseño para conocer el comportamiento de la red en un ambiente más realista. Este proceso es mucho mejor desde el punto de vista de la ingeniería de diseño pero cabe recordar el incremento significativo en el costo.

En los tres procesos o métodos se utiliza el proceso llamado balance de los enlaces. Este proceso es importante por que además de ser parte del modelo de propagación, ayuda a predecir la cobertura de radiofrecuencia (RF) de un sitio, la que finalmente determina el número de células para lograr la cobertura de la señal de RF y por ende el costo del sistema.

Se puede decir que el balance de los enlaces se utiliza para definir:

- Todas las pérdidas y las ganancias a lo largo de la trayectoria de la señal,
- la pérdida de trayectoria máxima permitida y,
- las suposiciones a utilizar en el diseño.

Los parámetros en este balance de los enlaces se pueden dividir en dos categorías principales:

- Los intrínsecos a CDMA
- Los parámetros de propagación

Los parámetros intrínsecos de CDMA son aquellos que en el balance de los enlaces tienen valores diferentes basados en la tecnología que se escoja. Los parámetros de CDMA incluyen factores tales como: E_b/I_0 , parámetros de *Handoff*, etc³. Estos parámetros los hemos estudiado a detalle en el capítulo pasado y aquí se utilizan de manera práctica. Y aunque es importante conocer que significan es bueno saber cuales son los valores nominales para su aplicación en la práctica.

Los parámetros de propagación están relacionados con las ganancias y las pérdidas que en el balance de los enlaces son constantes e independientes de la tecnología de acceso o de la marca

³ TIA/EIA IS-95A Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual Mode Wide Band Spread Spectrum Cellular System. EE.UU. Telecommunication Industry Association, 1995

del equipo. Estos son parámetros dependientes de la frecuencia o relacionados con el móvil y un ambiente determinado.

Estos parámetros de propagación dictaminan los rangos en dB (ver apéndice A) de las pérdidas que se deben tomar en cuenta y como se deben incorporar al balance de los enlaces. Por ello en la sección 2 de este capítulo 5 se analizan dichos parámetros y se les involucra de una manera práctica en el diseño de la red.

5.2 Parámetros de propagación

La cobertura de RF se puede explicar como sigue: una estación base recibe y envía señales de voz y datos de y hacia una estación móvil. Estas señales son ondas electromagnéticas. Las ondas electromagnéticas son llamadas señales de RF o radiofrecuencia que producen una cobertura o huella de RF. Una definición formal se deduce de los campos E y H de una onda plana uniforme, dicha definición se puede consultar en esta referencia. La cobertura de RF es el término utilizado para definir las áreas donde un usuario puede hacer y recibir llamadas con su teléfono celular.

5.2.1 Pérdidas

Una parte de la señal que proviene de la estación base se bloquea puesto que nos encontramos en un ambiente de Rayleigh y la mayoría de las trayectorias son indirectas. A este bloqueo se le llama pérdida de la señal.

Por lo tanto la señal sigue el patrón lógico descrito de la siguiente manera:

$$\text{Señal recibida} = \text{señal inicial} - \text{pérdida de penetración.}$$

Es muy importante entonces conocer el valor de la pérdida. Sin embargo, ya que la pérdida de penetración siempre esta cambiando, cuando se diseña el sistema celular se utiliza un valor promedio. ¿Qué valor será entonces?

Debido a que el valor promedio cambia de acuerdo a la ubicación del móvil de una manera drástica, ya que las pérdidas en ciertas circunstancias (como dentro de un elevador en un edificio de concreto) son muy grandes, se optó por expresar la pérdida de penetración en dB. Para dar una idea general, frente al lóbulo principal del patrón de radiación de la antena de la estación base de forma

ideal existe un valor de 0dB lo que implica que no hay pérdida, el valor de 3 dB se encuentra cuando un usuario esta en la calle bloqueando únicamente con su cabeza y significa que hay una pérdida de la mitad de la señal. El de 10dB significa una pérdida de 10 veces el valor de la señal original , el de 20dB significa una pérdida de 200 veces el valor de la señal, y así sucesivamente.

Como rangos generales se pueden ofrecer los siguientes valores en las distintas situaciones donde el móvil puede iniciar una llamada:

En el caso del tipo de cobertura de la calle solo existe la pérdida por la obstrucción de la cabeza del usuario que se considera de 3dB en promedio.

En el caso del auto se considera la pérdida promedio de 10dB por la estructura del mismo.

En el caso de los edificios variará de acuerdo a la estructura de estos pero el más difícil de penetrar considera una pérdida de 20dB en promedio. Este tipo de cobertura solo es para la planta baja, si se quiere para los pisos superiores se tienen que hacer consideraciones especiales como inclinaciones de antenas, repetidores, etc.

Entre más pequeño sea el valor de pérdida de penetración de la señal más grande es la probabilidad de tener cobertura de RF pero esto requerirá de un número mayor de sitios para entregarla. Es aquí donde surge la pregunta: ¿Qué nivel de calidad deberá proveer la red de acuerdo al presupuesto deseado? Usualmente esta respuesta la ofrece un área que se llama presupuesto de capital de la red, quien tiene el trabajo importante de establecer el presupuesto en años futuros para la red y de todos sus componentes. Crea una base de datos que sea capaz de proponer diferentes escenarios de acuerdo al número de radiobases que se requieran. Es decir, la variable principal será el número de sitios. Supongamos un área X en un ambiente Y como sigue:

Una cobertura de 100 sitios tiene asociado una pérdida de penetración de 15dB.

Una cobertura de 200 sitios tiene asociado una pérdida de penetración de 18dB.

Una cobertura de 400 sitios tiene asociado una pérdida de penetración de 21dB.

Claro que la cobertura de 21 dB será muy confiable pero la inversión no lo será tanto.

Como vemos el parámetro de pérdida tiene asociado estrechamente el número de estaciones base y por ello, la inversión inicial y presupuesto de la red. Los operadores deben de tener un balance entre confiabilidad en la red y costo de ella tomando en cuenta este parámetro.

La cobertura en un sistema celular no es una huella homogénea como en el caso de los satélites, en ocasiones se puede tener una huella en capas concéntricas no uniformes con espacios vacíos sin cobertura. En general se guía por la forma. Hablaremos de como se determina la cobertura y sus características principales en el apartado 5.5 ya que requiere de un estudio mas profundo por su complejidad e importancia.

5.3 Herramienta de diseño

5.3.1 El modelo aplicado

El modelo es una representación teórica del comportamiento de un ambiente de radio. Pero el modelo se resume a las ecuaciones del capítulo 2. Entonces, el paso siguiente es utilizar ese modelo para predecir como será un ambiente en la realidad. ¿Pero cómo hacerlo? Debido a sus múltiples variables es difícil “sintonizar” (del inglés *tuning*) el modelo encontrando el valor para dichas variables. Por ello, para facilitar el encontrar estos valores se le da una solución práctica de nuestros días que es un programa o varios programas que incluyen las ecuaciones y arrojan los resultados.

Pongamos como ejemplo de nuevo el sistema CDMA. Hemos descrito que para este ambiente se usará el modelo de Hata y pese a todas las descripciones de modelos previas en las herramientas se utiliza una fórmula general que enunciamos a continuación:

$$PL = K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{eff}) + K_4 D + K_5 \log(H_{eff}) \log(d) + K_6 \log(H_{morf}) + K_7 \log(f) + K_{morfologia}$$

donde:

PL pérdida de trayectoria (ver capítulo 2)

K1 valor de la intersección al origen del modelo dentro de un kilómetro o milla de radio.

K2 valor de la pendiente.

K3 coeficiente de altura efectiva.

K4 coeficiente para el ajuste del cálculo de la difracción.

K5 multiplicador del modelo de Hata

K6 multiplicador de la altura del móvil

K7 factor para la frecuencia usualmente es 27 para HATA y 20 para el modelo del espacio libre.

Esta fórmula es un esquema básico. En cada manual propio de la herramienta se describirá a profundidad las variables así como sus variaciones.

Sin embargo, estos programas no se limitan a las variables de los modelos, también presentan otras capacidades como la interfase gráfica, la facilidad para importar y exportar datos, la facilidad para integrar datos tomados del ambiente real y, la facilidad de modificar el modelo de acuerdo a las características del ambiente específico que se este modelando.

El modelo aplicado a un programa de cómputo es una herramienta de diseño muy valiosa que ahorrará recursos porque nos permite saber como se comporta la señal y por lo tanto dos cosas muy importantes. La primera es saber donde colocar las radiobases. La segunda es si no hay buena cobertura como modificar la ubicación de las estaciones base o del azimut de los sectores para mejorarla.

El modelo toma como referencia desde luego los elementos que componen el ambiente y los integra al programa de cómputo. Estos elementos son desde luego los parámetros del modelo pero además los elementos del terreno, las construcciones humanas, etc. En el apartado 5.3.2 se explican estos otros elementos a detalle. La forma en que la herramienta de propagación calcula la pérdida de trayectoria es utilizando la carta de coordenadas, las coordenadas del sitio, la altura sobre el nivel del mar, el patrón de radiación de la antena en sus dos dimensiones, la orientación e inclinación de la antena, así como la potencia de radiación efectiva aplicada a los elementos externos del modelo. Calcula el modelo de propagación basado en las unidades digitales llamadas bin. Esto es, a cada bin o recuadro de la retícula digital, se le asigna un valor de acuerdo al modelo de propagación que se eligió en la herramienta. Se utiliza un algoritmo de difracción para calcular este valor estimado promedio por bin. La longitud del bin la puede definir el diseñador. Para un cálculo preciso se debe utilizar el bin más pequeño posible.

Algunos ejemplos de herramientas profesionales de diseño se muestran en la tabla 5.1:

Nombre de la herramienta	Nombre de la Compañía que lo produce
PlaNet	MSI
CellCAD	LCC
Celplan	CelPlan TL
Wizard	SAFCO
DeciBel Planner	MapInfo
C4	Lucent
NetPlan	Motorola
QED	Qualcomm
EET	Ericsson

Tabla 5.1

Es trabajo del equipo de RF el elegir la herramienta mas adecuada según los elementos que se mencionarán en el apartado de 5.3.3 Criterio de Elección. El conocimiento de las herramientas es esencial para el desarrollo de un diseño, sin embargo la experiencia nos dicta que mientras se comprendan las bases teóricas de los modelos de propagación, cualquier herramienta de software se puede comprender de manera sencilla y con un poco de estudio del manual de operación se vuelve fácil de utilizar.

5.3.2 Elementos externos del modelo

Para que el modelo de propagación pueda predecir lo más preciso posible se necesitan integrar a todos los elementos que son parte del ambiente. Como cualquier programa de computadora, se necesita que los elementos físicos se representen digitalmente. Estos elementos se pueden incluir en las siguientes cuatro categorías: un mapa de la orografía del lugar, un mapa de topografía urbana, un mapa de tipo de terreno y el mapa demanda de usuarios.

Mapa topográfico.

Es un mapa donde se representa el terreno, sus elevaciones, depresiones, en general cualquier forma que adquiera el terreno. Este es el mapa tradicional con curvas de nivel y elevaciones del terreno que ha existido desde hace mucho tiempo. Este tipo de información proviene del gobierno o empresas privadas y su precio no es elevado ya que existen muchos proveedores. Un ejemplo de este tipo de mapas se observa en la figura 5.1.

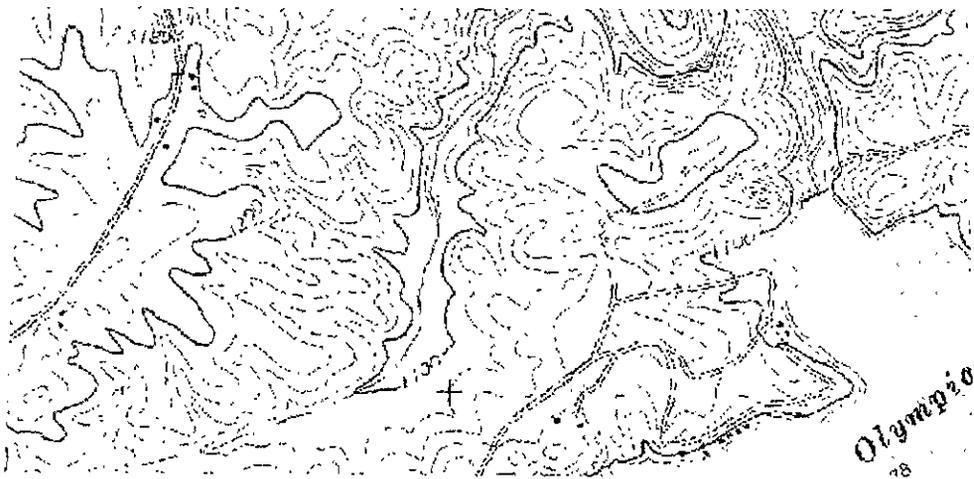


Figura 5.1

Mapa de topografía urbana.

Se refiere a un conjunto de datos agrupados digitalmente. Dichos datos representan elementos con volumen hechos por el hombre como edificios, casas, anuncios espectaculares, centros comerciales, monumentos, fuentes, jardines, etc. además de incluir las vías de comunicación como carreteras, caminos, calles, todo tipo de vías férreas, canales de agua, etc. La topografía o tipos de suelo y sus elementos son relevantes en la propagación de la señal como se observó en las secciones de desvanecimiento y modelos de propagación. Los elementos que lo componen son muy dinámicos, es decir, las construcciones humanas como los edificios, se construyen muy rápido por lo tanto la información es diferente comparada con la del mapa topográfico. Por ello, para su elaboración se requiere de datos muy recientes y esto deriva en un alto costo.

mapa de tipo de terreno.

Es aquel que representa las áreas con las categorías definidas específicamente para los modelos de propagación como urbano, suburbano, agua, bosque, bosque denso, desértico, etc., indicados en colores como se muestra en la figura 5.2. Este mapa puede sustituir al anterior en el caso de que su costo sea muy alto. Su función es proveer al modelo de propagación con información para ajustar las variables de acuerdo al tipo de suelo.

**Figura 5.2**

El mapa de demanda de usuarios.

Proviene del equipo GIS o Sistema de Información Geográfico por sus siglas en inglés (*Geographic Information System*) de la compañía operadora y es normalmente información geográfica, es decir, zonas indicadas en un área de acuerdo al número promedio de usuarios a los que se espera dar servicio en un tiempo determinado. Además pueden incluir otros factores como tipos de viviendas, negocios, niveles económicos; puede analizar a la población por género, edad, ingreso, ocupación; puede proveer áreas con potencial de crecimiento, etc. Este tiempo es usualmente de un año, lo que implica que el estudio se hace constantemente. Las zonas se distinguen por medio de colores o tonos de grises. Estas zonas deben ser precisas porque como se estudió antes, la cobertura en CDMA es inversamente proporcional a la capacidad de usuarios a los que se les puede dar servicio.

La mejor forma de representar los mapas es por medio de capas digitales que se pueden sobreponer unas a otras presentando los datos en un formato AMSL o altura media sobre el nivel del mar. Existen paquetes de cómputo que permiten mostrar la superposición de las capas, importando los resultados de los datos de la herramienta de predicción que se escoja aunque las herramientas deben incluir esta capacidad también para poder calibrar su modelo de propagación. La mejor resolución que tengan será lo mejor que la herramienta pueda predecir pero también el costo se incrementará demasiado. La resolución que se requiere depende del área que se necesita cubrir. Por ejemplo, para una área densamente urbana se necesita de una base de datos de un metro de resolución pero para un área rural con una resolución de 100 metros (o también llamada de 3 arc sec) bastará. Esto debido a que entre más obstrucciones e irregularidades existan mayor conocimiento de las estructuras se necesitará para un mejor modelo.

Por ejemplo, mediante los mapas se pueden observar en un área de cobertura la zona de árboles que este en una colina junto a un centro comercial y la avenida que da al estacionamiento coloreados con la cantidad de usuarios que tendrá cada área y la cobertura en dB que existiría si se colocará dicha radiobase.

Ahora que se sabe para que se quiere la herramienta de diseño y que otros parámetros externos se necesitan, es importante escoger la herramienta de acuerdo a las necesidades del sistema en específico.

5.3.3 Criterio de elección

La herramienta de diseño se escoge de acuerdo al tipo de tecnología. Se utilizan varias consideraciones técnicas aunque se debe saber que la decisión económica influye en la elección de cualquier herramienta.

El criterio de selección de la herramienta esta basada en varios conceptos que podemos dividir en generales, análisis de la propagación, modelo de tráfico pruebas y resultados, módulo de CDMA, estándares, módulos opcionales y otras tecnologías.

5.3.3.1 General

En la categoría de general se puede encontrar que un parámetro vital es que el programa se pueda ejecutar en una plataforma Windows o UNIX. Existen variantes como emulaciones Windows sobre una base UNIX. Otro punto general muy importante es que el proveedor incluya el entrenamiento del programa. También hay que ver que recursos externos se necesitan para manejar su base de datos. Se debe revisar si se puede configurar la base datos para extraer solo información de forma remota, que soporte una misma copia del sistema varios mercados, y algo muy importante que el hardware que se emplee sea mínimo. Otro aspecto general es el tipo de interfase. En esta división lo más destacado es que debe tener una hoja de cálculo estándar con la información que contenga el sistema y que tenga la capacidad de importarse y exportarse a Excel u otra hoja de cálculo. *Cursores de diseño interactivos, diseño amigable al usuario, edición de las celdas, agrupamiento y marcado de celdas, etc.*

5.3.3.2 Análisis de propagación

La forma en que analiza la predicción es lo más importante de una herramienta. Debe considerar la aplicación de varios modelos de propagación como el modelo Okumura-Hata/Cost-231 o el modelo de Lee. Estos deben basarse en conteos o análisis por sector y no por estación base, deben utilizar el tipo de terreno en los cálculos, así como la mayoría de los que elementos que se mencionan en los mapas de la sección 5.3.2. Debe permitir incluir factores de corrección para los modelos y flexibilidad para adaptarlos al ambiente real en cuestión. Debe incluir un modelo para optimizar automáticamente un grupo de estaciones base o un solo sector si se requiere. A continuación se muestra en la figura 5.3 un despliegue gráfico del proceso de predicción. Se pueden

servar los distintos niveles de la intensidad de la señal separados por colores. También se pueden servar las avenidas principales y la división política de las entidades. Este tipo de gráfico es el e se obtiene al calcular la ecuación de cualquier modelo de predicción en todos los puntos del reno.

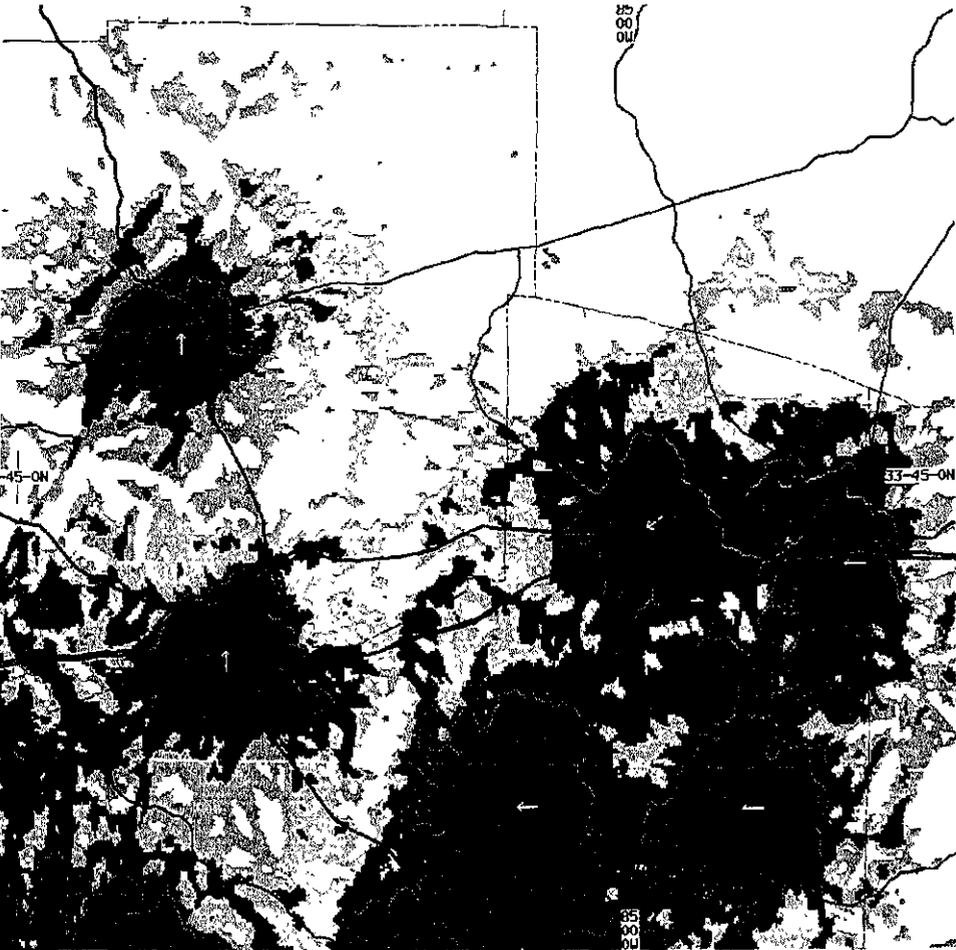


Figura 5.3

5.3.3.3 Modelo de tráfico

El modelo de tráfico es la representación del número de usuarios a los que se espera dar servicio. Según lo consideran algunos operadores, es tan importante crear esta representación del sistema en unidades Erlangs para que se conozca el valor inicial por sector de carga de usuarios basados en vectores demográficos. Todo esto con el fin de crear una herramienta que permita conocer a futuro mediante simples operaciones cuál será la carga en diferentes años del nuevo sistema.

La herramienta debe ser capaz de analizar el bloqueo de tráfico. Esto es, en los sistemas AMPS y TDMA, los canales de voz o tráfico se asignan a los usuarios mientras estén disponibles. Dados los datos de canales disponibles para tráfico, se utiliza el modelo Erlang B para determinar el número de canales de tráfico que se requieren para proveer un *Grado de Servicio* determinado. El modelo Erlang B se basa en el modelo de servicio por medio de colas. En otras palabras, todas las llamadas bloqueadas se desechan. La carga de tráfico es el producto de la tasa de llamadas y del tiempo de espera de las llamadas. Es una cantidad adimensional medida en Erlangs. Un erlang es la intensidad de tráfico de un canal de voz o tráfico que se ocupa de manera continua. *Grado de Servicio* es un término que se usa para contar el tiempo en que una congestión ocurre en cualquier troncal del sistema y se expresa como la probabilidad de encontrar un bloqueo. Bloqueo entonces se define como la probabilidad de encontrar todas las frecuencias de voz (para AMPS) o ranuras de tiempo (para TDMA) o códigos PN (para CDMA) asignadas a otras estaciones móviles.

Los valores de carga de tráfico o grado de servicio que se toman en cuenta para el diseño de una red celular son los respectivos a la hora pico. La hora pico la definimos como un período de tiempo con duración de una hora continua en la cual se encuentra la densidad de tráfico promedio más alta en el sistema. La fórmula del modelo Erlang B esta dada por:

$$P_{\text{bloqueo}} = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{K=0}^C \frac{A^K}{K!}} \quad (5.2)$$

donde:

A es el tráfico que se propone

C es el número de servidores disponible.

Sin embargo la fórmula no es práctica y por lo tanto se sustituye con tablas de los valores por ejemplo, ver la tabla 5.2:

Tabla Erlang B (Carga propuesta) N: número de elementos Encabezado de Columnas: Grado de Servicio										
N	0.002	0.005	0.008	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.05	0.100
1	0.002	0.005	0.008	0.010	0.015	0.020	0.026	0.031	0.053	0.111
2	0.065	0.105	0.135	0.153	0.190	0.223	0.254	0.282	0.381	0.595
3								

Tabla 5.2

5.3.3.4 Modelo de demanda

El modelo de demanda se basa en la forma de importar datos verdaderos del sistema a la herramienta. La herramienta debe soportar un módulo que contenga una interfase entre los datos que se obtengan del conmutador central para que pueda ajustar el modelo de tráfico descrito en la sección anterior. Esto implica que pueda importar datos en erlangs por sector de manera diaria. Así como determinar cual será la hora pico y por ende el tráfico en esta hora. Como una regla empírica se sabe que el 10% del tráfico de 24 horas se aproxima al tráfico en la hora pico. Sin embargo, si este módulo de la herramienta se puede reemplazar por otro software si incrementa el precio o bien no esta disponible. Existe una variedad de herramientas para el análisis de tráfico del conmutador. Lo que es imprescindible es que la herramienta de diseño debe ser capaz de ajustar el modelo de tráfico ya sea basado en su propio modelo de demanda o en datos externos del conmutador del sistema. El problema principal en este punto es la dificultad para encontrar interfases entre los diferentes componentes del modelo como por ejemplo entre el archivo de datos que proviene del conmutador y que se debe importar a la herramienta de diseño.

5.3.3.5 CDMA

Hemos presentado este módulo porque la tesis estudia mas a fondo esta tecnología y como un ejemplo de las particularidades que cualquier tecnología representa para la herramienta. Esto no significa que la herramienta deba contener un módulo con esta tecnología de manera obligada.

Algunas características que debe tener el módulo son las siguientes:

Análisis rápido de CDMA, que calcule resultados de CDMA básicos incluyendo enlace de subida, de bajada, *handoff* y balance de los enlaces. Debe calcular ganancias de *handoff* basado en el tipo de *handoff* y en correlación a las estaciones vecinas (es decir, ganancia de *handoff* no uniforme).

La herramienta debe deshabilitar y habilitar el *handoff* para cualquier estación base. Que el análisis soporte múltiples tipos de suscriptores como de datos, EVRC, 13 kbps, SmartRate, etc.

Que pueda proveer acertadamente una mezcla de movilidad con tráfico fijo por medio de cambiar el Eb/No.

Que soporte análisis de multiportadora y pueda predecir cuándo se necesitarán portadoras adicionales.

Que soporte diferentes tipos de estaciones base.

Capacidad de 1XRTT (capacidad de análisis en tercera generación para CDMA).⁴

Que sea capaz de generar un plan de offset de PN automático. Módulo de cálculo de vecinos.

El módulo de CDMA debe ser capaz de identificar la contaminación del canal piloto y conflictos de offset de la secuencia de PN, así como el cálculo de ganancia mínima de piloto requerida por sector, entre muchos otros.

Además de los módulos mencionados se deben tomar en cuenta otros adyacentes como la planeación de la red fija o conectividad entre células. Esta usualmente es un red híbrida de fibra óptica, microondas, etc., la cuál esta ligada a la capacidad por célula y es considerada la red de transporte para el sistema o red fija.

Además de los módulos de tecnología, la herramienta debe contener un módulo administrativo ligado a la base de datos que contenga formas y procedimientos para cumplir con las normas del organismo regulador encargado del área o país.

⁴ Carnese, W. *CDMA Systems* [en línea]: Total CDMA Solution for CDMAOne and CDMA2000 <http://www.ericsson.se/cdmasystems/3gedma2000_tech.shtml> [Consulta Agosto 2000]

La herramienta entre más atributos tenga de acuerdo a las necesidades del cliente y a la capacidad de sus recursos humanos y económicos será la más conveniente.

5.4 Administración de diseño

5.4.1 Adquisición de sitios

La adquisición de sitio es una parte fundamental de la construcción de la red y el equipo de ingeniería de RF tiene la responsabilidad en conjunto con el equipo de adquisición de sitios de buscar la ubicación donde se colocará la radio base. En el equipo de la red de la compañía operadora debe existir un grupo que se dedique a la búsqueda, análisis estructural y de espacio, firma de contrato, construcción, instalación alimentación de la potencia y seguridad permanente del sitio donde se coloque la estación base.

Cuando se habla de ubicación se refiere a lo siguiente: el equipo de RF basado en la predicción del modelo de propagación ejecutado en la computadora y a la experiencia personal determinará la posición de los sitios aproximada, esto es, determinará una cierta área donde puede quedar el sitio. Estas áreas son llamadas anillos de búsqueda y es donde se podrá ubicar el sitio. Según la experiencia su tamaño depende de elementos como la zona de búsqueda y la cobertura que dicho sitio proveerá en la red, es decir, en un área rural no será del mismo tamaño que para una zona urbana. Una vez que el ingeniero de RF ha proporcionado el anillo de búsqueda, el equipo de adquisición de sitios buscará en dicha área, inmuebles en primer lugar con la altura de diseño.

Una vez que el equipo de adquisición de sitios reconoce el área y escoge dos o tres candidatos, se los presenta a un grupo de ingeniería que comprende representantes de construcción, de red fija y de RF. A esta presentación se le llamará auditoria de sitio. Tiene que ser en el sitio físicamente y el equipo de construcción verificará la estructura o el terreno, el equipo de red fija buscará el recurso de la conexión futura para el sitio, ya sea por medio de fibra o microondas. Si es la última, entonces se pensará en línea de vista. Pero la decisión más importante será la del equipo de RF pues determinará si el sitio es adecuado o no por su claridad en la propagación. A grandes rasgos esto quiere decir que no existan obstrucciones cercanas en un radio de 100 metros alrededor del sitio porque sino habría reflexiones y bloqueos importantes.

Una vez aprobado, se hace un contrato de arrendamiento o de compra según convenga y se comienza la construcción del sitio.

5.4.2 Base de Datos

La metodología más adecuada según la experiencia, es crear una base de datos y al mismo tiempo llevar una bitácora por sitio de lo que vaya sucediendo de manera impresa. Esta base de datos debe contener formatos donde se pueda introducir y consultar la información con facilidad. El primer formato será el de búsqueda de sitio.

El formato de búsqueda de sitio

Debe contener la dirección del sitio, las señas para llegar a él, debe tener un mapa topográfico señalando la posición del sitio así como datos del tipo de propiedad como edificio, terreno, torre de otro operador, etc.

El formato de RF de sitio

Debe contener las coordenadas del sitio, un número de identificación de este, un nombre, la dirección legal del sitio, la altura de la torre, el centro de radiación de las antenas de cada uno de los sectores, las pérdidas por sector de los cables coaxial, el orden en que se considera este candidato. Además se agregarán todas las pruebas de cobertura y un análisis de ellas.

El formato de red fija de sitio

Este contiene la forma en que se conectará la estación base a la red de datos. Si es por medio de fibra, indicará el número de enlaces y su redundancia, si pertenece a un anillo, y sobretodo si será enlace de otros sitios. Si es por medio de microondas se anexará todo el estudio correspondiente además de un análisis de aislamiento con las antenas de RF.

El formato de construcción del sitio

Este formato es un seguimiento de la construcción del sitio e incluye los planos de construcción, el tiempo en que se debe terminar, los permisos, el tiempo en que se instalará la torre, el equipo, el cableado, las tierras, etc.

El equipo de RF tiene la responsabilidad absoluta de organizar y llevar a cabo la base de datos que contenga la información de las formas anteriores para el buen desempeño del diseño de la red celular.

5.5 Cobertura

El ingeniero de RF participa en el mercado contando los sitios para un lugar en particular, es decir, ayuda a tomar la decisión de cuantos sitios son necesarios para cubrir el área determinada por la compañía operadora. El nivel de radiación de la estación base esta limitada por el organismo regulador, llámese FCC en EE.UU., COFETEL en México, etc., por el Límite de Área de Servicio o SAB por sus siglas en inglés (*Service Area Boundary*) y por el Área de Servicio Geográfico Celular o CGSA por sus siglas en inglés (*Cellular Geographic Service Area*).

Sin embargo, no toda el área donde se tiene permiso de emitir radiaciones es conveniente construir estaciones base. Para determinar dónde y cuántas se construirán se crean los objetivos de cobertura. Un objetivo de cobertura es un área donde habrá la suficiente señal de RF para dar servicio a una llamada desde una estación base. En la siguiente sección se estudiarán los objetivos de cobertura en mayor detalle.

5.5.1 Objetivos de cobertura

Para que lo anterior suceda, es decir, para que se sepa cuantos sitios poner y en dónde, se necesita saber a que área se le proporcionará el servicio inalámbrico y por lo tanto que área debe cubrir la huella de radiopropagación. Estos objetivos de cobertura son el resultado de un estudio de mercado que la compañía operadora realiza antes de lanzar el proyecto.

Los objetivos de cobertura se definen en tres categorías:

- Categoría de penetración en interior de edificios,
- Categoría de penetración en interior de autos y,
- Categoría de cobertura en exteriores y/o la calle.

Para los objetivos de cobertura dentro de los edificios, primero se hace una lista de los edificios donde se cree se tendrá una mayor afluencia de subscriptores como centros comerciales,

centros de negocios, casas de bolsa, zonas hoteleras, plazas públicas, oficinas, concentraciones urbanas muy densas, aeropuertos, edificios de la misma compañía operadora, etc. Una vez hecha la lista se necesita documentar la ubicación, la documentación se lleva a cabo con un GPS de mano y se marca en un mapa digitalizado, que se integrará posteriormente como mapa digital para el diseño en la herramienta.

Luego se consideran los objetivos que son vías de transporte como lo son las avenidas donde transitan los autos con una mayor afluencia y todas las avenidas que entren y salgan de los objetivos de la lista anterior, así como los estacionamientos de los edificios. Se consideran las entradas y salidas de la ciudad o región.

En la tercera categoría se considerarán las plazas donde solo transitan los peatones, las áreas urbanas y suburbanas y finalmente, sólo cuando el estudio de mercado así lo requiera se presentará una cobertura en transportes subterráneos e interiores de áreas específicas por conveniencia de la compañía operadora.

5.5.2 Límites de cobertura

Una vez que se tienen todos los objetivos, se elabora una mapa también digitalizado con los límites precisos que tendrá cada tipo de cobertura. Este trabajo es muy importante pues definirá la meta del equipo de ingeniería de RF.

5.5.3 Despeje de Banda

Para el caso de México, la COFETEL emitió una resolución en el diario oficial de la federación el 14 de noviembre de 1997 en el que se establecen los *“lineamientos para llevar a cabo el despeje de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, ubicadas dentro de los rangos de los 1850 – 1990, 440 – 450 y 485 – 495MHz, así como 3.4 – 3.7GHz, para la prestación del servicio de acceso inalámbrico fijo o móvil”*, en el que hace mención que el retiro de los enlaces o sistemas que se encuentran en las bandas mencionadas se harán previa solicitud del concesionario que vaya a operar el servicio de acceso inalámbrico fijo o móvil, al cual la COFETEL le proporcionará las características técnicas del sistema o enlace operante, para que además, el concesionario de acceso inalámbrico mediante un estudio previo, establezca las causas de interferencia y sobre la base de sus requerimientos, solicite una fecha de despeje de banda a partir

de la cual, tendrá 180 días hábiles para iniciar la prestación de los servicios concesionarios en la zona. Cabe mencionar, que esta solicitud estará sujeta a aprobación de un consejo, el cual también determinará el monto que el concesionario deberá pagar al dueño del sistema operante.

Todo lo anterior nos muestra que debe existir un medio para asegurarse que el despeje de banda se halla realizado satisfactoriamente, puesto que la resolución menciona tan solo la zona de cobertura concesionada, pero generalmente los enlaces o sistemas operantes, tan solo se reubican, por lo que aparecerán reflejados en alguna otra parte si no se realiza una revisión.

El método que se lleva a cabo para asegurar que la banda de frecuencias este libre de interferencias se llama prueba de limpieza de espectro o en inglés *spectrum cleaner*, y consiste en un equipo que mide el nivel de la señal en una banda de frecuencias determinada, y proporciona de igual forma, con ayuda de un GPS, la localización de tales niveles de la señal. Este equipo se coloca en un vehículo que recorrerá la ciudad seleccionada. Este recorrido será procesado al finalizar, y de acuerdo a los niveles que se obtengan, se determinará si existe algún otro emisor en la banda deseada.

Si se llegan a detectar altos niveles de señal en la banda de frecuencia solicitada, es necesario realizar un estudio posterior para determinar de donde proviene esta interferencia, y así notificarlo al departamento de regulación del concesionario para que este tome las acciones pertinentes.

5.6 Prueba de campo

Cuando se realiza el diseño de cualquier sistema celular, mediante la herramienta de predicción se indicará la posición final de los sitios. Sin embargo, se debe verificar la veracidad de la cobertura antes de colocar cada sitio celular. Para ello existen diversos métodos. Si se revisa el objetivo de la tesis se podrá observar que nosotros consideramos que las pruebas que se lleven a cabo para verificar la correcta ubicación de la radio base son de alta prioridad. Creemos que estas pruebas beneficiarán en dos aspectos muy importantes: el primero es que el servicio inicial que preste la compañía operadora será de alta calidad, y el segundo es que la inversión posterior se verá beneficiada pues la buena planeación respaldará los cambios en el futuro.

Las pruebas que permiten conocer la buena ubicación de las estaciones base son pruebas de campo, por lo que intervendrán varios elementos como por ejemplo: un vehículo, un asistente recolector de datos, un técnico que ayude a colocar la antena, etc. Todo este equipo requiere de una logística apropiada que se explicará más adelante.

5.6.1 Definición

Las pruebas de campo que verifican la correcta colocación de una estación base son llamadas en inglés “Drive Test” cuya traducción literal no es apropiada para su descripción. Lo apropiado para definir las es: prueba de campo en un vehículo. Estas pruebas se llevan a cabo alrededor de la estación base en un vehículo con el objetivo de verificar la cobertura.

Una prueba de campo tiene como objetivo comprobar que la ubicación de la radio base sea la correcta para tener la capacidad de dar servicio a cualquier usuario que se encuentre en el radio que dicha estación base debe cubrir según el diseño original. Además de caracterizar los efectos de propagación y desvanecimiento en una frecuencia específica.

Esto se lleva a cabo recolectando datos para ajustar el modelo de predicción para las simulaciones preliminares. En ocasiones podemos utilizar estos mismos datos para ajustar el balance de los enlaces.

Otra finalidad es la de optimizar el sistema una vez que se ha llegado a su construcción total. Es importante saber que también se verifican las rutas que se recorren antes de que exista la estación base con respecto a las rutas que se recorren una vez que ya está operando para cotejar los resultados y saber si la predicción fue buena o no. Además de esto, cabe subrayar que en el diseño de la red no a todos los sitios se les hace una prueba de campo, de hecho, por cuestiones económicas se sugiere por experiencia deba ser de un 40% máximo el número de estaciones bases que pasen por este proceso del total de ellas en la red. Además de que la herramienta de predicción debe ayudar a ubicar el otro 60% restante de radio bases para minimizar los costos y el tiempo de diseño.

5.6.2 Procedimientos

5.6.2.1 Zonas

El proceso comienza en la planeación de las pruebas dividen el mercado por zonas. A estas zonas se les llama 'clusters' y se eligen de acuerdo a la tecnología que se use, por ejemplo en AMPS se solía utilizar 'clusters' de 7 células por el reúso de frecuencias, en CDMA se hace la división de acuerdo al *handoff* entre Controladores de las estaciones base o BSCs por sus siglas en inglés (*Base Station Controller*). Aunque si el sistema es pequeño y todas las estaciones base pertenecen al mismo BSC, se pueden subdividir de acuerdo a como el departamento de operaciones vaya a trabajar o por la distribución de red fija que tenga dicha red, por ejemplo 'nodos' asociados a un anillo SDH.

5.6.2.2 Rutas

Una vez que se eligen las zonas o 'clusters', se planean las rutas alrededor de los sitios. Estas deben ser tomando al sitio como el centro de un círculo, la ruta debe contener dos ejes diametrales perpendiculares entre sí, además de círculos concéntricos como curvas de nivel a no más de 100 metros de separación cada uno. También se deben incluir las avenidas, túneles y calles importantes de la zona, así como todos los objetivos de cobertura que sean posibles.

Para hacer más eficiente todo el proceso de pruebas, de preferencia se debe delegar responsabilidades por lo que el ingeniero que fungirá como recolector de datos puede trazar los mapas.

De preferencia debe conocer la zona de antemano para tomar en cuenta caminos que no existen pero están marcados en el mapa, caminos que no están marcados en el mapa pero si existen, tomar en cuenta sentidos contrarios de las avenidas para hacer más eficientes las rutas, etc. Recordando que el objetivo de estas rutas es medir la propagación de la señal atacaremos los puntos donde es más débil dicha propagación y se cree existe desvanecimiento, como por ejemplo detrás de un edificio de concreto sólido casi sin ventanas, o en un valle del terreno donde tal vez la herramienta si prediga cobertura pero por sentido común no sea tan cierto.

5.6.2.3 Conexiones de Rx

En este apartado nos enfocaremos a la colocación del equipo de recepción de la señal. Este posee dos antenas, una de GPS y otra del equipo que mide la intensidad de la señal. Estas van conectadas físicamente por un cable coaxial al módulo de prueba de campo genérico. Este a su vez va conectado a una computadora, mediante el puerto serial, que aloja el software que controla el módulo de prueba de campo. La pantalla de la computadora nos sirve como monitor del módulo. El módulo y la computadora se conectan a la potencia de 127V (con un inversor de DC-AC) que va a la potencia del vehículo de 12 V (figura 5.5).

Se pueden preparar módulos fijos dentro de vehículos que solo se utilizan con el fin de hacer pruebas de campo para evitar conectar y desconectar frecuentemente, ya que esto ocasiona rupturas en los conectores tanto de potencia como de señal.

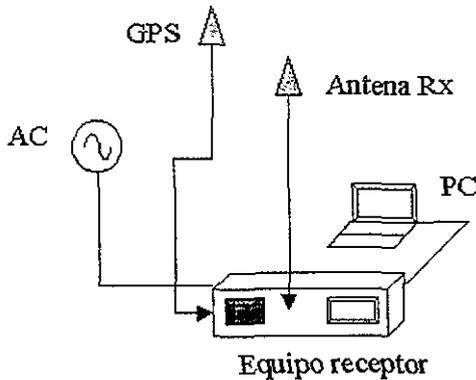


Figura 5.5

Se inicia la computadora con las conexiones hechas y se corre un programa que inicia la memoria del módulo de prueba de campo, enseguida se ejecuta el programa que soporta el GPS y se espera a que adquiera 4 o más satélites para la señal pertinente. Todo esto se recomienda llevar a cabo para antes de abandonar la oficina central en caso de que haya un desperfecto o mal funcionamiento de alguno de los equipos se pueda reparar o reemplazar según sea el caso.

El equipo de medición de Rx consiste de un medidor de intensidad de la señal, un equipo de recepción GPS y un software que permita ver lo que se va midiendo de la potencia de la señal, las

coordenadas de localización de la camioneta a través del GPS y que permita manipular las variables.

6.5.2.4 Muestreo

Se debe especificar la forma en que se recolectarán las muestras, es decir, si se tomarán muestras de la intensidad de la señal cada cierta distancia d , donde d tenga un valor de 10 metros, por ejemplo, o que se tome cada cierto tiempo t , donde $t=20$ ms. La elección dependerá de la zona donde se practique la prueba de campo. Por ejemplo, si en la ruta puede haber tráfico y varios semáforos donde se hagan altos continuos de larga duración, se programa el equipo para que tome una muestra cada 20ms. Entonces el archivo de muestras (tipo *.log en formato de texto) se volverá muy grande para una distancia pequeña por lo que las muestras serán repetitivas. Sin embargo, si se toma una muestra cada 10 metros ($d=10$ m), no importará cuanto se tarde en recorrer 100 metros solo tomará las 10 muestras requeridas. Lo inverso sucede en una carretera de alta velocidad.

Para considerar el tamaño de la ventana de muestra se debe saber cuál es el número mínimo para esta ventana de muestras que harán confiable la recolección. Así mismo, las muestras recolectadas deben tener la característica de no ser dependientes entre sí, es decir, debe existir un espacio apropiado entre ellas. Media longitud de onda de la frecuencia portadora de separación funciona como mínimo para asegurar la independencia adecuada. En la práctica se utiliza el 80% o 0.8λ .

Como se presentó en el capítulo 4, la señal varía de acuerdo a las pérdidas por propagación y al desvanecimiento de la misma. Como se analizó antes, el desvanecimiento ocurre de dos maneras: la que se puede modelar mediante un proceso aleatorio lognormal y el modelado por una distribución ya sea de Rayleigh o de Rice. Para efectos de la prueba de campo solo interesan los efectos de desvanecimiento por el modelo lognormal y aquellas causadas por las pérdidas de propagación.

En las mediciones de campo el interés se concentra en obtener promedios de la señal recibida. Por lo que la ventana de muestreo debe ser lo bastante pequeña para capturar las pequeñas variaciones debidas al "shadowing" y lo bastante amplia para capturar aquellas variaciones debidas al comportamiento de multitrayectoria. Se debe tener presente, sin embargo que, esta proporción de la ventana se verá afectada por el tipo de terreno en cuestión

El siguiente parámetro que se fija es la frecuencia de trabajo. La cifra esta normalmente en MHz y es la misma a la que se fijará el transmisor de prueba. Esta frecuencia debe ser similar a la portadora o frecuencia central si se trata de CDMA para simular lo más cercano a la realidad el comportamiento de las señales de radio.

Ya que todos los parámetros están fijos y el equipo esta trabajando, se procede a trabajar en la parte del equipo que simulará la estación base.

Este equipo comprende un transmisor que contenga en su rango de frecuencias la que se desea transmitir, un cable coaxial usualmente con conectores tipo N para conectar el transmisor y la antena. Un medidor de potencia en Watts. Una antena de transmisión omnidireccional que trabaje en la frecuencia deseada o una antena de 120 grados si se desea analizar un solo sector.

5.6.2.5 Conexiones de Tx

La antena debe radiar lo más perpendicular al suelo posible, se debe conectar al coaxial y de ahí al transmisor que usualmente esta alimentado a potencia de AC. Si la antena se coloca en la azotea de alguna construcción no debe existir "shadowing" por obstrucción, por lo tanto la antena se debe colocar lo mas cerca posible a la orilla del edificio.

Cuando se conecta la antena se hacen dos mediciones para calcular la ERP (Potencia radiada efectiva) como sigue:

El transmisor se conecta al coaxial, el coaxial al medidor de potencia y este a la antena. Se obtendrá entonces un valor del medidor de potencia, W_1 (figura 5.6).

Ahora se tomará otra lectura, W_2 , donde el transmisor se conectará al medidor de potencia, este al cable coaxial y finalmente el cable a la antena. La pérdida por la línea será entonces la diferencia $W_1 - W_2$ (figura 5.6).

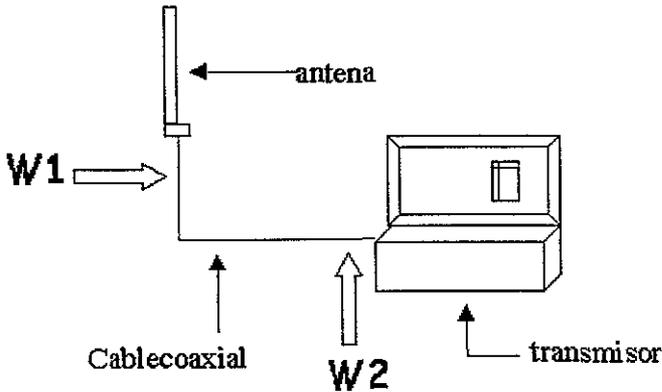


Figura 5.6

Para conocer la ERP del sistema de transmisión provisional de la prueba de campo se consideran la potencia del transmisor, las pérdidas de la línea y la ganancia de la antena. Se debe tener cuidado con las unidades porque la potencia del transmisor y las pérdidas usualmente están dadas en Watts pero la ganancia de la antena esta dada en dBi o dBd. Ver apéndice A.

Una vez que se hacen las mediciones correspondientes, y el equipo de transmisión esta colocado lo más cerca al punto donde se quiere colocar la estación base, entonces se hace un barrido de la banda de frecuencias para asegurarse de que solo la antena de la prueba de campo es la que esta transmitiendo en la frecuencia portadora. Teniendo el espectro limpio da comienzo la prueba grabando la intensidad de la señal en cada punto de la ruta según se estableció el intervalo de la muestra. Se debe cuidar que la intensidad sea coherente de acuerdo a la posición del vehículo y el terreno. En ocasiones existen rupturas en los cables y conectores, falta de potencia en el transmisor, etc. El ingeniero de campo tiene como responsabilidad que la prueba se lleve a cabo como se diseñó en la oficina. El ingeniero de campo también es responsable de la seguridad de los técnicos, conductor del vehículo y demás personas que participen en la prueba.

Una vez recolectados los datos se respaldan en la computadora de campo y se llevan a la oficina para ser procesados.

5.6.3 La integración de datos

En el capítulo dos se estudió que el terreno de cada ciudad es diferente, y las estructuras humanas en cada ciudad son también únicas, por lo que habría que encontrar un medio para simularlas en la herramienta. Este medio debe ser un método para obtener la curva de pérdida de trayectoria para el área como si el área fuera plana, aún si no lo es. Como habíamos mencionado de igual forma, la curva de pérdida de trayectoria que se obtiene en un terreno plano indica virtualmente los efectos de la pérdida de la señal debida solamente a las estructuras humanas. Como bien sabemos en un área pueden existir diferentes tipos de curvas de pérdida de trayectoria obtenidas en la misma ciudad para diferentes estructuras humanas.

Como no es posible hacer pruebas de campo en todas las áreas por las razones explicadas en el apartado anterior, se hacen pruebas para tres o cuatro sitios de cada tipo de zona. Por ejemplo se lleva a cabo una prueba para tres sitios de área suburbana y se integran por cualquier software de integración de datos al modelo de predicción, tres para el tipo de zona urbana, tres para el tipo de zona rural, industrial, etc.

En conclusión, lo que se busca es encontrar los dos parámetros determinantes del comportamiento de un ambiente para una señal de RF: el punto de obstáculo de 1mi (o 1km) y la pendiente de pérdida de trayectoria en base a los datos obtenidos por medio de la prueba de campo que se ha explicado a lo largo de este capítulo para cada zona en específico.

Esto se puede llevar a cabo por medio de la comparación con datos de estudios previos o bien mediante la integración de datos reales en el software.

Un estudio que se encuentra en el libro del Dr. William Lee⁵, u otro similar el de Theodore Rappaport⁶ se resume en la tabla 5.3, teniendo como referencia la propagación en el espacio libre:

⁵ William Lee op cit p 520.

⁶ Rappaport, Theodore S *Wireless Communications Principles & Practices*, Pertinence Hall PIR, 1996

Nombre de área	Pendiente de la pérdida de trayectoria (dB/dec)	Intersección en el origen (dBm)
Espacio libre	20	-45
Rural	43.5	-49
Suburbano	38.4	-61.7
Newark	43.1	-64
Philadelphia	36.8	-70
Nueva York	48	-77
Tokyo	30.5	-84

Tabla 5.3

Entre mas datos se consiga obtener de una área en específico mayor será la confiabilidad de la predicción. Ahora bien, estos mismos valores se ocuparán para la predicción en áreas similares aunque estas no se prueben por medio del vehículo y el procedimiento de recolección.

En cada software de predicción existirá un método particular para lograr el procedimiento de la integración de datos que se explicó en el capítulo dos y ahora toma sentido.

Recordando el capítulo dos tenemos que:

1. Compare el área de interés con un área similar de estructuras humanas de la cual se tenga conocimiento que se han efectuado estudios para determinar la pendiente de pérdida de trayectoria para poder consultar las curvas correspondientes. La curva de área suburbana es una curva que se usa comúnmente.

Es decir, mediante la tabla anterior se pueden sacar conclusiones para un área en específico. Cabe recordar que las pérdidas por follaje varían de acuerdo a la estación del año por lo que habrá que diseñar para la temporada de verano por que será más denso. Y por último, no cabe duda que siempre es más conveniente tomar datos de la realidad mediante la prueba de campo en vez de solo comparar con tablas o datos existentes. Es aquí donde toma mucha importancia la prueba de campo y la metodología con la que se lleve a la práctica para obtener datos realmente representativos. Por

lo tanto creemos que es mejor seguir el paso número dos que se indica en el capítulo dos de esta tesis como sigue:

Si las estructuras humanas de una ciudad son diferentes de las ciudades en que se ha realizado el estudio, o si se desea tener una mayor exactitud se debe llevar a cabo una medición simple.

5.7 Antenas

Ahora que hemos repasado los elementos de la red celular en cuanto al comportamiento de la señal se refiere, toca el turno a los elementos que transportan dicha señal. Aquellos elementos físicos o como se les denomina en la actualidad: elementos de hardware.

Debemos hablar entonces del generador de la señal de RF que es la antena.

5.7.1 Definición

“Las antenas son estructuras diseñadas para radiar y recibir energía electromagnética eficazmente, en una forma prescrita. Cada antena tiene una impedancia de entrada característica y puede considerarse como un transductor para adaptar la línea de transmisión de alimentación o la guía de ondas a la impedancia intrínseca del medio circundante. Si no hubiera una antena eficiente, la energía electromagnética estaría localizada y no sería posible la transmisión inalámbrica de información a grandes distancias.”⁷

Para el análisis de toda antena debemos determinar el potencial magnético de la distribución de corriente asociada en la antena. Se debe encontrar la intensidad de campo magnético a partir del potencial magnético así como la intensidad de campo eléctrico igualmente a partir del potencial eléctrico. Una vez conocidos E y H se puede conocer casi cualquier característica de la antena.

Aunque no se tocarán en este apartado la forma de determinar estas características, si es importante conocer el análisis de la teoría electromagnética para dar soluciones prácticas con buenos fundamentos teóricos.

⁷ Cheng, K. David. *Fundamentos de Electromagnetismo para ingeniería* Addison-Wesley Iberoamericana, 1997. Delaware, EE.UU. p 426

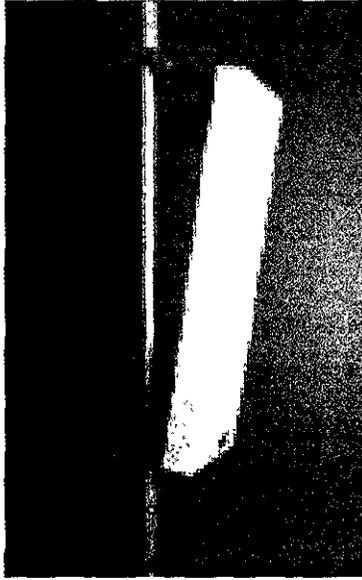


Figura 5.7

Las imágenes que se muestran tanto en la figura 5.8 como en la figura 5.9 corresponden a una antena que se utiliza para una cobertura rural. La elección de dicha antena para este tipo de terreno está basada en sus características esenciales.

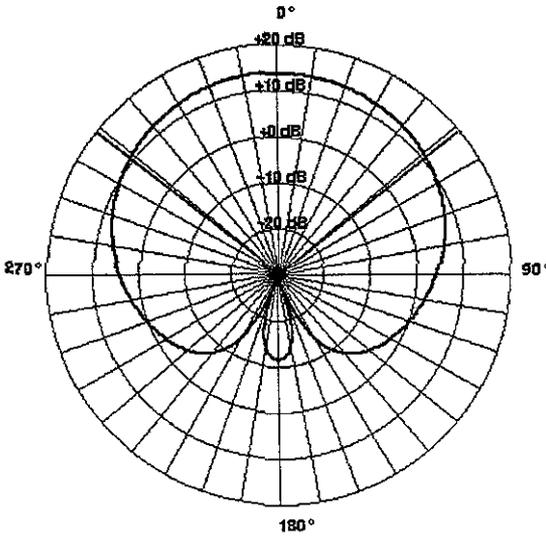


Figura 5.8

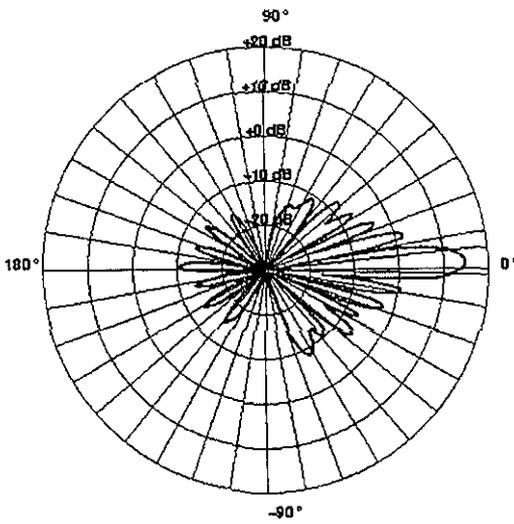


Figura 5.9

Para el caso de un sistema celular, al escoger el tipo de antena que se utilizará en la estación base, se necesita conocer las siguientes características de ella (aunque siempre se sugiere que exista un análisis más profundo de la antena):

- Ganancia de la antena
- Ancho de haz
- VSWR
- El coeficiente de reflexión
- Potencia máxima
- Razón de lóbulo frontal y lóbulo posterior
- Lóbulos laterales y posteriores
- Inclinación de la antena
- Aislamiento de la antena
- Diversidad de la antena
- Instalación y mantenimiento

5.7.2 Ganancia de la antena

La ganancia de la antena también conocida como la ganancia de la potencia es la razón de la máxima radiación en una dirección dada comparada con una antena de referencia orientada en la misma dirección teniendo ambas la misma potencia de alimentación.

La antena de referencia por lo general es una antena isotrópica o una dipolo doble en el espacio libre con cero grados de inclinación. Ver apéndice A para unidades de referencia de estas dos antenas.

El valor de las antenas que se utilizan en estaciones base de tres sectores oscila entre 12dBi y 16.5dBi.

5.7.3 Ancho de haz

El ancho del haz se mide en grados entre dos puntos. Estos dos puntos son 3 dB a la izquierda y a la derecha del centro del lóbulo principal de radiación de la antena. El Ancho del haz se puede definir en términos de azimut del plano horizontal o H y del plano vertical o E.

El uso teórico de antenas con ancho de haz de 120 grados se entiende que provocará traslapes innecesarios por lo que en la práctica se sabe que 60 grados son suficiente. Recordando que el ancho del haz vertical esta relacionado con los puntos nulos debajo de la antena, hay que revisar siempre el área cubierta cerca de la estación base.

En la figura 5.10 podemos observar en línea punteada el ancho de haz para la antena muestra comparada con el terreno y con la línea de vista con respecto a la distancia del sitio y la altura de este.

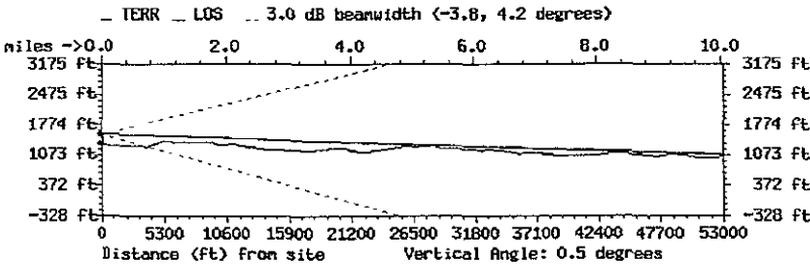


Figura 5.10

5.7.4 VSWR

El parámetro llamado Razón de Onda Estacionaria del Voltaje o VSWR por sus siglas en inglés (*Voltage Standing Wave Ratio*), es otro parámetro que se utiliza para describir una línea de transmisión que tiene como carga una antena.

Se refiere a la igualdad de impedancias del punto de alimentación de la antena (o impedancia del generador Z_g) con el punto donde se une con la línea de transmisión (o impedancia de la carga Z_L). La impedancia de entrada de la antena establece una carga en la línea de transmisión, es decir se convierte en Z_L , así como en el transmisor de la señal de RF. Para que el transmisor funcione teniendo una pérdida mínima de energía, la impedancia de entrada de la antena debe estar acoplada con la línea de transmisión $Z_e = Z_L$.

$$VSWR = V_{MAX}/V_{MIN} \tag{5.3}$$

o bien,

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (5.4)$$

donde Γ es el coeficiente de reflexión asociado a la impedancia de entrada de la línea de transmisión y a la impedancia de salida o carga en la línea, en este caso la antena.

La razón de onda estacionaria puede variar de 1 (cuando $|\Gamma|=0$, es decir, cuando la carga esta acoplada a la línea) a infinito (cuando $|\Gamma|=1$, es decir, cuando existe un circuito abierto en la línea).

Por este rango tan amplio, el VSWR se expresa en dB como:

$$VSWR_{dB} = 20 \log_{10} (VSWR) \quad (5.5)$$

El coeficiente de reflexión depende del acoplamiento de la carga, en este caso de la antena. En una línea de transmisión acoplada a una antena no es deseable una razón de onda estacionaria elevada, ya que provocaría grandes pérdidas de potencia. El VSWR debe ser menor a 1.5:1 en las antenas que se usan en el sistema celular.

5.7.5 Coeficiente de reflexión

En una línea de transmisión, las ondas de voltaje y corriente que se propagan desde el generador hacia la carga al final de la línea producirán ondas de voltaje y corriente reflejadas con la condición $Z_o \neq Z_L$.

Si el voltaje en cualquier punto z' en la línea se calcula mediante la ecuación 5.6:

$$V(z') = \frac{I_L}{2} [(Z_L + Z_o)e^{\gamma z'} + (Z_L - Z_o)e^{-\gamma z'}] \quad (5.6)$$

donde:

$V(z) = V_o^+ e^{-\gamma z} + V_o^- e^{\gamma z}$ es la solución general de la ecuación de Helmholtz para una línea de transmisión.

I_L es la corriente en la carga.

Z_L es la impedancia en la carga

Z_0 es la impedancia en la línea.

y el término con $e^{z'}$ representa la onda de voltaje incidente y el término $e^{-z'}$ representa la onda de voltaje reflejada.

Entonces se puede deducir la ecuación 5.7:

$$V(z') = \frac{I_L}{2} (Z_L + Z_0) e^{z'} \left[1 + \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2z'} \right] \quad (5.7)$$

si hacemos

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (5.8)$$

Entonces, estamos definiendo en (5.8) a Γ como: “la razón de las ondas de voltaje reflejada e incidente en la carga y se denomina coeficiente de reflexión en voltaje de la impedancia de carga Z_L ”⁸.

Dicho coeficiente esta relacionada con el VSWR en la ecuación 5.9 como:

$$|\Gamma| = \text{VSWR} - 1 / \text{VSWR} + 1 \quad (5.9)$$

La razón de onda estacionaria puede medirse en cualquier línea de transmisión mediante una sonda que se introduce en la línea a través de una estrecha ranura a lo largo de una sección de la línea. Para las líneas de cualquier estación base, estas mediciones se llevan a cabo antes de declarar que la estación base esta en condiciones de transmitir. La prueba que se lleva a cabo se denomina “barrido de antenas y líneas de transmisión” y en inglés *sweep test* y se refiere al barrido de los cables generando una señal en el extremo opuesto al de la antena y midiendo el porcentaje de la onda reflejado. Esta prueba se imprime y su resultado se anexa al archivo que lleva la historia de este sitio. Se recomienda que el barrido de las líneas se realice cada seis meses o después de cada temporada de lluvias ya que el agua es la que más afecta a las líneas sobretodo en los conectores.

⁸ Ibidem p. 361

5.7.6 Potencia máxima

Es la potencia máxima que radia la antena sin distorsionar o degradar. Usualmente expresada en Watts. Su valor varía entre los 300 y los 500W pero en redes PCS se emplean menos frecuencias portadoras y el valor de esta potencia no es tan importante como en los sistemas analógicos. El trabajo del ingeniero de RF con respecto a este parámetro es adecuar la potencia para que la propagación sea la más adecuada. Por ejemplo, en un sistema donde los canales se dividen por frecuencia, se debe tener cuidado para que la potencia de una radiobase no sea demasiado alta como para interferir con la célula que transmita en la misma frecuencia que ella. En un sistema CDMA se evita que la potencia sea tan alta como para que en un punto cualquiera exista la misma potencia en el enlace de bajada por parte de varios sectores (códigos PN), entonces habrá contaminación de secuencias PN y el móvil sufrirá de confusión pudiendo bloquear la llamada.

5.7.7 Razón de lóbulo frontal y lóbulo posterior

Esta característica de la antena es importante para el comportamiento del sistema. Es la razón de la potencia radiada del ancho del lóbulo frontal principal entre el lóbulo posterior de la antena. Se expresa usualmente en dB, esto es que la señal en la parte posterior de la antena debe ser x dB menor que una señal exactamente del otro lado de la antena. El valor típico para PCS debe ser alrededor de 25 dB.

5.7.8 Inclinación de la antena

Inclinar la antena es el método de ajustar efectivamente el patrón de radiación vertical de la antena para incrementar la cantidad de la potencia radiada hacia el suelo. La inclinación se utiliza para incrementar la cobertura cerca de los sitios, es decir, para cubrir los hoyos de cobertura que ocurren cuando las antenas están en alturas elevadas y en caso de que sea difícil ajustar la potencia de salida. También se utiliza este método para reducir la contaminación de PN causada por reflexiones o propagación indeseable.

El método de inclinación se puede dividir en dos. Cuando se inclina mecánicamente y cuando se inclina eléctricamente.

El mecánico esta por demás explicarlo pero no sus ventajas. El poder desplazar físicamente la ubicación de la antena le da una ventaja de independencia con respecto a su fabricación y a la estructura donde esté colocada.

El eléctrico se lleva a cabo cuando se sabe de antemano que se requerirá la inclinación y en que porcentaje. Este tipo de inclinación tiene la ventaja de que los lóbulos laterales no se expanden en el plano vertical. Además, se puede aplicar a antenas omnidireccionales. Este tipo de inclinación la realiza el proveedor desde su fabricación.

El ingeniero de RF debe tomar las siguientes decisiones: que tipo de inclinación usará en general, que tipo de antenas por el ancho de banda, que tipo de antena por sus lóbulos laterales, por su lóbulo posterior, etc. además de conocer los proveedores más confiables en tiempos de entrega y calidad de equipo, debe conocer de precios y descuentos por grandes volúmenes de compra. Como todo campo de ingeniería se debe contemplar el aspecto económico para la construcción del sistema y ya que la antena es un elemento básico que se utiliza en grandes cantidades el costo será factor determinante para su elección.

5.8 Desarrollo

Para dejar en claro los puntos que se han tratado dentro de este capítulo, ejemplificaremos el tratamiento que se da para el diseño de una red de comunicaciones inalámbricas para una ciudad cualquiera, en este caso Toluca.

5.8.1 Verificación de despeje de banda de frecuencia

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se trazará la ruta a seguir para verificar que la banda de frecuencias de interés se encuentre libre de interferencia. La figura 5.11 muestra el procesamiento de los datos de la ciudad de Toluca después que se ha manejado en la zona en busca de interferencia. Como muestra la figura, no hay problema de interferencia, puesto que todos los niveles de la señal se encuentran debajo de -100dBm . Se procede entonces al siguiente punto.

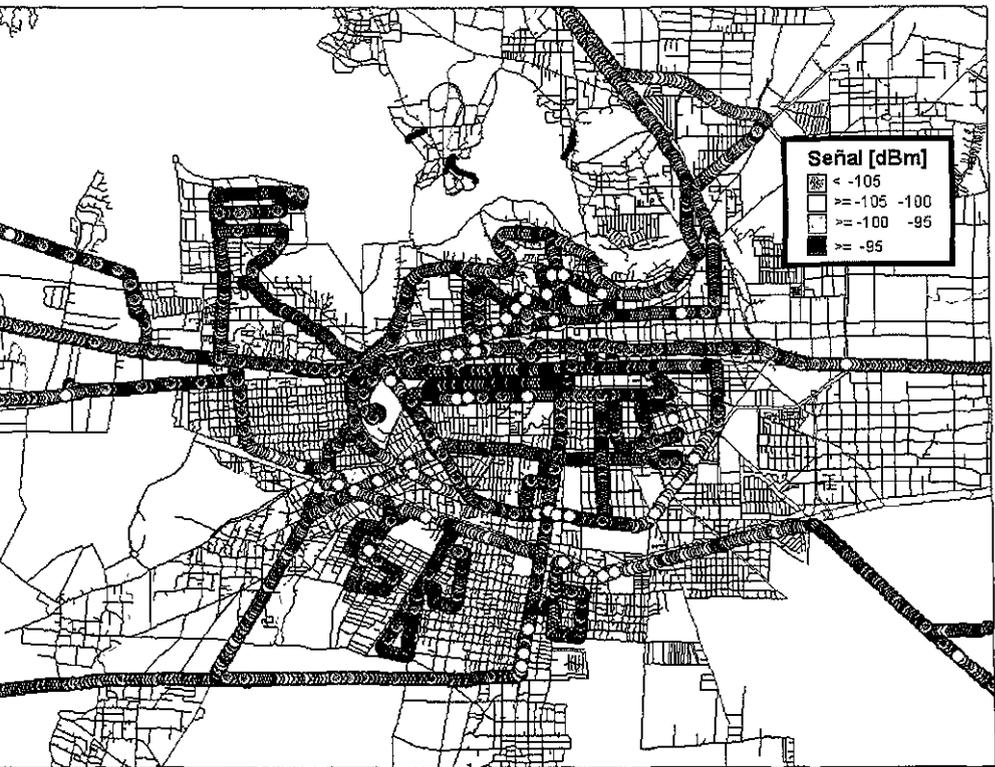


Figura 5.11

8.2 Definición de Objetivos

En este punto, después del estudio de mercado que se ha realizado, se proponen los niveles de cobertura deseados en cada zona y los puntos estratégicos que el departamento de mercadotecnia desea atacar. Para una zona específica dentro de Toluca, estos son los objetivos:

Plaza las Américas

Club de Golf San Carlos

Parque Árbol de la vida

Conjuntos Residenciales Las Américas, Hípico, Residencial Country Club

Fraccionamientos Los Cedros, Real de Arcos, Encinos y Eucaliptos

Avenidas y calles alrededor del Blvd. Toluca – Metepec, Prol. 5 de mayo, Lic. Benito Juárez, Leona Vicario y José Ma. Pino Suárez.

En la figura 5.12, se observa la ubicación de estos puntos.

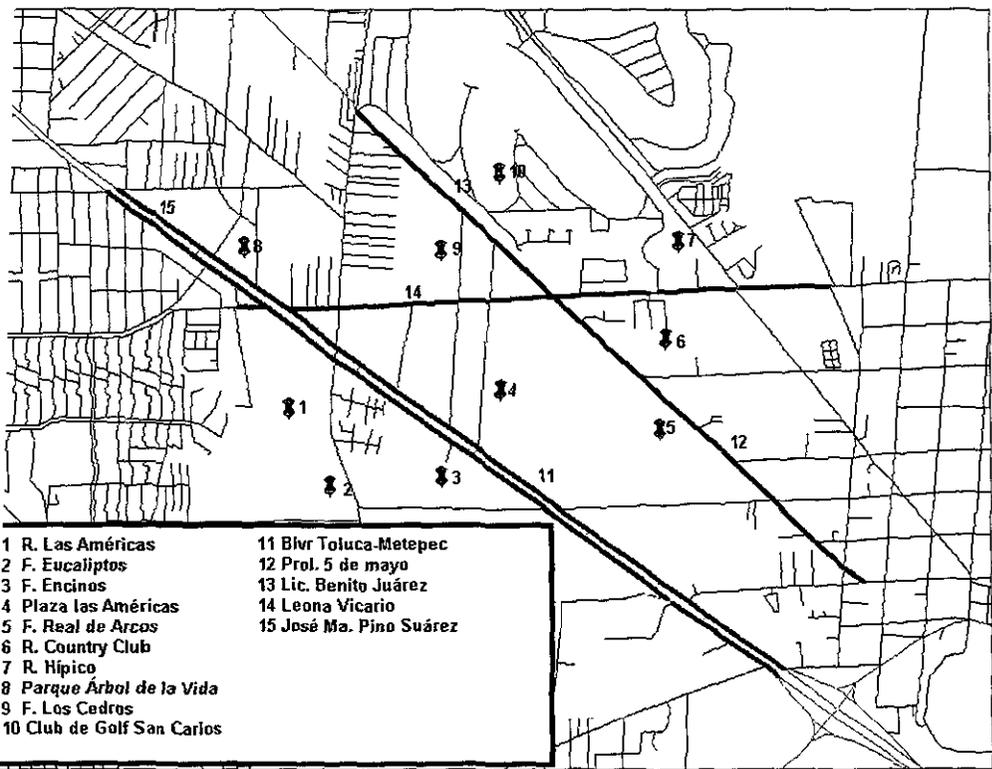


Figura 5.12

8.3 Diseño

Para los objetivos que han sido planteados, se buscará proporcionar el nivel adecuado de cobertura. Cabe señalar que dado que este es un ejemplo, no se han mencionado los objetivos a lo largo de toda la ciudad, sino que tan solo se pretende llevar a cabo la simulación de las actividades que se llevarían a cabo en caso de que este fuera un diseño real. A partir de esto, para el ejemplo que estamos proponiendo, no estamos tomando en consideración otras zonas dentro de la ciudad, ni tampoco a otras estaciones base.

En las figuras 5.13 y 5.14, podemos observar que la zona en donde se encuentran los objetivos, es plana, y residencial en su mayoría, por lo que podemos considerar que es una zona suburbana.

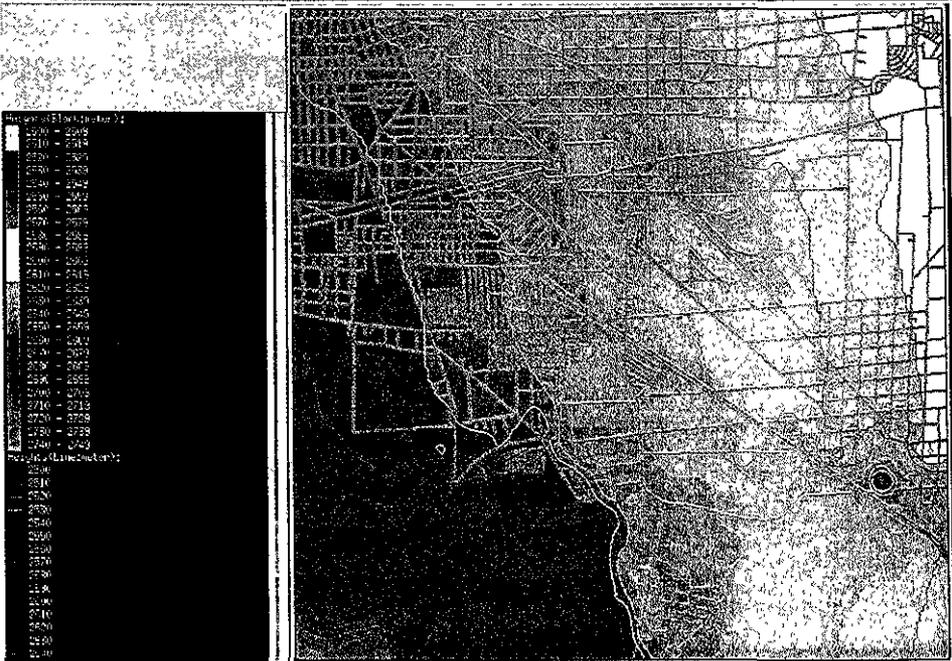


Figura 5.13

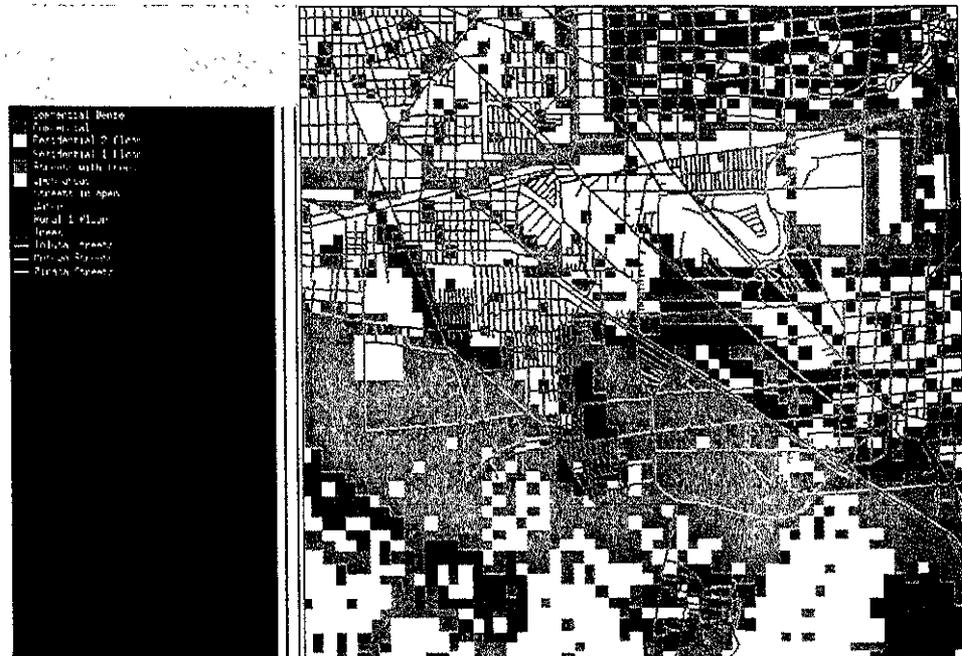


Figura 5.14

8.3.1 Selección del sitio

Usando un software de modelado de propagación de la señal de RF, tratamos de ubicar la mejor posición para la estación base de tal forma que cubra todos los objetivos que han sido propuestos. Cabe señalar que en este momento se ocuparán tan solo las características que tiene el software cargado en sus archivos, es decir, tan solo ocupará la base de datos de orografía y de morfología de Toluca.

Las características de la estación base, tal como la altura, antenas, orientación de las antenas, potencia, se proponen en base a los requerimientos que se tienen de alcanzar los objetivos, en base al balance de los enlaces. De acuerdo a lo anterior, se obtiene una predicción de lo que sería la propagación de la señal de RF. Como puede observarse, se alcanzan todos los objetivos, y con un margen de ganancia superior a los requerimientos mínimos. La figura 5.15 muestra lo anterior.

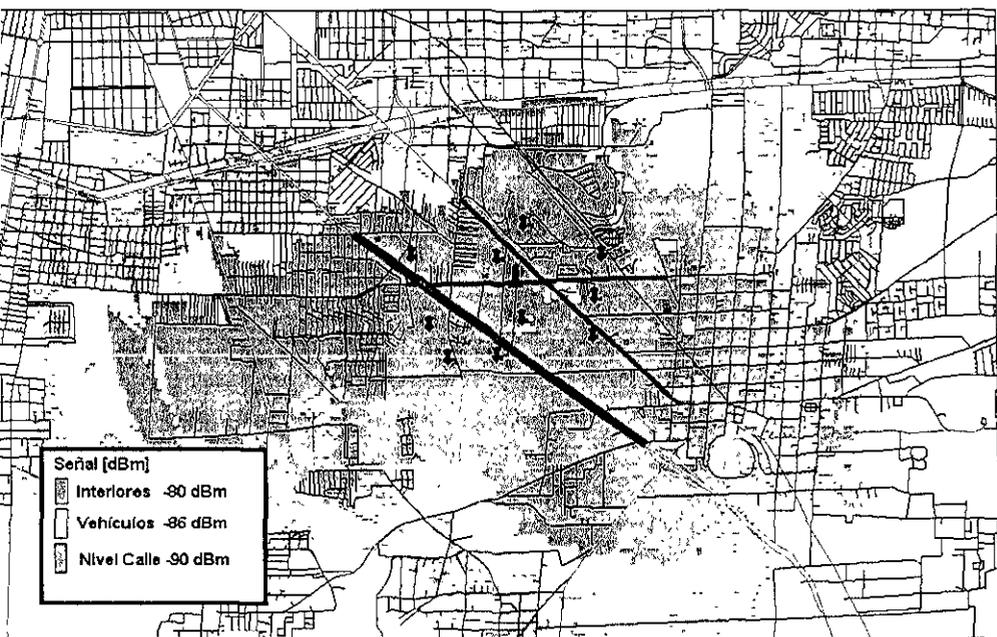


Figura 5.15

8.3.2 Estudio de campo

Teniendo en cuenta la propagación de la señal anterior, nos dispondremos a realizar la prueba de campo para verificar la correcta ubicación de la estación base. Para esto, se requiere buscar un lugar cercano a la ubicación ideal para poder realizar las pruebas. Es muy importante que, dependiendo de la zona de que se trate, no se realice a más de 100m del centro original de la estación base, puesto que de lo contrario estas pruebas no tendrán la misma validez.

La simulación de la estación base se realizará teniendo en cuenta las mismas características con que fue diseñada la misma, esto para que la simulación sea lo más confiable posible. Es decir, se realizarán a la misma altura y con la misma potencia.

Con los datos que se recolectan en la prueba de campo, se proceden a cargarlos en el software de predicción de RF, para poder sintonizar el modelo de propagación que ocupa el software. Después de la sintonización del software, los resultados que arroja pueden observarse en figura 5.16

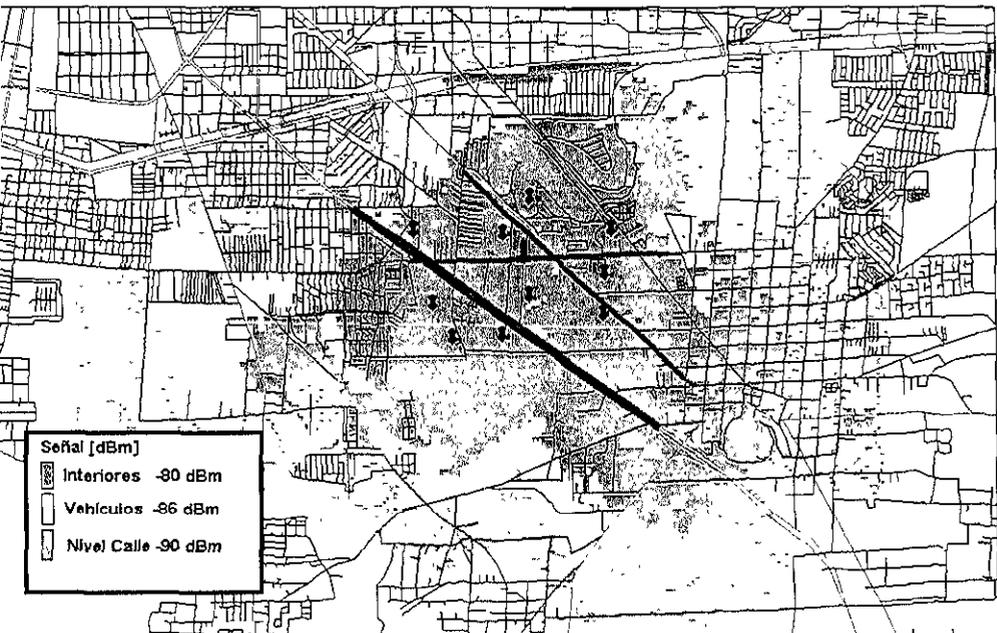


Figura 5.16

De forma estadística, el software nos da los siguientes resultados:

Cobertura	Cobertura antes de la Sintonización [km ²]	Cobertura después de la Sintonización [km ²]	Porcentaje [%]
Nivel calle	28.55	20	70.05
Vehículos	23.63	15.42	65.26
Interiores	14.30	7.96	55.66

A pesar de que después de la sintonización hay un drástico cambio en los niveles de la señal que predice el software puesto que estos varían entre 4dB y 8dB, la ubicación propuesta de la estación base aún es adecuada, y esto lo confirma la predicción de la cobertura después de ajustarse, dado que se siguen alcanzando los objetivos por los cuales se está diseñando esta estación base.

8.3.3 Anillos de búsqueda

Finalmente, se propone el polígono alrededor de la estación base sobre el cual se puedan buscar candidatos para instalar la estación base. La figura 5.17 no muestra que la zona no representa problema alguno por obstáculos naturales, y la zona es esencialmente residencial con algo de comercio, pero siempre es conveniente visitar antes la zona para cerciorarse de que la información que provea la base de datos del software sea la correcta. La imagen siguiente, 5.18, muestra la zona donde se pretende colocar la estación base.

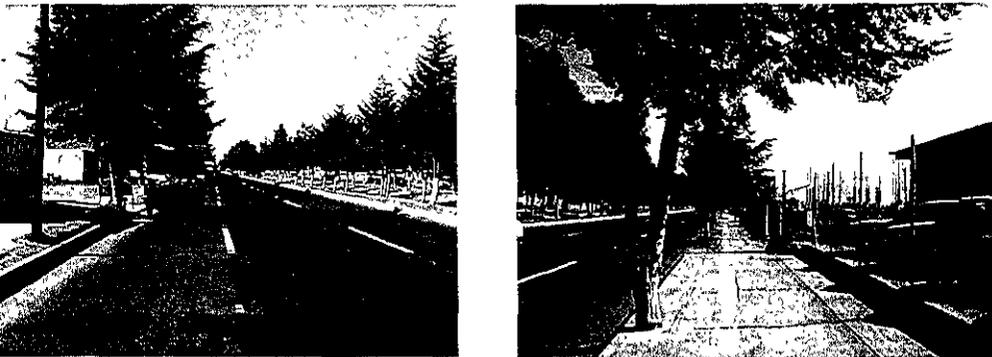


Figura 5.17

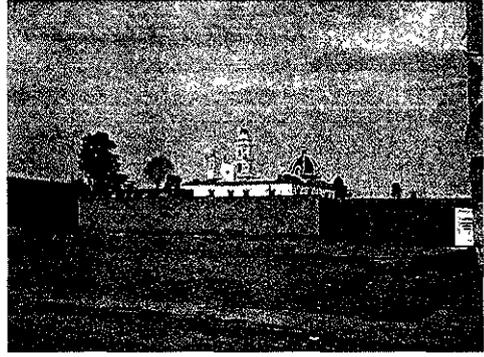


Figura 5.18

En base a lo anterior, podemos definir el anillo de búsqueda de tal forma que cualquier lugar que sea contactado dentro del mismo pueda ser considerado un buen lugar para la construcción del sitio. El polígono que se crea como anillo de búsqueda no debe permitir que la señal de RF se modifique y altere la cobertura en los objetivos planteados, por lo que el anillo propuesto es el siguiente (figura 5.19):

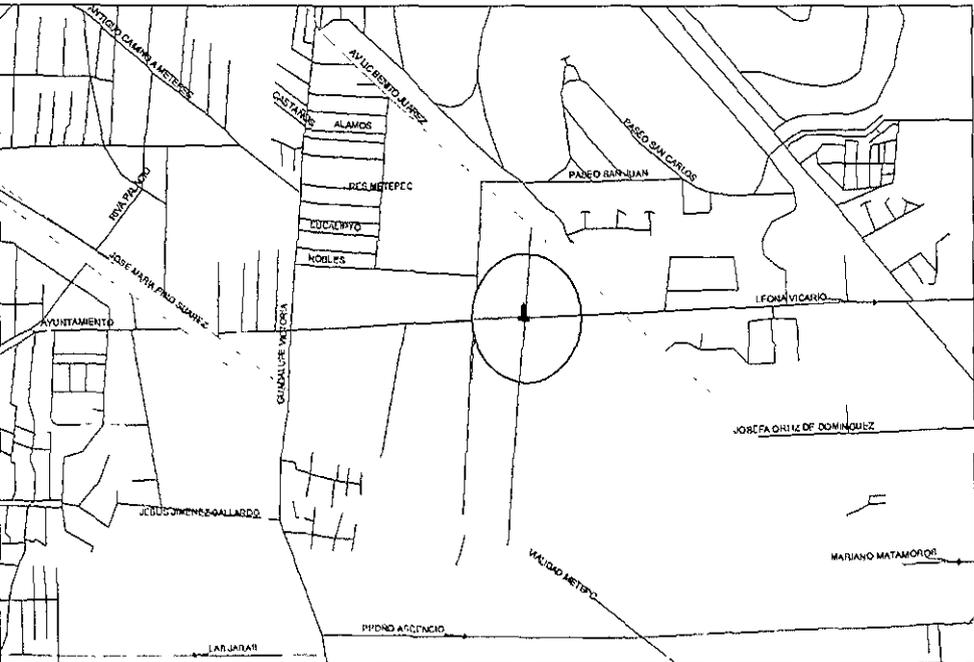


Figura 5.19

5.8.3.4 Resultados

El ejemplo anterior nos muestra lo importante que es la prueba de campo en la determinación correcta de lo que será la estación base. Los valores obtenidos nos sirven como ejemplo de lo que podría perderse al errar en la predicción de la señal de RF.

Hasta este punto, cualquier terreno, o edificio que se consiga dentro del polígono propuesto no modificará los alcances que se tienen para la estación base diseñada pero, dado que existe una normatividad en cuanto a la construcción por parte de los gobiernos, el diseño original de la estación base tendría que ser modificado si existe alguna limitante en la zona propuesta.

El ejemplo propuesto, tan solo hace mención de los parámetros a tomar en cuenta al diseñar un sitio para cubrir ciertos objetivos. Cuando hablamos del diseño de una red, se deben tomar en cuenta otros parámetros en el diseño como se menciona en el capítulo 2 de esta tesis.

Conclusiones

A lo largo del capítulo 2 se estudiaron 3 modelos de propagación, el del espacio libre, el modelo de Hata y el modelo de Lee, por ser los más representativos cuando se estudian ambientes inalámbricos móviles.

Se hizo un estudio para explicar en detalle como surge un modelo, en particular el de Lee. En este estudio se presentaron dos propuestas para diseñar un modelo, el modelo área a área y el modelo punto a punto. El modelo área a área únicamente provee una exactitud de predicción con una desviación estándar de 8dB, lo que significa que el 68% de los datos actuales de pérdida de trayectoria están dentro del ± 8 dB del valor predicho; este rango de incertidumbre es muy grande cuando se pretende diseñar un sistema confiable.

El modelo punto a punto reduce el rango de incertidumbre al incluir la información del contorno del terreno detalladamente en las predicciones de pérdida de trayectoria, es decir, este toma en cuenta aspectos importantes tales como la altura efectiva de la estación base con respecto al móvil a lo largo de la trayectoria de desplazamiento.

El modelo de predicción punto a punto es una herramienta básica que se usa para generar un mapa de cobertura de la señal, o una configuración de diseño de sistema óptima, por mencionar algunas aplicaciones.

Los modelos de predicción tienen sus limitaciones cuando se usan en modelos de propagación de pérdidas en ambientes humanos. La exactitud de estos modelos varía típicamente entre 6 y 8dB cuando se comparan con mediciones de campo. Sin embargo, la exactitud se puede incrementar cuando se integran los resultados de las mediciones de campo con los resultados del modelo. De hecho, es una práctica común en la industria tomar mediciones de campo y calcular la pendiente del modelo que se utiliza sobre ciertas distancias (una milla) de la estación base.

Otra limitación es que las predicciones de los modelos presentados no se pueden utilizar sobre regiones de microcélulas. Las regiones de microcélulas se refieren a aquellas distancias que están muy cerca a una estación base, típicamente menor a un kilómetro de radio. Otro fenómeno de

propagación predomina cuando se quiere predecir la pérdida de trayectoria muy cerca de la estación base y éste es la propagación en distancia cercana.

A lo largo del capítulo tres se ha analizado la ventaja de tener un sistema digital sobre uno analógico puesto que este proporciona calidad en el servicio al poder regenerar la voz humana mediante el uso de unos y ceros que permiten establecer una cuantización de la señal y por el uso de códigos correctores que permiten detectar errores en la transmisión y corregirlos o pedir un reenvío de esta.

De igual forma, al usar códigos binarios durante la transmisión y recepción, estos permiten incrementar la capacidad del sistema; así como proveerla de elementos como la privacidad y seguridad en el enlace, aún cuando varios usuarios estén compartiendo el espectro asignado.

En lo que se refiere a la codificación de la fuente, a diferencia de los sistemas tradicionales que ocupan PCM, y puesto que su ancho de banda no es tan limitado como en las aplicaciones inalámbricas; las tecnologías celulares y particularmente el sistema CDMA han optado por alternativas cuyo requerimiento de ancho de banda sea menor.

Entre dichas alternativas se encuentra el uso del vocoder a través de la técnica conocida como predicción lineal, que permite la simulación de los sonidos vocales y no vocales que los humanos producimos.

A pesar de su gran cercanía en la reproducción del habla humana, esta no es exacta, y debido a que se envía a través de un medio que permite degradaciones en la señal original, se requiere la codificación del canal para agregar elementos que minimicen la acción del canal sobre el mensaje.

Esta necesidad involucra dos acciones, incrementar el número de bits que se envían o incrementar el ancho de banda. La elección de un código corrector es primordial puesto que este influirá en la calidad del mensaje recibido. Y no solo en la calidad sino también en el costo del envío de un mensaje.

En lo que se refiere a CDMA, su uso como método de acceso permite una mejor calidad de la voz, puesto que se ocupa un ancho de banda mayor al requerido por otras tecnologías para procesar la llamada. Y durante la recepción, el móvil observa las demás señales en el medio como ruido, por lo que desaparece la posibilidad de interferencia, logrando así una mayor calidad en el enlace.

Por el manejo de diversos códigos durante la transmisión y recepción de la señal, el sistema requiere de una mayor capacidad en el procesamiento, por lo tanto se debe elegir entre la calidad deseada con la inversión a realizar.

Las técnicas digitales nos proveen de menor degradación y mayor capacidad. Sin embargo, esto no significa que el hecho de que la tecnología sea digital, tendrá todas las ventajas sobre una tecnología analógica.

AMPS por otro lado, es una técnica más limitada en capacidad pero compatible con casi cualquier forma de acceso de segunda generación. Esta característica le permite ser la tecnología de enlace, por ejemplo, entre un sistema TDMA y otro CDMA.

AMPS mantiene al día de hoy, en muchas regiones de los EE.UU., bajos niveles de llamadas bloqueadas y de intentos no exitosos. Desde luego que se pierden las características adicionales que una red digital entrega (como identificador de llamadas, llamada tripartita, etc.) pero provee la cobertura.

Si bien es cierto que es más deseable una red digital comparada con una red analógica, la red analógica resulta más barata y fácil de mantener cuando esta ya existe.

Hablando de la primera tecnología digital que tratamos en esta tesis, TDMA, podemos concluir que, todo desarrollo tecnológico en el campo de las telecomunicaciones, específicamente en la telefonía celular, evoluciona muy rápido y a veces tanto que no todos los cambios llegan a la implementación real. Estos cambios buscan optimizar los servicios celulares, reducir los costos y mejorar la disponibilidad de servicio.

Muchos de las compañías operadoras que trabajaban hasta hace un par de años en TDMA, están tratando de desarrollar el IS-136 para permitirle proveer una variedad más amplia de servicios relacionados con el concepto de los PCS. Cabe hacer notar, que AT&T es una de las operadoras que ha trabajado bajo esta tecnología y le ha dado tremendo impulso en su implementación.

Como conclusión principal, podemos anotar que la tendencia de los cambios en las nuevas tecnologías como TDMA son:

- crear sistemas para ambientes reducidos,
- diseño de estaciones base personales,
- soporte de grandes cantidades de paquetes para acceso a Internet,
- soporte de antenas inteligentes que cambien su patrón de radiación con la distribución de la carga y,
- reconocer que la llave de la evolución recae en el poder de incrementar la eficiencia del espectro del modo de acceso para poder manejar tasas de datos mucho más altas.

Las conclusiones específicas giran en torno al crecimiento espectral de TDMA, este sistema se encuentra en una etapa de transición donde la modulación QPSK cambiará a 8PSK, es decir, la tasa efectiva de transmisión en un canal de 30KHz será entre 45 y 50Kbps sin modificar el ancho de banda del canal o la estructura de la trama de TDMA de 20ms.

Estos y otros muchos pequeños cambios hacen que el estándar se vea como un sólido candidato para la ITU como base del nuevo estándar general.

El ambiente de CDMA como tecnología de acceso esta dado por distintas variables, como la pérdida por propagación, que incluye características específicas tales como: pendiente de la curva de la pérdida de propagación, desvanecimiento, tipo de antenas, etc. Además, las características del ambiente, como ruido, interferencia de otros proveedores de servicio y distribución de los usuarios.

Existen más características que definen a la tecnología de acceso por división de código desde el punto de vista del diseño de RF y creemos que son: la calidad, capacidad y cobertura. Estos elementos los estudiamos profundamente en el capítulo 4 y 5, a continuación concluiremos específicamente con la capacidad.

Una de las características técnicas de CDMA que sustenta nuestra apreciación personal, como una mejor opción de tecnología de acceso para una red celular, es la capacidad que este modo puede proveer. Hablando de capacidad o número de usuarios simultáneos, se recuerda que esta es directamente proporcional a la ganancia de procesamiento del sistema, por lo que la capacidad se convierte en una variable en manos del diseñador de la red.

Para lograr que la ganancia de procesamiento del sistema sea muy grande, se modifica la variable E_b/N_0 para alcanzar un '*bit error rate*' o tasa de error de bit (BER) aceptable, así como un '*frame error rate*' o tasa de error de la trama (FER) también aceptable. Sabiendo que la capacidad es inversamente proporcional al E_b/N_0 requerido del enlace, se reduce el umbral requerido de E_b/N_0 para lograr una capacidad del sistema más alta.

Otra conclusión importante con respecto a la capacidad en CDMA es la siguiente: la capacidad se puede incrementar si uno puede disminuir la cantidad de carga de usuarios de células adyacentes. Y para llevar a cabo esta disminución se emplean diferentes recursos, tales como la sectorización y el control de potencia.

Hablando de este último, el control de potencia del enlace que conecta al móvil con la estación base tenemos que; para el control de potencia de lazo cerrado, la estación base controla el lazo exterior y parte del lazo interior; el móvil maneja la otra parte del lazo interior. Para el control de potencia de lazo abierto, la porción de lazo abierto entera reside en el móvil.

En este proceso podemos concluir que el móvil se encuentra involucrado en este control de la potencia, lo que permite una mejor distribución de la carga en la red y por ende una red de alta capacidad.

A principios de 1996 se hizo la comparación en cuanto a capacidad se refiere de los sistemas de CDMA Y TDMA. Con los rasgos básicos resultó que la capacidad de CDMA es superior a la de un sistema TDMA y tal vez no sea tan efectivo ningún sistema como se describe en las ecuaciones pero Vijay y Wilkes lo señalaron como muchos otros hace cuatro años, y por ello, la aparición de CDMA abarcando muchos mercados de Norteamérica.

El *handoff* o transición del enlace de comunicación de una estación base a la siguiente de cualquier móvil del sistema, es una característica de toda red que se precie de ofrecer servicios móviles eficientes. El *handoff* en CDMA es amigable para el diseñador, en el sentido en que tiene una probabilidad muy pequeña de cortar la llamada si las listas de vecinos se encuentran distribuidas adecuadamente. Además es amigable con el usuario por el hecho de que no sufrirá una interrupción como en un sistema analógico, y como resultado de dicha interrupción una pérdida de datos. Esta interrupción tal vez sea corta e imperceptible para el usuario; sin embargo, si se estaba mandando un facsímil o un número de identificación personal a un banco, estos datos no se perderán por el proceso de *handoff* que CDMA lleva a cabo. El *handoff* tiene la excepcional característica de ayudarse del móvil para su ejecución, lo cual optimiza los recursos de la red.

También debemos mencionar un aspecto negativo del *handoff* en CDMA. Si no se encuentran distribuidas las listas de vecinos apropiadamente, se tendrá un efecto de reducción de la capacidad de la red por tener varios canales de piloto ocupados en móviles que en realidad tienen buen servicio y por lo tanto se estarán bloqueando llamadas reales.

Aquí el ingeniero de diseño debe procurar prever la distribución de las radiobases, dando a cada sector un área específica a cubrir para que su secuencia de pseudoruido con un cierto offset sea dominante en un área determinada y, se evite que un móvil tenga más de dos pilotos en su lista de activos, porque como se señaló en el apartado 4.4 del presente trabajo, puede contener hasta seis de ellos y si fuera el caso, se desperdiciarían entonces al menos cuatro canales pilotos.

Así como el diseño de las listas de canales piloto vecinos, el ingeniero de diseño de RF tiene otras responsabilidades en la red, y la más importante, es la de calcular la posición exacta de las estaciones base. Para llevar a cabo esta tarea, creemos que debe comenzar por construir adecuadamente su balance de enlaces que se menciona en el capítulo 5.

Sin embargo, para que tenga la capacidad de construir un documento de este tipo debe conocer el funcionamiento a detalle de ambos enlaces: el de bajada y el de subida.

Los enlaces son la estructura de lo que llamamos la interfase aérea entre la estación base y la estación móvil. Son aquella liga mágica e invisible de ondas hertzianas a la que el ingeniero de RF debe su ocupación. Este conjunto de direcciones de memoria, cadenas de datos, moduladores,

codificadores y demás son en realidad lo que conforma la norma o estándar en su mayoría. El 80% del estándar IS-95 habla de ellos y es sin duda lo que más diferencia a una tecnología de otra además de su método de acceso.

Este protocolo único debe ser dominado por aquel que diseñará la red para hacer consideraciones que ligen, por ejemplo, la forma en que se comprimirá una cadena de datos y como afectará este hecho a la calidad de la voz en una llamada telefónica.

El ingeniero de RF diseña la red para cumplir con los requisitos del órgano normativo de la región donde se construye la red, y aunque muchos de estos son parámetros de calidad, dichos requisitos tienen su explicación real en la estructura del enlace. Por ejemplo, si el organismo regulatorio exige una tasa de error del 5% compuesta por el 2.5% de llamadas bloqueadas, y la misma cifra por llamadas pérdidas (drop calls), entonces en la estructura del enlace se pueden observar y modificar adecuadamente sus elementos, como el tipo de modulador, el tipo de vocoder o codificador de voz o el control de potencia para alcanzar la cifra propuesta.

Concluyendo, podemos decir que la estructura del enlace es el protocolo interno de la tecnología de acceso que le da características propias, y por cierto, para el caso de CDMA complicadas en la parte de la codificación y en la parte de la modulación de datos.

En el capítulo 4, señalamos dos elementos que definen a una red basada en el modo de acceso por códigos o CDMA. Estos fueron la capacidad y la calidad del enlace. En el capítulo 5 se precisa un tercer elemento llamado cobertura.

El diseño de la red toma como piedra angular al parámetro de cobertura, el cual busca encontrar el número de células que cubrirán el área deseada. Entonces se concluye que las tres cantidades de calidad, capacidad y cobertura se relacionan y son dependientes entre sí. Para mejorar la calidad, se tendrá que sacrificar algo de cobertura y capacidad, para mejorar la cobertura algo de capacidad y calidad y para mejorar la capacidad lo mismo con la calidad y la cobertura.

Como se puede observar, para diseñar la red se necesita de un proceso llamado Link Budget o balance de los enlaces. La meta de crear un balance de los enlaces, asociado a un modelo de

propagación, es la de crear una cobertura característica para un área específica de un sistema, basado en el estándar correspondiente de su tecnología de acceso.

Este proceso se puede llevar a cabo en tres diferentes niveles. Dichos niveles se explican en la primera sección del capítulo 5. Sin embargo, falta concluir porque no se hacen todos los diseños en el tercer nivel, que es el más profundo de todos. Y la respuesta es simple: se necesitan múltiples recursos y la mayoría de las veces una inversión de dinero y de tiempo muy importante para lograr este nivel de diseño. A veces, hay que poner en la balanza el nivel del diseño y su calidad contra la inversión económica y el tiempo en que se tardará en recuperar dicha inversión.

Hablando del proceso balance de los enlaces, asociado con un modelo de propagación estadístico (por ejemplo el de Lee), se concluye que es útil como técnica de análisis para evaluar las diferencias relativas entre sistemas de radio, o para obtener una descripción cualitativa de un sistema CDMA. Sin embargo, no garantiza la confiabilidad de la capacidad o de la cobertura.

Un diseño detallado de un sistema, toma siempre en consideración las características específicas del área del terreno donde se lleva a cabo el diseño. Algunas de estas características son: ubicación de los sitios, distribución de los usuarios, tipo de terreno y de estructuras humanas.

Las suposiciones genéricas de terreno plano, distribución de usuarios uniforme y una ubicación ideal de los sitios, junto con los modelos de distribución de tráfico y de propagación, no representan finalmente las características específicas del sistema que en realidad se diseñó. Por ello, el ingeniero de RF juega un papel determinante en la construcción de una red celular.

Es aquí donde se demuestra, que el uso de las pruebas de campo, retroalimentan el diseño para mejorar la calidad de la red a construir. Concluiremos ampliamente este punto cuando hablemos de la herramienta de predicción más adelante.

Parte de la ingeniería de RF, considera el costo de la red como otro aspecto que pertenece al diseño. El equipo de ingeniería de radio debe basar el diseño en el capital activo de la red. Se puede concluir, que un representante del grupo de ingeniería de RF, debe participar en el momento de planear; ya sea una nueva red de telefonía celular o una modificación a una red existente. Muchas

de las veces, el departamento de ingeniería de RF determina el número de estaciones base necesarias para la buena cobertura debido a razones técnicas pero también económicas.

Las características de tráfico de los sistemas no son uniformes, es decir, existen variaciones de un sector a otro. Y entre más eficiente sea una tecnología de acceso en cuanto al manejo del espectro se refiere, es más barato mantener el grado de servicio de los sectores con tan solo agregar canales de tráfico adicionales cuando se les requiera.

En los sistemas menos eficientes de radio, se utiliza el recurso de subdivisión de las células. El subdividir una célula en varias células, es el único recurso disponible para mantener el grado de servicio. Este procedimiento requiere de agregar varias estaciones base para resolver el problema de bloqueo de llamadas en un solo sector. Esta característica es relevante desde el punto de vista económico, y no existe modelo de probabilidad que se le pueda asociar, pues depende de la densidad de los suscriptores y no se considera en el balance de los enlaces de ninguna forma.

Existen muchos criterios para determinar el área de cobertura de un sistema. Dentro de estos criterios se hacen diferencias entre el enlace de subida y el enlace de bajada, así como el criterio de simulación y en el que se incorporan datos válidos recolectados mediante las pruebas de campo. Se deben tomar en cuenta las unidades de los usuarios fijos y la diferencia con aquellos que serán móviles. Y por último, se debe conocer la diferencia entre la cobertura de un área definida por un sistema con carga y la cobertura de la misma con un sistema sin carga. Recordando que la cobertura cambiará por el efecto de la carga. Se concluye entonces, que toda prueba de campo que se lleve a cabo debe considerar el efecto de la carga para un diseño real del sistema.

Otra situación que representa un elemento clave para el trabajo a futuro del equipo de ingeniería, es escoger la herramienta de predicción adecuada para desarrollar el diseño de la red en términos de su propagación o cobertura. Cabe señalar que el uso de la herramienta implica dos situaciones que apuntaremos a continuación como conclusiones.

La primera, es que la forma de llevar a cabo el diseño esta directamente relacionado con la calidad de la herramienta y, la calidad de las bases de datos que representan el terreno y demás que esta pueda manejar. Entre más detallado sea el funcionamiento de las bases de datos, menor será la necesidad de recolectar información del exterior, lo que hará más rápido y sencillo el diseño.

El segundo aspecto, es el de contemplar la retroalimentación de la predicción mediante recolección de datos, como un método eficaz para el diseño de una red.

Basados en la teoría que presentamos en esta tesis, y en las aplicaciones básicas en el capítulo 5, podemos afirmar lo siguiente: la recolección de datos del exterior nos permite crear un modelo ad hoc al área en particular donde se construirá la red. Dicho modelo se deriva de los modelos teóricos estudiados en el capítulo segundo, pero se afina de una manera específica con las pruebas de campo que estudiamos en capítulo quinto.

Se debe enfatizar como conclusión de esta tesis, que la construcción de un análisis de los enlaces asociado al modelo de propagación, aunque es de utilidad como una técnica de diseño, no puede garantizar la confiabilidad en la predicción de la capacidad y la cobertura; por ello, será necesaria la recolección de datos del ambiente.

La recolección de datos es, sin duda, un elemento que debe ser constante en todo diseño y optimización de una red celular, no importando la tecnología de acceso que ésta utilice u otras características como frecuencia, fabricante del equipo, etc.

La recolección de datos es la herramienta más poderosa para diseñar una red celular de cualquier tipo, dentro de las que se encuentran las redes PCS. Al destacar las pruebas de campo, debemos decir que su utilidad varía de acuerdo a la forma en que se pueda procesar la información.

Y concluyendo, si se obtiene una buena cantidad de datos del ambiente, estos se procesan mediante una herramienta confiable y se combinan con bases de datos de densidad urbana, orografía, etc., de manera adecuada; el resultado no puede ser otro que una distribución magnífica de las estaciones base para una cobertura con poca probabilidad de error.

En cuanto al proceso de construcción se refiere, podemos decir que es necesario contar con un buen personal de adquisición de sitios. Si no se obtienen los terrenos o áreas donde se piensan construir las estaciones base, éstas nunca se podrán construir y la red por muy bien diseñada que se encuentre tendrá que modificarse. Además de la obtención de los sitios, se debe contar con un método para administrar la construcción de la red. Parece sencillo construir un sitio y llevar registro

de todos los elementos que lo componen, pero cuando se trata de una red de 250 sitios los registros toman mucha importancia para conocer el estado general de la red.

Otro aspecto, que señalamos en nuestra tesis, es que no importando que tipo de red celular se diseñe; el medio físico de propagación y recepción es el dispositivo llamado antena. No sería propio abundar en más parámetros de propagación dentro de las conclusiones, sin embargo, creemos conveniente concluir que la selección de un tipo de antena debe ser individual de acuerdo al sitio celular del que estemos hablando.

El proceso que las compañías operadoras utilizan para las órdenes de adquisición del equipo que compone la red, se basan en compras al mayoreo. Usualmente se consigue un contrato con un proveedor para cierto número y modelo de antenas, sin darse cuenta que al restringir a cierto modelo de antenas se esta restringiendo el diseño de la red de una manera drástica. Por ejemplo, si se requiere cubrir una carretera exclusivamente, se necesitan antenas con patrones de radiación angostos, como de 15 o 30 grados en el plano horizontal, para lograr la cobertura únicamente sobre la carretera. Si el contrato con el proveedor no incluye este tipo de antenas, el diseño se verá modificado por un agente externo y no será el óptimo.

La prueba de campo por su parte, define la calidad con la que se lleva a cabo un diseño. En todos los modelos de propagación, se requiere que la herramienta de diseño se encuentre actualizada de acuerdo a datos recolectados del ambiente mediante estas pruebas de campo. Entre mayor sea la cantidad de datos que se integren del ambiente, mejor será el desempeño de la herramienta. Este método de integración de muestras tomadas del ambiente, es de vital importancia para el ingeniero de RF en su diseño.

El futuro en el diseño de las redes celulares, será aquel que converja con los servicios de datos como Internet y radiolocalizadores, serán aquellos que integren la mayoría de los servicios en un solo aparato receptor. Como veremos en los párrafos siguientes, es algo que ya estamos viviendo, hoy ya es el futuro que Marconi soñó un día: la comunicación absoluta sin el par de cobre.

En la década pasada, la telefonía móvil creció rápidamente. Los teléfonos más baratos con aplicaciones y elementos de valor agregado con tarifas muy bajas, han hecho a los servicios móviles una parte esencial de la vida de muchos usuarios.

Como ejemplo podemos tomar al Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM), el sistema celular utilizado a través de toda Europa. Este ha crecido rápidamente desde su aparición en 1992. Tiene más de 100 millones de suscriptores en el mundo en 120 países, y atrae más de 5 millones de usuarios cada mes. Hay cerca de 300 operadores del sistema GSM alrededor del mundo, y en el último año casi el 60% de todos los teléfonos celulares digitales se producen para GSM.

Sin embargo, existe un nuevo sistema móvil para uso mundial se esta desarrollando para aprovechar al máximo los sistemas actuales. El sistema de tercera generación móvil, será un sistema digital mejorado y proveerá comunicación personal universal, no importando donde se encuentre el usuario. Permitiendo acceso a Internet inalámbrico, videoconferencia, y otras aplicaciones de banda ancha.

En Europa, el sistema que se está desarrollando en la mesa de trabajo del Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI), se llama UMTS (Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal). ETSI tiene su sede en Sofía Antípolis, Francia. En paralelo, la Unión Internacional de Telecomunicaciones, con sede en Génova, está formulando el IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales) 2000, el cual es una familia de sistemas que permitirá a los usuarios hacer un 'roaming' en todo el mundo con el mismo microteléfono, y que incluirá a UMTS como un subconjunto.

Aunque el UMTS será un gran paso para los usuarios y la tecnología, hay poco tiempo para desarrollar e implementar estándares comerciales. Japón planea lanzar su red UMTS en este año; y el Reino Unido, quiere que su interfase de radio UMTS empiece a trabajar junto con la red GSM el año 2002. Para el 2005, el Reino Unido, espera que su red UMTS este trabajando completamente, siendo compatible con sus sistemas anteriores para ampliar al máximo sus capacidades de servicios y cobertura.

Mientras tanto, IMT 2000 asegurará que los sistemas de tercera generación son globalmente compatibles y proveen comunicaciones uniformes. La idea es alcanzar esta meta alentando todas las partes interesadas para trabajar hacia una convergencia de tecnologías que de otra manera competirían entre sí (como lo hicieron los países de la Unión Europea en los años 80's).

Aunque no hay una definición exacta de un sistema de tercera generación móvil, en éstas últimas líneas, nos adentraremos en una visión de los sistemas de tercera generación.

El objetivo principal de su creación, es la meta que tienen los operadores del sistema, proveedores de productos, y gobiernos, al proveer funcionalidad en los servicios con un roaming global. Los sistemas de tercera generación soportarán datos de alta velocidad y aplicaciones multimedia de hasta 144kb/s, y hasta 2Mb/s en acceso de área local inalámbrico.

El sistema de tercera generación móvil está diseñado para dar a los usuarios servicios de información basados en elementos gráficos, video, multimedia, datos, voz de forma consistente, no importando su localización en la red (inalámbrico, celular, satelital, cableado fijo, etc.).

El UMTS soportará tasas más altas que 2Mb/s en servicio alámbrico. Antes, los sistemas estaban separados por la forma de conexión alámbrica/inalámbrica; ahora, la tendencia en la Unión Europea es la de integrar los sistemas alámbricos y los móviles en uno solo.

En resumen, UMTS se puede separar en dos áreas principales de conjuntos de estándares: red fija y acceso inalámbrico. La mayoría del trabajo se ha concentrado en la parte inalámbrica, UMTS estará en Europa para el año 2002 en la forma de interfase de aire que se llamará también UMTS. Esto nos hace concluir que el desarrollo de la tecnología inalámbrica debe ser tan rápido como su implementación.

Los nuevos sistemas de banda ancha inalámbricos, ofrecerán modos de tiempo real (por ejemplo voz) y con retardo (por ejemplo correo electrónico), utilizando mecanismos de transporte comunes. El mecanismo de transporte del futuro proveerá un proceso eficiente para mensajes, archivos, y datos de tipo cadena clasificados de las siguientes formas:

- Datos de paquete de mensaje: retraso de tiempo tolerante, pero con un BER pequeño. Esto es, generalmente un paquete sencillo de longitud invariable, para operaciones de tipo *handshake*, y para paquetes de señalización y parámetros de movilidad como servicio de mensajes cortos o 'short message service' (SMS).
- Datos de paquete de archivo: para paquetes múltiples, también tolerante en el retraso de tiempo pero requiere que los datos lleguen perfectamente intactos (mientras que con el habla, por

ejemplo, algunos se pueden perder). El contenido varía en longitud y puede incluir páginas de Internet que se pueden bajar, archivos para transferir, correo electrónico, y demás.

- Datos en cadena: separables en dos subgrupos, aplicaciones de 'voz' y 'videoteléfono'. Estos son intolerantes al retraso de tiempo pero más flexibles en sus demandas de BER.

El ancho de banda muy alto, conexiones asimétricas, y la ubicación en el ancho de banda dinámico ofrecerán una mayor flexibilidad del sistema tanto a los operadores de la red como a los usuarios.

Los nuevos sistemas proveerán los mecanismos apropiados para cada aplicación, obteniendo la eficiencia máxima de la red, y ahorrando a los usuarios dinero.

Los servicios actuales generalmente forzan al cliente a pagar por un conjunto de ancho de banda que se desperdicia porque los datos son usualmente innecesarios y la conexión raramente se usa a su máximo.

Empleando Internet como un ejemplo, el usuario fija una conexión de datos a un proveedor de servicios (normalmente un enlace de dos vías simétrico equivalente a un enlace de dos vías de 9.6Kb/s en GSM). Cuando se accesa una página, inicialmente el usuario requiere de muchos datos innecesarios. La aplicación es tolerante de tiempo, y los paquetes de datos llegan en tiempos diferentes. *El tráfico es principalmente de una sola vía (bajar datos).*

Una vez que la información se recibe, el cliente normalmente lee la página y mantiene la comunicación del enlace "viva". El sistema de tercera generación mantendrá un enlace virtual por medio de una señalización de canal (al contrario que con los datos), por lo que, una vez que los datos se han bajado, el cliente no paga nada más hasta que se pida la siguiente información. Durante el tiempo que el usuario esta leyendo la página que bajó, los recursos de la red se pueden asignar a otros usuarios, incrementando la capacidad de la red de una forma tremenda.

Hablando del enfoque de la tercera generación de los sistemas móviles, en cuanto al usuario se refiere, se puede decir que éste ocupa el lugar central teniendo como propósito proveer servicios sin importar el tipo de terminal, red, o método de acceso.

Por ejemplo, como parte de los diversos servicios, el ambiente de casa virtual (VHE) es una nueva opción del usuario. El VHE le permitirá al usuario personalizar y tener los servicios donde sea, y utilizarlos en cualquier momento en cualquier ambiente alámbrico o inalámbrico. Los sistemas de tercera generación también permitirán a los usuarios determinar la calidad de la llamada de voz o vídeo, y pagar de acuerdo a ello.

Los usuarios tendrán servicios específicos: correo de voz, fax y tal vez algunos servicios de vídeo, los cuales se convertirán en servicios regulares. También se fijará una forma fácil para acceder los servicios, posiblemente usando una ventana de Internet y códigos cortos para teléfonos amigables. Si el cliente se interconecta (roaming) a un país diferente y por lo tanto a un operador de red diferente, UMTS asegurará que los servicios específicos no solo estén disponibles, sino que sus preferencias también se mantengan. Las preferencias tal vez incluyan que también los bienes sean pagados por Internet y como los servicios reaccionen cuando el ancho de banda se decremente. Con la vídeo conferencia, un cliente puede optar por mantener la calidad elevada en el habla y perder vídeo cuando el ancho de banda o calidad del enlace se decremente.

Y aunque salga del área con capacidad de alto ancho de banda, se puede sobreponer a la caída cambiando el codificador/decodificador (codec) de vídeo, tan solo cambiando la tasa de compresión. Ya que el codec es un software, y cambiarlo es un caso de redireccionamiento de la cadena de vídeo al programa de codec apropiado, en la terminal; para ajustar la calidad de la foto solo se tiene que escoger el ancho de banda disponible. El usuario terminal tendrá, por supuesto, que soportar el estándar de vídeo y correr el software de descodificación de vídeo. Mientras que, la calidad de la fotografía puede cambiar el usuario podrá mantener el servicio. En este caso, el usuario tal vez tenga que escoger entre fotografía de baja calidad o voz de alta calidad.

El concepto anterior, de tasas de datos alojadas dinámicamente, y el hecho de cambiar los estándares de codificación, es un elemento nuevo y requiere de más trabajo antes de que pueda ser utilizado comercialmente; mientras que la idea ha sido probada en el laboratorio, todavía faltan dos años para su producción comercial.

El sistema de tercera generación, ofrece un método por capas para cobertura. En áreas localizadas de tamaño pequeño (picocélulas), como oficinas o casas o estaciones de gasolina, por ejemplo, el ancho de banda de acceso de radio disponible es relativamente alto, mayor a los dos

Mb/s. La picocélula estará cubierta por una microcélula más grande la cual ofrece un ancho de banda menor de 384kb/s y puede cubrir algunos cuantos Km².

La picocélula y microcélula estarán cubiertas por una macrocélula más grande, ofreciendo servicios con ancho de banda menores todavía (144kb/s) en un área tan grande como una ciudad. Un sistema global de satélites cubrirá las áreas remotas. Y aunque se le esta dando mucha atención a los operadores celulares, los servicios de 3G o tercera generación, también se aplican a los operadores alámbricos; a la larga ofrecerán las mismas capacidades y proveerán altos anchos de banda, incluyendo los mismos servicios de banda ancha.

Por ello, se ha llevado a cabo progreso importante en la definición de estándares inalámbricos para sistemas de tercera generación. Pero hay mucho debate acerca de cómo éstos se implementarán en la arquitectura de la red debido a que las especificaciones de la red fija (alámbrica) no se han definido.

La futura red deberá soportar diferentes medios de acceso, desde lazo local inalámbrico a celular, e inclusive redes de área local inalámbricas corporativas (LAN Wireless). Esto significa, adaptar las transferencias de las tasas de datos de 9.6kb/s (la actual tasa de datos, por ejemplo, de GSM) a 5Gb/s para datos de banda ancha totales.

Debido a que los operadores de red celulares tienen una inversión considerable en sus redes actuales, no es concebible que desechen las tecnologías viejas e inviertan en las nuevas en un solo paso. (Un operador alámbrico no tiene este problema y tal vez quiera cambiar a una red de tercera generación desde el primer día). Las redes de 3G pueden ser compatibles con los sistemas anteriores.

Generalmente, mientras el sistema sea más antiguo, los menos servicios que podrá soportar como red dentro del estándar IMT-2000. Los operadores, están considerando todavía nuevas características basadas en una plataforma de red inteligente (IN), permitiendo a los clientes utilizar servicios específicos del operador, a pesar de la localización del operador de red. Esto significa que los servicios especiales (tales como la marcación de códigos cortos para obtener el clima) que se puedan acceder desde cualquier país, se vuelvan características universales de red. Actualmente los códigos cortos tales como 901 en el R.U. para obtener correos de voz, no funcionan en otros países.

Los sistemas de tercera generación, se implementarán en fases como se hizo con tecnologías como CDMA o GSM, y la evolución actual de ellos facilitará la transición hacia los de 3G. La nueva arquitectura de la red comenzará a desarrollarse dentro de un año para expandir los servicios actuales. Estos servicios, llamados GPRS (sistema general de radio de paquetes) proveerán datos de paquetes o servicios de conexión que agregaran funcionalidad y flexibilidad a los servicios existentes.

Por último, diremos que los PCS sentarán la base para las redes que aún hoy, solo existen en las mentes de aquellos que soñamos y vivimos de ellas. ¿Llegará un día en que un dispositivo en el oído y otro en la pupila sean todo lo que necesitamos? ¿Una sola palabra cerrará un trato en la bolsa? ¿Un comando comprará boletos de avión o nos dirá el estado del tiempo del otro lado del mundo?

La información en nuestros días parece más infinita que nunca pero más al alcance de la mano, más fácil de acceder a ella pero nadie sabe hacia donde nos llevará esta nueva forma de vida.

Apéndice A

Unidades dB

El decibel o dB es una forma de representar de manera logarítmica las pérdidas y ganancias de la potencia.

La ganancia definida como $G_{\text{lineal}} = P_{\text{salida}}/P_{\text{entrada}}$ es equivalente a:

$$\begin{aligned} G_{\text{dB}} &= 10 \cdot \log(G_{\text{lineal}}) \\ &= 10 \cdot \log(P_{\text{salida}}/P_{\text{entrada}}) \end{aligned}$$

Unidades dBW

$$G_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(P/P_0) \quad [\text{dB}]$$

Si $P_0 = 1$ [Watt]

$$\text{Tenemos entonces: } P_{\text{dBW}} = 10 \cdot \log(P/1 \text{ [Watt]})$$

Unidades dBm

$$G_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(P/P_0) \quad [\text{dB}]$$

Si $P_0 = 1$ [mW]

$$\text{Tenemos entonces: } P_{\text{dBm}} = 10 \cdot \log(P/1 \text{ [mW]})$$

Unidades dBV

Unidad logarítmica utilizada para representar ganancias y pérdidas de voltajes.

$$\begin{aligned} G_{\text{vnc,d}} &= (V/V_0)^2 \\ G_{\text{dB}} &= 20 \cdot \log(V/V_0) \quad [\text{dB}] \end{aligned}$$

Si $V_0 = 1$ [Volt]

$$\text{Tenemos entonces: } V_{\text{dBV}} = 20 \cdot \log(V/1 \text{ [Volt]})$$

Unidades dBu

Unidad logarítmica utilizada para representar ganancias y pérdidas de voltajes.

Si $V_0 = 1$ [μV]

$$\text{Tenemos entonces: } V_{\text{dBu}} = 20 \cdot \log(V/1 \text{ [}\mu\text{V]})$$

Una relación importante para el diseño de una red celular es aquella entre dBm y dBu

Si $0 \text{ dBu} = 1[\mu\text{V}]$ y cualquier potencia en mW es $P = (V^2/R) * 1000 \text{ mW}$

Entonces tenemos:

Para una impedancia de $50 [\Omega]$ y el voltaje acordado de $1 [\mu\text{V}]$

$$\text{PdBm} = 10 * \log \{(10^{-6})^2(1000)/50\} = -107 [\text{dBm}]$$

$$0 [\text{dBu}] = -107 [\text{dBm}] \text{ para } 50 [\Omega]$$

Unidades dBi

Es la unidad que se utiliza para medir la ganancia de la antena con respecto a una antena isotrópica.

Por lo tanto, una antena isotrópica tiene una ganancia de 0 dBi.

Unidades dBd

Es la unidad que se utiliza para medir la ganancia de la antena con respecto a una antena dipolo

doble. Por lo tanto, una antena dipolo doble tiene una ganancia de 0 dBd o bien 2.15 dBi.

Todas las operaciones entre unidades logarítmicas iguales se deben llevar a cabo en el dominio lineal.

Referencias.

1. Austin, Mark. Buckley, Adrian. Coursey, Cameron. *Service and System Enhancements for TDMA Digital Cellular Systems*. IEEE Personal Communications. The Magazine of Nomadic Communications and Computing.. EE.UU. IEEE COMSOC, Vol. 6 No. 3. 1999, p.21-24.
2. Blahut, Richard E. *Digital Transmission of Information*. 1ª Ed. EE.UU., Addison-Wesley Publishing Co, 1990, p.7.
3. Brooks, John. *Telephone: The First Hundred Years*. New York: Harper and Row, 1975, p. 45-48.
4. Cheng, K. David. *Fundamentos de Electromagnetismo para ingeniería*. Addison-Wesley Iberoamericana, 1997. Delaware, EE.UU. p.426.
5. G. Hagn. *Radio System Performance Model for Predicting Communications Operational Ranges in Irregular Terrain*. 29th. IEEE Vehicular Technology Conference Record, 1970.
6. Gibson, Jerry D. *The Communications Handbook*. 1ª Ed, EE.UU., CRC Press e IEEE Press, 1996, p.1248.
7. Gibson, Stephen W. *Cellular Mobile Radiotelephones*. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1987.
8. Glover, Ian. Grant, Peter. *Digital Communications*. 1ª Ed, Inglaterra, Prentice Hall, 1998. p. 597-599.
9. Hata, M. *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*. IEEE Trans. On Vehicular and Technology, VT-29, EE.UU. 1980, p. 317-325.
10. K. Allsebrook. J.D. Parsons. *Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in the VHF and UHF Bands*. IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. VT-26, No.4, 1977.
11. K. Kelly II. *Flat Suburban Area Propagation of 820 MHz*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.VT-27, Noviembre 1978.
12. Lee, William. *Mobile Cellular Telecommunications. Analog and Digital Systems*. 2ª ed. EE UU: Airtouch Communications, 1995, 665p.
13. M. Hata. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-29, 1980, p. 317-325.
14. McDonald, Ramsey. *"Dial Direct" Automatic Radiotelephone System*. IRE Transactions on Vehicle Communications Julio, 1958, p. 80-81.
15. Motorola Cellular Infrastructure Group. *Manual de CDMA, versión 1.3. 1998*.
16. Paul, C.E. *Telephones aboard the Metro liner*. Bell Laboratories Record. Marzo 1969, p.77

17. Pickholtz, R.L. Milstein, L.B. Schilling. D.L. *Spread Spectrum for Mobile Communications*. IEEE Trans. Vehic Tech, EE.UU. IEEE, p. 313-322. VT-40.
18. Rappaport, Theodore S. *Wireless Communications Principles & Practices*. Pertinence Hall PTR, 1996.
19. Rodger, Ziemer E. y Peterson, Roger L. *Introduction to Digital Communication*. 1ª Ed, EE.UU. Macmillan Publishing Co, 1992, p.525.
20. Sklar, Bernard. *Digital Communications. Fundamentals and Applications*. 1ª Ed. EE.UU. Prentice Hall, 1988, p. 138.
21. TIA/EIA IS-136-131-A. *Digital Traffic Channel Layer1*. 7 de octubre de 1998.
22. TIA/EIA IS-136-430. *US1 (Vocoder)*. 20 de noviembre de 1998.
23. TIA/EIA IS-95A. *Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual Mode Wide Band Spread Spectrum Cellular System*. EE.UU. Telecommunication Industry Association, 1995.
24. Vijay, Garg K.Wilkes, Joseph E. *Wireless and Personal Communications Systems*. EE UU. Prentice Hall PTR, AT&T, 1996, p. 12.
25. Yang, Samuel C. *CDMA RF System Engineering*. EE.UU. Artech House Mobile Communications Library, Mayo de 1998.
26. Young, W.R. *Advanced Mobile Phone Service: Introduction, Background, and Objectives*. Bell System Technical Journal. Enero 1979, p. 7-17.
27. Ziemer Rodger, Roger Peterson. op. cit., p.526.

Referencias electrónicas.

1. Carnese, W. *CDMA Systems*. [en línea]: Total CDMA Solution for CDMAOne and CDMA2000. <http://www.ericsson.se/cdmasystems/3gcdma2000_tech.shtml> [Consulta Agosto 2000]
2. COFETEL. *Atribución del espectro radioeléctrico 1999 para México*. [en línea]: Área general de Ingeniería y Tecnología.1999.<http://www.agitec.gob.mx/cuadro/index_espectro.html> [Consulta: Marzo 2000]
3. COFETEL. *Cronología de la telefonía en México*. [en línea]: Información sobre telecomunicaciones. CFT. México 1997.<http://www.cft.gob.mx/html/la_cra/info_tel2/hist7.html> [Consulta. Marzo 2000]

4. COFETEL. *Empresas Concesionarias de Telefonía Celular*. [en línea]; Índice de servicios: Banda celular. Enero 2000. Actualizada Enero 2001.<<http://www.cft.gob.mx/conse/celular.html>> [Consulta: Marzo 2000]
5. De Silva, Clarence. *Biography of Hans Christian Oersted*. [en línea]; Cover Story. Abril 1997.<<http://www.mac-med.com/M%26C%20FILES/04maccs.html>> [Consulta: Marzo 2000]
6. Farley, Tom. *Telephone History Series* [en línea]; Telephone History since Graham Bell. Septiembre 1999.<<http://www.privateline.com/TelephoneHistory/History1.htm>> [Consulta: Marzo 2000]
7. Kelly. *Leyden Jar* [en línea]; Description and construction. Enero 2000. <<http://www.alaska.net/~natnkell/leyden.htm>> [Consulta: Marzo 2000]
8. Kuhlman, Federico. Alonso C., Antonio. *Radiodifusión de señales (1a. de 2 partes)* [en línea]; Información sobre telecomunicaciones. CFT. México 1997. <http://www.cft.gob.mx/html/la_era/info_tel/it31.html> [Consulta: Marzo 2000]
9. Naughton, Russell. *Adventures in Cybersound*. [en línea]; Scientists and Engineers. Trabajo de Post-Doctorado. Diciembre 1999.<http://www.cinemia.net/SFCV-RMIT-Annex/maughton/REIS_BIO.html> [Consulta: Marzo 2000]
10. Oberlies, Rolf. *History of Telecommunications from 1874 to 1930*. [en línea]; Fachhochschule für Technik Esslingen, Germany<<http://www.fht-esslingen.de/telehistory/1870-.html>> [Consulta: Marzo 2000]
11. Rothenberg , Marc. rothenbergm@osia.si.edu *JOSEPH HENRY* [en línea]; Smithsonian Institutional History Division. Octubre 1997. <<http://www.si.edu/organiza/offices/archive/ihd/jhp/index.htm>> [Consulta: Marzo 2000]
12. Symons, Lenore. *Michael Faraday 1791-1867*. [en línea]; Institution of Electrical Engineers. Agosto 1997. <<http://www.iee.org.uk/publish/faraday/faraday1.html>> [Consulta: Marzo 2000]
13. The Lemelson MIT Program's Invention Dimension. *Samuel F.B. Morse*. [en línea]; Inventor of the Week. Enero 2000.<<http://web.mit.edu/invent/www/inventorsI-Q/morse.html>> [Consulta: Marzo 2000]