



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

MIGRACIÓN A LOS SISTEMAS 4G

Luis Cristián García Estrada

Asesorado por el Ing. Julio César Solares Peñate

Guatemala, marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIGRACIÓN A LOS SISTEMAS 4G

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LUIS CRISTIÁN GARCÍA ESTRADA

ASESORADO POR EL ING. JULIO CÉSAR SOLARES PEÑATE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, MARZO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

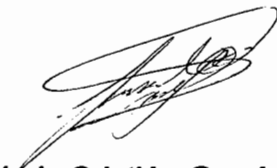
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez García de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MIGRACIÓN A LOS SISTEMAS 4G,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de noviembre de 2008.



Luis Cristián García Estrada

Guatemala, 27 de octubre de 2009

Señor Coordinador de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Coordinador:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **"MIGRACION A LOS SISTEMAS 4G"**, desarrollado por el estudiante **Luis Cristián García Estrada**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,


Ing. Julio César Solares Peñate
ASESOR





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 10 de noviembre de 2009

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **"MIGRACION A LOS SISTEMAS 4G"**, desarrollado por el estudiante **Luis Cristián García Estrada**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





REF. EIME 05.2010.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Luis Cristián García Estrada titulado: “MIGRACIÓN A LOS SISTEMAS 4G”, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 26 DE ENERO 2,010.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **MIGRACIÓN A LOS SISTEMAS 4G**, presentado por el estudiante universitario **Luis Cristián García Estrada**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, marzo 2010

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS, quien me dio el valor, la serenidad y la sabiduría para alcanzar este triunfo.

LA SANTÍSIMA VIRGEN MARÍA, madre de toda la humanidad y de nuestro Señor Jesucristo.

MIS PADRES, Luis García Sián y Reyna Leticia Estrada de García, por darme su cariño, su ejemplo e incondicional apoyo, porque este triunfo alcanzado nos pertenece.

MIS HERMANAS, Dra. Wendy Lizbeth y Licda. Jennifer Rocío, por sus innumerables consejos y apoyo, con mucho cariño.

MI FAMILIA, mis abuelos, tíos y primos, los quiero a todos.

MIS AMIGAS Y AMIGOS, por confiar en mí, por estar conmigo en las buenas y en las malas, han llegado a ser una parte muy importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Ing. Julio César Solares Peñate, por el valioso tiempo que dedico a la revisión, asesoría y dirección de este trabajo de graduación, y a la vez por haberme brindado la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos en mi formación profesional.

Todas aquellas personas, catedráticos y amigos que me brindaron su apoyo, tiempo e información para el logro de mis objetivos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CELULARES	1
1.1 Generalidad del sistema celular	1
1.2 Introducción al sistema celular	2
1.3 Concepto celular	4
1.3.1 Reusos de frecuencias	4
1.3.2 Estrategias de asignación de canales	9
1.4 Misión de la interfaz de radio	10
1.5 Efectos de la movilidad	11
1.5.1 Servicio de localización	11
1.5.2 <i>Handoff</i>	13
1.5.3 <i>Roaming</i>	16
1.6 Calidad del canal celular	18
1.6.1 Interferencia co-canal y capacidad del sistema	19
1.6.2 Interferencia entre canales adyacentes	21
1.6.3 Control de potencia	21

1.7 Partición de células (" <i>cell-splitting</i> ")	22
2. EVOLUCIÓN A LA CUARTA GENERACIÓN (COMPARACIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES)	25
2.1 Primera generación (1G)	26
2.2 Segunda generación (2G)	27
2.2.1 Protocolos de telefonía 2G	29
2.3 Segunda generación y media (2.5G), y Segunda Generación punto setenta y cinco (2.75G)	30
2.4 Tercera generación (3G)	30
2.4.1 Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000)	31
2.4.1.1 Recomendaciones para IMT-2000	32
2.4.2 Telefonía móvil 3G	33
2.4.2.1 Estándares en 3G	34
2.5 Tercera generación y media (3.5G)	34
2.6 Resumen de las principales tecnologías hasta antes de 4G	35
2.7 Factores determinantes en la evolución de 3G hacia 4G	37
2.8 Cuarta generación (4G)	38
2.8.1 Qué es 4G?	38
2.8.2 Motivación de investigaciones para 4G, antes que 3G se haya implementado en su totalidad	39
2.8.3 Necesidades que deben ser resueltas para la construcción de las redes 4G	41
2.8.4 Estándares en 4G	42

3.1.1.5 Canal codificando y entrelazando (<i>coding and interleaving</i>)	60
3.1.1.6 Transmisión adaptable	61
3.1.1.7 Diversidad espacial	62
3.1.1.8 Amplificador lineal de potencia del transmisor	63
3.1.1.9 Ventajas y desventajas de OFDM	65
3.2 Modelo idealizado del sistema	66
3.2.1 Transmisor	66
3.2.2 Receptor	67
3.3 Breve descripción matemática	68
3.4 Otras versiones de OFDM	71
3.4.1 VOFDM	71
3.4.2 BST-OFDM	72
3.4.3 WOFDM	72
3.4.4 UWB-OFDM	73
3.4.5 Flash OFDM	73
3.4.6 OFDM extendido con acceso múltiple (OFDMA)	74
3.4.6.1 Estructura de los símbolos en OFDM y OFDMA	74
3.4.7 SOFDMA (OFDMA Escalable)	75
3.4.8 OFDM-CDMA o Acceso Múltiple por División de Código de Multi portadora (MC-CDMA)	76
3.5 Sistemas que utilizan la modulación OFDM	77
3.5.1 Inalámbricos	77
3.5.2 Cableados	77

4. PLANEACIÓN, BENEFICIOS Y COSTOS DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G	79
4.1 Planeación de una red de telefonía de cuarta generación	79
4.1.1 Dimensionamiento de los planes	79
4.1.2 Limitación de las frecuencias: Ancho de banda	83
4.1.3 Técnica de modulación: Basada en OFDM u OFDMA	83
4.1.4 Transferencia y movilidad de los usuarios	84
4.1.5 Caché y pico celdas	84
4.1.6 Suministro de servicios multimedia, adaptación de servicio y transmisión sólida	86
4.1.7 Cobertura	86
4.1.8 Introducción de nuevos servicios	87
4.1.8.1 Implementación total IP	87
4.1.8.2 SDR (Equipo de radio definido por programa)	88
4.1.8.3 Entrada múltiple/salida múltiple (MIMO)	88
4.2 Beneficios	88
4.3 Costos	89
4.4 Servicios de menor costo: Una nueva propuesta	90
4.4.1 Internet gratis	90
4.4.1.1 Comunidad FON	91
4.4.1.2 FON <i>Spot</i>	91
4.4.1.3 Beneficios	92
4.4.1.4 Requisitos del servicio	92
4.4.2 Equipos	92

4.4.2.1 <i>Routers</i> : Las Foneras	92
4.4.2.1.1 La Fonera	93
4.4.2.1.2 La Fonera+	94
4.4.2.1.3 La Fonera 2.0 Beta (Versión para desarrolladores)	95
4.4.2.2 Antenas: La Fonantena	96
4.4.3 Costo del equipo	97
4.4.4 Funcionamiento	97
4.4.5 Impacto en los proveedores de servicio de Internet	98
4.4.6 Tendencias: hacia los sistemas de telefonía móvil celular	99
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Arquitectura a bloques de un sistema de telefonía móvil celular	3
2	Reuso de frecuencia	5
3	Sectorización y reuso de frecuencia	8
4	<i>Handoff</i>	14
5	Partición de células	23
6	Generaciones de Sistemas de Telefonía Móvil Celular	25
7	Diagrama espectral de una señal UWB comparada con una Wi-Fi	45
8	Diagramas De bloques: Transmisor y Receptor OFDM	53
9	Eficiencia espectral OFDM	55
10	Subportadoras ortogonales en OFDM	56
11	Diagrama de bloques de un sistema transmisor OFDM	67
12	Diagrama de bloques de un sistema receptor OFDM	68
13	Estructura simbólica de OFDM en WiMAX	75
14	Estructura simbólica de OFDMA en WiMAX	75
15	Velocidad Vs. Movilidad de los sistemas OFDMA y las generaciones anteriores	78
16	Ejemplo de Modelo discreto empleado para el dimensionamiento de una red de telefonía móvil celular	82
17	Diseño de una red Pico celda	85
18	Ejemplo de despliegue en zonas de tráfico denso	87

TABLAS

I	Sistemas de Telefonía Celular Analógica	27
II	Resumen de los principales Sistemas de Telefonía Móvil Celular	35
III	Comparación de parámetros claves entre 4G y 3G	40
IV	Evolución de WiMAX	48
V	Versiones de la tecnología MIMO	50
VI	Ejemplos de dimensionado	83
VII	Especificaciones técnicas: La Fonera	93
VIII	Especificaciones técnicas: La Fonera+	94
IX	Especificaciones técnicas: La Fonera 2.0 Beta	95
X	Especificaciones técnicas: La Fonantena	96
XI	Categorías asignadas a los usuarios del sistema FON	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Δ	Cambio de una cantidad cualquiera.
B	Ancho de banda.
C	Número total de canales dúplex.
dB	Decibel.
f	Frecuencia en Hz.
Gbps	Giga bits por segundo o $1 \cdot 10^9$ bits por segundo.
GHz	Giga Hertz o $1 \cdot 10^9$ ciclos por segundo.
Hz	Hertz.
k	Número entero cualquiera.
k	Número de grupos de canales por célula.
kbps	Kilo bits por segundo.
km/h	Kilómetro por hora.
M^N	Cantidad de símbolos en una trama binaria.
Mbps	Mega bits por segundo.
MHz	Mega Hertz o $1 \cdot 10^6$ ciclos por segundo.
N	Número total de células de un conjunto completo de frecuencias o tamaño del cluster.
Q	Factor de reuso co-canal.
RF	Radio Frecuencia.
S	Cantidad de canales.
T	Periodo de una señal.
US\$	Dólar americano.

LISTA DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado
1G	Primera generación de telefonía móvil celular.
2G	Segunda generación de telefonía móvil celular.
3G	Tercera generación de telefonía móvil celular.
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project.</i>
4G	Cuarta generación de telefonía móvil celular.
ADC	Convertidor de análogo a digital.
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> (Línea de Suscripción Digital Asimétrica).
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone Service.</i>
BCHO	<i>Base controlled handoff o handoff controlado por la radio base.</i>
BPSK	<i>Bit phase shift keying.</i>
C/I	<i>Carrier to interference relationship</i> o relación portadora a interferencia de una señal.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access.</i>
CDPD	<i>Celular Digital Packet Data</i> o Datos Digitales del Paquete Celular.
DAC	Convertidor de digital a análogo.
DC	Corriente Directa.
DCA	<i>Dynamic Channel Assignment</i> o asignación de canales dinámica.
DCA	Asignación dinámica del canal complejo.
DFT	Transformada de Fourier en tiempo discreto.
DMT	<i>Discrete Multitone Modulation</i> o Modulación por Multitono Discreto.
DPSK	<i>Differential phase shift keying.</i>

DQPSK	<i>Differential Quadrature phase shift keying.</i>
DSFN	Redes de dinámicas de una sola frecuencia.
FCA	<i>Fixed Channel Allocation.</i>
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FFT	Transformada rápida de Fourier.
FIR	Respuesta finita al impulso.
FPLMTS	<i>Future Public Land Mobile Telecommunications System.</i>
GSM	<i>Global System per Mobile Communications.</i>
HLR	<i>Home Location Registers.</i>
HSDPA	Acceso de Alta Velocidad del Paquete en Conexión de Bajada.
ICI	Interferencia inter portadora.
IDFT	Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IFFT	Transformada inversa rápida de Fourier.
IMT-2000	Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000.
IP	<i>Internet Protocol.</i>
ISDB	<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i> o Transmisión Digital de Servicios Integrados.
ISDB-C	Transmisión Digital de Servicios Integrados por Cable.
ISDB-T	Transmisión Digital de Servicios Integrados Terrenal.
ISDB-TSB	Transmisión Digital de Servicios Integrados Sonora Terrenal.
ISI	Interferencia intersimbólica.
ISP	<i>Internet Service Provider</i> (Proveedor de servicios de Internet).
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LAN	<i>Local Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution.</i>
MAC	Control de acceso a los medios.
MAHO	<i>Mobile Assisted Handoff</i> o <i>handoff</i> asistido por el móvil.

MCHO	<i>Mobil Controlled Handoff o handoff controlado por el móvil.</i>
MFN	Transmisión de multifrecuencia convencional.
MIMO	Entrada múltiple/salida múltiple.
MSC's	<i>Mobile Switching Centers o Centro de Conmutación Móvil.</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing.</i>
PAPR	Factor de cresta.
PSK	<i>Phase shift keying.</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network.</i>
QAM	<i>Quadrature amplitud modulation.</i>
QPSK	<i>Quadrature phase shift keying.</i>
SAE	<i>Service Architecture Evolution.</i>
SDR	<i>Software Defined Radios o Equipo de radio definido por programa.</i>
SFN	Una sola frecuencia nacional.
SMS	<i>Short Message Service.</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio o relación que existe entre una señal y el ruido que se le suma por distintas causas.</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access.</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telephone System.</i>
USB	Comunicación serial universal.
UWB	Ultra banda ancha.
VDSL	<i>Very high bit-rate Digital Subscriber Line o DSL de muy alta tasa de transferencia.</i>
VLR	<i>Visiting Location Registers.</i>
W-CDMA	Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha.
Wi-Lan	<i>Wireless Local Area Network.</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access. Equivalente a decir protocolo IEEE 802.16 MAN</i>
WWRF	<i>Wireless World Research Forum.</i>

... ..
... ..
... ..

GLOSARIO

Ancho de banda	Cantidad de datos que puede ser enviada o recibida durante un cierto tiempo a través de un determinado circuito de comunicación. Técnicamente, es la diferencia en hertz (Hz) entre la frecuencia más alta y más baja de un canal de transmisión.
Banda ancha	En su significado más conocido, la banda ancha hace referencia a una gran velocidad de transmisión, como la obtenida a través de un sistema ADSL. Además, el término se refiere a la característica de cualquier red que permite la conexión de varias redes en un único medio de transmisión.
Baudio	Es el número de cambios de estado (voltaje o frecuencia) de una señal por segundo en una línea de comunicación, normalmente telefónica. Aunque el término baudio se utiliza como sinónimo de bits por segundo, en realidad, se trata de cosas diferentes. La diferencia está en que cada cambio de estado en la señal no transmite necesariamente un bit, de forma que las dos medidas no son equivalentes.
Bit	Es la unidad mínima de información digital; puede tener un valor de uno o de cero. Para expresar más información requiere agruparse para formar los <i>bytes</i> .
Burst	Estallido o salto de una señal en un tiempo muy pequeño.

Cluster	Forma de direccionamiento usada por el IPv6, en la que se asigna una dirección a un grupo de computadoras o usuarios.
Cobertura	Área geográfica de una estación base que recibe suficiente señal para mantener una llamada. Área a la que llegan las señales de una red de telefonía celular.
Conmutación	Cambio de un sistema a otro, en el menor tiempo posible. La conmutación suele tener una velocidad mayor que el enrutamiento. Además difiere del enrutamiento en que emplea la dirección de hardware de un cuadro.
Conmutar	Término general usado para describir la operación de un conmutador.
Cross talk	Interferencias de fondo que son percibidas por los usuarios al realizar una llamada telefónica.
Fading	Desvanecimiento o atenuación de una señal.
Footprint	Huella que deja en el sistema de telefonía móvil celular un usuario al realizarse una llamada.
Hotspot	Es el área física desde la cual es posible establecer una conexión a Internet en forma inalámbrica, mediante tecnología WiFi.
Idle	Desocupado.

<i>Interleaving</i>	Entrelazando de señales.
Modulación	Proceso que realizan los módems para adaptar la información digital a las características de las líneas telefónicas analógicas.
Móvil	Término asignado a un teléfono celular.
Multiplexación	Transmisión simultánea de múltiples mensajes en un sólo canal. La multiplexación es el procedimiento por el cual un circuito transporta más de una señal, cada una en una localización individualizada que constituye su canal. El sistema demultiplexor es el que permite distinguir las diferentes señales originales.
Operador	También llamados operadoras, son empresas que ofrecen servicios de telefonía básica y móvil.
<i>Paging messages</i>	Mensajes de búsqueda o voceo.
<i>Parent coverage</i>	Cobertura primaria.
Protocolo	Conjunto de normas y/o procedimientos para la transmisión de datos que ha de ser observado por los dos extremos de un proceso comunicacional (emisor y receptor). Estos protocolos "gobiernan" formatos, modos de acceso, secuencias temporales, etc.

Router	Originalmente, identificado con el término <i>gateway</i> , sobretodo en referencia a la red Internet. En general, debe considerarse como el elemento responsable de discernir cuál es el camino más adecuado para la transmisión de mensajes en una red compleja que está soportando un tráfico intenso de datos.
Slices	Porciones asignadas de un ancho de banda a una señal.
SMS	Siglas de Short Message System. Es un sistema de mensajes cortos. Sistema estándar de comunicaciones utilizando teléfonos móviles que dispongan de tecnología digital.
Sombra radioeléctrica	Punto físico en el cual los usuarios carecen de servicio.
Time slice	Fracción de tiempo. Intervalo fijo de tiempo que se asigna a cada usuario o programa en un sistema multitarea o de tiempo compartido.
Time slot	Ranura de tiempo. Intervalo de tiempo continuamente repetido o un periodo de tiempo en el que dos dispositivos son capaces de interconectarse.
Transceptor	Disposición de un transmisor y un receptor en un mismo equipo.

***Tracking
efficiency***

Eficiencia de rastreo o escaneo de señal.

Wi-Fi

Protocolo de comunicación estándar que define la conexión vía radio frecuencia para Redes Área Local en Entornos Privados (WLAN). Conocido también por su especificación técnica (el estándar 802.11), es un sistema de comunicación de datos que transmite y recibe información a través del aire en frecuencias de 2.4 GHz (Gigahertz) y pueden transmitir información a una velocidad de transmisión de 11 Mbps (Megabits por segundo).

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una definición y aclaración de ciertos conceptos fundamentales que pertenecen a la telefonía móvil celular en general, ya que se considera que es importante el conocimiento de la teoría básica al respecto, antes de dar una descripción mas detallada en los capítulos dos, tres y cuatro de lo que involucra la migración de los sistemas de telefonía móvil celular actuales hacia los sistemas de cuarta generación.

En el capítulo dos se presentan antecedentes generales de las distintas generaciones de telefonía móvil celular hasta antes de lo que será la 4G. También se realiza una serie de comparaciones entre ellas para que de esa manera puedan distinguirse las ventajas que han tenido las generaciones posteriores a una ya establecida, y a su vez motivado a la implementación de los nuevos servicios que estas prestan. Una vez establecido lo anterior, se da inicio a la descripción de lo que es la cuarta generación de telefonía móvil celular juntamente con parte de sus tecnologías y técnicas de trabajo.

En el capítulo tres se describe detalladamente lo que es la técnica de modulación OFDM, empleada por la cuarta generación, juntamente con algunas versiones que pueden tomarse para la misma, dependiendo de la región o continente donde se encuentren los equipos.

Finalmente, en el capítulo cuatro, se presentan los criterios a considerar en la planeación e implementación de una red de telefonía móvil 4G, así como sus beneficios y costos, tanto para usuarios como para los empresarios de las distintas compañías operadoras.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
50 EAST LEXINGTON AVENUE
NEW YORK, N. Y. 10017
LONDON: ROUTLEDGE AND KEGAN PAUL
AND CO., LTD., 11 BEDFORD SQUARE, W.C.1

OBJETIVOS

Generales:

1. Conocer el funcionamiento de una red de telefonía móvil celular.
2. Conocer las características y beneficios de los sistemas 4G.

Específicos:

1. Describir los sistemas telefónicos más actuales y sus características tecnológicas.
2. Indicar las limitantes inherentes a cada sistema de telefonía descrito.
3. Establecer las ventajas del cambio de una tecnología aplicada en telefonía móvil celular a otra.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de telefonía móvil durante el 2008 en Guatemala se encontraban en una transición tecnológica masiva, la cual consistió en pasar de pertenecer de segunda generación a tercera generación o a tercera generación y media; se planteaba a los usuarios el uso de tecnologías que operan de manera inalámbrica y que aprovechan la banda ancha del espectro radioeléctrico.

Es por ello que en este trabajo se presentan los cambios que deben realizarse en los sistemas de telefonía móvil para así poder brindar servicio en 4G y que dichos cambios le sean transparentes a los usuarios. Lo anterior se hace describiendo las partes y conceptos básicos que conforman un sistema de telefonía móvil celular, para luego dar paso a los antecedentes generales de las distintas generaciones desde la primera hasta la cuarta generación. Una vez establecidos los antecedentes, se da una profundización hacia lo que comprende la 4G, no sin antes compararla de forma detallada con las generaciones inmediatamente anteriores, como lo son 3G y 3.5G.

Con la implementación de la cuarta generación de telefonía móvil celular, se pretenderá dar un avance tecnológico al actualmente ya saturado mercado de las radiocomunicaciones, esto con el fin de brindar seguridad y novedad al usuario que cada día busca nuevas tecnologías y sus aplicaciones en la vida cotidiana.

Ya que la red 4G comenzará su implementación a nivel mundial en un futuro no muy lejano, a comienzos del 2010 por parte de la empresa japonesa NTT DoCoMo, se tiene que una de sus principales ventajas será la transmisión de información aprovechando la banda ancha del espectro radioeléctrico, juntamente con la compatibilidad entre equipos, con lo que se tendrá gran capacidad, costos más bajos y reducción en la complejidad de las terminales.

1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CELULARES

En este capítulo se presentan y a la vez describen algunos de los conceptos fundamentales de los sistemas de telefonía móvil celular, ya que se considera que tales conceptos son de gran utilidad en la comprensión de cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas por muy moderno que este sea.

1.1 Generalidad del sistema celular

El rápido y acelerado crecimiento de la industria de la telefonía móvil celular en sus primeros 12 años¹ dio como resultado una cobertura extensa de servicios celulares en áreas pobladas. La telefonía móvil celular fue considerada como la tecnología dominante de comunicaciones bidireccionales inalámbricas. Debido a la extensa cobertura provista por los servicios celulares de voz, se toma a la telefonía móvil celular como el medio ideal para proveer servicios inalámbricos de datos en casi todas partes. Desafortunadamente, la herencia de voz de la industria celular influye de manera drástica en su habilidad para soportar aplicaciones de datos. Por otro lado, los sistemas celulares se basan en el modelo de canal tradicional de telefonía: *circuit-switched* (conmutación de circuitos). En este modelo, el circuito punto a punto, incluyendo el canal celular, esta dedicado a un solo usuario o aplicaciones antes de que se pueda transmitir en el canal. Es de observar que el canal permanece dedicado al usuario o aplicación durante la transmisión, hasta que se libere de manera explícita.

Un canal dedicado solo a un usuario puede utilizarse para aplicación de voz a menos que exista alguna ineficiencia de la perspectiva del canal.

A pesar de lo anterior, un canal dedicado a información de usuario es en extremo ineficiente y por ende, demasiado costoso, a no ser que la aplicación de datos involucre un transporte lo suficientemente compactado de grandes cantidades de información o la aplicación sea de naturaleza alta-característica misión-crítica. En el soporte de la naturaleza celular *circuit-switched*, los sistemas de tarificación originalmente fueron orientados hacia unidades de tiempo facturables sobre el orden de minutos de tiempo aire en lugar de cantidades que coincidieran más con las actividades de la información del usuario o en su defecto el ancho de banda utilizado.

Las características del canal utilizado por los sistemas de telefonía móvil celular ofrecieron varios retos extra a los canales celulares y sus aplicaciones en manejo de datos. Estas características son operadas por medio de mensajes de control de llamada, los cuales son transmitidos en banda, mientras la llamada se encuentra en progreso.

1.2 Introducción al sistema celular

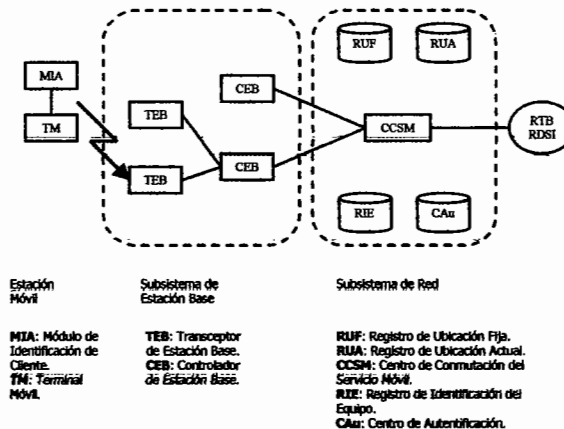
El concepto de sistema celular fue un avance muy importante en la solución del problema de la congestión espectral y de la capacidad del usuario. Dicho concepto ofreció una gran capacidad en una localización limitada del espectro sin grandes cambios tecnológicos.

La idea primordial de un sistema celular consiste en un sistema basado en distintos niveles de células, los cuales son:

Un transmisor de gran potencia (célula grande) con muchos transmisores de baja potencia (células pequeñas), cada una brindando cobertura a solo una pequeña porción del área de servicio.

A cada radio base se le asigna una porción del número total de canales disponibles en el sistema complejo y a las radio bases cercanas se les asignan diferentes grupos de canales de forma que los canales disponibles son asignados en un número relativamente pequeño de radio bases vecinas. A las radio bases vecinas se les asigna diferentes grupos de canales de forma que las interferencias entre las radio bases (y entre los usuarios móviles bajo su control) se reducen. La distribución de canales disponibles a través de una región para poder ser reutilizados tantas veces como sea necesario se logra por medio de dos factores, los cuales son: el espaciamiento sistemático de las radio bases y el espaciamiento de los grupos de canales a través de un mercado. Además se debe considerar que la interferencia entre radio bases con el mismo canal se mantenga por debajo de los niveles aceptables. A continuación se muestra (Figura 1) la arquitectura básica en diagrama de bloques de un sistema de telefonía móvil celular.

Figura 1. Arquitectura a bloques de un sistema de telefonía móvil celular.



A medida que la demanda de servicios crece, se debe incrementar el número de radio bases, proporcionando una capacidad de radio adicional sin incremento del espectro de radio. Este es el principio fundamental de todos los sistemas de comunicaciones inalámbricas modernos.

1.3 Concepto celular

1.3.1 Reusos de frecuencias

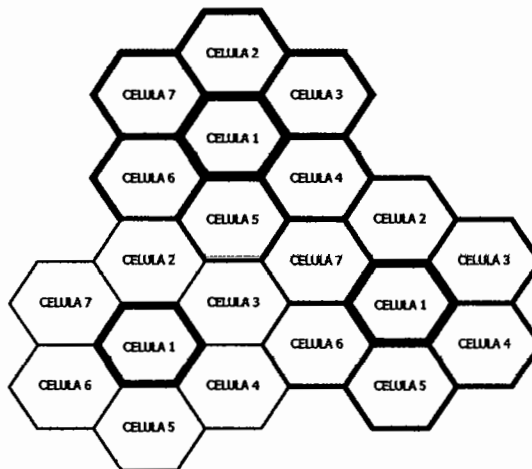
El ancho de banda ha sido el primer obstáculo a vencer para los sistemas inalámbricos de radio frecuencias. El utilizar eficientemente este recurso se denomina reuso de frecuencia, en este se permite a un mismo radio canal ser empleado al mismo tiempo en múltiples transmisores, mientras estos se encuentren suficientemente separados uno del otro para evitar interferencia. La idea esencial del radio celular es transmitir los niveles de potencia lo suficientemente bajos para no interferir con la ubicación más cercana en donde el mismo canal es reutilizado.

Es por ello que un canal físico de radio frecuencia (RF) puede utilizarse más de una vez en una misma ciudad. Por otro lado, la probabilidad de interferencia se ve reducida conforme aumente el área de cobertura y con ello la distancia de reuso. Así también, mientras más bajos sean los niveles de potencia usada en células compartiendo un canal común, es menor la probabilidad de interferencia. Por lo tanto, en un sistema celular se utiliza la combinación de control de potencia y planeación de frecuencia para prevenir interferencia.

Puesto que los sistemas celulares poseen un área de cobertura, fue necesario asignarles una unidad de medida, la cual esta basada en el área de cobertura RF de los mismos y se le denomina celda o célula.

En cada célula, una radio base transmite de una ubicación específica o *cell site*, que es usualmente situada en el centro de la célula. A la radio base y a los móviles se les permite usar un subconjunto de canales de RF disponibles para el sistema. Estos Canales no pueden ser utilizados en ninguna célula potencialmente interferible, es decir próxima a la que los este utilizando.

Figura 2. Reuso de frecuencia.



La figura 2 ilustra el concepto de reutilización de frecuencia, donde las células con el mismo número emplean el mismo grupo de canales. La forma hexagonal de la célula mostrada es conceptual y es un modelo simple de la cobertura de radio para cada radio base, pero ha sido universalmente adoptado dado que el hexágono permite un análisis fácil y manejable de un sistema celular, la cobertura real de una célula se conoce como huella (*footprint*)² y se determina de los modelos de campo o de los modelos de predicción de la propagación.

Cuando se utilizan hexágonos para modelar las áreas de cobertura, los transmisores de las radio bases pueden estar tanto en el centro de las células como en tres de las esquinas de las seis de cada célula.

Normalmente las antenas omnidireccionales se colocan en el centro de las células, y las antenas de dirección selectiva o sectorizadas suelen colocarse en las esquinas de las células.

Para comprender en mejor manera el concepto de reutilización de frecuencia, debe considerarse un sistema celular que tenga un total de S canales dúplex disponibles para su utilización. Si a cada célula se le coloca un grupo de k canales ($k < S$), y si los S canales se dividen en N células dentro de un grupo único y disjunto de canales donde cada célula tiene el mismo número de canales, el número total de canales de radio disponibles se puede expresar como:

$$s = k * N \quad \text{(Ecuación 1)}$$

A las N células que usan un conjunto completo de frecuencias disponibles se les llama *cluster*. Si un *cluster* se repite M veces dentro de un sistema, el número total de canales dúplex C , se puede utilizar como una medida de la capacidad, y está dado como:

$$C = M * N \quad \text{(Ecuación 2)}$$

A N se le llama también tamaño del *cluster*. Si el tamaño del *cluster* N se reduce mientras que el tamaño de la célula permanece constante, se requerirán más *clusters* para cubrir un área dada y por tanto se logrará una mayor capacidad. Cuanto mayor sea N , mayor será la distancia entre radio bases con el mismo grupo de canales, menor será su interferencia, y así también la capacidad del sistema será menor.

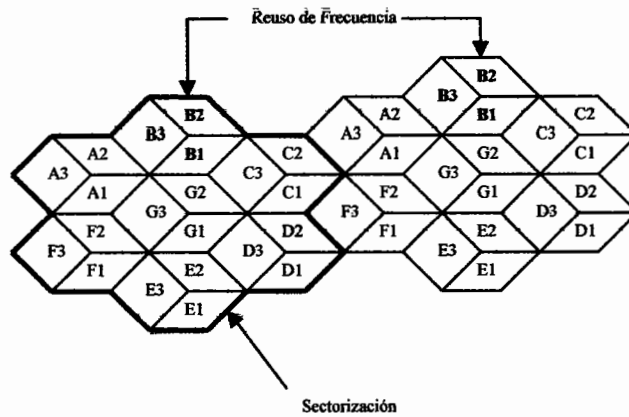
Desde un punto de vista del diseñador, es deseable usar el valor más pequeño de N posible, para maximizar la capacidad dentro de un área de cobertura.

En otras palabras, los mismos canales son re utilizados cada r , células, brindando una mejor calidad de canal mientras más grande sea el valor de N (debida a las reducidas oportunidades de interferencia).

Una de las desventajas de este esquema es que sólo permite tener $1/N$ canales disponibles en cada célula, lo que provoca un gran incremento en la probabilidad de chequeo de usuarios tratando de ingresar al sistema. La sectorización provee un reuso de frecuencias más eficiente, ya que cada una ofrece una larga fracción del total del espectro de frecuencias. Los valores típicos para N son siete para células sectorizadas, las cuales por lo regular se encuentran divididas en tres sectores o doce para células omnidireccionales.

La capacidad de un sistema celular o eficiencia del espectro puede ser incrementada sencillamente y sin costo si se subdividen las células en células más pequeñas o sectorizando las células. La sectorización consiste en dividir una vista de sitio de célula omnidireccional (360°) en porciones (*slíces*), que no se traslapen, llamadas sectores y cuando se combinan proveen la misma cobertura, pero son consideradas células separadas. Esta tendencia ha continuado con la creación de microcélulas, cuyo objetivo es el incrementar la capacidad de usuarios en áreas urbanas densas. Mientras el rango típico de una célula es de 2 a 20 kilómetros de diámetro, el rango de las microcélulas es de 100 metros a 1 kilómetro de diámetro.

Figura 3. Sectorización y reuso de frecuencia.



En la figura 3 se muestra como es aplicable el concepto de reuso de frecuencia y de Sectorización.

La ganancia de capacidad provista por los sistemas celulares es casi balanceada con las pérdidas de *trucking efficiency*, la cual es la eficiencia resultante que está al final de un gran número de usuarios que reciben servicio de un conjunto de servidores en lugar de asignar proporcionalmente a cada usuario con uno de los servidores. Si un número no proporcional de móviles están ubicados simultáneamente en una sola célula, un sistema celular podría terminar soportando pocos usuarios en lugar de un área ancha del sistema, porque relativamente pocos de los usuarios que son agregados en la célula pueden recibir servicio (debido a que sólo están disponibles un subconjunto de canales en la célula), el sistema celular podría parecer inefectivo.

Las radio bases están provistas de conexiones entre ellas y la PSTN (*Public Switched Telephone Network*) a través de los MSC's (*Mobile Switching Center*). La operación del sistema AMPS ha sido basada en MSC's inteligentes controlando la operación de las radio bases y los móviles.

La administración de la movilidad celular es manejada por el HLR (*Home Location Registers*) y el VLR (*Visiting Location Registers*).

1.3.2 Estrategias de asignación de canales

Para la utilización prudente del espectro de radio, se requiere de un reuso de frecuencias que aumente la capacidad y minimice las interferencias en el sistema. Se han desarrollado una gran variedad de estrategias de asignación de canales para llevar a cabo estas tareas. Las estrategias de asignación de canales se pueden clasificar en fijas o dinámicas.

La elección de la estrategia de asignación de canales impondrá las características del sistema, particularmente, en como se gestionan las llamadas cuando un usuario pasa de una célula a otra (*handoff*).

En una estrategia de asignación de canales fija o FCA (*Fixed Channel Allocation*), a cada célula se le asigna un conjunto predeterminado de canales. Cualquier llamada producida dentro de la célula, sólo puede ser servida por los canales que no están siendo utilizados dentro de esa célula en particular. Si todos los canales de esa célula están ocupados, la llamada se bloquea y el usuario no recibe servicio. Existen algunas variantes de esta estrategia, una de ellas permite que una célula vecina le preste canales si tiene todos sus canales ocupados. El Centro de Conmutación Móvil (*Mobile Switching Center* o *MSC*) supervisa que estos mecanismos de préstamo no interfieran ninguna de las llamadas en progreso de la célula donadora.

Por otro lado, en una estrategia de asignación de canales dinámica o DCA (*Dynamic Channel Assignment*), los canales no se colocan en diferentes células permanentemente.

En vez de lo anterior, cuando se produce un requerimiento de llamada la radio base servidora pide un canal al MSC, éste entonces coloca un canal en la célula que lo pidió siguiendo un algoritmo que tiene en cuenta diversos factores como son: la frecuencia del canal a pasar, su distancia de reutilización, y otras funciones de costo.

Las Estrategias de asignación dinámicas aumentan las prestaciones del sistema, pero requieren por parte del MSC una gran cantidad de cómputo en tiempo real.

1.4 Misión de la interfaz de radio

Dado que el número de canales de radio es mucho menor que el número total de usuarios potenciales, los canales bidireccionales sólo se asignan si se necesitan. Esta es la principal diferencia con la telefonía estándar, en donde cada terminal está continuamente unido a un conmutador haya o no haya llamada en progreso.

En una red móvil como GSM, los canales de radio se asignan dinámicamente. En GSM, así como en otros sistemas de telefonía celular, el usuario que está en espera permanece atento a las llamadas que se puedan producir escuchando un canal específico. Este canal transporta mensajes llamados mensajes de búsqueda o voceo (*paging messages*), su función es la de advertir que un usuario móvil está siendo llamado; además dicho canal es emitido en todas las células, y el problema de la red se ve reducido a determinar en qué células llamar a un móvil cuando se le necesite.

El establecimiento de cualquier llamada, ya sea el móvil origen o destino de la llamada, requiere medios específicos por los cuales la estación móvil pueda acceder al sistema para obtener un canal. En GSM este procedimiento de acceso se realiza sobre un canal específico del móvil a la base. Este canal que envía además de otra información, los mensajes de búsqueda, es conocido en GSM como Canal Común dado que lleva información hacia y desde el móvil al mismo tiempo. A los canales asignados durante un período de tiempo a un móvil se les llaman canales dedicados. Tomando como base la definición anterior, se pueden definir dos macro-estados, los cuales son:

1. Modo desocupado (*Idle*), en este el móvil escucha; el móvil no tiene ningún canal para si mismo.
2. Modo dedicado, en el cual se asigna un canal bidireccional al móvil para sus necesidades de comunicación, permitiéndole de esta forma intercambiar información punto a punto en ambas direcciones.

El procedimiento de acceso es una función particular que permite al móvil alcanzar el modo dedicado desde el "*Idle*".

1.5 Efectos de la movilidad

1.5.1 Servicio de localización

La movilidad de los usuarios en un sistema celular es la fuente de mayores diferencias con la telefonía fija, en particular con las llamadas recibidas. Una red puede encaminar una llamada hacia un usuario fijo simplemente sabiendo su dirección de red, dado que el conmutador local al cual se conecta directamente la línea del usuario no cambia.

Sin embargo en un sistema celular, la célula en la que se debe establecer el contacto con el usuario cambia cuando éste se mueve. Para recibir llamadas, primero se debe localizar al usuario móvil y después el sistema debe determinar en qué célula está en ese instante.

En la práctica se utilizan tres métodos diferentes para tener este conocimiento. En el primer método, el móvil indica cada cambio de célula a la red, se le llama: actualización sistemática de la localización al nivel de célula.

Cuando llega una llamada, se necesita enviar un mensaje de búsqueda sólo a la célula donde está el móvil, ya que ésta es conocida. Un segundo método sería enviar un mensaje de voceo a todas las células de la red cuando llega una llamada, evitando así la necesidad de que el móvil esté continuamente avisando a la red de su posición. El tercer método es un compromiso entre los dos primeros introduciendo el concepto de área de localización. Un área de localización es un grupo de células, cada una de ellas pertenecientes a un área de localización simple.

La identidad del área de localización a la que una célula pertenece se le envía a través de un canal de difusión (*broadcast*), permitiendo a los móviles saber el área de localización en la que están en cada momento. Cuando un móvil cambia de célula se presentan los dos casos siguientes:

1. Ambas celdas están en la misma área de localización, para lo cual el móvil no envía ninguna información a la red.
2. Las células pertenecen a diferentes áreas de localización, en este caso el móvil informa a la red de su camino de área de localización.

Cuando llega una llamada solamente se necesite enviar un mensaje a aquellas células que pertenecen al área de localización que se actualizó la última vez. GSM utiliza éste método.

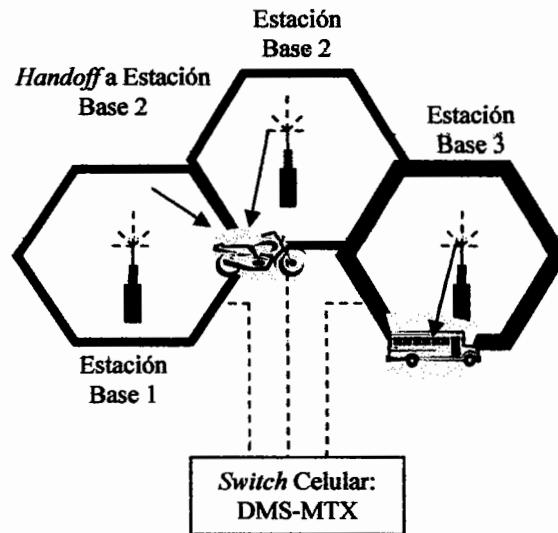
1.5.2 Handoff

Anteriormente se indicaron los efectos de la movilidad en el modo *idle*, en el modo dedicado, y en particular cuando una llamada está en progreso, la movilidad del usuario y como puede inducir a la necesidad de cambiar de célula servidora cuando la calidad de la transmisión cae por debajo de un umbral establecido.

Con un sistema basado en células grandes, la probabilidad de que ocurra lo anterior es pequeña y la pérdida de una llamada podría ser aceptable. Sin embargo, si se quisiera lograr gran capacidad, se debe de reducir el tamaño de la célula, puesto que el mantenimiento de las llamadas es una tarea esencial y con ello se evitaría un alto grado de insatisfacción en los usuarios.

Uno de los objetivos del sistema celular es mantener a un usuario en contacto incluso si éste se mueve a través del sistema.³ Cuando un usuario se mueve del área de cobertura definida de una célula a otra, el sistema debe proveer la capacidad de mantener al usuario en contacto aunque se rompa la conexión establecida con una radio base y se establezca una nueva conexión con otra radio base. Esta operación es llamada *handoff* o *handover*, esto puede apreciarse en la figura 4.

Figura 4. *Handoff*.



El contar con células pequeñas significa tener más frecuentemente *handoffs*, lo cual requiere más recursos del sistema para soporte y coordinación. Este proceso requiere primero algunos medios para detectar la necesidad de cambiar de célula mientras se está en el modo dedicado (preparación del *handoff*), y después se requieren los medios para conmutar una comunicación de un canal en una célula dada a otro canal en otra célula, de una forma transparente al usuario, es decir, que no se percate del cambio.

El *handoff* en un sistema celular se realiza de dos maneras, las cuales son:

Handoff duro es cuando la conexión entre el móvil y su servidor inicial (radio base) permanece momentáneamente antes de reconectar al móvil con una nueva radio base³. Este es el método tradicional usado en los sistemas celulares existentes, porque requiere de menos procesamiento por parte de la red para seguir brindando servicio, aunque tiene el inconveniente de causar una interrupción momentánea en la recepción.

El segundo método de *handoff* es llamado *handoff* suave, en este dos radio bases están simultáneamente conectadas por un periodo corto de tiempo con el móvil durante el *handoff*. Tan pronto como el enlace de RF del móvil con la nueva radio base sea aceptable, la radio base inicial se desprende del móvil³. Se emplean diversas técnicas al final de los dos enlaces para asegurar un *handoff* suave, el cual es transparente al usuario.

También se puede clasificar a los *handoffs* como controlados o asistidos por la red o el móvil. Un *handoff* controlado por la red es calificado como un BCHO (*base-controlled handoff*) o *handoff* controlado por la radio base.

Un *handoff* MCHO (*Mobil - Controlled Handoff*) o *handoff* controlado por el móvil es menos utilizado en sistemas de voz³, pero más empleado en CDPD (*Celular Digital Packet Data*) por el modo de transmisión de ráfaga empleado en móviles CDPD. La segunda generación de sistemas celulares de voz toma ventaja de la inteligencia en los móviles y las técnicas de división de tiempo para realizar un MAHO (*Mobile Assisted Handoff*) o *handoff* asistido por el móvil, en donde el móvil participa pero no controla el *handoff*.

El proceso de *handoff* es complejo con cualquiera de las técnicas que se emplee. Se utiliza un algoritmo de decisión para determinar cuando debe ocurrir un *handoff*, el cual se basa en factores como el nivel de potencia recibido y la calidad de la señal (coeficiente de error de bit *-bit error rate-* o tono supervisor — *supervisory tone*). Una vez que los valores predeterminados de umbral han sido excedidos, indicando que se ha llegado a la orilla de la cobertura de la célula, se debe también decidir de dónde recibirá servicio el móvil.

La célula marcada para *handoff* es determinada por medidas de RF diseñadas para minimizar la interferencia asociada con consideraciones de capacidad, tales como la necesidad de balance de carga, disponibilidad de canales desocupados (*idle*), entre otras. Todas las decisiones para el *handoff* deben ser rápidas, ya que el usuario puede estar movilizándose con rapidez. Esta necesidad de decisiones rápidas de *handoff* se acentúa más en células con tamaños decrecientes utilizadas en áreas urbanas. Los requerimientos para *handoffs* rápidos solo pueden ser reunidos con un nivel suficiente de procesamiento y capacidad de señalización.

La habilidad de una red para soportar *handoffs* puede ser una capacidad coactiva. Por lo tanto, es importante evitar *handoffs* innecesarios e indeseados.

El sistema debe distinguir entre un movimiento del área de cobertura de una célula a otra y un móvil moviéndose a la franja del área, donde la recepción de RF es pobre. Se han logrado desarrollar algoritmos inteligentes que involucran cronómetros, control de potencia e histéresis para reducir el número de *handoffs* innecesarios.

1.5.3 Roaming

En los sistemas de comunicaciones accedidos a través de un enlace fijo, la elección de que red proporciona el servicio, está hecha desde el principio. Diferentes servicios pueden proporcionar servicio a un usuario dado dependiendo de dónde se encuentre éste.

Además de lo anterior, cuando cooperan diferentes operadores de red, puede emplearse la posibilidad anteriormente mencionada para ofrecer a sus usuarios un área de cobertura mucho mayor que cualquiera de ellos pudiera ofrecer por sí mismo. A esto es a lo que se llama "*Roaming*", y es una de las características principales de la red europea GSM.

El *roaming* se puede proporcionar sólo si se dan una serie de acuerdos administrativos y técnicos entre las distintas empresas de telefonía móvil celular. Desde el punto de vista administrativo, se deben resolver entre los diferentes operadores cosas tales como las tarifas, acuerdos de abonadas, entre otros aspectos. La libre circulación de los móviles también requiere de cuerpos reguladores que convengan el reconocimiento mutuo de los tipos de convenios. Desde el punto de vista técnico, algunas cosas son una consecuencia de problemas administrativos, como las tarifas de la transferencia de llamadas o la información de los usuarios entre las redes.

Otros factores que se necesitan para poder realizar el *roaming* son la transferencia de los datos de localización entre redes, o la existencia de una interfaz de acceso común. Este último punto es probablemente el más importante. Este hace que el usuario deba tener un accesorio simple del equipo que lo habilite para acceder a las diferentes redes. Para lograrlo, se ha especificado una interfaz de radio común de forma que el usuario pueda acceder a todas las redes con el mismo móvil.

Una de las definiciones formales de *roaming*, que da una compañía celular es:

Servicio que se presta al usuario cuando éste se ubica en otra zona de cobertura concesionada distinta a la de la concesionaria con la cual contrató el servicio concesionado, denominándose el usuario como abonado móvil visitante, debiendo pagar la cuota diaria de *roaming*, las llamadas que origine y/o reciba y los cargos de larga distancia que genere.

1.6 Calidad del canal celular

La interferencia es el principal factor que limita el desarrollo de los sistemas móviles celulares.

Las fuentes de interferencias incluyen a otros móviles dentro de la misma célula, o cualquier sistema no celular que de forma inadvertida introduce o resta energía a la banda de frecuencia del sistema celular.

Las interferencias en los canales de voz causan "*cross – talk*", el cual consiste en que el usuario escucha interferencias de fondo, debidas a una transmisión no deseada. Sobre los canales de control, las interferencias conducen a llamadas perdidas o bloqueadas debido a errores en la señalización digital. Las interferencias son más fuertes en las áreas urbanas, debido al mayor ruido de radio frecuencia y al gran número de radio bases, así como al creciente número de móviles. Además se les considera responsables de formar un cuello de botella en la capacidad, y de la mayoría de las llamadas entrecortadas.

Los dos tipos principales de interferencias generadas por sistemas son las interferencias co-canal y las interferencias entre canales adyacentes.

Aunque las señales de interferencia se generan frecuentemente dentro del sistema celular, son difíciles de controlar en la práctica (debido a los efectos de propagación aleatoria). Pero las interferencias más difíciles de controlar son las debidas a otros usuarios de fuera de la banda que llegan sin avisar debido a los productos de intermodulación intermitentes o a sobre cargas del móvil de otro usuario.

En la práctica, los transmisores de portadoras de sistemas celulares de la competencia, son frecuentemente una fuente significativa de interferencias de fuera de banda, dado que la competencia frecuentemente coloca sus radio bases cerca para proporcionar una cobertura comparable a sus clientes.

1.6.1 Interferencia co-canal y capacidad del sistema

El reuso de frecuencias implica que en un área de cobertura dada haya varias células que utilicen el mismo conjunto de frecuencias.⁴ Estas células son llamadas células co-canales, y a la interferencia entre las señales de estas células se le llama interferencia co-canal. Al contrario que el ruido térmico, el cual puede superarse incrementando la relación señal ruido (*Signal to Noise Ratio* o SNR), la interferencia co-canal no puede combatirse simplemente incrementando la potencia de portadora de un transmisor.

Lo mencionado anteriormente se debe a que un incremento en la potencia de portadora de transmisión de una célula, incrementará la interferencia hacia las células co-canales vecinas.

Es por ello que para reducir la interferencia co-canal, las células co-canales deben estar físicamente separadas por una distancia mínima que proporcione el suficiente aislamiento debido a las pérdidas en la propagación.

En un sistema celular cuando el tamaño de cada célula es aproximadamente el mismo, la interferencia co-canal es aproximadamente independiente de la potencia de transmisión y se convierte en una función del radio de la célula (R), y de la distancia al centro de la célula co-canal más próxima (D). Incrementando la relación D/R , se incrementa la separación entre células co-canales relativa a la distancia de cobertura. El parámetro Q , llamado factor de reuso co-canal está relacionado con el tamaño del *cluster* N . Un valor pequeño de Q proporciona una mayor capacidad, puesto que el tamaño del *cluster* N es pequeño. Por otra parte, un valor de Q grande mejora la calidad de la transmisión, debido a que es menor la interferencia co-canal. Se debe llegar a un compromiso entre estos dos objetivos al momento de diseñarse el sistema.

Una de las medidas físicas de la calidad del canal de RF es la relación portadora-a-interferencia (C/I , *carrier-to-interference*). Esta relación es logaritmicamente proporcional a la calidad de la señal del receptor. Mientras más grande sea la relación C/I mejor será la calidad del canal. ⁴

Los coeficientes de C/I de 17dB son usados idealmente para determinar el umbral de la cobertura de una célula. Si las medidas de C/I son debajo de este nivel, el móvil deberá estar en la región de cobertura de otra célula y se deberá realizar un *handoff*.

El interior de la célula deberá proveer coeficientes de C/I que excedan 17dB, a menos de que el móvil se localice en un punto ciego de la cobertura de RF.

1.6.2 Interferencia entre canales adyacentes

Bajo este concepto se examinan las interferencias procedentes de señales que son adyacentes en frecuencia a la señal deseada.⁴

Estas interferencias se producen por la imperfección de los filtros en los receptores, los cuales permiten a las frecuencias cercanas colarse dentro de la banda de paso. El problema puede ser serio si un usuario de un canal adyacente está transmitiendo en un rango muy próximo al receptor de un usuario, mientras que el receptor está intentando recibir una señal de la radio base sobre el canal deseado. A esto se le llama efecto "*near-far*", donde un transmisor cercano (que puede ser o no del mismo tipo que el empleado en el sistema celular) captura al receptor del usuario. Otra forma de producir el mismo efecto es cuando un móvil cercano a una radio base transmite sobre un canal cercano a otro que está utilizando un móvil, cuya potencia de transmisión es más débil.

La radio base puede tener dificultad para discriminar al usuario móvil deseado del otro, debido a la proximidad entre los canales. Este tipo de interferencias se pueden minimizar filtrando cuidadosamente, y con una correcta asignación de frecuencias. Puesto que cada célula maneja sólo un conjuntó del total de canales, los canales a asignar en cada célula no deben estar próximos en frecuencias.

1.6.3 Control de potencia

Una parte importante en la administración de los recursos de radio es controlar los niveles de potencia utilizada en los transmisores, esto se hace para asegurar que cada móvil transmite la potencia más baja necesaria.

Este control es muy importante porque hasta en las mejores condiciones el nivel de potencia recibido es inversamente proporcional a la distancia del transmisor.⁵ Sin el control de potencia, los niveles cercanos podrían saturar la transmisión de móviles distantes a los receptores de la radio base.

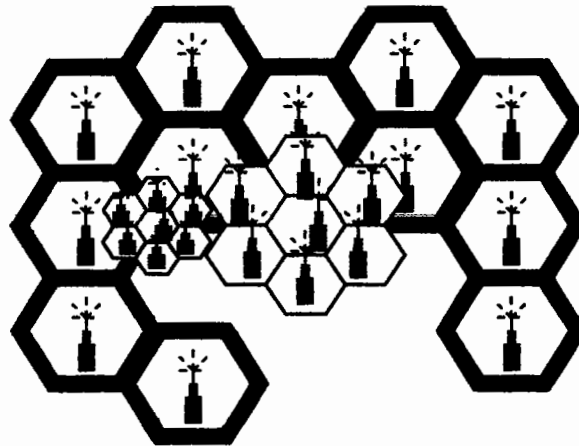
El dominio por los transmisores cercanos puede prevenir que se detecten en el receptor señales distantes transmitidas. Una mejor descripción es el llamado *near-far* o problema de terminal escondida. Esto ocurre cuando un transmisor se encuentra más cercano al receptor que otro transmisor. Si la señal del transmisor más próximo es capturada satisfactoriamente por el receptor, el receptor debe reconocer la recepción exitosa de la señal.⁵ El transmisor distante puede entonces concluir de manera errónea que su señal fue recibida sin mayor dificultad.

Una radio base debe prevenir que los móviles cercanos transmitan con niveles de potencia que sature a otros móviles en la célula. La potencia de la señal recibida (RSS) en la radio base debe ser aproximadamente igual en todos los móviles de la célula. Usualmente los algoritmos de control de potencia están basados en la llamada reciprocidad de las señales de RF. La radio base puede siempre manipular individualmente a los móviles para usar otro nivel de potencia. El control de potencia es importante en los umbrales de célula, para reducir el número innecesario de *handoff* y evitar interferencia.

1.7 Partición de células ("*cell-splitting*")

El *splitting* es el proceso que consiste en subdividir una célula congestionada en células más pequeñas², cada una con su propia radio base y la correspondiente reducción en la altura de la antena y de la potencia de transmisión, como se puede observar en la figura 5.

Figura 5. Partición de células.



Celdas grandes: Áreas Rurales.
Celdas pequeñas: Áreas Urbanas.

El *splitting* incrementa la capacidad de un sistema celular, ya que incrementa el número de veces que se reutilizan los canales. Definiendo nuevas células que tengan un radio más pequeño que las células originales e instalándolas entre las células existentes, se incrementa la capacidad debido al incremento de canales por unidad de área.

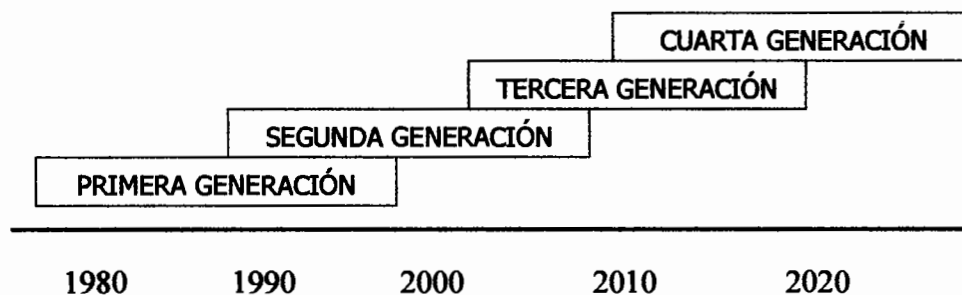
De igual forma el incremento del número de células incrementará el número de *clusters* en la región de cobertura, que a su vez incrementará el número de canales y por la tanto la capacidad en el área da cobertura. El *cell-splitting* permite al sistema crecer sustituyendo células grandes por pequeñas.²

2. EVOLUCIÓN Y MIGRACIÓN A LA CUARTA GENERACIÓN (COMPARACIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES)

Con el pasar del tiempo, la telefonía móvil celular ha tenido distintos grados de evolución y a estas etapas se les ha designado con el nombre de generaciones, así desde sus comienzos en 1976⁶, las comunicaciones móviles han experimentado un crecimiento a gran escala, desarrollándose con esto diversas tecnologías y sistemas para dar servicios de comunicación inalámbrica.

De forma general, el desarrollo que han tenido, así como una proyección de las distintas generaciones a través del tiempo se presenta en la figura 6.

Figura 6. Generaciones de Sistemas de Telefonía Móvil Celular



2.1 Primera generación (1G)

Los sistemas de telefonía móvil de primera generación se caracterizaban por realizar transmisión analógica de servicios de voz con baja calidad, con una velocidad de 2400 baudios.

Además utilizaban para su funcionamiento la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), lo que hacía a estos sistemas limitados en relación al número de usuarios a los que podía prestarse el servicio.

El primer sistema celular analógico comercial inició a operar en Japón en 1979, desarrollado por la compañía de Telefonía y Telegrafía de Japón (NIT). Dos años más tarde se introduce el sistema *Nordic Mobile Telephone System* o NMTS450, el cual comenzó a operar en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega en la banda de los 450 MHz. Por otro lado, Estados Unidos a partir de 1983 comenzó a utilizarse el sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) que operaba en la banda de los 800 MHz y a su vez ofrecía 666 canales divididos en 624 canales de voz y 42 canales de señalización con 30 KHz. cada uno. En 1985 Gran Bretaña a partir del AMPS adoptó el sistema TACS (*Total Access Communications System*), el cual contaba con 1000 canales de 25 KHz cada uno y que operaba en la banda de 900 MHz. Durante la década de 1980, fueron implementándose nuevos sistemas de Primera Generación, entre los cuales se pueden mencionar el estándar Alemán C-Netz y *French Radiocom 2000* de Francia, entre otros.

La siguiente tabla muestra un resumen de la primera generación de sistemas celulares, así como los países en los cuales se implementaron las distintas técnicas de modulación para los mismos.

Tabla I. Sistemas de Telefonía Celular Analógica.

Sistema	País	Nº Canales	Espaciado (kHz.)
AMPS	EE.UU.	832	30
C-450	Alemania	573	10
ETACS	Reino Unido	1240	25
JTACS	Japón	800	12.5
NMT-900	Escandinavia	1999	12.5
NMT-450	Escandinavia	180	25
NTT	Japón	2400	6.25
Radiocom.-2000	Francia	560	12.5
RTMS	Italia	200	25
TACS	Reino Unido	1000	125

Fuente: <http://www.um.es/docencia/barzana/IATS/lats08.html>

Para concluir con lo referente a la primera generación, puede decirse que la mayor diferencia entre los sistemas 1G y los 2G es que en 1G la tecnología es del tipo analógica y los sistemas de 2G son digitales⁷; aunque los dos sistemas utilizan sistemas digitales para la conexión de las Radio bases al resto del sistema telefónico; por otro lado, la llamada es cifrada cuando se utilizan los sistemas 2G.

2.2 Segunda generación (2G)

Debido a la limitación de canales que se lograron tener en un ancho de banda con el método de Acceso Múltiple por División de Frecuencias (FDMA), empleado en la primera generación, se realizaron nuevas propuestas con el fin de incrementar la cantidad de usuarios simultáneos en los sistemas de telefonía.

Debido a lo anterior surgen entonces la TDMA (*Time Division Multiple Access*) y la CDMA (*Code Division Multiple Access*) como las tecnologías predominantes para la Segunda Generación.

Surgiendo bajo esta tecnología en el año de 1993 el sistema IS-95 (*Interim Standard 95*), siendo este el primer sistema en utilizar CDMA. Un año más tarde surge el sistema IS-136 (*Interim Standard 136*) como primer sistema con tecnología TDMA.

Es de hacer notar que esta segunda generación se caracterizó por ser del tipo digital, en vez de analógica como su predecesora. De esta manera, la digitalización brindó una reducción de tamaño⁶, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, así como nuevos servicios tales como identificador de llamadas, envío de mensajes cortos SMS (*Short Message Service*), mensajes de voz y una mayor capacidad de envío de datos desde dispositivos de fax y modem.

Por otro lado, los sistemas de telefonía celular de segunda generación alcanzaron una velocidad de intercambio de información de 9.6 kbps⁶, siendo esta velocidad superior para voz con respecto a la primera generación pero muy limitada para la transmisión de datos. En esta generación se lograron grandes avances en lo referente a seguridad, calidad de voz y de servicios de *roaming*.

En contraste a los beneficios que la segunda generación abarca, se puede mencionar que en 2G se presentan varios protocolos, los cuales son distintos entre sí, debido a que fueron desarrollados por varias compañías e incompatibles entre ellos, lo que limitaba el área de uso de los teléfonos móviles a las regiones con compañías que les dieran soporte.

2.2.1 Protocolos de telefonía 2G

Dentro de los sistemas de telefonía móvil celular de segunda generación destacan los siguientes protocolos:

- GSM (*Global System per Mobile Communications*), permite una velocidad de transferencia de datos máxima de 9,6 kbps.
- TDMA IS-136, también conocido como *Cellular PCS/IS-136*, TIA/EIA136 o ANSI-136. Este es un sistema regulado por la *Telecommunications Industry Association* o TIA. Emplea una técnica de división de tiempo de los canales de comunicación para aumentar el volumen de los datos que se transmiten simultáneamente. Esta tecnología se usa, principalmente, en el continente americano, Nueva Zelanda y en la región del Pacífico asiático.
- CDMA (*Code Division Multiple Access*) conocido como IS-95/cdmaONE. Utiliza una tecnología de espectro ensanchado que permite transmitir una señal de radio a través de un rango de frecuencias amplio.
- D-AMPS *Digital Advanced Mobile Phone System*.
- PHS (*Personal Handyphon System*). Sistema utilizado en un principio en Japón por la compañía NTT DoCoMo con la finalidad de tener un estándar orientado más a la transferencia de datos que el resto de los estándares 2G.

2.3 Segunda Generación y Media (2.5G), y Segunda Generación punto setenta y cinco (2.75G)

Para los sistemas de telefonía móvil celular, bajo esta clasificación no se encuentra ningún estándar o tecnología a los cuales se les pueda llamar propiamente 2.5G o 2.75G⁸, pero frecuentemente se le denomina así a algunos equipos móviles pertenecientes a la 2G que incorporan algunas de las mejoras y tecnologías del estándar 3G, tales como GPRS (2.5G) y EDGE (2.75G) los cuales se desempeñan en redes 2G con tasas de transferencia de datos de hasta 384 kbps, velocidades que son superiores a los teléfonos pertenecientes a la tecnología 2G regular pero inferior a la manejada por los equipos 3G.

2.4 Tercera Generación (3G)

En las generaciones anteriores se tenía como principal objetivo el brindar soporte a las comunicaciones de voz y a pesar de que pueden emplearse en la transmisión de datos a baja velocidad, no cumplen con los requerimientos para la transmisión de grandes cantidades de información a altas velocidades entre terminales inalámbricas y la red fija necesarios para las aplicaciones como videoconferencia, audio y video en tiempo real, conexión a Internet, entre otras.

Debido a lo anterior es que surgen entidades y una serie de normas, las cuales se describen a continuación, que especifican el funcionamiento que debe cumplir un sistema para poder ser considerado dentro de la tecnología 3G.

2.4.1 Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000)

A finales de los años ochenta la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU (*International Telecommunications Union*) formó un grupo de trabajo con el objetivo de valorar y especificar los requisitos de las normas celulares del futuro para la prestación de servicios de datos y multimedia a alta velocidad. A dicha iniciativa se le conoció originalmente con el nombre de FPLMTS (*Future Public Land Mobile Telecommunications System*). Posteriormente fue renombrada como IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*).

IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000) es la norma mundial para la tercera generación de comunicaciones inalámbricas (3G), definida por un conjunto de recomendaciones de la ITU. La IMT-2000 constituye un marco para el acceso inalámbrico a nivel mundial ya que permiten conectar diversos sistemas de redes terrestres y del tipo satelitales. La IMT-2000 aprovecha el potencial que representan las tecnologías y sistemas móviles digitales de telecomunicaciones en favor de los sistemas fijos y móviles de acceso inalámbrico.

Las actividades que realiza la ITU en lo referente a la IMT-2000 cubren la normalización internacional que incluye especificaciones sobre el espectro de radiofrecuencias de carácter técnico para las componentes radioeléctricas y de red, la asistencia técnica y los estudios sobre aspectos de reglamentación y política.

2.4.1.1 Recomendaciones para IMT-2000

Para que un sistema sea considerado dentro de los estándares 3G y ser interfase IMT-2000, debe cumplir con los siguientes aspectos:

- Calidad de voz comparable a la ofrecida por una red telefónica pública (PSTN).
- Velocidades de transmisión de datos de 144 kbps para usuarios en vehículos en movimiento, viajando a una velocidad de 120 Km/h.
- Velocidades de transmisión de datos de 384 kbps para peatones que se encuentren en un solo lugar o bien moviéndose sobre áreas pequeñas.
- Soporte para operaciones de 2.048 Mbps en oficinas, es decir en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores.
- Soporte para ambos servicios de datos: conmutación por paquetes y conmutación por circuitos.
- Soporte IP para acceso a Internet (navegación www, comercio electrónico, video y audio en tiempo real).
- Una interfaz adaptada para las comunicaciones móviles de Internet que permita un ancho de banda más grande para enviar información que para recibir, contando así con un ancho de banda dinámico en función de la aplicación y de esta manera optimizar el espectro de frecuencia con el que se dispone.
- Introducción suave de nuevos servicios y tecnologías.
- Capacidad de proveer servicios simultáneos a usuarios finales y terminales.
- *Roaming* internacional entre diferentes operadores y tipos de redes.

2.4.2 Telefonía Móvil 3G

Una vez establecidos los criterios para considerar un sistema de telefonía móvil como propio de la tercera generación, se puede describir el funcionamiento así como los servicios ofrecidos en esta tecnología.

Los servicios asociados con la tercera generación brindan la posibilidad de transferir tanto voz y datos (sobre una misma llamada telefónica) y datos no-voz (como la descarga de programas, intercambio de correo electrónico, y mensajería instantánea)⁹.

Ante el crecimiento de usuarios que buscan un servicio más eficiente, ya no solo de telefonía celular, sino además de acceso a servicios multimedia y transferencia de información, se ha provocado la saturación en la capacidad de los sistemas existentes. En otras palabras, la cantidad de usuarios que pueden compartir simultáneamente el ancho de banda sobrepasa las capacidades del sistema para mantener un nivel de calidad adecuado.

Fundamentalmente, la manera de contrarrestar el problema de capacidad en un sistema es el tener que hacer uso de otras bandas del espectro para alojar a un mayor número de usuarios, dividir las celdas existentes en otras más pequeñas y utilizar el recurso de reuso de frecuencias. Puesto que el espectro de radio es un recurso limitado y la separación de celdas es una alternativa muy cara debido a la infraestructura que se necesita, la única opción viable es el desarrollo de nuevas tecnologías.

Lo anterior provocó que se desarrollaran los estándares 3G, los cuales utilizan lo que se denominaba banda ancha para compartir el espectro entre usuarios. Con esto, se define un ancho de banda mayor (5 MHz)⁹, el cual permite incrementar las velocidades de descarga de datos y el desempeño de los equipos en general. Aunque inicialmente se especificó una velocidad de 384 kbps, la constante evolución de la tecnología permite ofrecer al usuario velocidades de descarga superiores a 3 Mbps.

Debido a lo anterior, es que para la implementación de las redes 3G las compañías operadoras necesitaron adquirir una licencia adicional para un espectro de frecuencias diferente al que tenían asignado en 2G, es por ello que la instalación de estas redes 3G en un inicio se dio de manera lenta.

2.4.2.1 Estándares en 3G

Como se indicó (sección 2.4.1), las tecnologías de 3G son la respuesta a la especificación IMT-2000 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Por otro lado, en Europa y Japón, se seleccionó el estándar UMTS (*Universal Mobile Telephone System*), el cual está basado en la tecnología W-CDMA (Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha).

EvDO es otra evolución muy común para las redes 2G y 2.5G basadas en CDMA2000.

2.5 Tercera generación y media (3.5G)

Al igual que para la segunda generación, en 3G existe un sistema que adopta características que sobrepasan las especificaciones propias de su generación.

El HSDPA (Acceso de Alta Velocidad del Paquete en Conexión de Bajada) es un protocolo de telefonía móvil de tercera generación, el cual excede las características comunes de la tecnología 3G.⁶

Este puede alcanzar velocidades de datos en el orden de los 8 a 10 Mbps. La tecnología HSDPA utiliza la banda de frecuencia de 5 GHz y codificación W-CDMA.

2.6 Resumen de las principales tecnologías hasta antes de 4G

A continuación se presenta una tabla resumen, en la cual se toman las distintas características de las principales tecnologías o estándares empleados en las generaciones hasta ahora descritas.

Tabla II. Resumen de los principales Sistemas de Telefonía Móvil Celular.

Generación	Estándar	Características
1G	AMPS (Sistema Telefónico Móvil Avanzado)	Primer estándar de redes celulares. Utilizada principalmente en el América, Rusia y Asia.
	TACS (Sistema de Comunicaciones de Acceso Total)	Versión para Europa de AMPS. Sistema dúplex en la banda de 900 MHz. Empleado en Inglaterra y luego en Asia (Hong-Kong y Japón, principalmente).
	ETACS (Sistema de comunicaciones de acceso total extendido)	Versión mejorada del estándar TACS desarrollado en el Reino Unido, utilizó una gran cantidad de canales de comunicación.
2G	GSM (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles)	Su primera funcionalidad es la transmisión de voz, y además permite la transmisión de datos a baja velocidad: 9.6 kbps. Limitaciones: Establecimiento lento de conexión, poco ancho de banda, simetría del enlace, coste excesivo.

	CDMA (Acceso Múltiple por División de Código)	Utiliza tecnología de espectro ensanchado, permite que un mayor número de usuarios compartan las mismas radiofrecuencias. Brinda mayor seguridad, mayor cobertura, y reducción del ruido e interferencia.
	TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo)	Emplea la técnica de división de tiempo de los canales de comunicación para así aumentar la cantidad de los datos que se transmiten simultáneamente.
2.5G	GPRS (Servicio General de Paquetes de Radio)	Se basa en la transmisión de paquetes y además los canales de comunicación se comparten entre los distintos usuarios de forma dinámica. Permite la transferencia de voz o datos digitales de volumen moderado con velocidades promedio de 40 Kbps.
2.75G	EDGE (Velocidades de Datos Mejoradas para la Evolución Global)	Tecnología que mejora el ancho de banda de la transmisión de datos en GSM y GPRS, considerada como precursora de UMTS. Permite la transferencia simultánea de voz y datos digitales, alcanzando velocidades de intercambio del orden de los 171 Kbps.
3G	UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles)	Emplea codificación W-CDMA (Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha). Emplea bandas de 5 MHz en la transferencia de voz y datos, con velocidades de datos que van desde los 384 Kbps a los 2 Mbps.
3.5G	El HSDPA (Acceso de Alta Velocidad de Conexión Descendente del Paquete)	Alcanza velocidades de datos en el orden de los 8 a 10 Mbps. Utiliza la banda de frecuencia de 5 GHz y codificación W-CDMA.

Es de hacer notar, que no todas las tecnologías desarrolladas por las distintas empresas de telefonía móvil celular han sido incluidas en la tabla anterior, ya que se considera que las tecnologías descritas se han tomado como base para el desarrollo posterior de nuevos servicios.

2.7 Factores determinantes en la evolución de 3G hacia 4G

Como características principales en la evolución de los sistemas pertenecientes a la 3G hacia la 4G, se tienen:

- Para el acceso de radio se abandona el acceso tipo CDMA característico de UMTS.
- Utilización de SDR (*Software Defined Radios*) para optimizar el acceso radio.
- La red completa prevista es toda del tipo IP.
- Las tasas de transferencia pico máximas previstas son de 100 Mbps para el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente (con espectros en ambos sentidos de 20 MHz).¹⁰

Por otro lado, existen componentes que se verán envueltos de manera significativa en el desempeño de las redes 4G, entre los cuales pueden mencionarse:

- Los nodos principales, los cuales dentro de la implementación 4G son el *Evolved Node B* (BTS evolucionada), y el *System Access Gateway*, que actuará también como interfaz a Internet, conectado directamente al *evolved node b*.
- Otro componente será el servidor RRM, este se utilizará para facilitar la interoperabilidad con otras tecnologías.

2.8 Cuarta generación (4G)

En un principio la cuarta generación 4G no contó con una definición cierta de lo que comprendía¹⁰, simplemente surgió como una idea ante la necesidad de cubrir de mejor manera las propiedades en el intercambio de información a través del IP aplicado a la telefonía móvil celular¹¹.

2.8.1 Qué es 4G?

En un principio y de manera sencilla, puede decirse que 4G fue catalogada como la siguiente generación de redes inalámbricas que reemplazarán a las redes 3G en un futuro próximo, o como le denominan algunas empresas de telefonía móvil "Más allá de 3G"¹⁰. Por otro lado, puede decirse que es una iniciativa planteada por los Laboratorios Académicos R&D con el fin de avanzar mas allá de los problemas y limitaciones que presenta la Tercera Generación.

Hacia la primera mitad del 2002, 4G se consideraba como una estructura conceptual o un punto de discusión para encaminar necesidades futuras de una red universal inalámbrica de alta velocidad, la cual se interconectará con la línea principal de las comunicaciones por vía alámbrica.

Desde el punto de vista de las grandes compañías como Motorola, Qualcomm, Nokia, Ericsson, Sun, HP, NTT DoCoMo, entre otras, 4G representa la esperanza e ideas de sus grupos investigadores, las cuales deben satisfacer las necesidades de SMS, multimedia y aplicaciones de video, en el caso de que las tecnologías 3G desarrolladas por dichas compañías no satisfagan las expectativas de los usuarios.

Posteriormente, con el desarrollo de las tecnologías el sistema 4G se plantea mas formalmente como la solución futura para IP en la cual voz, datos y multimedia estarán disponibles a los usuarios en cualquier momento y en cualquier lugar y con una velocidad mayor a la actual en la transferencia de datos.

2.8.2 Motivación de investigaciones para 4G, antes que 3G se haya implementado en su totalidad

El desempeño de la red 3G puede ser insuficiente al presentarse necesidades en un futuro de alto rendimiento en sus aplicaciones¹², tales como multimedia, intercambio en movimiento de video, tele conferencias inalámbricas.

Otro de los factores que motivo a plantear la existencia de una nueva generación antes de que sea puesta a prueba totalmente 3G, fue que en 3G existen múltiples estándares, haciendo con esto que las distintas compañías tengan dificultades para interactuar libremente en aplicaciones tales como el *roaming*. En otras palabras, se necesita tener una movilidad a nivel global y que los servicios sean transportables.

Por otro lado, se tiene el inconveniente que 3G se encuentra basada en el concepto de un área amplia principal. En contraste a las redes hibridas que se muestra serian muy útiles, las cuales emplean los conceptos de las redes inalámbricas LAN y el diseño de las redes de área amplia con estaciones base o células.

Otro factor importante fue la necesidad de un ancho de banda más amplio para 3G, así como el manejar redes que utilicen completamente paquetes en forma digital, las cuales emplean IP y que cubren las capacidades requeridas para el intercambio de voz y datos.

Dado lo anterior, los investigadores han alcanzado elaborar esquemas de modulación espectral más eficientes que no pueden ser alcanzados en la infraestructura 3G.

Para concluir con los aspectos que motivaron la creación de 4G, se muestra la tabla III, en la cual se comparan algunas características de la tercera generación y parte de la 2.5G contra la nueva y prometedora tecnología que comprende a la 4G.

Tabla III. Comparación de parámetros claves entre 4G y 3G.

	3G (Incluyendo 2.5G)	4G
Mayor requerimiento en la arquitectura de manejo.	Predominantemente se encamina la voz, los datos son agregados.	Incluir voz y datos sobre IP.
Arquitectura de red.	Célula basada en área amplia.	Hibrida. Integración de LAN inalámbrica (WIFI, BLUETOOTH) y área amplia.
Velocidades.	384 Kbps a 2 Mbps.	20 a 100 Mbps en modo móvil.
Banda de frecuencia.	Dependiendo del país o continente (1800-2400 Mhz).	Bandas de frecuencia más altas (2-8 Ghz).
Ancho de banda.	5-20 Mhz.	100 Mhz (o más).
Base de conmutación en el diseño.	Conmutación de circuitos y de paquetes.	Todo digital, con la voz paquetizada.
Tecnologías de acceso.	W-CDMA, 1XRTT, EDGE.	OFDM Y MC-CDMA (CDMA- Multi portadora).

Predicción para la corrección de error.	Rata convolucional 1/2, 1/3.	Esquema de codificación concatenado.
Diseño de componentes.	Diseño de antena optimizadas, adaptadores multibanda.	Antenas inteligentes, software multibanda y radios de banda ancha.
IP	Un número de protocolos de conexión inalámbrica, incluyendo IP 5.0.	Todo IP (IP6.0).

Fuente: http://www.mobileinfo.com/3g/4G_CommSystemArticle.htm

2.8.3 Necesidades que deben ser resueltas para la construcción de las redes 4G

Para lograr que las redes 4G no se vean truncadas en su desarrollo antes de su implementación, existe una diversidad de factores que deben ser considerados. Entre dichos factores se encuentran las decisiones para la localización del espectro¹², otro factor a considerar son las decisiones necesarias que lleven tanto a la estandarización como a la disponibilidad del espectro.

Por otro lado, tanto las innovaciones tecnológicas como el desarrollo de componentes se consideran como uno de los factores determinantes en la implementación de las redes 4G, además el procesado de las señales así como el tipo de switcheo y la cooperación entre las compañías deben tomar parte antes que la idea de 4G se vea implementada.

2.8.4 Estándares en 4G

Como se indico (sección 2.8), la cuarta generación no se encuentra definida como un estándar o tecnología específica, sino que puede considerarse como una colección de tecnologías y protocolos que permite alcanzar el máximo rendimiento y desempeño en el procesamiento con una red inalámbrica cuyo costo sea menor al de las redes ya existentes.

No obstante lo anterior, el WWRF (*Wireless World Research Forum*) plantea una definición para 4G¹⁰, la cual la considera como una red que funciona en la tecnología de Internet, combinándola con otros usos y tecnologías tales como Wi-Fi y Wi-MAX. El IEEE aún no ha establecido a cabalidad en que consiste la 4G, designándola nada mas como una tecnología “Más allá de la 3G”.

Como un adelanto a su época, en Japón ya se ha experimentando con las tecnologías de cuarta generación, siendo la empresa japonesa de telefonía DoCoMo la que ha presentado los móviles de cuarta generación que se encuentran en etapa de desarrollando¹⁰. Aunque se trata de prototipos, la empresa realizó una prueba real con ellos, en la cual se vieron 32 vídeos de alta definición mientras se viajaba en un automóvil a 20 km/h, con resultados bastante satisfactorios¹³, ya que (según la empresa) mientras el vehículo está en movimiento la velocidad de descarga alcanzada es de 100 Mbps, por otro lado, se considera que en estático la velocidad puede llegar a incrementarse hasta el orden de los Gbps. Tratando de mantenerse a la vanguardia del mercado, dicha empresa planea lanzar comercialmente los primeros servicios de 4G en el año 2010, mientras que en el resto del mundo se espera una implantación alrededor del año 2020.¹⁰

La tecnología 4G enmarcada dentro del concepto “Más allá de la 3G” incluye técnicas de avanzado rendimiento del espectro de radio como MIMO y OFDM. Dos de los términos que forman parte en la definición de la evolución de 3G, siguiendo la estandarización del 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*, la cual realiza la supervisión del proceso de elaboración de estándares relacionados con 3G), serán LTE (*Long Term Evolution*) para el acceso radio, y SAE (*Service Architecture Evolution*) para la parte núcleo de la red.

2.8.4.1 Estándares y protocolos IEEE 802.1x

2.8.4.1.1 IEEE 802.11 o Wi-Fi

El estándar IEEE 802.11 también conocido como Wi-Fi de IEEE, define el uso de los dos niveles inferiores de la arquitectura OSI (capas física y de enlace de datos), especificando sus normas de funcionamiento en una WLAN. En general, se tiene que los protocolos de la rama 802.x definen la tecnología para redes de área local.

Hasta la fecha, la familia del 802.11 incluye seis técnicas de transmisión por modulación, utilizando todas estas los mismos protocolos.¹⁴

El estándar original de este protocolo tuvo su origen en 1997, y fue el IEEE 802.11, el cual tenía velocidades de 1 hasta 2 Mbps y trabajaba en la banda de frecuencia de 2.4 GHz.

Posteriormente en 1999 apareció una nueva modificación y fue designada como IEEE 802.11b, esta especificación manejaba velocidades de 5 hasta 11 Mbps, al igual que su predecesora trabajaba en la frecuencia de 2.4 GHz.

Así mismo se realizó una especificación sobre una frecuencia de 5 Ghz que alcanzaba los 54 Mbps, era la 802.11a, esta tuvo el inconveniente de ser incompatible con los productos de la b y aunado a esto se tuvieron motivos técnicos para que casi no se desarrollaran productos de la misma.¹⁴ Posteriormente se añadió un estándar a esa velocidad y compatible con el b que se designo con el nombre de 802.11g. La versión final del estándar recoge las modificaciones más importantes sobre la definición original; incluye: 802.11a, b, d, e, g, h, i, j.

En la actualidad la mayoría de productos desarrollados son de las especificaciones b y g.

El siguiente paso se dará con la norma 802.11n (estándar que debía ser completado hacia finales de 2006 y cuya implementación se planeó hacia 2008), que sube el límite teórico hasta los 600 Mbps y emplea las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz, además se espera que el alcance de operación de las redes sea mayor con este nuevo estándar gracias a la implementación de la tecnología MIMO. Así mismo, es útil que trabaje en la banda de 5 GHz, ya que esta banda se encuentra menos congestionada, con lo cual se puede alcanzar un mayor rendimiento.

El primer estándar de la familia 802.11 que tuvo una amplia aceptación fue el 802.11b. Durante el 2005 la mayoría de los productos comercializados siguió el estándar 802.11g con compatibilidad hacia el 802.11b, puesto que estos estándares utilizan bandas de 2.4 GHz, no necesitan permisos para su uso. Por otro lado, las redes que trabajan bajo estos estándares pueden llegar a sufrir interferencias por parte de hornos de microondas, teléfonos inalámbricos y otros equipos que utilicen la banda de 2.4 GHz.

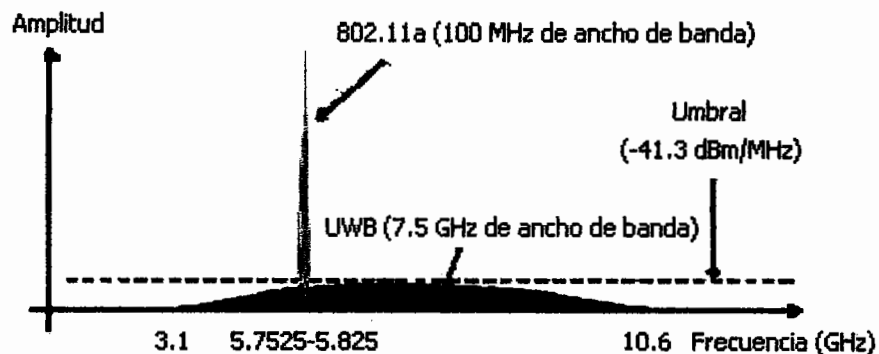
2.8.4.1.2 IEEE 802.15.3

Este estándar tiene como objetivo enmarcar a la tecnología cuyo campo de trabajo se encuentra en la ultra banda ancha UWB.¹⁵ El rango de operación para el estándar 802.15.3-2003, cuya aparición se tenía prevista para mayo del año 2008, es de 57 GHz a 64 GHz. El anterior rango de frecuencias no había sido utilizado anteriormente y se define por la FCC 47 CFR 15.255.

Por otro lado, se tiene el estándar 802.15.3a. Esta norma se encuentra definida entre 3.1 GHz y 10.6 GHz¹⁶, su distancia de cobertura alcanza los 10 metros, con una capacidad de envío de información desde 110 hasta 480 Mbps, cubriendo de esta forma las tasas necesarias para USB inalámbrico.

En la figura 7 se presenta el espectro en frecuencias para una señal UWB, comparada con una Wi-Fi.

Figura 7. Diagrama espectral de una señal UWB comparada con una Wi-Fi.



Fuente: Mandke, Ketan. *The evolution of ultra wide band radio for Wireless personal area network, high frequency electronics*. Página 22.

Como puede apreciarse, los límites de las emisiones en banda y fuera de la misma, se plantean de manera que se asegure que los dispositivos UWB no causen interferencia con los servicios y algunas operaciones de radio, tales como telefonía móvil celular, PCS, GPS, IEEE 802.11a y señales del tipo satelital.

El tipo de modulación empleada para los datos es modulación por pulsos. Existen dos propuestas para lograrlo, las cuales son:

- La primera plantea utilizar QPSK o BPSK combinada con DS-SS.
- Y la segunda QPSK combinada con OFDM para ocupar un ancho de banda más angosto, con lo cual se ocuparían 528 MHz de ancho de banda por canal.

En lo referente a su costo, puede decirse que tendrá un costo similar al de la tecnología Bluetooth.

2.8.4.1.3 IEEE 802.16a/e, WiMAX

Al estándar IEEE 802.16x también se le da el nombre de "*Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*"¹⁷, además conocida como WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). Surge de la inquietud de brindar servicio de Internet a grandes velocidades y con distancias de cobertura de hasta 50 Km.¹⁸ Al principio puede creerse que es una extensión de Wi-Fi, pero no es así, ya que Wi-Fi es para una red de área local diseñada para rangos cortos (aproximadamente hasta 100 metros) con el fin de distribuir Internet en hogares y oficinas.

La tecnología WiMax logra alcanzar una tasa de transmisión de hasta 75 Mbps¹⁹, con la salvedad de que puede ser punto a multipunto, teniendo como técnica de modulación 256 OFDM (combinando 64 QAM, 16 QAM y QPSK); por otro lado, el espectro de frecuencias originalmente estuvo comprendido entre 2.5 y 3.5 GHz, bandas que se trabajan bajo licencia, y también en bandas de 5 GHz (que no necesita licencia), posteriormente surgió la inquietud de operar en la banda de frecuencias de 10 a 66 GHz¹⁷.

Una de sus mejores ventajas es que su diseño fue desarrollado sin especificar alguna tecnología en especial para la conexión con el núcleo de la red, así mismo pensando en la coexistencia con los estándares ya desarrollados y que esta considerado para redes celulares en el servicio de datos¹⁸, razones por las cuales el IEEE ha llegado a considerarla como un sistema 4G.

2.8.4.1.3.1 Elementos de un sistema WiMAX

Los sistemas WiMAX básicamente están conformados por dos partes principales, las cuales son:

Estación Base (BS): también denominada torre WiMAX, aunque una estación base no necesariamente se encuentre instalada en una torre, también puede estar localizada en edificios terrazas o estructuras elevadas. Una estación base teóricamente puede cubrir un radio de hasta 50 kilómetros, pero realmente se considera una cobertura aproximada de 10 kilómetros.

El Receptor WiMAX: generalmente se le denomina con las siglas CPE (*Customer Premise Equipment*).

Consiste en una unidad localizada en cada equipo del usuario. Dicha unidad constituye el último segmento de la red WiMAX pues es la que permite todo el proceso de transferencia de información entre el usuario y la estación base (BS). Por otro lado, se tiene que un receptor WiMAX y su antena podrían estar contenidos dentro de una pequeña caja o tarjeta PCMCIA, o estar contruidos en un equipo portátil tal como se tiene acceso a las redes Wi-Fi.

La razón por la cual solamente se consideran estos dos componentes, es que los estándares 802.16 no especifican alguna tecnología en especial para la conexión con el núcleo de la red.²⁰

2.8.4.1.3.2 Evolución de Wimax

Al igual que todos los sistemas descritos anteriormente, el estándar WiMAX posee ciertas variantes que se han venido desarrollando por los fabricantes a manera de cubrir ciertas necesidades que se han presentado y sus predecesores no han logrado cubrir a cabalidad. A continuación se presenta la tabla IV, la cual contiene las distintas evoluciones que ha sufrido.

Tabla IV. Evolución de WiMAX.

Estándar	Descripción
802.16	Emplea el espectro licenciado que se encuentra en el rango de 10 a 66 GHz, utiliza línea de visión directa, posee capacidad de hasta 134 Mbps en celdas entre 3.22 a 8.05 kilómetros.
802.16a	Aplicación del estándar anterior en las bandas de 2 a 11 GHz, con sistemas NLOS y LOS.
802.16c	Ampliación del 802.16 que define las características y especificaciones en la banda de 10 a 66GHz.

802.16d	Revisión del 802.16 y 802.16a con el fin de implementar los perfiles aprobados por el WiMAX Forum. Fue aprobado bajo el nombre de 802.16-2004 en junio de 2004 (se considera la última versión de este estándar)
802.16e	Extensión del 802.16, incluye la conexión de banda ancha nomádica para elementos portátiles. Fue publicado en diciembre de 2005.

2.8.4.2 MIMO (*Multiple-input Multiple-output*)

Este término se refiere específicamente a la forma como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para distintos tipos de dispositivos inalámbricos.

Es sabido que en la transmisión inalámbrica de señales, estas se ven afectadas por distintos factores tales como interferencias de tipo ambientales, así como del tipo reflectivas, entre otras, lo que provoca que la calidad en el nivel de la transmisión se vea degradado, provocando con ello la pérdida de información.

Los sistemas MIMO aprovechan fenómenos físicos como la Propagación Multicamino para así incrementar la Tasa de Transferencia de información, empleando distintos canales en la transmisión de datos o la Multiplexación Espacial (por contar con antenas físicamente separadas) y reducir con ello la Tasa de Error. En resumen MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización del Dominio Espacial.²¹

2.8.4.2.1 Clasificación de la Tecnología MIMO

En la siguiente tabla, se presentan y describen las distintas versiones en las que se puede clasificar la tecnología MIMO que han logrado desarrollarse.

Tabla V. Versiones de la tecnología MIMO.

Versión	Descripción
MIMO	<i>Multiple input multiple output</i> , esta se presenta cuando el transmisor como receptor poseen varias antenas.
MISO	<i>Multiple input Single output</i> , se tienen esta versión cuando se cuenta con varias antenas de emisión pero únicamente una en el receptor.
SIMO	<i>Single input multiple output</i> , en el caso de una única antena de emisión y varias antenas en el receptor.

Dependiendo de la tecnología MIMO que se vaya a utilizar, se emplea uno u otro conjunto de antenas de la tabla V.

Además de la clasificación anterior, la tecnología MIMO puede incorporarse principalmente a tres categorías, las cuales se describen a continuación:

Beamforming: Consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en distintas antenas. Sus principales ventajas son una mayor ganancia de señal además de una menor atenuación con la distancia. Debido a la ausencia de dispersión el *beamforming* da lugar a un patrón bien definido pero con el inconveniente de ser direccional.

En este tipo de transmisiones se hace necesario el uso de dominios de *beamforming*, sobre todo en el caso de múltiples antenas de transmisión. Además se debe tener en cuenta que el *beamforming* requiere el conocimiento previo del canal a utilizar en el transmisor.

Multiplexación espacial (*Spatial multiplexing*): Consiste en la multiplexación de una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda iguales, transmitidas desde distintas antenas.

Si estas señales llegan con la suficiente separación en el tiempo al receptor se encuentra en la capacidad de distinguirlas, creando así múltiples canales en anchos de banda mínimos.

Esta técnica es bastante eficiente para aumentar la tasa de transmisión, sobre todo en entornos hostiles a tal grado de mejorar el nivel de relación señal ruido. Por otro lado, este método se ve limitado por el número de antenas disponibles tanto en el receptor como en el transmisor. En contraste con el anterior, no requiere el conocimiento previo del canal en el transmisor o receptor.²¹

Diversidad de código: Consiste en una serie de técnicas que se emplean en medios en los que por alguna razón solamente puede emplearse un único canal, codificando la transmisión mediante espaciado en el tiempo y la diversidad de señales disponibles, dando lugar al código Espacio-Tiempo. La emisión desde varias antenas basándose en principios de ortogonalidad es aprovechada para aumentar la diversidad de la señal.

2.8.4.2.2 Aplicaciones de la tecnología MIMO

Para concluir, se tiene que el estándar en desarrollo IEEE 802.11n utilizará esta tecnología para así lograr velocidades de hasta 600 Mbps²¹, esto es un poco más 10 veces el límite teórico del 802.11g (54 Mbps), el cual es el protocolo de red inalámbrico más utilizado desde junio del 2003. Además, está planeada su utilización en los terminales de la red 4G.

2.8.5 Técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

Es un método para la transmisión de multiportadoras en banda ancha, caracterizado por el uso eficiente de las frecuencias transmitidas a altas velocidades. Esta tecnología se emplea para la Radiodifusión Digital Terrestre, sistemas de LAN inalámbricos como IEEE 802.11^{a23}, así como módems, por mencionar algunos ejemplos.

Puesto que la técnica OFDM incluye tecnología para la división ortogonal de señales, las señales multiportadoras pueden espaciarse de manera estrecha sin temor a que su propagación se vea sujeta a interferencias, incluso cuando el solapamiento parcial tiene lugar. Por consiguiente, OFDM permite utilizar las frecuencias estrechas más eficazmente.

Este método trae consigo dos beneficios primordiales, los cuales son:

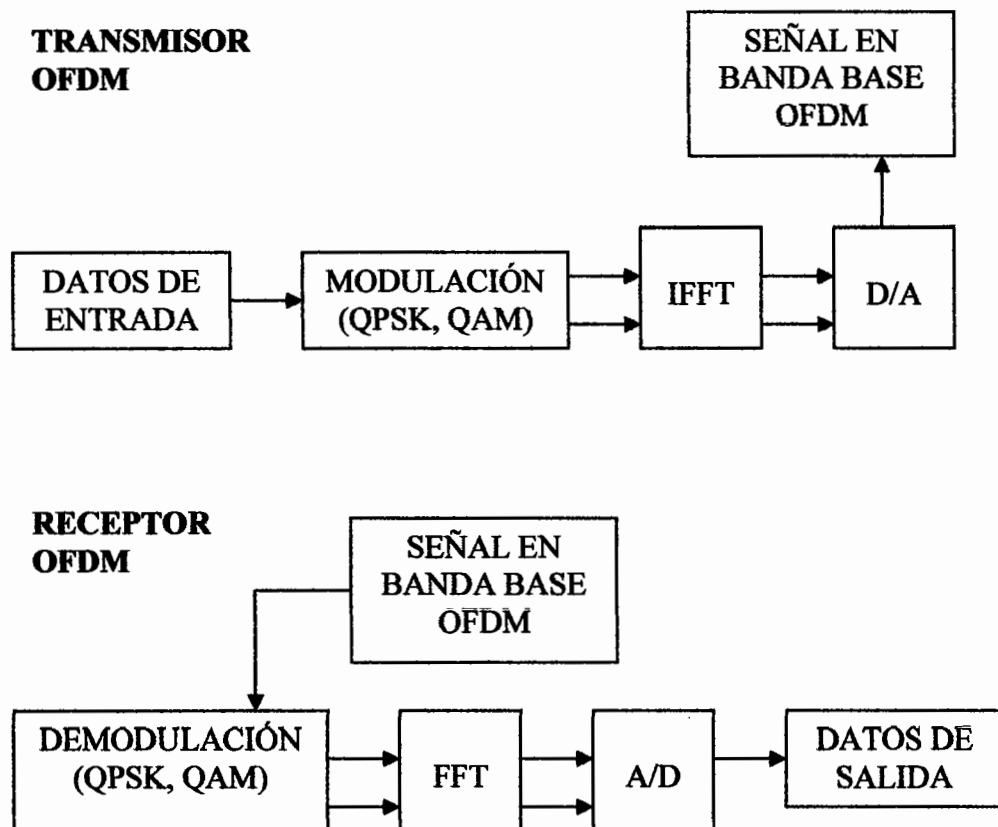
- Flexibilidad: cada transceptor (transmisor/receptor) tiene acceso a todas las subportadoras.
- Fácil ecualización: los símbolos OFDM presentan la particularidad de ser más largos que el máximo retardo, resultando en un canal plano de ensombrecimiento, que puede ser fácilmente ecualizado.

La amplitud y la fase que requiere la portadora se calculan en base al esquema de modulación que se emplee (BPSK, QPSK, o QAM regularmente).

En el siguiente capítulo se presenta con más detalle esta técnica de modulación, ya que se considera pertinente el describirla, puesto que forma parte importante en la cuarta generación de sistemas de comunicación inalámbricos.

A continuación se muestra (figura 8) un diagrama de bloques simplificado, del sistema transmisor y receptor empleado en OFDM.

Figura 8. Diagramas De bloques: Transmisor y Receptor OFDM.

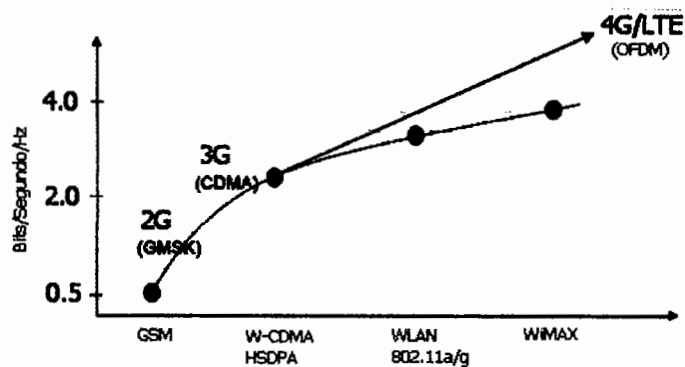


3. TÉCNICA DE MODULACIÓN OFDM

3.1 OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

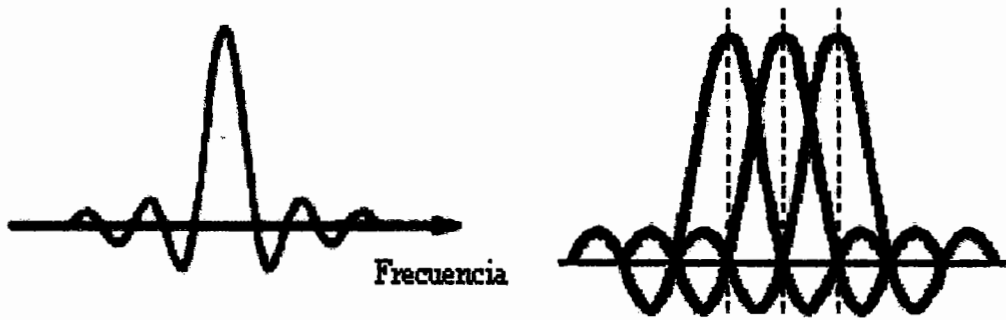
La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, (OFDM), también conocida como Modulación por Multitono Discreto (*Discrete Multi tone Modulation*, DMT), es una modulación en la cual cada subportadora es ortogonal al resto, y tiene como finalidad el enviar un conjunto de las mismas en diferentes frecuencias, siendo transmitida en cada banda una subportadora que transporta una porción de la información del usuario, y puede ser modulada en QAM o en PSK.²⁴ Por otro lado, como cada subportadora es ortogonal al resto, se puede colocar el espectro de manera traslapada sin que esto lleve a interferencias (*cross talk*) e incluso aumentando la eficiencia del uso espectral (figura 9) debido a que no se utilizan bandas de separación entre subportadoras, tal como se muestra en la figura 10 en la siguiente página.

Figura 9. Eficiencia espectral OFDM.



Fuente: http://www.cs.vu.nl/~costa/cn_slides/ofdm.pdf

Figura 10. Subportadoras ortogonales en OFDM.



a) Una sola portadora OFDM.³⁰

b) Señal multiportadora OFDM.³¹

Normalmente se realiza la modulación OFDM luego de pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, entonces esta modulación se denomina COFDM, del inglés *Coded OFDM*.

Debido al problema técnico que supone la generación y la detección en tiempo continuo de los cientos, e incluso miles, de portadoras equiespaciadas que forman una modulación OFDM, los procesos de modulación y demodulación se realizan en tiempo discreto mediante la IDFT (Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto) y la DFT (Transformada de Fourier en tiempo discreto) respectivamente²⁴.

3.1.1. Características y principios de operación de la modulación OFDM

3.1.1.1 Ortogonalidad

En OFDM, las frecuencias subportadoras se escogen de manera que estén ortogonales unas con otras, teniéndose con esto que el *cross-talk* entre los subcanales es eliminado y no se requieren bandas de guarda de interportadoras.²⁵

Lo anterior simplifica grandemente tanto el diseño del transmisor como el del receptor; en contraste con un sistema FDM, no se requiere un filtro separado para cada subcanal.

Además, requiere que las subportadoras estén espaciadas en frecuencia por la distancia:

$$\Delta f = \frac{k}{T_u}, \text{ Hz} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde T_U es la duración útil del símbolo en segundos (el tamaño de la ventana en el receptor), y k es un entero positivo, normalmente igual a uno. Por consiguiente, con N subportadoras, el ancho de banda total de la banda de paso será:

$$B \approx N \cdot \Delta f, \text{ Hz.} \quad (\text{Ecuación 4})$$

La ortogonalidad también permite alta eficiencia espectral, con una tasa de símbolo total cercana a la tasa de Nyquist, por lo que casi toda la banda de frecuencia disponible puede utilizarse.²⁵

3.1.1.2 Implementación que emplea el algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*)

La ortogonalidad permite, además de lo expuesto anteriormente, que para lograr un empleo eficiente de un modulador y un demodulador el utilizar un algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) en el lado del receptor, y uno IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) en el transmisor. Aunque los principios y algunos de los beneficios han sido conocidos desde 1960²⁵, OFDM ha tomado carácter popular para comunicaciones de banda ancha hoy en día, debido al bajo costo de los componentes empleados para el procesado de señales digitales que pueden calcular eficientemente la FFT.

3.1.1.3 Intervalo de guarda para la eliminación de la interferencia intersimbólica

Un principio importante de OFDM es que a partir de que los esquemas de modulación de baja tasa simbólica (es decir, donde los símbolos son relativamente largos comparados a las características de tiempo de canal) sufra menos de interferencia intersimbólica causada por multitrayectorias. A partir de que la duración de cada símbolo es larga, es factible insertar un intervalo de guarda entre los símbolos OFDM²⁶, eliminando de esta manera la interferencia intersimbólica.

El intervalo de guarda además elimina la necesidad de un filtro pulso-formando, y reduce la sensibilidad a los problemas de sincronización. Durante este intervalo se transmite un prefijo cíclico, que consiste en el extremo del símbolo de OFDM copiado en el intervalo de guarda, y el intervalo de guarda se transmite seguido por el símbolo de OFDM.

La razón para que el intervalo de guarda consista en una copia del extremo del símbolo de OFDM (Véase figura 13), es debido a que el receptor integrará sobre un número entero de ciclos sinusoidales para cada una de las multitrayectorias cuando se realiza la demodulación de OFDM con el FFT.²⁵

3.1.1.4 Ecuación simplificada

Los efectos de la selectividad de frecuencia debidos a las condiciones del canal, por ejemplo al desvanecimiento causado por propagación de multitrayectoria, pueden ser considerados como constantes sobre un subcanal OFDM si este es lo suficientemente estrecho en banda, es decir si el número de subcanales es suficientemente grande.

Lo anterior hace una ecualización más simple en el receptor en OFDM comparado con la modulación convencional de una sola portadora. El ecualizador sólo tiene que multiplicar cada subportadora detectada (es decir, cada coeficiente de Fourier) por un número complejo constante, o un valor raramente cambiado.²⁵

Algunas de las subportadoras en algunos de los símbolos de OFDM pueden llevar señales piloto, esto con el fin de tomar mediciones de las condiciones del canal, por ejemplo la ganancia del ecualizador y el cambio de la fase para cada subportadora. Las señales piloto y símbolos de entrenamiento pueden utilizarse para la sincronización de tiempo (y con esto evitar interferencia intersimbólica, ISI) y sincronización de frecuencia (para evitar interferencia interportadora, ICI, causadas por cambios Doppler).²⁵

Si la modulación diferencial tal como DPSK o DQPSK se aplica a cada subportadora, la ecualización puede omitirse totalmente, sabiendo que estos esquemas no coherentes son insensibles a cambios lentos de amplitud y distorsión de la fase.

3.1.1.5 Canal codificando y entrelazando (*coding and interleaving*)

OFDM es repetidamente utilizado juntamente a la codificación del canal (predicción en la corrección del error), y casi siempre emplea frecuencia y/o entrelazando en el tiempo.

El entrelazando de frecuencia (uso de subportadora) aumenta la resistencia a las condiciones del canal tales como selectividad de frecuencias y desvanecimiento.

Por otro lado, el entrelazando de tiempo asegura que los bits que se encuentran juntos en la trama de bits original se transmitan lejos a intervalos de tiempo distintos, atenuando así el efecto de desvanecimiento (*fading*) severo como pasarían con transmisiones a alta velocidad.

Sin embargo, el entrelazado en el tiempo no aporta mayor beneficio ante poco desvanecimiento del canal, tal como para la recepción estacionaria, de igual forma el entrelazado de frecuencia ofrece entre poco a ningún beneficio para canales de banda estrecha que padecen desvanecimiento en el punto mas bajo de la señal (región en la cual todo el ancho de banda del canal se debilita al mismo tiempo).

La razón de que el entrelazando (*interleaving*) se emplee en OFDM radica en que se intenta esparcir los errores fuera de la trama de bits que se presenta al decodificador encargado de la corrección de error, ya que cuando los decodificadores se presentan con una alta concentración de errores de bit, ocurre un *burst* de errores no corregidos.

Un tipo común de corrección del error codificado utilizado con sistemas basados en OFDM es la codificación convolucional, la cual es frecuentemente concatenada con la codificación Reed-Solomon. El codificado convolucional se usa como el código interno y el código Reed-Solomon se emplea para el código exterior (usualmente con entrelazado adicional entre las dos capas a codificar). La razón por la cual esta combinación de codificación para la corrección de error se emplea es que el decodificador Viterbi utilizado para la decodificación convolucional, produce pequeños saltos de error cuando existe una alta concentración de los mismos, y los códigos Reed-Solomon son relativamente satisfactorios para la corrección de esos saltos de error.

3.1.1.6 Transmisión adaptable

El resalto a algunas condiciones severas del canal puede reforzarse más allá si se envía información relativa al canal sobre un canal de retorno. Con base en la retroalimentación de información, la modulación adaptativa, la codificación del canal y la asignación de potencia puede aplicarse a todas las subportadoras, o de manera individual a cada subportadora. En el último de los casos, si un rango particular de frecuencias sufre interferencia o atenuación, pueden desactivarse las portadoras dentro de ese rango o hacerse correr más lento aplicando modulación más robusta o codificación para la corrección de error a esas subportadoras²⁵.

La modulación discreta multitono (DMT) indica sistemas de comunicación basados en OFDM que adaptan la transmisión a las condiciones del canal individualmente para cada subportadora, por medio de la llamada carga de bit. Ejemplos de estos son ADSL y VDSL.²⁷

Las velocidades de encendido y apagado pueden ser variadas asignando a más o a menos portadoras para cada propósito. Algunas formas de ratas adaptativas DSL emplean esta característica en tiempo real, para que la rata de bit se adapte a la interferencia del cocanal y el ancho de banda se asigna a cualquier suscriptor o usuario que más lo necesite.

3.1.1.7 Diversidad espacial

En OFDM basado en transmisiones de área ancha, los receptores pueden beneficiarse de las señales recibidas simultáneamente de algunos transmisores espacialmente dispersos, a partir que los transmisores sólo interferirán destructivamente entre sí en un número limitado de subportadoras, mientras que en general ellos reforzarán la cobertura sobre un área amplia. Lo anterior es beneficioso en muchos países, ya que permite el funcionamiento de una red sobre una sola frecuencia nacional (SFNs), las SFNs utilizan el espectro disponible más eficazmente que las redes de transmisión de multifrecuencia convencionales (MFN),²⁵ asimismo producen una diversidad de ganancia en receptores localizados a la mitad del camino entre los transmisores. El área de cobertura se incrementa y la probabilidad de falla disminuye comparada con una MFN, debido a que aumenta la potencia de la señal recibida promediada con todas las subportadoras.

Aunque el intervalo de guarda sólo contiene datos redundantes, lo que significa que reduce la capacidad, algunos sistemas basados en OFDM, entre ellos algunos de los sistemas de radiodifusión, utilizan intencionalmente un intervalo de guarda largo para así lograr espaciar los transmisores lo suficientemente aparte en un SFN, y los intervalos de guarda más largos permiten tamaños de célula en un SFN más grandes. Una regla válida para establecer la distancia máxima entre transmisores en un SFN es tomar una distancia igual a la distancia viajada por la señal durante el intervalo de guarda.

Las redes de una sola frecuencia son una forma de macro diversidad del transmisor. El concepto puede utilizarse más allá en redes de dinámicas de una sola frecuencia (DSFN), donde el SFN agrupado se cambia de *timeslot* a *timeslot*²⁵.

Por otra parte, OFDM puede combinarse con otras formas de diversidad espacial, tales como los arreglos de antenas y los canales MIMO, lo cual se realiza en el estándar inalámbrico IEEE 802.11n (sección 2.8.4.1.1).

3.1.1.8 Amplificador lineal de potencia del transmisor

Una señal OFDM muestra una alta proporción promedio a pico de potencia (PAPR, factor de cresta), ya que las fases independientes de las subportadoras se combinarán constructivamente. El manejo de este PAPR alto requiere:

- Una alta resolución del convertor digital a analógico (DAC) en el transmisor.
- Una alta resolución del convertor analógico a digital (ADC) en el receptor.
- Una cadena de señal lineal.

Cualquier no linealidad existente en la señal causará distorsión de intermodulación, con lo cual se tiene:

- Aumentos en el ruido de fondo.
- Puede causar interferencia de interportadora.
- Genera radiación espuria fuera de banda.

El requisito de linealidad es exigente, sobre todo para la circuitería del transmisor RF, donde los amplificadores se diseñan a menudo para ser no lineales y con ello minimizar el consumo de potencia. En sistemas OFDM prácticos una pequeña cantidad de rizado es permitido con el fin de limitar el factor de cresta²⁶ (PAPR) en un manejo conveniente para la prevención de las consecuencias anteriores.

Sin embargo, el filtro a la salida del transmisor, el cual es necesario para reducir la probabilidad que se presente fuera de banda en los niveles propios, tiene el efecto de restaurar los niveles pico que se incluyeron, así que incluir el rizado no es una manera eficaz de reducir el factor de cresta (PAPR).

Aunque la eficiencia espectral de la modulación OFDM es muy atractiva para comunicaciones terrestres y espaciales, los altos requisitos en el manejo del factor de cresta han limitado aplicaciones de OFDM hasta ahora a los sistemas terrestres.

La modulación OFDM es muy robusta frente al multitrayecto (*multi-path*), que es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias de RF²⁷.

Debido a las características de esta modulación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales con distintos retardos y amplitudes (*fading*) que llegan al receptor, por lo que existe la posibilidad de crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia.

3.1.1.9 Ventajas y desventajas de OFDM

Una vez establecidas las características fundamentales de la técnica de modulación OFDM, se presentan a continuación, a manera de resumen, sus principales ventajas y desventajas.

Ventajas:

- Incremento en la eficiencia, debido a que el espaciamiento entre portadoras es reducido (las portadoras ortogonales se solapan).
- Ecuación simplificada o eliminada.
- Mayor resistencia al desvanecimiento.
- La tasa de transferencia de datos puede ser escalada a las condiciones.
- Redes de una sola frecuencia son posibles, para las aplicaciones de transmisión.

Desventajas:

- Promedio de cresta más alto.
- Mayor sensibilidad al ruido de fase, cronometrado y desplazamientos de frecuencia.
- Mayor complejidad.
- Transmisores y receptores más costosos.

- Reducción en la eficiencia de la ganancia debido al requerimiento para el intervalo de guarda.

3.2 Modelo idealizado del sistema

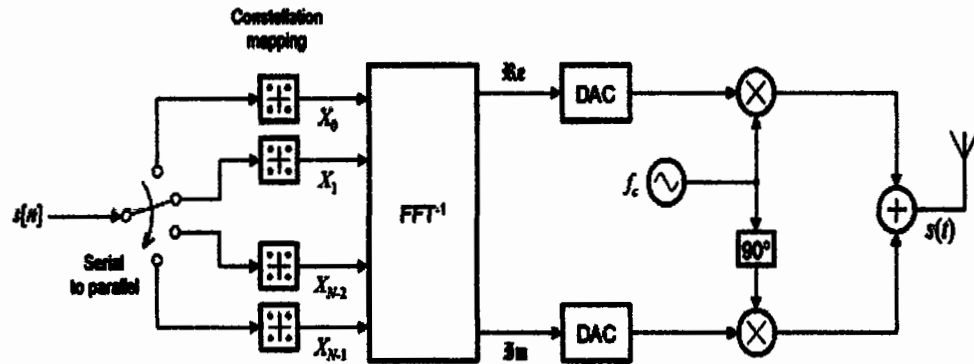
A continuación se describe un modelo de sistema OFDM idealizado, sencillo y de alguna manera conveniente para un canal invariante con el tiempo.

3.2.1 Transmisor

Una señal portadora OFDM es la sumatoria de varias subportadoras ortogonales, con datos en banda base en cada subportadora, modulándose independientemente utilizando por lo regular algún tipo de modulación de amplitud en cuadratura (QAM) o codificación de cambio de fase (PSK)²⁸. Esta señal de banda base compuesta se emplea para modular a una portadora de RF principal.

En la figura 11, se tiene la representación en diagrama de bloques de un sistema transmisor que utiliza OFDM, donde $s_{[n]}$ es una trama serial de datos binarios. Por multiplexado inverso, éstos bits son primero demultiplexados en N tramas paralelas, y cada uno mapeado en una (posiblemente compleja) trama de símbolos que utiliza alguna constelación de la modulación empleada (QAM, PSK, etc.). Es de hacer notar que las constelaciones pueden ser diferentes, y por ende algunas tramas pueden llevar una tasa de bit más alta que otras.

Figura 11. Diagrama de bloques de un sistema transmisor OFDM.



Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:OFDM_transmitter_ideal.png

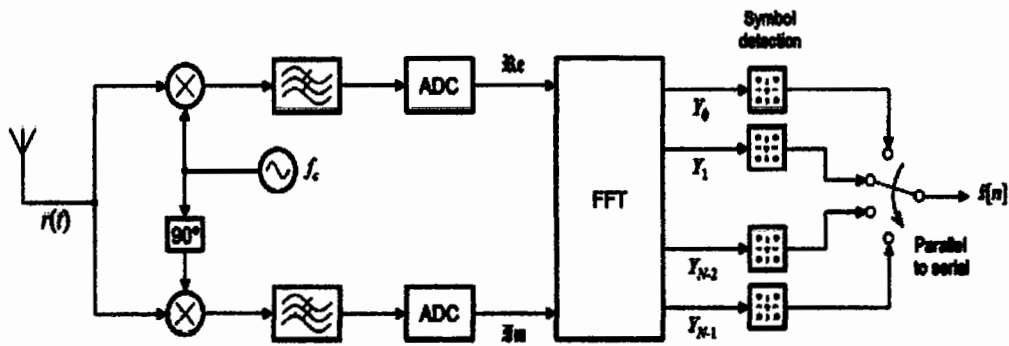
Posteriormente un FFT inverso procesa cada serie de símbolos, dando así un juego de muestras en el dominio del tiempo complejo. Estas muestras son mezcladas en cuadratura en la banda de paso de manera normal. Luego, los componentes reales e imaginarios se convierten primero al dominio análogo utilizando los conversores de digital a análogo (DACs); las señales análogas (reales e imaginarias) se emplean para modular a una frecuencia igual a la frecuencia portadora f_c , ondas coseno y seno respectivamente. Finalmente estas señales se suman para alcanzar la señal a transmitir, $s(t)$.

3.2.2 Receptor

En el extremo receptor, se recoge la señal $r(t)$ la cual es entonces mezclada en cuadratura para obtener la señal de banda base utilizando ondas cosenoidales y senoidales, las cuales se encuentran operando a la frecuencia portadora. Esto crea también señales centradas en $2f_c$, así que se emplean filtros paso bajo para rechazar estas réplicas. Las señales en banda base son muestreadas y digitalizadas usando conversores digital a análogo (ADCs), y un FFT posterior es empleado para reconvertir la señal al dominio de frecuencia.²⁸

Lo anterior entrega N tramas paralelas, cada una de las cuales es convertida a una trama binaria utilizando un detector de símbolo apropiado. Estas tramas se recombinan en una trama serial $S_{[n]}$, la cual es una aproximación de la trama binaria original en el transmisor. La explicación anterior corresponde a lo mostrado en la figura 12.

Figura 12. Diagrama de bloques de un sistema receptor OFDM.



Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:OFDM_receiver_ideal.png

3.3 Breve descripción matemática

Si se emplean N subportadoras ortogonales entre si, y cada subportadora es modulada utilizando M símbolos distintos, luego el alfabeto simbólico OFDM consiste de M^N combinaciones de símbolos. Entonces cada subportadora de banda base se plantea de la siguiente forma:

$$\phi_k(t) = e^{j2\pi kt/T} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde k/T es la frecuencia de la k -ésima subportadora. Por otro lado, se tienen los símbolos OFDM (sin un prefijo cíclico) que multiplexan N subportadoras moduladas:

$$v_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \phi_{k(t)}, 0 \leq t < NT \quad (\text{Ecuación 6})$$

De manera parecida, para el receptor, la señal equivalente OFDM se expresa de la siguiente forma:

$$v_{(t)} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \phi_{k(t)}, 0 \leq t < T \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde X_k corresponde a los símbolos de los datos, N es el número de subportadoras, y T es el tiempo de símbolo OFDM. El espaciado entre subportadoras de $1/T$ las hace ortogonales sobre cada periodo de símbolo; esta propiedad se expresa como:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \int_0^T (e^{j2\pi k_1 t/T})^* (e^{j2\pi k_2 t/T}) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi(k_2 - k_1)t/T} dt = \delta_{k_1 k_2} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde $(\bullet)^*$ denota al operador complejo conjugado y δ es la delta de Kronecker.

Para evitar la interferencia intersimbólica en canales que se desvanecen por las multitrayectorias, un intervalo de guarda de duración T_g es insertado en la parte anterior del bloque OFDM. Durante este intervalo, un prefijo cíclico se transmite de manera que la señal en el intervalo $T_g \leq t < 0$ iguala la señal en el intervalo $(T - T_g) \leq t < T$. Por consiguiente, la señal OFDM con prefijo cíclico es entonces:

$$v_{(t)} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \phi_{k(t)}, -T_g \leq t < T \quad (\text{Ecuación 9})$$

La señal paso bajo dada en la ecuación 9 puede ser valuada en el dominio real o complejo. Valuada en dominio real, las señales paso bajo equivalentes se transmiten típicamente en aplicaciones alámbricas para banda base como por ejemplo DSL que emplea esta aproximación. Por otro lado, para las aplicaciones inalámbricas, la señal paso bajo por lo regular se valúa en el dominio complejo; en cuyo caso, la señal transmitida se reconvierte a una frecuencia igual a la de la portadora f_c .

Para concluir con esta descripción matemática, se tiene que, en general, la señal transmitida puede representarse como se indica en la ecuación 10.

$$s_{(t)} = \frac{1}{2} \text{R}\{v_{(t)} e^{j2\pi f_c t}\}$$

(Ecuación 10)

$$s_{(t)} = \sum_{k=0}^{N-1} |X_k| \cos(2\pi[f_c + k/T]t + \arg[X_k])$$

3.4 Otras versiones de OFDM

Se tienen distintas versiones de la técnica de modulación OFDM, las cuales incorporan ciertas características tecnológicas con las que logran vencer diversas limitaciones, a continuación se dará una descripción de algunas de las versiones desarrolladas OFDM y que han sido modificadas para cumplir con el fin ya mencionado.

3.4.1 VOFDM

OFDM Vectorizada, utiliza el concepto de la tecnología MIMO²⁹, con lo cual se incrementa la tolerancia del sistema al ruido, a la interferencia, y a las señales que toman múltiples trayectorias; por otro lado, se encontraba a finales del 2007 en estado de desarrollando por los Sistemas Cisco.

La implementación de los sistemas que utilicen VOFDM involucra realizar las siguientes funciones:

- En los sistemas OFDM, la rata o tasa de datos y la extensión a la tolerancia al retraso es programable. El filtrado lineal y cíclico se realizan por medio de filtros óptimos FIR.

- La estimación del canal. Una aproximación óptima es utilizada empleando modo de entrenamiento de detección del *Burst*.
- Sincronización. El cronometro y la frecuencia recuperada son robustos.
- Procesado espacial. En el sistema VOFDM, el procesado espacial es conocido como Cancelación de la Interferencia.³²
- Codificado. Se utilizan los métodos de Convolución y Reed-Solomon de manera concatenada. La razón Señal a Ruido de Interferencia del Pulso (SINR) pesa para cada *bit* transmitido.

3.4.2 BST-OFDM.

La versión BST-OFDM (*Band Segmented Transmission Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) fue propuesta por Japón, para los sistemas de comunicaciones ISDB-T, ISDB-TSB e ISDB-C.

Este sistema presenta mejoras utilizando COFDM, aprovechándose de que algunas portadoras OFDM pueden modularse de manera diferente a otras, incluyendo la misma multiplexación. Algunos tipos de COFDM ya ofrecen este tipo de modulación jerárquica, aunque parece ser que BST-OFDM lo hace más flexible. Muestra de ello, es que el canal de televisión de 6 MHz puede ser “segmentado”, y con segmentos diferentes ser modulado de otra manera y empleado para diferentes tipos de servicios.

3.4.3 WOFDM

OFDM de banda ancha, desarrollada por Wi-Lan, despliega espacio lo suficientemente grande entre los canales para que cualquier error de frecuencia entre el transmisor y el receptor no tenga efecto en el desempeño del sistema.

3.4.4 UWB-OFDM

Sus siglas corresponden a: *Ultra Wideband* OFDM. Así como OFDM Multibanda (MB-OFDM), esta especificación de UWB es adoptada por la compañía WiMedia Alliance, siendo a finales del año 2008 una de las interfaces de radio UWB-OFDM más competitivas del mercado. En este tipo de modulación, OFDM tiene una ventaja adicional³³, la cual consiste en su habilidad para evitar interferencias en transmisiones de portadoras significativamente alteradas o dañadas de banda estrecha.

3.4.5 Flash OFDM

Sus siglas en ingles corresponden a: *Fast Low-latency Access with Seamless Handoff Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. También es conocida como F-OFDM (*fast-hopped* OFDM). Es un sistema basado en OFDM para los canales de radio de 1.25 MHz, y es totalmente IP, implementando funciones de voz empleando VoIP; además utiliza tonos múltiples y cambio rápido entre celdas (*fast hopping*) para esparcir señales sobre una banda espectral dada. También especifica capas más altas del protocolo. Se ha desarrollado y comercializado por la compañía Flarion *Technologies*.

Flash-OFDM ha creado interés comercialmente, como un sistema celular que emplea la conmutación de paquetes, campo en el que competiría con los sistemas GSM y las redes 3G.

3.4.6 OFDM extendido con acceso múltiple (OFDMA)

OFDM en su forma más simple es considerada como una técnica de modulación digital, y no una técnica de acceso multiusuario, a partir de que se utiliza para transferir una trama de bits sobre un canal de comunicación utilizando una secuencia de símbolos OFDM. Sin embargo, OFDM puede combinarse con acceso múltiple empleando tiempo, frecuencia o codificando por medio de la separación de los usuarios.

Es por ello que, en Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA), el acceso múltiple por división de frecuencia es alcanzado asignando diferentes subcanales OFDM a los distintos usuarios. Los soportes de OFDMA diferenciaron los términos calidad y servicio, asignándoles un número distinto de subportadoras a los diferentes usuarios de manera similar que en CDMA, y así la complejidad del paquete que fija o los esquemas de control de acceso pueden evitarse. OFDMA se emplea en el estándar inalámbrico IEEE 802.16 MAN, comúnmente llamado WiMAX.

3.4.6.1 Estructura de los símbolos en OFDM y OFDMA

Los símbolos de ambos sistemas poseen una estructura similar, y se muestra en las figuras 13 y 14, donde cada símbolo consta de:

- Las subportadoras de datos (en OFDM) o subcanales (para OFDMA) que acarrean los datos (información).
- Subportadoras piloto como frecuencias de referencia y para diversos propósitos de estimación.
- Subportadora de DC como frecuencia central.

- Subportadoras de guarda o bandas de guarda para mantener el espacio entre las señales OFDM/OFDMA.

Figura 13. Estructura simbólica de OFDM en WiMAX.

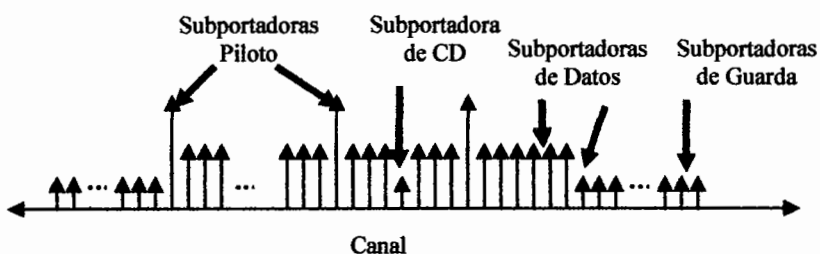
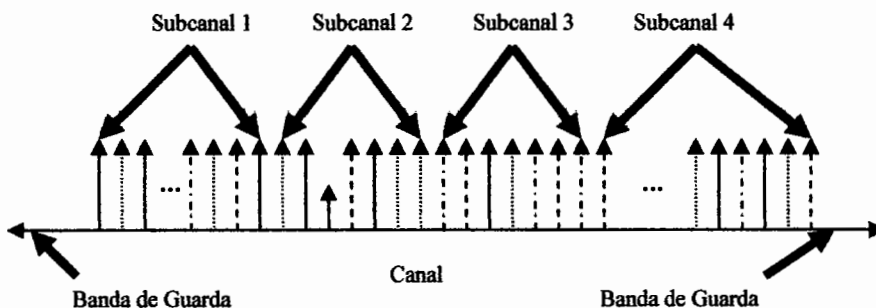


Figura 14. Estructura simbólica de OFDMA en WiMAX.



3.4.7 SOFDMA (OFDMA Escalable)

Esta agrega escalabilidad a la técnica OFDMA. Esta escala el tamaño de los FFT según el tamaño del ancho de banda del canal mientras que se mantiene el espaciamiento constante de la frecuencia subportadora a través de diferentes anchos de banda.

Lo anterior significa que: el tamaño de FFT más pequeño es empleado para bajos anchos de banda de canal, mientras FFT más grandes se clasifican según el tamaño de los canales más anchos. Haciendo el espaciado de la frecuencia subportadora constante, SOFDMA reduce la complejidad del sistema de canales más pequeños y mejora la actuación de canales más anchos.

Por otro lado, se tiene que SOFDMA es la modalidad de OFDMA empleado en WiMAX Móvil. Soporta anchos de banda de canal que van desde 1.25 MHz hasta los 20 MHz.

Con escalabilidad de ancho de banda, la tecnología WiMAX Móvil puede cumplir con varias regulaciones de frecuencia de carácter mundial y flexibilidad de dirección para diversos operadores o requerimientos ISP que son necesarios para proporcionar servicios básicos de Internet o un paquete de servicio para banda ancha.

3.4.8 OFDM-CDMA o Acceso Múltiple por División de Código de Multiportadora (MC-CDMA)

En esta versión, OFDM se combina con CDMA de espectro extendido o WCDMA para codificar la separación de los usuarios.

Por otro lado, la interferencia cocanal puede contrarrestarse, significando que la asignación manual fija del canal (FCA) simplifica la planificación de frecuencia, es decir que se evitan los esquemas para la asignación dinámica del canal complejo (DCA).

3.5 Sistemas que utilizan la modulación OFDM

Los sistemas que emplean la modulación OFDM pueden clasificarse de dos formas, las cuales se presentan a continuación:

3.5.1 Inalámbricos

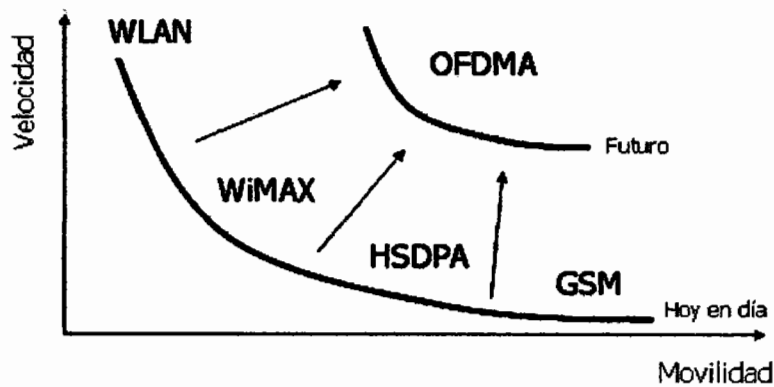
- IEEE 802.11a, g, j, n (WiFi) LANs Inalámbricas.
- IEEE 802.15.3a Ultra banda ancha (UWB) PAN Inalámbricas.
- IEEE 802.16d, e (WiMAX), WiBro, HiperMAN Inalámbricas MANs.
- IEEE 802.20 Acceso móvil Inalámbrico de Banda Ancha MBWA (*Mobile Broadband Wireless Access*).
- DVB Transmisión Video Digital (*Digital Video Broadcast*) sistemas de televisión terrestres: DVB-T, DVB-H, ISDB-T y T-DMB.
- DAB Transmisión de Audio Digital (*Digital Audio Broadcast*) sistemas: EUREKA 147, *Digital Radio Mondiale*, HD Radio, ISDB-TSB y T-DMB.
- Flash-OFDM Sistemas celulares.
- 3GPP UMTS & 3GPP@ LTE (*Long-Term Evolution*), y 4G.

3.5.2 Cableados

- ADSL y VDSL acceso a la banda ancha por medio del alambrado de cobre.
- MoCA (*Multi-media over Coax Alliance*) Multimedia sobre conexiones coaxiales, redes caseras.
- PLC (*Power Line Communication*) Comunicación a través de la línea de alimentación.

En la figura 15 se muestra el desempeño de los sistemas anteriormente descritos en lo referente a su movilidad y velocidad comparado con el de las generaciones anteriores.

Figura 15. Velocidad Vs. Movilidad de los sistemas OFDMA y las generaciones anteriores.



Fuente: http://www.cs.vu.nl/~costa/cn_slides/ofdm.pdf

4. PLANEACIÓN, BENEFICIOS Y COSTOS DE UNA RED DE TELEFONÍA MÓVIL 4G

4.1 Planeación de una red de telefonía de cuarta generación

Debido a que las redes de telefonía pertenecientes a la cuarta generación tienen como fin primordial el brindar compatibilidad con los sistemas anteriores así como nuevos y mejores servicios, incorporan las características ya existentes juntamente con servicios más personalizados y a la vez sincronizados.

Por otro lado, para el diseño de una red de telefonía móvil celular es bastante claro que su complejidad involucra muchísimos factores que deben considerarse, algunos de los cuales ya han sido mencionados en los capítulos uno y dos sección 2.8.3, página 41; a pesar de ello, se cree conveniente el presentar otros factores, los cuales deben considerarse como fundamentales para el diseño de una red de telefonía móvil celular de cuarta generación.

4.1.1 Dimensionamiento de los planes

Los sistemas de telefonía móvil celular regularmente se dimensionan como sistemas de llamadas perdidas, por lo que se utiliza la distribución Erlang B^{34} dada por la siguiente ecuación:

$$p_b = B(N, A) \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde p_b es la probabilidad de bloqueo, N el número de canales por célula o por sector y A es el tráfico ofrecido.

Debido a diferentes factores, como lo son bloqueo o porque el usuario se encuentra situado en una zona de sombra radioeléctrica, un intento de llamada puede resultar infructuoso, es por ello que la probabilidad real de pérdida estará dada por:

$$p = 1 - (1 - p_c)^* p_e \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde p_c es la probabilidad de cobertura radioeléctrica, la cual se considera uno de los principales objetivos de calidad del sistema celular.

Por otro lado, se tiene el grado de servicio para este tipo de sistemas, el cual se establece por medio de la siguiente ecuación:

$$GOS(\%) = 100 * p \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde p esta dada por la ecuación 12.

Así también se tiene que para el dimensionamiento es necesario conocer tanto las previsiones de tráfico como su densidad ρ en el área de cobertura. Las compañías operadoras por medio de encuestas, estudios de mercado, índices poblacionales y de actividades económicas, entre otros, logran realizar estimaciones de densidad y su proyección hasta cierto punto en el tiempo.

Con lo anterior, las redes se dimensionarán en sus inicios para los valores estimados de densidad, de manera que su capacidad de atender el crecimiento de tráfico se verá limitada hasta el punto donde sea necesario un redimensionamiento de la misma red.

En lo que respecta al tráfico, se refiere al medio urbano, ya que en las zonas urbanas es donde se obtienen datos de más alta densidad, siendo por esto que es un factor condicionante para el dimensionamiento.

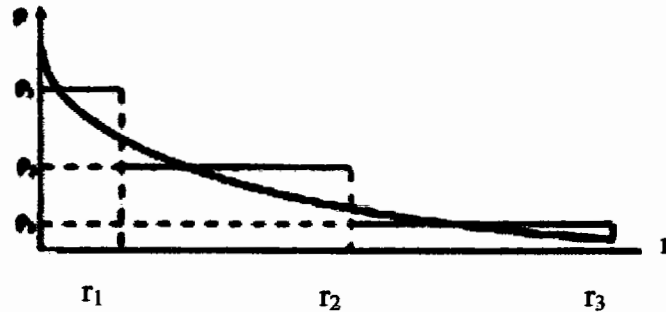
Según algunos estudios realizados por diferentes empresas de telefonía móvil celular, se ha encontrado que la densidad de tráfico no es de manera constante, sino que mientras que en el centro de las ciudades se obtiene un valor máximo, su valor decrece a medida que se viaja a la periferia de las mismas. Es por ello que se ha propuesto el siguiente modelo matemático:

$$\rho_{(r)} = \rho_{(0)} * e^{(-r/r_0)} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Donde $\rho_{(0)}$ es la densidad de tráfico en el centro de la ciudad, $\rho_{(r)}$ la densidad a la distancia r del centro y r_0 una distancia de referencia.

Puesto que el radio de la célula es función de la densidad de tráfico y en la práctica se cree conveniente hacer la planificación con células de radio constante, se trabaja con modelos discretos, sustituyendo lo establecido por la ecuación 14 por otra forma escalonada, como se muestra en la figura 16 en la siguiente página.

Figura 16. Ejemplo de Modelo discreto empleado para el dimensionamiento de una red de telefonía móvil celular.³⁴



En la figura 16, puede notarse que la función de densidad de tráfico cuenta con tres tramos que se asociarán a tres radios celulares, los cuales van desde r_1 para el área central urbana hasta r_3 que corresponde al área rural, con sus respectivas densidades poblacionales. Los valores de ρ_r son los valores medios de la curva exponencial en cada zona, el cual viene dado por la siguiente ecuación:

$$\rho_I = \frac{1}{r_i} \int_0^{r_n} \rho(r) dr = \rho_{(0)} \frac{r_o}{r_i} [1 - e^{(-r_i/r_o)}] \quad \text{(Ecuación 15)}$$

En lo referente a la cuarta generación, dentro del plan de diseño en términos de prestaciones radioeléctricas se tiene contemplado que los sistemas alcancen una capacidad escalable de 50 a 500 bit/s/Hz/km².

A manera de referencia, se tiene que el mejor rendimiento esperado de las tecnologías pertenecientes a la 3G se encuentra alrededor de 10 bit/s/Hz/km² empleando HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), MIMO (entrada múltiple/salida múltiple). Como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. Ejemplos de dimensionado.³⁵

Número de abonados/km ²	10000	10000
Uso pico	20%	20%
Eficiencia espacial	30%	20%
Diferentes eficiencias	40%	30%
Velocidad media de servicio (kbps)	128	1000
Capacidad requerida (Gbit/s/km ²)	2.13	33.33
Ancho de banda disponible (MHz)	50	100
Prestaciones de radio requerida bit/s/Hz/km ²	42.7	333.3

4.1.2 Limitación de las frecuencias: Ancho de banda

Debido a que la cuarta generación se basa en IP, hace uso de un ancho de banda según sean las aplicaciones y la capacidad de manejo del proveedor del servicio contratado.

Por otro lado en el capítulo dos, sección 2.8.2 página 39, se indica que el ancho de banda pronosticado para la cuarta generación se encuentra comprendido a partir de los 100 MHz.

4.1.3 Técnica de modulación: Basada en OFDM u OFDMA

La técnica OFDM ha sido descrita en el capítulo tres, y es de agregar que dependiendo de la región o continente donde el usuario se encuentre, así será la variante de la misma que se emplee por las distintas empresas de telefonía móvil celular, pero existe una gran preferencia hacia la técnica MC-CDMA.

4.1.4 Transferencia y movilidad de los usuarios

Las técnicas de transferencias basadas en tecnología IP móvil han sido consideradas tanto para voz como para datos. El inconveniente de las técnicas de IP móvil es que son lentas pero pueden ser aceleradas con métodos clásicos, entre los cuales están:

- Método Jerárquico.
- IP móvil rápido.

Los anteriores han sido desarrollados en su aplicación para datos, y existe la probabilidad de que la voz sea muy bien procesada por ellos.

4.1.5 Caché y pico celdas

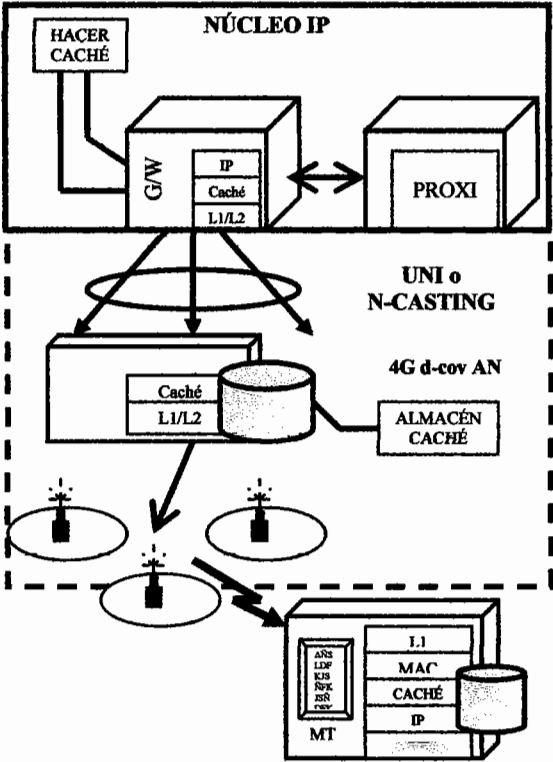
La memoria en cualquier equipo así como en la red y en los terminales facilita la entrega de servicios. En sistemas celulares lo anterior aumenta las capacidades del planificador MAC (Control de acceso a los medios), puesto que facilita el suministro de servicios en tiempo real. Es de hacer notar que los recursos sólo se pueden asignar a los datos cuando las condiciones radioeléctricas son favorables. Con este método logra duplicarse la capacidad de un sistema celular clásico.

Con la cobertura pico celular, los servicios característicos de 4G son de gran velocidad (no en tiempo real) pueden entregarse aun cuando se interrumpe la recepción/transmisión durante parte del tiempo, creando una aparente discontinuidad. En estas áreas, los contenidos se envían al caché de la terminal a alta velocidad y son leídos a la velocidad del servicio.

Por otro lado, las coberturas son discontinuas; y sus ventajas, en especial cuando se diseña con tecnología caché, son alta eficiencia espectral, gran escalabilidad (de 50 a 500 bit/s/Hz), alta capacidad en el manejo de datos y bajo costo.

Uno de los factores que puede ser considerado como inconveniente, es que se necesita una arquitectura específica para introducir memoria caché en la red, tal como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Diseño de una red Pico celda.



4.1.6 Suministro de servicios multimedia, adaptación de servicio y transmisión sólida

La codificación de audio y vídeo puede realizarse de forma escalable. A manera de ejemplo, se tomara un flujo de vídeo que puede dividirse en tres flujos, los cuales a su vez transportan de forma independiente lo siguiente: un flujo de capa base (30 kbps), que es un flujo sólido pero con limitación en la calidad (5 imágenes/s), y dos flujos de mejora (50 kbps y 200 kbps). El primer flujo proporciona disponibilidad, los otros dos flujos calidad y definición. Al momento de realizar una transmisión, el terminal dispondrá de tres cachés.

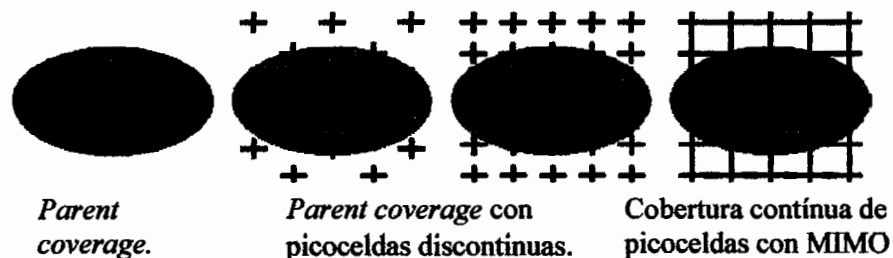
En cobertura pico celular, la cobertura primaria establece el diálogo de servicio y el arranque de servicios (con la capa base). Tan pronto como el terminal entra en la cobertura de pico celda, se saturan los cachés de terminal, empezando con el caché base. Para el 2º trimestre de 2005, las transmisiones de audio y vídeo se realizaron sin error y sin pérdida de paquetes. No obstante, las tasas de error permisibles son de unos 10^{-5} ó 10^{-6} y para las pérdidas de paquetes de alrededor de 10^{-2} hasta 10^{-3} . Por otro lado, las imágenes codificadas contienen suficiente redundancia para lograr la satisfactoria corrección de errores.

4.1.7 Cobertura

Esta se logra añadiendo nuevas tecnologías y mejorando progresivamente la densidad. A manera de ejemplo, y debido a su gran similitud en el funcionamiento, se tomará el despliegue de una red WiMAX: para comenzar, se despliega la *parent coverage*³⁴; luego se hace más densa añadiendo pico celdas discontinuas, seguidamente la pico celda se hace más densa pero aún de forma discontinua.

La cobertura pico celda se hace continua ya sea empleando MIMO o mediante el despliegue de otra cobertura pico celda en una banda de frecuencia diferente tal como se muestra en la figura 18.

Figura 18. Ejemplo de despliegue en zonas de tráfico denso.



Además, se tiene que el rendimiento de la *parent coverage* puede variar de 1 a 20 bit/s/Hz/km², mientras que la tecnología pico celda llega a alcanzar de 100 a 500 bit/s/Hz/km², dependiendo de la complejidad del *hardware* y *software* de la terminal.

4.1.8 Introducción de nuevos servicios

4.1.8.1 Implementación total IP

Aunque el IP ya se ha utilizado por diversos sistemas, aún no ha sido implementado total y definitivamente, debido a las limitantes tecnológicas que este implica. Como una reacción a lo anterior y a manera de aprovecharlo eficientemente surge la cuarta generación, la cual implementa nuevas tecnologías y estará basada totalmente en IP, se espera que el costo del servicio sea muy bajo (si no es que gratuito, tal como se hace en Internet), ya que se basará únicamente en la disponibilidad de banda ancha, lo cual dependerá de la capacidad que se contrate.

4.1.8.2 SDR (Equipo de radio definido por programa)

El SDR se convertirá en un habilitador de agregación de ya sean pico y/o micro celdas multi-estándar. Para un fabricante, lo anterior puede ser una gran ventaja, ya que podrá suministrar equipo multi-banda y multi-estándar con costes y esfuerzos de desarrollo reducidos mediante tratamiento multi-canal simultáneo.

4.1.8.3 Entrada múltiple/salida múltiple (MIMO)

Debido a que anteriormente fue elaborada una descripción de la tecnología MIMO, sección 2.8.4.2 página 49, en esta sección no se dará mayor detalle, únicamente se hace notar que la tecnología perteneciente a la cuarta generación hará uso de esta forma de manejar las ondas de radio en sus sistemas de transmisión y recepción.

4.2 Beneficios

La red de telefonía móvil celular 4G, plantea una nueva gama de aspectos técnicos a vencer por parte de las distintas compañías operadoras, que, una vez conquistados, darán tanto a los usuarios como a las mismas gran capacidad en el manejo de información ya sea de negocios, salud, entretenimiento, entre otras, ya que el límite lo determinará el usuario.

Una de las principales ventajas que ofrece esta generación es la transmisión de información (video, voz y/o datos) a altas velocidades, aproximadamente de 20 a 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en estado estacionario (sección 2.8.4, página 42).

Otro aspecto y que es considerado fundamental para las empresas operadoras de telefonía como para los usuarios es su costo. Bajo este criterio puede decirse que los usuarios únicamente tendrán que sujetarse a las tarifas establecidas en los diferentes países para los anchos de banda contratados, dando con esto lugar a las llamadas “gratuitas” (en cierta manera, véase sección 4.1.8.1, página 87).

Generalidad de conexión es otro beneficio en la telefonía de cuarta generación, ya que se utiliza la plataforma IP, un usuario puede realizar una llamada desde cualquier sitio en donde exista una conexión disponible a Internet, dando con esto lugar a que la compañía proveedora del servicio administre al usuario a través de su conexión, logrando con ello garantizar el cobro por sus servicios.

4.3 Costos

Como ya se ha dicho (secciones 4.1.8.1 y 4.2), la telefonía de cuarta generación resultaría de muy bajo costo para los usuarios, ya que se encuentra basada totalmente en IP, puesto que únicamente se cubrirían los gastos por el uso de un determinado ancho de banda.

Por otro lado, se tiene que el costo de esta nueva generación para las distintas compañías operadoras de telefonía, el cual además de ser monetario será del tipo infraestructural así como computacional, al plantearse desde el punto de vista de las llamadas gratis toma un carácter de excesivo, pero al considerar que las compañías a pesar de que las llamadas sean gratuitas obtendrán ingresos por el ancho de banda utilizado por los usuarios, aún cuando estos realicen sus llamadas en el extranjero a través de Internet.

4.4 Servicios de menor costo: Una nueva propuesta

Como es de suponer todo usuario de cualquier servicio, por muy novedoso que este sea, casi siempre buscará una versión o disposición del mismo que le implique un menor gasto.

Es debido a lo anterior que en la mayoría de países del continente Europeo y parte de América del norte ya se vive una cultura comunitaria y de servicio, con el fin de hacer funcionar una red WiFi que brinda acceso a Internet de manera casi gratuita. Por otro lado, se tiene que como ya se ha dicho, la telefonía perteneciente a la cuarta generación estará basada en su totalidad en IP, es considerada por muchos la parte que unirá a las redes de ordenadores con los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

Ahora bien, tomando la conectividad ofrecida por dicha red WiFi y la compatibilidad de protocolo empleada por las tecnologías 4G con esta red, es posible plantear que las llamadas hechas por un individuo miembro de esta comunidad sean totalmente gratis, aún cuando se encuentre en otro país.

4.4.1 Internet gratis

El termino gratis es aplicado ya que al momento de pertenecer a cierto grupo de individuos o comunidad, los usuarios pueden ingresar a los servicios de Internet por medio de cualquier conexión disponible no importando su ubicación sin costo alguno, estas afirmaciones se explican a continuación.

4.4.1.1 Comunidad FON

FON es considerada como la comunidad WiFi de mayor tamaño a nivel mundial ya que a finales de 2008 se encontraba desplegada en la mayoría de los países europeos. Los *routers* WiFi de FON le permiten a un usuario compartir una parte del servicio de Internet de banda ancha con el resto de la comunidad FON cercanos a este.

Desde sus inicios en 2006, FON ha tenido gran aceptación, muestra de ello es que a julio del 2008 contaba con más de 800,000 usuarios y más de 250,000 puntos de acceso. Debido a que el objetivo de esta comunidad es el compartir la conexión a Internet al menor costo permisible, ofrece además para los usuarios que no pertenecen a la misma la posibilidad de conectarse a través de cualquier FON *Spot* por medio de la adquisición de pases.

4.4.1.2 FON Spot

Al momento de que un usuario ha instalado un *router* La Fonera, esta en la capacidad de brindar servicio a otros usuarios que quieran compartir la conexión a Internet, es así que la conexión FON se convierte en FON *Spot* y no es más que un WiFi *Hotspot*. Para poder localizar un FON *Spot* de manera sencilla, puede ingresarse a la página <http://maps.fon.com/> y con indicar unos cuantos datos es posible ubicar los FON *Spots* cercanos.

4.4.1.3 Beneficios

Al pertenecer a la comunidad FON y estar registrado como un usuario que comparte su conexión con otros miembros de la comunidad FON, el usuario tiene conexión a cualquier FON *Spot* en cualquier parte del mundo de manera gratuita.

Si un usuario vive o se encuentra cercano a una zona céntrica o comercial, puede comercializar sus servicios como FON *Spot* vendiendo pases a *Foneros Alien* (sección 4.4.4).

4.4.1.4 Requisitos del servicio

Para llegar a ser miembro de la comunidad FON, el único requisito a cumplir es el de mantener el *router* encendido las 24 horas del día, los siete días de la semana, esto con el fin de mantener la idea de FON de proporcionar un punto de acceso de bajo costo a cualquier hora.

4.4.2 Equipos

Para que la comunidad FON pueda tener un funcionamiento exitoso se han desarrollado distintos equipos, con los cuales los usuarios y servidores puedan aprovechar de la mejor forma los servicios de Internet. Estos equipos son descritos a continuación.

4.4.2.1 Routers: Las Foneras

En general, una Fonera es un pequeño *router* Wi-Fi, y permite compartir con otras personas el ancho de banda del que se dispone de manera segura.

Actualmente se comercializan tres distintos modelos de *routers* “Las Foneras”, cuyos precios son de US\$ 29.95 y US\$ 49.95 (más gastos de envío).

4.4.2.1.1 La Fonera

La Fonera es la edición de *routes* Wi-Fi de FON con un solo puerto, su precio es de US\$ 29.95. Ofrece ratas de transferencia de datos arriba de los 54 Mbps, y es compatible con la mayoría de dispositivos Wi-Fi del mercado. Su rango de alcance se encuentra entre los 10 y 50 metros, dependiendo del entorno.

La tabla VII muestra las especificaciones técnicas de este *router*.

Tabla VII. Especificaciones Técnicas: La Fonera.³⁶

Dimensiones:	93.5 mm x 25.5 mm x 70 mm (excluyendo la antena).
Entrada de alimentación 2100:	100-240V ~ 50-60 Hz 0.3A. Salida: 5V, 2.0A salida DC.
Consumo de energía:	4 Watts.
Memoria Flash:	8 MB / SDRAM: 16 MB.
Conector de antena:	Conector RP-SMA (SMA inverso).
Antena:	Antena externa omnidireccional desmontable (2dBi).
Autenticación:	WEP 64bit/128 bit, WPA, WPA2, WPA <i>mixed</i> .
Encriptado:	TKIP, AES, <i>Mixed</i> .
Estándares compatibles:	IEEE 802.11b / 802.11g (sobre los 54 Mbps).

4.4.2.1.2 La Fonera+

El *router* Wi-Fi “La Fonera+” de FON, se caracteriza por contar con dos puertos de conexión; al igual que el anterior tiene un precio de US\$ 29.95, y brinda tasas de transferencia de datos arriba de los 54 Mbps, además es compatible con la mayoría de dispositivos Wi-Fi del mercado. De igual forma, su rango de alcance esta comprendido de los 10 a los 50 metros, dependiendo del entorno.

Las especificaciones técnicas de este *router* se encuentran listadas en la tabla VIII.

Tabla VIII. Especificaciones Técnicas: La Fonera+.³⁷

Dimensiones:	93.5 mm x 25.5 mm x 110 mm (excluyendo la antena).
Entrada de alimentación 2100:	100-240V ~ 50-60 Hz 0.3A. Salida: 5V, 2.0A salida DC.
Conector de antena:	Conector RP-SMA (SMA inverso).
Antena:	Antena externa desmontable (1.5dBi).
Autenticación:	WEP 64bit/128 bit, WPA, WPA2, WPA <i>mixed</i> .
Encriptado:	TKIP, AES, <i>Mixed</i> .
Estándares compatibles:	IEEE 802.11b / 802.11g (sobre los 54 Mbps).
Puertos:	Un puerto <i>Ethernet</i> WAN (10/100Mbps) para Internet y un puerto <i>Ethernet</i> LAN (10/100Mbps) para conexiones de computadora y otros dispositivos (impresora de red, almacenamiento, entre otros.)
SSIDs:	Uno público no encriptado (llamado por defecto <i>FON_FREE_INTERNET</i>) y uno privado encriptado con WPA-PSK (llamado por defecto <i>MyPlace</i>).

4.4.2.1.3 La Fonera 2.0 Beta (Versión para desarrolladores)

Esta versión para desarrolladores trabaja de manera similar al *router* La Fonera+ en términos del desempeño esperado para los *routers* Wi-Fi del mercado. Es de hacer notar que por ser un dispositivo que para finales del 2008 aún se encontraba en etapa de desarrollo, ofrecía algunas limitantes de funcionalidad en su puerto de comunicaciones USB. Por otro lado, se tiene que este dispositivo es del tipo *Open source*, con lo cual se trata que los usuarios administren su equipo como mejor les convenga, agregando o quitando aplicaciones. Su precio en el mercado es de US\$ 49.95 (más gastos de envío), además sus especificaciones técnicas se encuentran listadas en la tabla IX.

Tabla IX. Especificaciones Técnicas: La Fonera 2.0 Beta.³⁸

Dimensiones:	93.5 mm x 25.5 mm x 110 mm (excluyendo la antena).
Entrada de alimentación 2100:	100-240V ~ 50-60 Hz 0.3A. Salida: 5V, 2.0A salida DC.
Conector de antena:	Conector RP-SMA (SMA inverso).
Antena:	Antena externa desmontable (1.5dBi).
Autenticación:	WEP 64bit/128 bit, WPA, WPA2, WPA <i>mixed</i> .
Encriptado:	TKIP, AES, <i>Mixed</i> .
Estándares compatibles:	IEEE 802.11b / 802.11g (sobre los 54 Mbps).
Puerto USB:	USB Receptáculo tipo A (USB 2.0)
Puertos:	Un puerto <i>Ethernet</i> WAN (10/100Mbps) para Internet y un puerto <i>Ethernet</i> LAN (10/100Mbps).
SSIDs:	Uno público no encriptado (llamado por defecto <i>FON_FREE_INTERNET</i>) y uno privado encriptado con WPA-PSK (llamado por defecto <i>MyPlace</i>).

4.4.2.2 Antenas: La Fonantena

La Fonantena tiene un precio de mercado de US\$ 19.95 y se ha diseñado especialmente para incrementar el rango de los *routers* Wi-Fi de FON. Esta antena se caracteriza por ser del tipo direccional para 7db, y multiplica la potencia de la señal por un factor de 5, lográndose incrementar el radio de alcance por arriba de los 200 metros, dependiendo de las instalaciones en las cuales se localice.

En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas de La Fonantena.

Tabla X. Especificaciones Técnicas: La Fonantena.³⁹

Dimensiones:	150 mm x 90 mm x 14 mm.
Tipo de antena:	Direccional.
Peso:	0.3 Kgr.
Rango de frecuencias:	2400 MHz a 2500 MHz.
Ganancia de la antena (sin cable):	7 dBi.
Ganancia de la antena (con cable):	6.5 dBi.
VSWR:	2.0 : 1 Máximo.
Polarización:	Lineal, vertical.
Impedancia:	50 Ω .
Temperatura:	-10°C a +55°C.
Conector de antena:	Conector R/P SMA.
Cable:	ULA 168, Longitud: 3 metros.

4.4.3 Costo del equipo

Debido a que éste es un pequeño *router*, el único precio a cubrir será el del mismo, el cual se indicó en la sección 4.4.2.1, más gastos de envío.

4.4.4 Funcionamiento

Independiente del tipo de Fonera que se utilice, su conexión a Internet la hace a través de un puerto Ethernet WAN (10/100Mbps), éste equipo se caracteriza por radiar dos canales distintos, los cuales son: la red social FON y un canal privado. El canal privado será destinado para cualquier red particular, mientras que el canal para FON es el que se compartirá con la comunidad y sus beneficios dependerán del papel que como usuario se desempeñe. Como cualquier red de comunicaciones inalámbrica, en el canal FON existe una variedad de categorías asignadas a los usuarios, las cuales para este caso se presentan en la tabla XI.

Tabla XI. **Categorías asignadas a los usuarios del sistema FON.**

Categoría	Descripción
Linus	Usuarios que comparten de manera gratuita el ancho de banda que poseen con el resto de la comunidad, a manera de retribución cuando viaje a cualquier lugar en el que exista un FON <i>spot</i> , podrá conectarse de manera gratuita.
Bills	También comparten su conexión como los usuarios Linus, con la diferencia de que reciben una compensación económica por ello, 50% del gasto que efectuó un visitante. En contraste a los usuarios Linus, cuando uno de estos usuarios se conecte a un FON <i>spot</i> no podrá hacerlo de manera gratuita.
Aliens	Usuarios registrados de FON que no cuentan con equipo para su conexión, por ende no tienen como compartir los servicios. Tienen acceso a la red de FON pagando un precio relativamente bajo de euros o dólares, dependiendo del continente en el cual se encuentre.

Puesto que el sistema FON esta comprendido como una red social de Foneros registrados con un usuario y una contraseña, cuando estos quieran utilizar el ancho de banda deberán autenticarse, en otras palabras podrían acceder a esta red desde cualquier equipo y en cualquier lugar donde exista una red FON (*Roaming*).

Al momento de disponer de una Fonera, no es necesario instalar algún tipo de software en específico, pero en caso que se quisiera montar una PC como un FON *spot*, se puede instalar el programa *FONSPOT* (Beta) disponible para los sistemas operativos LINUX y MAC, el cual permite compartir el propio ancho de banda con otros Foneros. Por otro lado, se tiene el inconveniente que la PC que tenga instalado dicho programa no puede ser registrada como si fuera una Fonera (*router FON*) ni tampoco posee los privilegios de *Roaming*.

4.4.5 Impacto en los proveedores de servicio de Internet

Como es de esperarse, ante la aparición de un servicio que implica para los usuarios en general un bajo costo si no es que ninguno, la reacción en común de los proveedores en los países donde ya se ha logrado implementar la red Wi-Fi FON de Internet gratuito (primeramente en Europa), no se hizo esperar.

El argumento dado por ellos fue que esto implicaría una reducción dramática de sus ingresos, ya que por causa de la red social, menos usuarios se conectarían a la red de los ISP's, con lo cual se verían perjudicados.

Lo anterior a nivel europeo no tiene lugar, ya que juntamente con la aparición de la red social se presentó una iniciativa con la cual se ofreció protección de igual forma a los ISP, mediante los tipos de usuarios Linus, Bills y Aliens, donde los Aliens en Europa (los que no comparten y tienen que pagar por el acceso) a noviembre de 2008 pagaban alrededor de €4.90 diarios para conectarse a una red Fon, lo cual es casi el doble de lo que cobran los ISP's Europeos, aunque la diferencia radica en que el Fonero Alien paga el día que utilice el servicio y no mensualmente. Por su parte, la empresa Fon al momento de introducir la red social en los diferentes países, ha tratado de convencer a las distintas empresas que prestan el servicio de Internet (ISP's locales) que al contrario de las expectativas que ellos argumentan para sus ganancias, esta propuesta les ayudará a confirmar a sus clientes y aumentar en cierta forma sus ingresos.

4.4.6 Tendencias: hacia los sistemas de telefonía móvil celular

Como se indicó (sección 4.4.2.1.3) La Fonera 2.0 Beta ya fue presentada y comercializada en la comunidad desarrolladora interesada en contribuir con diversas y nuevas aplicaciones, esto con el fin de que sean los mismos usuarios los que administren en un futuro los servicios.

Por otro lado, debido a que las nuevas tecnologías o generaciones tienen como objetivo brindar una mejor forma de comunicarnos, ya sea aprovechando el ancho de banda, prestando nuevos servicios o acoplando las tecnologías anteriores.

Como se mencionó en la sección 4.4.2.1.3, una de las características de La Fonera 2.0 Beta consisten en tener un adaptador USB en el cual puede conectarse un modem HSDPA logrando la conexión con redes de telefonía móvil 3G cuando no hay ADSL, además de una memoria o disco duro USB que sea compatible con el *firmware* de La Fonera.

Debido a la utilización del IP por parte de las tecnologías pertenecientes a la 4G y su compatibilidad con las generaciones anteriores, esta se encuentra en disposición de ser adaptable a los servicios que preste dicha comunidad, con lo cual se obtendrían llamadas gratis desde cualquier parte del mundo, siempre y cuando se este registrado en la comunidad FON.

CONCLUSIONES

1. La implementación de tecnologías celulares compatibles entre sí, brinda una alta capacidad y bajo coste, reduciendo con esto además la complejidad del terminal.
2. Brindar versatilidad al manejo de usuarios en un sistema de telefonía móvil celular, se logra por medio de la división de las células ya existentes (*cell-splitting*), esto lleva a que en 4G se opere bajo el concepto de micro celdas y pico celdas.
3. La tecnología perteneciente a la cuarta generación de telefonía móvil celular, utiliza la técnica de modulación basada en OFDM (dependiendo de la región en que se encuentre el usuario, así será su versión), ésta utiliza la banda ancha del espectro y actualmente es empleada por los sistemas de redes inalámbricas de computadoras, logrando con ello gran conectividad, variedad y disponibilidad de servicios para los usuarios de los sistemas de telefonía móvil celular.

Esta técnica trae consigo dos beneficios primordiales, los cuales son:

- **Flexibilidad:** cada transceptor (transmisor/receptor) tiene acceso a todas las subportadoras.
- **Fácil ecualización:** los símbolos OFDM presentan la particularidad de ser más largos que el máximo retardo, resultando en un canal plano de ensombrecimiento, que puede ser fácilmente ecualizado.

4. Para un fabricante de equipo móvil el que se utilice el SDR o Equipo de radio definido por programa (que es un habilitador de agregación, en el mejor de los casos de pico celdas multi-estándar), será de gran ventaja ya que podrá suministrar equipo multi-banda y multi-estándar con costos y esfuerzos de desarrollo más bajos mediante tratamiento multi-canal simultáneo.

5. Una de las principales ventajas que ofrece la cuarta generación de telefonía móvil celular es la transmisión de información aprovechando la banda ancha del espectro radioeléctrico, dicha información puede ser video, voz y/o datos a altas velocidades. Las velocidades de intercambio para 4G sobrepasan las actuales y se han aproximado entre los 50 a 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en estado estacionario.

RECOMENDACIONES

- 1. Para lograr una descripción que establezca las ventajas y limitantes de realizar el cambio de una tecnología aplicada en telefonía móvil celular a otra más novedosa, deben investigarse las semejanzas que existen entre ellas y sus predecesoras, para que así puedan establecerse puntos de partida para las nuevas tecnologías y posteriormente implementarlas.**

- 2. Para el diseño de una red de telefonía móvil celular, es evidente que su complejidad envuelve numerosos factores que deben considerarse tanto para el usuario como para las empresas operadoras en la región de interés, entre los cuales el mas importante, para ambos, es el costo que esta nueva tecnología implique, por lo cual deben buscarse o realizarse planes de operación que satisfagan las necesidades de los usuarios y que no signifiquen pérdida para las empresas operadoras.**

- 3. Puesto que las técnicas de transferencias de información basadas en tecnología IP móvil tanto para voz como para datos, en la mayoría de casos son lentas, se ha considerado el acelerarlas con métodos bastante clásicos; entre estos métodos, los que se consideran más efectivos son:**
 - a. Método Jerárquico.**
 - b. Método IP móvil rápido.**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mark S. Taylor y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach.***
<http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node31.html>. (agosto de 2008).
2. <http://www.gsmfavorites.com/documents/introduction/mobile>. (agosto de 2008).
3. Mark S. Taylor y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach.***
<http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node34.html>. (agosto de 2008).
4. Mark S. Taylor y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach.***
<http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node35.html>. (agosto de 2008).
5. Mark S. Taylor y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach.***
<http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node36.html>. (agosto de 2008).
6. "Generaciones de telefonía móvil." Disponible en:
<http://es.kioskea.net/telephonie-mobile/reseaux-mobiles.php3>. (agosto de 2008).
7. "Primera generación de telefonía móvil", Wikipedia Enciclopedia Libre.
http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_1G.
(septiembre de 2008).
8. "Segunda generación de telefonía móvil", Wikipedia Enciclopedia Libre.
http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_2G.
(septiembre de 2008).
9. "Tercera generación de telefonía móvil", Wikipedia Enciclopedia Libre.
http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_3G.
(septiembre de 2008).
10. "Cuarta generación de telefonía móvil", Wikipedia, Enciclopedia Libre.
http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_4G.
(septiembre de 2008).

11. "Qué es la Tecnología 4G?", Disponible en:
<http://www.sobrecelulares.com/noticias-celulares/4g-que-es-la-tecnologia-4g/>. (septiembre de 2008).
12. "Documento técnico: 4G - *Beyond 2.5G and 3G Wireless Networks*",
Revista: *Systems Design*. Una publicación CMP.
<http://www.mobileinfo.com/3g/4G CommSystemArticle.htm>. (octubre de 2008).
13. Blat, Fernando. "Prototipos de móviles 4G presentados en Japón"
Publicado en: <http://www.xataka.com/categoria/moviles>. 5 de
septiembre de 2005. Disponible en:
<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn7943>. (noviembre de
2008).
14. "Estándares IEEE", Wikipedia Enciclopedia Libre.
<http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE>. (febrero de 2009).
15. "Estándar IEEE 802.15", Wikipedia Enciclopedia Libre.
http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15. (enero de 2009).
16. Ketan Mandke y otros. ***Technology Report: The evolution of ultra wide band radio for Wireless personal area network, high frequency electronics***. (septiembre de 2003). pp. 22-30.
17. IEEE. "*Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*." Patrocinado por LAN/MAN Standards Committee de la IEEE Computer Society y la IEEE Microwave Theory and Techniques Society. (Revisión de IEEE Std 802.16-2001): 1, 1 de octubre de 2004.
18. "Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)", Wikipedia Enciclopedia Libre.
<http://es.wikipedia.org/wiki/WiMAX>. (septiembre de 2008).
19. Irujo Muñiz. Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones. "WiMAX: El Nuevo Acceso Inalámbrico a Internet". 3 de febrero de 2005. Disponible en:
<http://www.cinit.org.mx/index.php/recursos/articulos/WiMAX>
20. Pineda Marín, Fabián Albeiro. "Trabajo: WiMAX: Presente y futuro del acceso a banda ancha inalámbrica en COLOMBIA". (27 de agosto de 2006.) Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos60/wimax-banda-ancha/wimax-banda-ancha3.shtml>

21. "MIMO", Wikipedia Enciclopedia Libre. <http://es.wikipedia.org/wiki/MIMO>. (diciembre de 2008).
22. "OFDM", Wikipedia Enciclopedia Libre. <http://es.wikipedia.org/wiki/OFDM>. (diciembre de 2008).
23. "OFDM Tutorial". Disponible en: <http://www.wavereport.com/tutorials/OFDM.htm>. (diciembre de 2008).
24. "OFDM", Wikipedia Enciclopedia Libre. <http://es.wikipedia.org/wiki/OFDM>. (diciembre de 2008).
25. "OFDM", Wikipedia Enciclopedia Libre. <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDM>. (diciembre de 2008).
26. Conniq.com. "Introduction to FDM, OFDM, OFDMA, SOFDMA". Disponible en: <http://www.conniq.com/WIMAX/fdm-ofdm-ofdma-sofdma-01.htm>. (noviembre de 2008).
27. Louis Litwin, Michael Pugel. "The principles of OFDM, Multicarrier modulation techniques are rapidly moving from the textbook to the real world of modern communication systems": 34, 46.
28. J.J. Van de Beek y otros. "Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)." Copyright © 2002 by the International Union of Radio Science (URSI). En colaboración con las universidades suecas: University of Technology, Division of Signal Processing; y Lund University, Department of Applied Electronics. Disponible en: <http://www.s3.kth.se/signal/grad/OFDM/URSIOFDM9808.htm>
29. "OFDM Tutorial". Impulsado por myRSScreator. 24 de enero de 2007. Disponible en: <http://www.wave-report.com/tutorials/ofdm.htm>
30. Ramjee Prasad. **OFDM for Wireless Communications Systems.** (Copyright © 2003. Publicado por: Artech House Publishers.) pp. 11-14.
31. Muñóz, Marco. "OFDM". Disponible en: <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/e/e5/AnexoFG-Marcomun.pdf>. (febrero de 2009).

32. Ender Ayanoglu y otros. **VOFDM Broadband Wireless Transmission and Its Advantages over Single Carrier Modulation** (Cisco Systems, Inc.). p.1. Disponible en: <http://www.ece.uci.edu/~ayanoglu/ICC2001.pdf>. (febrero de 2009).
33. Huseyin Arslan y otros. **Ultra Wideband Wireless Communication**. (Editorial: Wiley InterScience.) p. 86.
34. Hernando Rábanos, José María. **Comunicaciones Móviles**. (Segunda edición. Editorial: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A.) pp. 279, 280.
35. D. Rouffet y otros. "MÓVILES 4G. *Technical paper*. Excelencia operacional", **Revista de Telecomunicaciones de Alcatel**. 2º. Trimestre de 2005. Disponible en: http://www1.alcatel-lucent.com/doctypes/articlepaperlibrary/html/ATR2005Q2/ATR2005Q2_A15_EN.jhtml?DARGS=/common/atr/include/sidebar_TOC.jhtmlA&DAV=/com/en/appxml/articlepaperlibrary/4gmobiletcm172262211635.jhtml. (febrero de 2009).
36. "La Fonera". Página principal: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>
Disponible en: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-001>. (marzo de 2009).
37. "La Fonera+". Página principal: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>
Disponible en: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-018>. (marzo de 2009).
38. "La Fonera 2.0 Beta". Página principal: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>
Disponible en: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-020>. (marzo de 2009).
39. "La Fonantena". Página principal: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>
Disponible en: <https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-ANT01>. (marzo de 2009).

BIBLIOGRAFÍA

1. "3G Migration". (s.l.) Disponible en:
<http://www.cdg.org/technology/3g/migration.asp>. (diciembre de 2008).
2. "4G Topics of Interest. All IP Wireless – All the Way". Publicado en:
http://research.sun.com/features/4g_wireless/. s.a. Disponible en:
http://www.mobileinfo.com/3g/4G_Sun_MobileIP.htm. (diciembre de 2008).
3. Aceitón, Roberto. "Codificación de Canal en Tecnología GSM". Trabajo voluntario, Universidad Técnica Federico Santa María Departamento De Electrónica, Teoría de Comunicaciones Digitales. s.a.
4. Adithya Raghunathan. "Ventajas Económicas de la Infraestructura Inalámbrica para el Desarrollo". Banco Interamericano de Desarrollo Washington, D.C. Serie de informes técnicos del Departamento de Desarrollo Sostenible. s.e. Agosto de 2005.
5. "An Introduction to Orthogonal Frequency Division Multiplex Technology". (s.l.). Página principal: www.keithley.com. s.a. Disponible en:
http://www.cs.vu.nl/~costa/cn_slides/ofdm.pdf. (diciembre de 2008).
6. Ayanoglu, Ender y otros. **VOFDM Broadband Wireless Transmission and Its Advantages over Single Carrier Modulation**. (Cisco Systems, Inc.) Página: 1. s.a. Disponible en:
<http://www.ece.uci.edu/~ayanoglu/ICC2001.pdf>.
7. Blat, Fernando. "Prototipos de móviles 4G presentados en Japón". (Publicado en: <http://www.xataka.com/categoria/moviles>). 5 de septiembre de 2005. Disponible en:
<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn7943>. (enero de 2009).
8. Carmen Urizar. "Estudios y Perspectivas. Competencia y regulación en las telecomunicaciones: el caso de Guatemala". Unidad de Comercio Internacional e Industria México, D. F. s.e. Marzo de 2007.

9. Castañeda Camacho, Josefina y Domingo Lara Rodríguez. "Sistemas Personales de Comunicación". **Revista Digital Universitaria de la UNAM**. (s.l.) (30 de Junio de 2001) (Vol. 2, No. 2.) Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.2/num2/art3/#1>
10. Chien, Charles. **Digital Radio Systems on a Chip. A Systems Approach**. s.l.: Editorial: Kluwer Academic Publishers. Publicado por: Springer. Páginas: 231, 232.
11. "Comunidad Fon". Página principal: <http://fon.com>. Disponible en: <http://fon.com/comunidad>. (noviembre de 2008).
12. Conniq.com. "Introduction to FDM, OFDM, OFDMA, SOFDMA". (s.l.). Disponible en: <http://www.conniq.com/WIMAX/fdm-ofdm-ofdma-sofdma-01.htm>. (noviembre de 2008).
13. "Cuarta generación de telefonía móvil". (Wikipedia Enciclopedia Libre.). http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_4G. (septiembre de 2008).
14. Cutler, Bob. "Measurement Challenges for OFDM Systems. Agilent Technologies". s.l. Páginas: 5, 7. 18 de septiembre de 2001. disponible en: http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/09-18-01_Measurement-OFDM-Cutler_522-NOTES.pdf.
15. "Documento técnico, 4G - Beyond 2.5G and 3G Wireless Networks". **Revista: Systems Design**. Una publicación CMP. http://www.mobileinfo.com/3g/4G_CommSystemArticle.htm.
16. "Estándar IEEE 802.15". Wikipedia Enciclopedia Libre. (s.l.). http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15. (enero de 2009).
17. "Estándares IEEE". Wikipedia Enciclopedia Libre. (s.l.). <http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE>. (febrero de 2009).
18. "Generaciones de telefonía móvil" (s.l.). s.a. Disponible en: <http://es.kioskea.net/telephonie-mobile/reseaux-mobiles.php3>. (noviembre de 2008).
19. G. Glisic, Savo. **Advanced Wireless Communication: Cognitive and cooperative broadband technology**. Segunda edición. s.l. Editorial Wiley InterScience. s.a. Páginas: 1-4, 11, 163-165, 269, 504-505, 714-742.

20. Gorrício Moreno, Mónica y otros. **Comunicaciones Móviles.** s.l. Editorial UPC. s.a. Páginas: 21—27, 45, 48, 147.
21. Hernando Rábanos, José María. **Comunicaciones Móviles.** Segunda edición. s.l. Editorial: Centro de Estudios Ramón Areces España, S.A. s.a. Páginas: 279, 280.
22. Herrera Pérez, Enrique. **Introducción a las Telecomunicaciones Modernas.** s.l. Editorial: Limusa. s.a. Páginas: 282, 283, 284, 286.
23. Horak, Ray. **Telecommunications and Data Communications Handbook.** s.l.: Editorial: Wiley InterScience. s.a. Páginas: 556, 558, 574, 575, 586.
24. <http://www.gsmfavorites.com/documents/introduction/mobile>. (noviembre de 2008).
25. Huseyin Arslan y otros. **Ultra Wideband Wireless Communication.** s.l. Editorial: Wiley InterScience. s.a. Página: 86.
26. IEEE. “*Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.*” Patrocinado por LAN/MAN Standards Committee de la IEEE Computer Society y la IEEE Microwave Theory and Techniques Society. (Revisión de IEEE Std 802.16-2001): Página: 1, 1 de octubre de 2004.
27. IEEE. *Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements. Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs).* (Revisión de IEEE Std 802.15.1-2002): Páginas: 45-47, 14 de junio de 2005.
28. **Internetworking Technologies Handbook.** (Cisco Systems, Inc.) Cuarta Edición. s.a. Página: 314.
29. “*Intuitive Guide to Principles of Communications*”. (s.l.). s.a. www.complextoreal.com/ofdm.pdf. (diciembre de 2008).

30. "La Fonantena". Página principal:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>.
Disponible en:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-ANT01>. (noviembre de 2008).
31. "La Fonera 2.0 Beta". Página principal:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>.
Disponible en:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-020>. (noviembre de 2008).
32. "La Fonera". Página principal:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>.
Disponible en:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-001>. (noviembre de 2008).
33. "La Fonera+". Página principal:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=shop>.
Disponible en:
<https://shop.fon.com/FonShop/shop/US/ShopController?view=product&product=PRD-018>. (noviembre de 2008).
34. LeFevre, Michael. *"4G Topics of Interest - From the Net Fundamental Changes Required in Modulation and Signal Processing for 4G"*. Publicado en: *Communications Systems Design Magazine - a CMP publication*. Julio de 2001. Disponible en:
<http://www.mobileinfo.com/3g/4GCommSystemArticle.htm>. (enero de 2009).
35. Louis Litwin, Michael Pugel. *"The principles of OFDM, Multicarrier modulation techniques are rapidly moving from the textbook to the real world of modern communication systems"*. (s.l.) s.a. Páginas: 34, 46.
36. Mandke, Ketan y otros. *Technology Report: The evolution of ultra wide band radio for Wireless personal area network, high frequency electronics*. s.l. s.e. septiembre de 2003. Páginas: 22-30.
37. McFarland, Bill. *The Family Dynamics of 802.11*. s.l. s.e. Mayo de 2003, Páginas: 415-419, 422, 424, 429, 430, 436, 437.

38. Mendoza Varas, Jampier Christopher. "La comunidad WiFi más grande del mundo". (Lima, Perú.) Disponible en: <http://blog.pucp.edu.pe/item/26401>. (julio de 2008).
39. "MIMO". Wikipedia Enciclopedia Libre. (s.l.). <http://es.wikipedia.org/wiki/MIMO>. (diciembre de 2008).
40. Muñiz, Iraza. Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones. "WIMAX: El Nuevo Acceso Inalámbrico a Internet". s.l. 3 de febrero de 2005. Disponible en: <http://www.cinit.org.mx/index.php/recursos/articulos/WIMAX>. (Septiembre de 2008).
41. Muñóz, Marco. "OFDM". (s.l.) s.a. Disponible en: <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/e/e5/AnexoFG-marcomun.pdf>. (enero de 2009).
42. "OFDM Tutorial". Impulsado por myRSScreator. (s.l.). 24 de enero de 2007. Disponible en: <http://www.wave-report.com/tutorials/ofdm.htm>. (diciembre de 2008).
43. "OFDM". Wikipedia Enciclopedia Libre. (s.l.). <http://es.wikipedia.org/wiki/OFDM>. (diciembre de 2008).
44. "OFDM". Wikipedia Enciclopedia Libre. (s.l.). <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDM>. (diciembre de 2008).
45. Pineda Marín, Fabián Albeiro. "Trabajo: WiMAX: Presente y futuro del acceso a banda ancha inalámbrica en COLOMBIA." s.l. 27 de agosto de 2006. <http://www.monografias.com/trabajos60/wimax-banda-ancha/wimax-banda-ancha3.shtml>. (Septiembre de 2008).
46. Prasad, Ramjee. **OFDM for Wireless Communications Systems**. s.l. Publicado por: *Artech House Publishers*. Copyright © 2003. Páginas: 11- 14.
47. "Primera generación de telefonía móvil". (Wikipedia Enciclopedia Libre.). http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_1G. (agosto de 2008).
48. "Primeras Pruebas Mundiales de Telefonía Móvil 4G". (Buenos Aires). Disponible en: <http://tecnologia.infobaeprofesional.com/40125-Primeras-pruebas-mundiales-de-telefonía-movil-4G.html>. (noviembre de 2008).

49. "Qué es la tecnología 4G?". Disponible en:
<http://www.sobrecelulares.com/noticias-celulares/4g-que-es-la-tecnologia-4g/>. (septiembre de 2008).
50. Rouffet, D. y otros. "MÓVILES 4G. *Technical paper*. Excelencia operacional". **Revista de Telecomunicaciones de Alcatel**. (s.l.) 2º. Trimestre de 2005. Disponible en: http://www1.alcatel-lucent.com/doctypes/articlepaperlibrary/html/ATR2005Q2/ATR2005Q2A15_EN.html?DARGS=/common/atr/include/sidebar_TOC.html&DAV=/com/en/appxml/articlepaperlibrary/4gmobiletcm172262211635.html. (enero de 2009).
51. Rysavy, Peter. "Mobile Broadband: EDGE, HSPA & LTE". *White paper developed for 3G Americas*. Página: 50. Septiembre de 2006.
52. "Segunda generación de telefonía móvil". (Wikipedia Enciclopedia Libre.). Disponible en:
http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_2G. (agosto de 2008).
53. "Servicio de Conectividad mediante Tecnología Inalámbrica Wi-Fi/ Wi-Max". s.l. Telefónica Telecomunicaciones Públicas, Dirección Área Comercial. Julio de 2006.
54. Taylor Mark S. y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach***. <http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node30.html>. (noviembre de 2008).
55. Taylor Mark S. y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach***. <http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node34.html>. (noviembre de 2008).
56. Taylor Mark S. y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach***. <http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node35.html>. (noviembre de 2008).
57. Taylor Mark S. y otros. ***Internetwork Mobility the CDPD Approach***. <http://www.leapforum.org/published/internetworkMobility/split/node36.html>. (noviembre de 2008).
58. "TELECOMMUNICATIONS STANDARDS ADVISORY COMMITTEE. *Update on IMT-2000 Development*". Septiembre de 2000. Disponible en: <http://www.ofta.gov.hk/ad-comm/tsac/ts-paper/ts2000p21.pdf>

59. "Telefonía 4G". (s.l.) s.a. Disponible en:
<http://www.radioptica.com/Noticias/noticia050829.asp>. (octubre de 2008).
60. "Telefonía móvil EDGE". (s.l.). s.a. Disponible en:
<http://es.kioskea.net/telephonie-mobile/edge.php3>. (noviembre de 2008).
61. "Telefonía móvil GPRS". (s.l.). s.a. Disponible en:
<http://es.kioskea.net/telephonie-mobile/gprs.php3>. (noviembre de 2008).
62. "Telefonía móvil GSM" (s.l.). s.a. Disponible en:
<http://es.kioskea.net/telephonie-mobile/gsm.php3>. (noviembre de 2008).
63. "Tercera generación de telefonía móvil". (Wikipedia Enciclopedia Libre.).
http://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_3G.
(agosto de 2008).
64. Van de Beek, J.J. y otros. "*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)*". Copyright © 2002 by the International Union of Radio Science (URSI). En colaboración con las universidades suecas: *University of Technology, Division of Signal Processing*; y *Lund University, Department of Applied Electronics*. Disponible en:
<http://www.s3.kth.se/signal/grad/OFDM/URSIOFDM9808.htm>.
65. Velásquez Pastrana, Lourdes. "Tres Generaciones en la Telefonía Celular." s.l. s.a.
66. "WiMAX". Wikipedia Enciclopedia Libre. (s.l.).
<http://es.wikipedia.org/wiki/WiMAX>. (Septiembre de 2008).
67. Zyren, Jim. "*White paper: Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer.*" Editor técnico: Dr. McCoy, Wes. Editorial: *Freescale Semiconductor, Inc.* s.a. Páginas: 3-10.