

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL EN UN  
SERVICIO DE TELECOMUNICACIONES MÓVILES DE  
CUARTA GENERACIÓN**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

**LEANDRO TEODORO ARIAS ANTONIO**

**PROMOCIÓN  
1987-I**

**LIMA – PERÚ  
2012**

**ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL EN UN SERVICIO DE  
TELECOMUNICACIONES MÓVILES DE CUARTA GENERACIÓN**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Tobías y María Julia que ya no están un agradecimiento especial por sus sabias enseñanzas.

## SUMARIO

El avance vertiginoso de las Telecomunicaciones Móviles en los últimos años, no tiene precedentes desde la invención del Transistor en Diciembre de 1947, por la necesidad de una sociedad en que la comunicación debe estar acompañada de manera permanente con nuevos servicios.

Desde la primera generación (1G) en la década entre 1970-1980 la comunicación por celular fue analógica con servicios muy limitados, la segunda generación (2G) comienza a operar con tecnología digital, la tercera generación (3G) representa un medio de comunicación que proporciona múltiples servicios, entre ellos multimedia de alta calidad, la cuarta generación (4G) ó simplemente 4G es la tendencia actual a la cual deben converger las nuevas tecnologías debido a las limitaciones e exigencias que se presentan en la implementación de la tercera generación 3G y las nuevas aplicaciones entre otros la multimedia MBMS (Multimedia Broadcast/ Multicast Service).

Los organismos de estandarización entre ellos 3GPP propuso LTE (Long Term Evolución) y otros plantean que sea WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Acces), la finalidad es garantizar su competitividad a largo plazo de estas tecnologías.

El marco teórico y su sustento matemático basados en las Transformadas de Fourier continua y discreta FFT, las técnicas y distintas formas de modulación es el tema del presente informe de suficiencia.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>MARCO TEÓRICO DE LTE Y WiMAX EN LA VERSIÓN DE CUARTA</b>	
<b>GENERACIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1 Descripción de la problemática.....	2
1.2 Antecedentes y evolución de tecnologías móviles.....	2
1.3 Long Term Evolución.....	5
1.4 Características.....	6
1.5 Arquitectura.....	8
1.6 Barreras para el despliegue de LTE.....	8
1.7 LTE: la evolución a 4G.....	10
1.8 ¿Es ó no es 4G? .....	12
1.9 Tecnologías 4G complementarias o competidoras.....	12
1.10 WiMAX.....	13
1.11 El futuro de WiMAX y la convergencia con 4G.....	14
1.12 Acceso al medio.....	14
1.13 Frequency Division Duplex FDD.....	14
1.14 Time Division Duplex TDD.....	15
1.15 Multiplexación de la información.....	16
1.16 OFDM.....	16
1.17 W-OFDM.....	17
1.18 Flash-OFDM.....	18
1.19 Acceso al medio de los usuarios.....	18
1.19.1 TDMA y CDMA.....	18
1.19.2 Multiplexación Por División De Frecuencias Ortogonales / OFDMA.....	19

1.19.3 Transmisor OFDM.....	20
1.19.4 Características del transmisor OFDM.....	21
1.19.5 OFDM en WiMAX.....	19
1.19.5 OFDM en WiMAX.....	22
1.19.6 OFDMA en WiMAX.....	24
1.19.7 Estructura de la Trama.....	25
1.19.8 Procesado de la señal.....	26
1.19.9 Modulación adaptativa.....	26
1.20 Características y ventajas de WiMAX.....	26
1.21 Comparativo de WiMAX contra otras tecnologías Inalámbricas.....	27
1.22 Tendencias actuales de WiMAX.....	29
1.23 WiMAX y el camino hacia la tecnología móvil 4G.....	29
<b>CAPITULO II</b>	
<b>BASES TEÓRICAS MATEMÁTICAS.....</b>	<b>31</b>
2.1 Acceso múltiple OFDMA.....	31
2.1.1 Modulador Digital.....	31
2.1.2 Modulación Digital BPSK.....	31
2.1.3 Modulación Digital M-PSK.....	32
2.1.4 Modulación Digital QAM / Quadrature Amplitud Modulación.....	33
2.1.5 OFDM.....	34
2.1.6 Expresión Matemática de la Ortogonalidad Dominio del Tiempo.....	34
2.1.7 Detectando la información de cada subportadora.....	35
2.1.8 Principios de OFDM / Dominio de la frecuencia.....	36
2.1.9 Banda Base OFDM.....	36
2.1.10 Señal OFDM Banda Base.....	37
2.1.11 Transformada de Fourier de las señales involucradas.....	39
2.1.12 La señal OFDM Banda Base en el tiempo.....	40
2.1.13 Organización de las subportadoras en OFDM.....	41
2.1.14 OFDM de 1024 subportadoras Capa Física OFDM IEEE 802.16e...	42
2.1.15 Canal Inalámbrico Multitrayectos.....	43
2.1.16 Prefijo cíclico PC.....	44
2.1.17 Con Prefijo Cíclico.....	45
2.1.18 OFDM: Ventajas y Desventajas.....	45

2.2	Transformada de Fourier.....	47
2.3	Transformada continua de Fourier / Función compuesta ó función Gate.....	48
2.3.1	Transformada rápida de Fourier / FFT.....	49
2.3.2	Algoritmo de diezmo en el tiempo.....	53
2.3.3	Polinomio de interpolación trigonométrica.....	53
2.3.4	La DFT unitaria.....	54
2.3.5	La transformada inversa de Fourier discreta (IDFT).....	55
2.3.6	Teoremas.....	56
<b>CAPITULO III</b>		
<b>APLICACIONES TANTO EN EL UPLINK COMO EN EL DOWN LINK EN LA RED DE ACCESO 4G.....</b>		
3.1	Antecedentes y Evolución tecnológica.....	59
3.2	Evolución de aplicaciones en 3G.....	60
3.3	Avances y tecnologías en transmisión móvil en 4G.....	61
3.4	Actualidad.....	61
3.5	Técnicas de acceso Downlink en LTE/OFDM.....	61
3.5.1	Subtrama uplink .....	61
3.5.2	Uplink – SC FDMA.....	63
3.5.3	Uplink.....	63
3.5.4	El juego.....	63
3.5.5	Plataformas.....	64
3.5.6	Modding.....	64
3.5.7	El Hud.....	64
3.5.8	Uplink de Servicios Internos.....	67
3.6	Downlink.....	67
3.6.1	Downlink PHY.....	67
3.6.2	Subtrama downlink.....	69
3.7	Aplicaciones en Dowlin Link/En el espacio.....	70
3.8	Tecnología.....	71
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>IV.- ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>		
4.1	Long Term Evolution /LTE.....	72

4.2	Worldwide Interoperability for Microwave Access /WiMAX.....	73
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
	<b>PARA LA ENSEÑANZA EN LA UNIVERSIDAD DE ESTAS TECNOLOGÍAS</b>	
	<b>ANEXO.....</b>	<b>78</b>
	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>80</b>

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad debido al avance sin precedentes de las telecomunicaciones móviles y las nuevas tecnologías que seguramente seguirán evolucionando para satisfacer nuevas exigencias de servicios que incluyen voz, audio, video y lo más importante en tiempo real.

El objetivo central del presente informe de suficiencia es presentar el marco teórico y su sustento matemático de las tecnologías móviles de cuarta generación 4G basados en el desarrollo de WiMAX y LTE, describiendo en detalle la teoría de las distintas formas de modulación principalmente OFDM y SC-FDMA, siendo la ortogonalidad de las funciones matemáticas el sustento central, se presenta el desarrollo y la descripción de las Transformadas de Fourier en forma analógica y discreta mediante la función Impulso ó delta de Dirac , siendo la transformada discreta de Fourier FFT y su inversa IFFT las herramientas indispensables para su descripción y debido a la complejidad y capacidad de transmisión de datos se usan algoritmos matemáticos que se describen con detalle. Igualmente la Convolución de señales discretas en el dominio de la frecuencia es fundamental para entender la transmisión de información en un solo paquete, es decir voz, audio y video.

El marco teórico de WiMAX y LTE son tratados en detalle en el capítulo II incluyen antecedentes, es decir un resumen de la evolución de cada tecnología, desde la primera generación, igualmente la convergencia, ventajas y desventajas de cada tecnología en las distintas etapas de sus evoluciones teniendo en cuenta los marcos regulatorios de organismos entre ellos la UIT.

Debido a que el desarrollo tecnológico se ha incrementado de manera notable y sin precedentes en los últimos años principalmente por que los usuarios exigen prestaciones de mejor calidad y acceso a mayor capacidad y velocidad en la transmisión de información, la tendencia que se viene presentando es que las redes de telecomunicaciones existentes evolucionen en Redes de siguiente generación (NGN) basadas en conmutación de paquetes usando el Protocolo de Internet (IP). Esta migración representa impactos tecnológicos , económicos y regulatorios, por esta razón es que el término LTE ( Long Term Evolución), es la evolución en el largo plazo.

## CAPITULO I

### MARCO TEÓRICO DE LTE Y WIMAX EN LA VERSIÓN DE CUARTA GENERACIÓN

#### 1.1 Descripción de la Problemática

El rápido proceso de la evolución de la tecnología y la necesidad del usuario de nuevos servicios a mayor rapidez y mayor ancho de banda, aumentando el volumen de transmisión de datos en los móviles y la aparición de nuevas aplicaciones y servicios como MMOG (Generación de Juegos en Línea Multimedia), televisión móvil, web 2.0, flujo de datos de contenidos, han sido las motivaciones por el que 3GPP desarrollase el proyecto LTE. Poco antes del año 2010, las redes UMTS llegan al 85% de los abonados de móviles. Es por eso que LTE 3GPP quiere garantizar la ventaja competitiva sobre otras tecnologías móviles. De esta manera, se diseña un sistema capaz de mejorar significativamente la experiencia del usuario con total movilidad, que utilice el protocolo de Internet (IP) para realizar cualquier tipo de tráfico de datos de extremo a extremo con una buena calidad de servicio (QoS) y, de igual forma el tráfico de voz, apoyado en Voz sobre IP (VoIP) que permite una mejor integración con otros servicios multimedia. Así, con LTE se espera soportar diferentes tipos de servicios incluyendo la navegación web, FTP, vídeo streaming, Voz sobre IP, juegos en línea, vídeo en tiempo real, pulsar para hablar (push-to-talk) y pulsar para ver (push-to-view).

#### 1.2 Antecedentes y evolución de tecnologías móviles

Las telecomunicaciones móviles a través de los años han evolucionado de una manera sorprendente, impulsadas principalmente de la necesidad de una sociedad en que la comunicación debe estar acompañada de manera permanente con nuevos servicios y lo destacable es cada vez con un mayor ancho de banda o una mayor velocidad de acceso.

*La primera generación* (1G) de comunicaciones móviles celular fue analógica, nace desde mediados de 1970 hasta 1980, con servicios muy limitados, conformado por redes móviles analógicas, como el American Mobile Phone System (AMPS), el Total Access Communication System (TACS) y el Nordic Mobile Telephone (NMT). Estas redes están basadas en técnicas Frequency Division Multiple Access (FDMA), donde diferentes bandas de frecuencia son asignadas a diferentes usuarios. En las redes de 1G no existió

especificación internacional, es decir cada red telefónica celular trabaja con diferentes tecnologías de radio y usa diferentes bandas de frecuencias para cada país, por lo que permitió ofrecer pocos servicios y solo algunas regiones, no era posible roaming internacional, Sin embargo el avance de este periodo es el concepto de red celular. Presentada por los laboratorios Bell en 1970, en comparación con los antiguos sistemas de comunicaciones móviles. El sistema de red celular se basa en células que reutilizan la frecuencia y por lo tanto mejoran la capacidad del sistema. El AMPS opera en la banda de 800 MHz de los sistemas de transmisión celular y fue aplicado en América del Norte, América del Sur y algunos países del Pacífico. TACS utiliza la banda de 900 MHz e incluye dos versiones: TACS (Enhanced TACS) en Europa y NTACS (Narrowband TACS) en Japón, este fue aplicado en Inglaterra, Japón y algunos países de Asia. La principal característica de los sistemas de comunicaciones de primera generación es que esta tecnología utiliza la reutilización de frecuencia, la modulación es analógica de las señales de voz y ofrece un canal analógico por cada suscriptor con respecto al otro cada 30 KHz/ 25 KHz. Sin embargo sus limitaciones eran:

- a) Baja utilización del espectro de frecuencia.
- b) Tipos de servicios limitados.
- c) No hay servicios de alta velocidades de datos.
- d) Pobre confiabilidad y alta vulnerabilidad para interceptar.
- e) Elevado costo de los equipos de gran volumen y pesados.
- f) Baja calidad de servicios.

*La segunda generación (2G)* de comunicaciones móviles comienza a operar con tecnologías digitales representadas por GSM, el DAMPS y IS-05. Un resumen de las características básicas de estas son:

GSM (Global System for Mobile Communication) en Europa, diseñado con un estándar TDMA para comunicaciones móviles digitales, esta tecnología soporta velocidades de 64 Kbps y puede interconectarse con el IS-54, utiliza la banda de 900 Mhz mientras que los sistemas DCS 1800 utilizan la banda de 1800 Mhz, GSM utiliza los modos FDD y TDMA y cada portadora soporta 8 canales con un ancho de banda de 200 KHz.

DAMPS (Digital Advanced Mobile Phone System) es también llamado IS-54 (North America Digital Cellular System), utiliza la banda de 800Mhz y utiliza el modo TDMA.

IS-05 es otro estandar celular digital en América del Norte, utiliza la banda de frecuencias de 800 Mhz o 1900 Mhz, se especifica el uso CDMA y ya es escogida como una de las primeras tecnologías PCS (Personal Communication System). Desde que los sistemas de comunicaciones móviles 2G se concentran en transmisión de voz y servicios de bajas velocidades de datos, surgen los sistemas de comunicaciones 2.5G en 1996

para cubrir las necesidades de transmisiones de datos a mayor velocidad, estos sistemas incluyen GPRS e IS-05B.

*La tercera generación (3G)* representa un medio de comunicación que pueden proporcionar múltiples tipos de servicios multimedia de alta calidad a nivel mundial y poner en práctica sin problemas de cobertura el roaming internacional. Son compatibles con las redes fijas y pueden implementar cualquier tipo de comunicación en cualquier momento y en cualquier lugar con terminales portátiles.

Presentada en 1985 por la UIT (International Telecommunication Union) la 3G fue llamado FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System) y posteriormente denominada IMT-2000 (International Mobile Communication 2000).

Las principales tecnologías de la época son: WCDMA, CDMA2000 y UWC-136. En 1999, la UIT-R TG8M establece las especificaciones de la interfaz de radio IMT-2000 y la tecnología TD-SCDMA fue incorporada en el IMT-2000 CDMA TDD como parte de la especificación técnica.

*La cuarta generación (4G)*, en vista que los sistemas IMT-2000 presentaban ciertas limitaciones en satisfacer las exigencias de la gran demanda de 3G y las nuevas aplicaciones entre otros, multimedia MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service), Servicio de Presencia, PoC avanzado; los organismos de estandarización comenzaron a plantear nuevos productos que se los denominó de cuarta generación (4G). En particular la norma 3GPP propuso el Long Term Evolution (LTE), que presenta las siguientes características:

- a) Incrementar de manera significativa las tasas de transmisión y que se ajusten en forma lineal de acuerdo con el ancho de banda, según las especificaciones de las normas.
- b) Asegurar la continuidad de las tecnologías 3GPP.

Objetivos:

- Tasa instantánea del DL de 100Mbps a 20 Mhz, es decir una eficiencia espectral de 5 bits/s/Hz.
- Tasa instantánea del UL de 50 Mbps a 20 Mhz, es decir una eficiencia espectral de 2,5 bits/s/Hz.

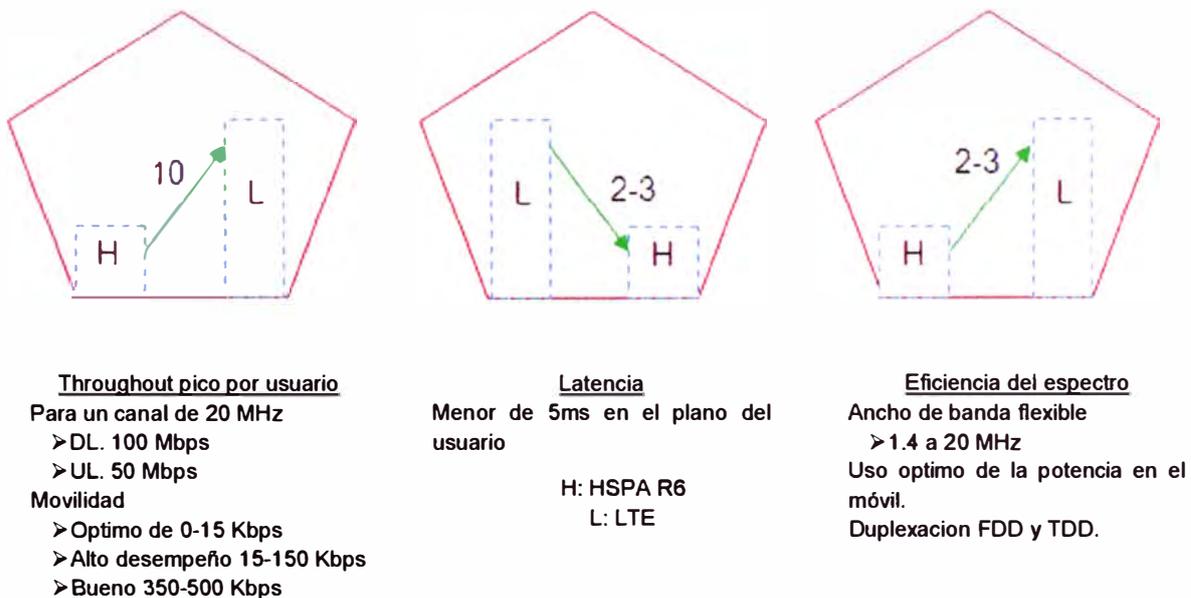
Mientras que en el Release 99 hay solo dos dominios: el de circuitos y el de paquetes, en el Release 5 se agrega un dominio adicional el Dominio IMS (IP Multimedia Subsystem). La interface de aire sigue siendo WCDMA, de hecho solo el Release 8 trata por primera vez el tema de LTE.

El dominio IMS (IP Multimedia Subsystem) permite la conexión de UMTS con el mundo IP. IMS es un marco referencial para la entrega de servicios multimedia usando el

protocolo IP, propuesto por la norma 3GPP para aplicaciones móviles como GSM. Donde sea posible IMS. Tanto el dominio de circuitos como el de paquetes, tiene su propio switch, sin embargo no es caso del dominio IMS.

Es necesaria una evolución de la tecnología de acceso de 3GPP con el fin de garantizar su competitividad a largo plazo. De igual manera la habilidad del sistema 3GPP para ir a la par del rápido desarrollo de IP, necesita introducir mejoras en la tecnología de conmutación de paquetes que se ha venido utilizando. Las mejoras introducidas deben reflejarse tanto en el desempeño de la red como en los costos asociados, entre otros podemos mencionar:

- Reducción de latencia.
- Altas tasas de transmisión a nivel de usuarios.
- Mejoras en la capacidad y cobertura.
- Reducción general de costos.
- Adaptación flexible y despliegue de nuevas tecnologías de acceso y las existentes con movilidad a través de una red IP común.



**Fig. 1.1: Características de LTE**

### 1.3 Long Term Evolution

LTE (Long Term Evolution) es un nuevo estándar de la norma 3GPP. Definida para unos como una evolución de la norma 3GPP UMTS (3G) para otros un nuevo concepto de arquitectura evolutiva (4G). De hecho LTE será la clave para el despegue de internet móvil. Servicios como la transmisión de datos a más de 300 metros y videos de alta definición, gracias a la tecnología OFDMA, serán de uso corriente en la fase madura del sistema.

Lo novedoso de LTE es la interfaz radioeléctrica basada en OFDMA para el enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace ascendente (UL). La modulación elegida por la norma 3GPP hace que las diferentes tecnologías de antenas (MIMO) tengan una mayor facilidad de implementación; esto favorece, según el medio, hasta cuatro veces la eficacia de transmisión de datos.

Las mejoras a investigar son, por ejemplo, el aumento de la eficiencia, la reducción de los costos, la ampliación y mejora de los servicios ya prestados y una mayor integración con los protocolos ya existentes.

#### **1.4 Características**

- a) Alta eficiencia espectral
- b) OFDM de enlace descendente robusto frente a las múltiples interferencias y de alta afinidad a las técnicas avanzadas como la programación de dominio frecuencial del canal dependiente y MIMO.
- c) DFTS-OFDM (single-Carrier FDMA) al enlace ascendente, bajo PAPR, ortogonalidad de usuario en el dominio de la frecuencia.
- d) Multi-antena de aplicación.
- e) Muy baja latencia con valores de 100 ms para el Control-Plane y 10 ms para el User-Plane.
- e) Separación del plano de usuario y el plano de control mediante interfaces abiertas.
- f) Ancho de banda adaptativo: 1,4, 3, 5, 10, 15 y 20 Mhz.
- g) Puede trabajar en muchas bandas frecuenciales diferentes.
- h) Arquitectura simple de protocolo.
- i) Compatibilidad con otras tecnologías de 3GPP.
- j) Interconexión con otros sistemas como CDMA2000.
- k) Red de frecuencia única OFDM.
- l) Velocidades de pico:
  - Bajada: 326,5 Mbps para 4x4 antenas, 172,8 Mbps para 2x2 antenas.
  - Subida: 86,5 mbps
- m) Óptimo para desplazamientos hasta 15 km/h. Compatible hasta 500 km/h.
  - Más de 200 usuarios por celda. Celda de 5 Mhz.
- n) Celdas de 100 a 500 km con pequeñas degradaciones cada 30 km. Se considera tamaño óptimo de las celdas cada 5 km. El Handover entre las tecnologías consideradas en 2G (GSM - GPRS - EDGE), 3G (UMTS - W-CDMA - HSPA) y LTE son transparentes.

LTE solo soporta hard-handover.

Las generaciones 2G y 3G están basadas en técnicas de Conmutación de Circuito (CS) para la voz mientras que LTE propone la técnica de Conmutación por paquetes IP (PS) al igual que 3G (incluyendo las comunicaciones de voz).

UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) Estándar que se empleará en la llamada tercera generación de telefonía móvil, que permitirá disponer de banda ancha en telefonía móvil y transmitir un volumen de datos importante por la red.

Con la tercera generación serán posible las videoconferencias, descargar videos, el intercambio de postales electrónicas, paseos virtuales, compras virtuales, libros virtuales y todo desde el teléfono móvil.

Las operadoras UMTS pueden usar más espectro, hasta 20 Mhz. Mejora y flexibiliza el uso del espectro (FDD y TDD) haciendo una gestión más eficiente del mismo, lo que incluiría servicios unicast y broadcast. Reducción en TCO (coste de análisis e implementación) y alta fidelidad para redes de Banda Ancha Móvil.

Principales parámetros LTE versión 8

**Tabla N° 1.1: Parámetros LTE**

<b>Tipo de acceso</b>	<b>Subida</b>	DFTS-OFDM
	<b>Bajada</b>	OFDMA
<b>Ancho de banda</b>		1.4, 3, 5, 10, 15, 20Mhz
<b>Mínimo TTI</b>		1mseg
<b>Espacio de la subportadora</b>		15kHz
<b>Prefijo de Longitud Cíclica</b>	<b>Corto</b>	4,7µseg
	<b>Largo</b>	16,7µseg
<b>Modulación</b>		QPSK, 16QAM, 64QAM
<b>Multiplexación espacial</b>		Una sola capa para subida para UE
		Hasta 4 capas para bajada para UE MU-MIMO soportado para subida y bajada

## Categorías de los equipos LTE versión 8

**Tabla N° 1.2: Categoría de equipos LTE**

Categoría		1	2	3	4	5
Pico por ratio	Bajada	10	50	100	150	300
	Subida	5	25	50	50	75
Capacidad para funciones físicas						
Ancho de banda RF		20Mhz				
Modulación	Bajada	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	Subida	QPSK, 16QAM		QPSK, 16QAM, 64QAM		
Multi-antena						
2Rx		Asumido en los requerimientos de rendimiento				
2x2 MIMO		No soportado Mandatorio				
4x4 MIMO		No soportado		Mandatorio		

### 1.5 Arquitectura

La interfaz y la arquitectura de radio del sistema LTE es completamente nueva. Estas actualizaciones fueron llamadas Evolved UTRAN (E-UTRAN).

Un importante logro de E-UTRAN ha sido la reducción del costo y la complejidad de los equipos, esto es gracias a que se ha eliminado el nodo de control (conocido en UMTS como RNC). Por tanto, las funciones de control de recursos de radio, control de calidad de servicio y movilidad han sido integradas al nuevo Node B, llamado evolved Node B. Todos los eNB se conectan a través de una red IP y se pueden comunicar unos a otros usando el protocolo de señalización SS7 sobre IP. Los esquemas de modulación empleados son QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La arquitectura del nuevo protocolo de red se conoce como SAE donde eNode gestiona los recursos de red.

### 1.6 Barreras para el despliegue de LTE

Las principales barreras de LTE incluyen la habilidad de los operadores de desarrollar un negocio viable y la disponibilidad de terminales y espectro. Los operadores necesitan que las aplicaciones y los terminales de usuario estén disponibles antes de comprometer el despliegue de tecnologías 4G. Pues los usuarios cambian sus planes

basándose en los equipos, los servicios y las capacidades que estos tengan. Adicionalmente, la disponibilidad de espectro también representará una barrera para LTE pues para alcanzar las velocidades prometidas se requieren 20MHz para el ancho de la portadora y muchos de los operadores no cuentan con el espectro necesario. Aunque se está abriendo nuevo espectro en la banda de 2,6 GHz en Europa y 700 MHz en Estados Unidos y parte de Europa, esto no es suficiente para alcanzar las demandas de LTE. En Europa, Suecia fue el primero en subastar su espectro; los ganadores incluyen Teliasonera, Telenor, Tele2 y Hi3G. Otros países que planean subastar la banda de 2,6 GHz son Italia, Austria, Inglaterra y los Países Bajos.

LTE tiene también algunos desafíos que alcanzar:

Voz sobre LTE: Una de las ventajas que LTE promociona es la Evolución del Core de Paquetes (EPC), que es un auténtica red "All-IP" y por lo tanto debe llevar a todos los tipos de tráfico: voz, video y datos. Pero, la mayoría de los trabajos de normalización se ha centrado en los aspectos de datos de LTE y la voz se ha descuidado un poco. Es evidente que los beneficios en OPEX/CAPEX de un core convergente EPC solo pueden ser logrados cuando todos los tipos de tráfico se realizan sobre un núcleo único y unificado. El problema de la normalización de la voz sobre LTE se complica más aún cuando se mezcla LTE con diferentes tipos de redes tradicionales incluyendo GSM, HSPA, CDMA2000, WiMAX y Wi-Fi.

Algunas soluciones que se han tomado en consideración son:

Circuit Switch Fallback CS FallBack: Esta es una opción atractiva que permite a los operadores aprovechar sus redes GSM / UMTS / HSPA legadas para la transmisión de voz. Con CSFB, mientras se hace o recibe una llamada de voz, el terminal de LTE suspende la conexión de datos con la red LTE y establece la conexión de voz a través de la red legada. CSFB complementa la descarga el tráfico de voz a las redes 2G/3G, que por supuesto obliga a los operadores para mantener sus redes básicas de CS. CS FallBack es una opción atractiva a corto y medio plazo, ya que permite a los operadores optimizar aún más su infraestructura de legado existente, pero en el largo plazo, otras opciones serán más atractivas para cosechar plenamente los beneficios de la convergencia de EPC.

IMS-basado en VoIP: El Subsistema IP Multimedia (IMS) soporta la opción de Voz sobre IP (VoIP) a través de redes LTE directamente. Además, esta opción solo aprovecha Radio Voice Call Continuity (SRVCC) para abordar las brechas de cobertura en redes LTE. Si bien la llamada de voz inicial se establece en la red LTE, si el usuario sale del área de cobertura LTE, entonces la llamada es entregada a la CS principal a través del core IMS. Esta opción proporciona una interesante estrategia de despliegue

para los operadores que tienen un fuerte núcleo IMS, ya que les permite hacer la transición a VoIP desde el principio a la vez que aprovechan los activos existentes legados para la continuidad de voz fuera de las áreas de cobertura LTE.

### **1.7 LTE: la evolución a 4G**

Se ha explicado que la evolución a la tercera generación 3G tiene limitaciones tecnológicas para transmitir información a altas velocidades, con mayor ancho de banda, razón por la cuál la norma 3GPP plantea el desarrollo de LTE, "Long Term Evolution", es decir, evolución a largo plazo.

Mientras que en España y en América Latina todavía se están desplegando las tecnologías 3G (UMTS-WCDMA) y 3.5G (HSDPA), la industria ya tiene puestos los ojos en el próximo paso, el llamado 4G. Durante el evento de Mobile World Congress de Barcelona, las operadoras Vodafone, Verizon Wireless y China Mobile se reunieron con los fabricantes de móviles, chips y equipos de red. La reunión tenía el objetivo de pedirles equipos capaces de operar en las dos versiones que aparecerán de LTE.

Vodafone y Verizon apuestan por LTE FDD (Frequency Division Duplex) que utiliza varias zonas del espectro de radio, mientras que China Mobile desarrollará LTE TDD (Time Division Duplex) que ocupa una sola zona. En caso de llegar a un acuerdo y disponer de móviles y redes que funcionen con estas dos especificaciones, el 4G sería un enorme paso para la industria a nivel mundial.

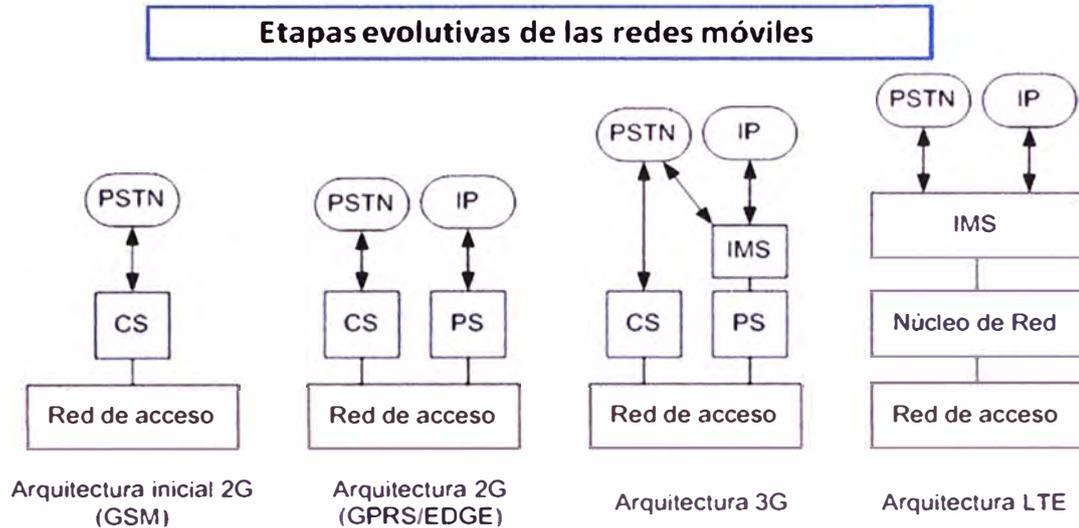
Las empresas involucradas en el tema son las más importantes del sector: Ericsson, Alcatel-Lucent o Nokia Siemens a nivel de red, Nokia, LG, Motorola, Sony-Ericsson e incluso Apple en cuanto a fabricantes de terminales, y también el gigante Huawei y otras empresas chinas como proveedores de equipamiento.

El objetivo ahora es conseguir desarrollar un chip que funcione en ambas versiones de LTE. Los participantes en esta iniciativa compartirán los resultados de las pruebas que se realicen con este fin, algo que nunca se había hecho hasta ahora con el objetivo de lograr un estándar mundial.

Actualmente el 3.5G HSDPA consigue velocidades de 3,6 megabits por segundo, y 7,2 mbps en algunas ciudades concretas. Antes del 2012 la tecnología 3G podría alcanzar los 30 mbps, pero se prevé que la cuarta generación LTE suponga velocidades de entre 50 y más de 100 megabits.

El principal escollo para un móvil que funcione en cualquier país del mundo, es que las autoridades chinas no estarían muy dispuestas a este paso. Un desarrollo tecnológico propio supone una forma de proteger su industria nacional, aunque, por otra parte, debilita su enorme capacidad exportadora.

Tampoco hay que olvidar que, WiMAX no debería quedar fuera de LTE, sino más bien quedar incluida. Hay también que tener en cuenta la llamada convergencia con las redes tradicionales y la desaceleración económica, que hacen que LTE y 4G sean precisamente eso, una evolución a largo plazo.

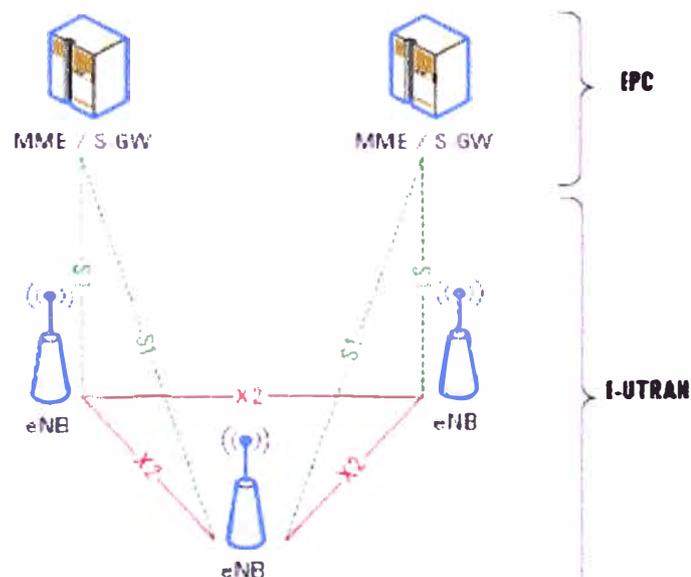


**Fig. 1.2:** Etapas evolutivas de las redes móviles.

Utiliza múltiples antenas (MIMO) en el receptor y en el transmisor siendo una tecnología clave para llegar a los objetivos más competitivos en rendimiento.

3GPP define la arquitectura para que tecnologías como UMTS/HSPA o GSM trabajen en conjunto con las redes LTE

LTE, está compuesto por E-UTRAN(acceso radio) y EPC(núcleo).



**Fig. 1.3:** EPC / E-UTRAN

## 1.8 ¿Es o no es 4G?

Según las investigaciones, el sistema de transmisión LTE-Advanced cumple el 95 por ciento de los requisitos necesarios para un sistema 4G funcional, aunque habrá que esperar a que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) crea un estándar sobre esta nueva tecnología.

En Corea del Sur se anunció que estas tecnologías de la información, la cuarta generación 4G podrá ser comercializado alrededor de 2015.

El ETRI ha registrado ya 24 patentes relacionadas con el 4G surcoreano y ha solicitado protección de propiedad intelectual para 500 procesos realizados durante el desarrollo y la investigación del servicio.

Según datos, este paso pionero hacia la banda ancha en el móvil permitiría que las compañías surcoreanas tengan el 23 por ciento de todos los derechos de la tecnología 4G, mientras que en el LTE o 3.9G disponen del 19 por ciento.



*Fig. 1.4: Servicios en LTE 4G*

## 1.9 Tecnologías 4G complementarias o competidoras

WiMAX, que se desarrolló con cierta ventaja de tiempo sobre LTE, pues en octubre del 2007 obtuvo el estatuto de norma 3G UIT, de lo que se desprende que los operadores con licencia 3G podrán desplegar WiMAX sobre UMTS. Sin embargo, el que LTE supere a WiMAX en ancho de banda, 100 Mbps contra 70 Mbps (35 + 35) y en alcance (100 Kbps en zona rural) y que los principales fabricantes y operadores de telefonía móvil se

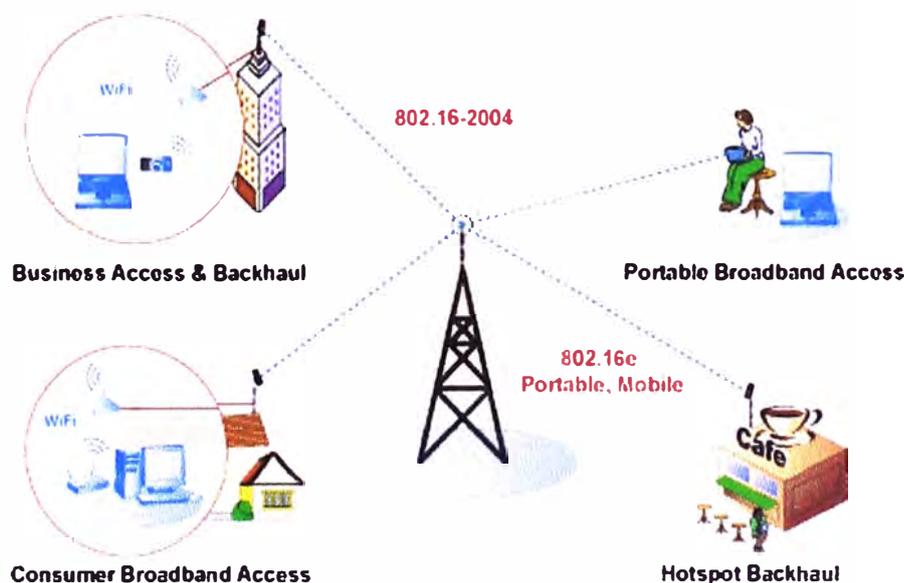
inclinen hacia esta fórmula, conduce a un claro pronóstico a favor de la evolución LTE como sistema 4G.

CDMA2000 UMB (CDMA2000 Ultra Mobile Broadband): Desarrollado por el estándar 3GPP2 es la evolución lógica de la familia de estándares CDMA2000 que incluye las tecnologías de 3G CDMA2000-1xRTT y CDMA2000-1xEVDO-DO.

### 1.10 WiMAX

WiMAX son las siglas de Worldwide Interoperability for Microwave Access, y es la marca que certifica que un producto está conforme con el estándar de acceso inalámbrico IEEE 802.16. Las frecuencias de operación definidas para esta tecnología llegan hasta los 66 GHz, aunque en la actualidad no existe un perfil de certificación del WiMAX Forum para equipos que operen en bandas libres (entre 5 y 6 GHz, dependiendo del país). Aclaradas estas diferencias, en este informe se hablará indistintamente de WiMAX o del estándar 802.16 pese a trabajar en bandas libres.

La primera versión del estándar, que estaba diseñada para terminales fijos, se publicó en 2002 y en diciembre de 2005 se publicó la expansión que permite la coexistencia de terminales fijos y móviles. La versión en vigor substituye a las publicaciones anteriores y es de Mayo de 2009, el IEEE Std 802.16TM-2009.



**Fig. 1.5: WiMAX**

WiMAX es una tecnología inalámbrica de transmisión de datos por micro ondas basada en el estándar 802.16. En una primera versión del estándar, la 802.16-2001 se hacía referencia únicamente a sistemas que funcionaban en bandas entre 10 y 66 GHz, extendiéndose posteriormente en la versión 802.16-2004 a sistemas en bandas de

frecuencias inferiores, entre 2 y 11 GHz. WiMAX hace uso de estas bandas, consiguiendo tener un funcionamiento óptimo tanto en condiciones de visión directa como en presencia de obstáculos, y siendo capaz de conseguir alcances de hasta 50 Km y velocidades de hasta 75 Mbps, gracias a la utilización de capas físicas basadas en OFDM, tamaño de canal flexibles dependientes de la banda de funcionamiento, modulación adaptada con esquemas BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM tanto en tiempo como en frecuencia.

Las características de la tecnología WiMAX la convierten en ideal para suministrar servicios de banda ancha de naturaleza inalámbrica. La gran popularidad que están alcanzando estas redes exige la existencia de herramientas que permitan una sencilla planificación y un adecuado dimensionamiento que garantice el éxito de los despliegues. A continuación se hace una recopilación de las tecnologías que hacen posible el funcionamiento de WiMAX, así como sus descripciones y características principales.

### **1.11 El futuro de WiMAX y la convergencia con 4G**

Objetivos: Presentar un panorama general de la tecnología WiMAX, y plantear una visión a mediano y largo plazo.

### **1.12 Acceso al medio**

A continuación se verán las técnicas principales en procesado de señal de acceso al medio destacando aquellas que utiliza WiMAX. Dentro del concepto de acceso al medio diferenciamos tres tipos: cómo se gestiona el acceso para los dos canales (subida y bajada de la información), el acceso de los usuarios y la multiplexación de la información.

En primer lugar se tiene las técnicas de acceso bidireccional. Este tipo de comunicaciones tiene una característica dúplex, es decir, existe una transmisión y recepción en los dos extremos. Como ambas comunicaciones comparten el mismo medio, es necesario establecer algún mecanismo para el control del acceso. Los métodos principales son FDD (basado en reparto de la frecuencia) y TDD (reparto temporal).

El estándar WiMAX soporta ambas técnicas de transmisión. Las soluciones para bandas licenciadas recurren a las técnicas FDD, mientras que las orientadas a bandas libres usan la técnica TDD. De cualquier forma, dentro de las bandas existe cierta flexibilidad a la hora de usar cada tipo de tecnología.

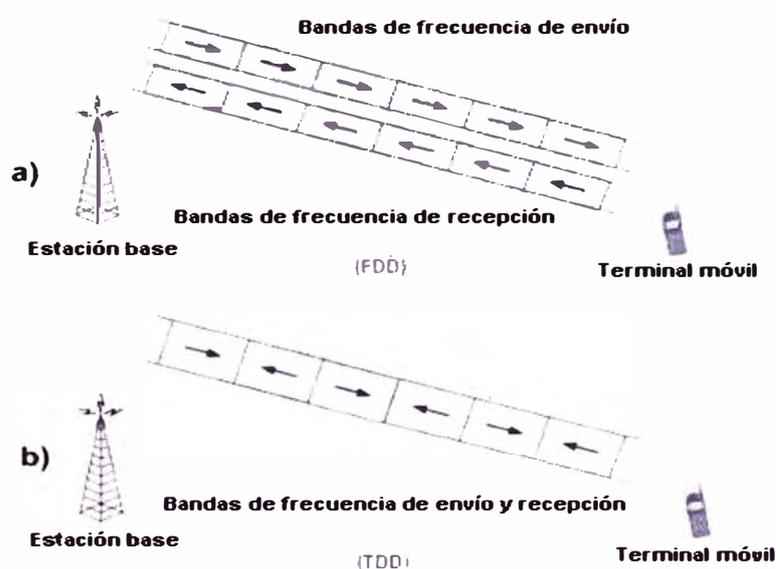
### **1.13 Frequency Division Duplex FDD**

Técnica Frequency Division Duplex, o transmisión bidireccional por división en frecuencia. Se basa en la utilización de dos bandas diferentes de frecuencia para la transmisión, una para el envío y otra para la recepción (*ver Fig. 1.6 a*). La cual es utilizada en telefonía móvil de segunda generación (GSM) y tercera generación.

Como desventaja tiene el hecho de tener que recurrir a buenos filtros separadores de frecuencia (ya que se tratan normalmente de bandas conexas). Este tipo de filtros reciben el nombre de duplexores.

Esta técnica es la que mejor se adapta al tráfico de voz, ya que permite tener un retardo mínimo, pero, por contra es la que requiere una implementación más costosa, principalmente por la adquisición de la licencia para operar en el espectro. Además, presenta la ventaja de no tener que recurrir a bandas de guardia temporales como en el caso TDD.

En general, se recomienda su utilización en entornos con patrones de tráfico predecibles, donde el costo del equipamiento es más importante que la eficiencia espectral.



**Fig. 1.6:** Técnicas de acceso al medio

#### 1.14 Time Division Duplex TDD

Time Division Duplex, o transmisión bidireccional por división en tiempo. A diferencia de la técnica FDD, se utiliza una única banda de frecuencia para envío y recepción de la información, compartiendo los periodos de transmisión (ver Fig. 1.6b). Esto provoca que los retardos de transmisión limiten el tamaño de las celdas.

Es una técnica muy eficiente para tráfico asimétrico, ya que se adapta al perfil del tráfico, por lo que se considera más adecuado para perfiles con descargas masivas de internet, por ejemplo. Ésta es la técnica utilizada en telefonía DECT y en redes inalámbricas. En general se usa en entornos donde no están disponibles pares de frecuencia.

Presenta un uso más inteligente de las antenas inteligentes y está enfocada a usos donde la eficiencia espectral sea más importante que el costo.

### **1.15 Multiplexación de la información**

Por multiplexación entendemos el proceso donde múltiples canales de información se combinan en un canal de transmisión. Existen dos métodos de multiplexación principales: TDM (multiplexación en tiempo) y FDM (multiplexación en frecuencia), en función del recurso que comparten.

En FDM muchos canales se combinan repartiendo rangos de frecuencias espectrales, de manera similar al FDD, teniendo que reservar bandas de guarda para evitar traslapamientos. Para conseguir una mayor eficiencia se ha desarrollado el método OFDM.

### **1.16 OFDM**

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) es una técnica de multiplexación multiportadora que proviene de la década de 1960, pero que ha resurgido en la actualidad por sus aplicaciones en transmisiones inalámbricas. En cuanto a sus aplicaciones, además de las relacionadas con el uso militar de sus orígenes, está presente en la ADSL, DAB (radio digital europea), DVB-T (televisión digital terrestre), junto a las ya mencionadas en comunicaciones inalámbricas WiFi (802.11a) y WiMAX.

La base del OFDM reside en la combinación de múltiples portadoras moduladas traslapadas espectralmente, pero manteniendo las señales moduladas ortogonales, de manera que no se producen interferencias entre ellas. Además, es posible utilizar diferentes técnicas de modulación entre portadoras, con lo cual se consigue una funcionalidad extra.

En recepción las portadoras deben ser separadas antes de modular. En las técnicas de multiplexación tradicionales FDM, se utilizaban filtros pasa banda en cada una de las frecuencias, por lo que además de no traslapar las bandas, era obligatoria la reserva de bandas de guarda. Un método de conseguir una mayor eficiencia espectral es traslapar las portadoras, mediante el uso de una DFT, tanto en modulación como en demodulación, que es en lo que se basa el OFDM. Para ello se hace coincidir los lóbulos espectrales principales con los nulos del resto de portadoras, manteniendo la señal ortogonal.

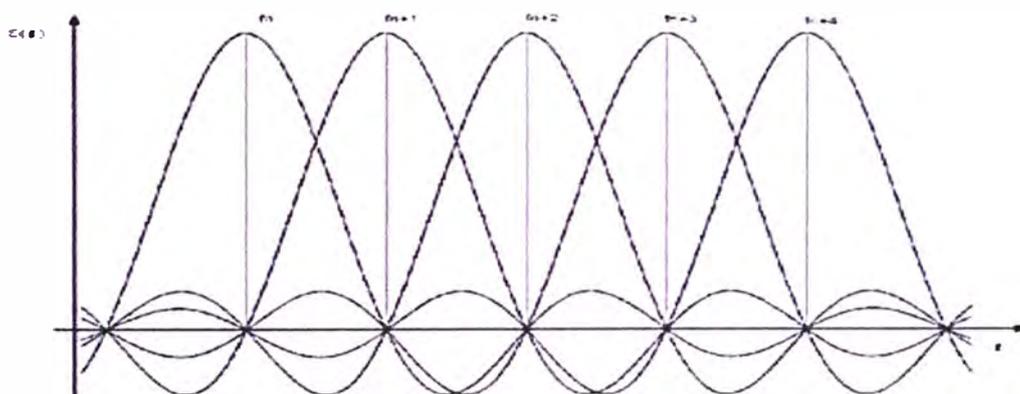
De esta manera es posible incrementar la eficiencia espectral, sin tener interferencia entre los canales. Pese a ello, en implementaciones reales existe una pequeña interferencia, que provoca que se pierda en forma mínima la ortogonalidad. Otra ventaja del OFDM, que es la causa por la que se ha popularizado en la tecnología WiMAX, es la capacidad para gestionar los diferentes retardos que se producen en señales que padecen multitrayecto. En un canal de radio, estos efectos se traducen en la

no respuesta plana del canal, la aparición de nulos, que normalmente conducen a la pérdida completa de la señal. Además, estos multitrayectos pueden producir interferencia entre símbolos, provocado por los diferentes retardos, que hace que se mezclen símbolos consecutivos. Esto se soluciona mediante la utilización de un periodo de guarda para cada símbolo OFDM, trasladando la misma idea que se utiliza en FDM.

Presenta la desventaja de ser más sensible que las técnicas tradicionales al desfase en frecuencia o desfase en la sincronización temporal.

Además, por su carácter ortogonal, presenta una elevada relación peak-to-average, condicionando el tipo de amplificadores que se pueden utilizar.

La distribución de datos sobre muchas portadoras hace que alguno de los bits transmitidos puedan ser recibidos de manera errónea. Es por ello que se hace imprescindible utilizar mecanismos de corrección de errores, que añaden bits adicionales en la transmisión, pero que hacen posible la corrección de dichos errores.



**Fig. 1.7:** Distribución de datos sobre una portadora

Sobre este método de multiplexación, se han desarrollado, a iniciativa de diferentes fabricantes, diversos variantes del original que veremos a continuación.

### 1.17 W-OFDM

Es una variante de la multiplexación OFDM, que es la que se está generalizando en los estándares inalámbricos, tratando de resolver los problemas que presenta la técnica anterior. Se basa en la transmisión de símbolos de entrenamiento, que permiten reducir los efectos adversos del canal, mediante una estimación y división respecto a la respuesta en frecuencia.

Además, utiliza un código FEC (Forward Error Correcting) como el Reed- Solomon, para expandir los símbolos sobre un amplio rango de frecuencias, que convierten la señal en un espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS). De esta manera, es posible recuperar los símbolos aunque se pierdan algunas de las portadoras. Para compensar el

problema del excesivo ratio peak-to-average en amplitud, debido al multitrayecto, esta técnica incorpora una aleatoriedad de la señal y una estimación del canal. La aleatoriedad en la transmisión permite blanquear la señal y eliminar la necesidad de amplificadores específicos. Por otro lado, el incluir datos conocidos en la señal, es posible calcular la respuesta del canal y utilizar esta respuesta para corregir los efectos que produce sobre los datos.

De esta manera, esta tecnología permite la utilización de menos potencia, manteniendo una baja tasa de interferencia con otras redes. Así, es posible que diferentes canales operen en la misma banda, como pueden ser redes punto a multipunto y redes punto a punto de backbone.

### **1.18 Flash-OFDM**

Flash-OFDM es una técnica de procesado nueva que ha sido desarrollada por Lucent y que soportará tasas elevadas de datos con pocas pérdidas de paquetes y retardos, de hecho, las siglas FLASH vienen de Fast Low-Latency Access with Seamless Handoff. Se basa en la utilización de múltiples tonos y flash hopping para expandir la señal en el espectro.

Este estándar está siendo apoyado por Lucent y Qualcomm como el sucesor de WiMAX, dentro del estándar 802.20, que consigue un mayor ancho de banda, distancia y movilidad.

### **1.19 Acceso al medio de los usuarios**

En este apartado veremos cómo se gestiona el acceso múltiple de los usuarios al canal de información. En primer lugar estudiaremos las técnicas tradicionales TDMA y CDMA, que se usan ya en telefonía de 2G y 3G. A continuación veremos la técnica de acceso OFDMA, basada en la modulación OFDM, para terminar por cómo se aplican estas técnicas en WiMAX.

#### **1.19.1 TDMA y CDMA**

TDMA se corresponde con Time División Multiple Access, mientras que CDMA con Code División Multiple Access. Ambas tecnologías persiguen el mismo objetivo mediante la utilización de diferentes mecanismos, de conseguir la mejor utilización del espectro permitiendo a múltiples usuarios compartir el mismo canal físico. TDMA se basa en la división del canal en ranuras temporales, transmitiendo los diferentes usuarios con una técnica similar a la del paso de testigo, es decir, sólo uno de los usuarios utiliza el canal de manera simultánea.

CDMA, por otro lado, permite a todos los usuarios transmitir de manera simultánea, algo que era imposible con las técnicas de modulación tradicionales, por lo que se basa

en técnicas de espectro ensanchado. Mediante estas técnicas los bits a transmitir por un usuario se reparten a lo largo del canal de una manera sub aleatorio. En CDMA se habla de la posibilidad de realizar soft handoff, o cambio transparente de celdas en las comunicaciones. Otra de las ventajas es la capacidad que proporciona, dada su elevada eficiencia espectral, ya que acomoda más usuarios por ancho de banda.

Entre las diversas implementaciones existentes de TDMA, cabe destacar el GSM, que utiliza la técnica de saltos de frecuencia. En el caso de TDMA, es el switch el encargado de determinar cuándo debe conmutar la señal. En la *tabla 1.2* se muestra un cuadro comparativo entre los distintos métodos de acceso múltiple.

**Tabla N° 1.3: Comparación de métodos de acceso múltiple**

<b>Método</b>	<b>TDMA</b>	<b>CDMA</b>
<b>Divide en</b>	Tiempo Segmenta tiempo de transmisión	Código Segmenta códigos en espectro disp.
<b>Terminales</b>	Todas activas en diferentes tiempos	Todas activas
<b>Separación de Señal</b>	Sincronización en el dominio del tiempo	Código más receptores especiales
<b>Ventajas</b>	Muy flexible Sistemas bien establecidos	Flexible Menos planeación necesaria
<b>Desventajas</b>	Sincronización difícil y se necesita una guarda en el tiempo	Receptores complejos Necesita control de potencia

### **1.19.2 Multiplexación Por División De Frecuencias Ortogonales / OFDMA**

OFDMA, también denominada como multiuser-OFDM, está siendo considerado como un método de modulación y acceso múltiple para tecnologías inalámbricas como WiMAX. Se trata de una extensión de la técnica Orthogonal Frequency División

Multiplexing (OFDM), que es la técnica de multiplexación en uso en los sistemas inalámbricos 802.11a/g y 802.16/a/d/e, como vimos anteriormente.

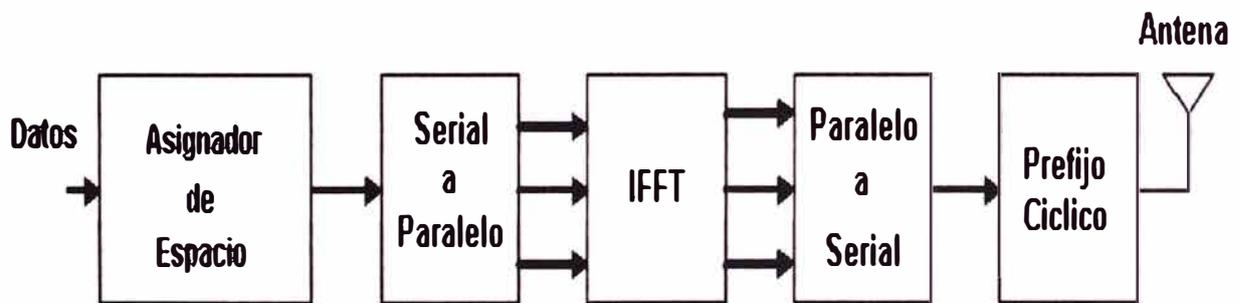
En los sistemas OFDM actuales, un único usuario puede transmitir sobre todas las subportadoras en cualquier momento y se utilizan técnicas de acceso múltiple por división en frecuencia o el tiempo para soportar múltiples usuarios. El principal problema de estas

técnicas de acceso estáticas es el hecho de que los usuarios ven el canal de una manera diferente cuando no es utilizado. OFDMA, por el contrario, permite a múltiples usuarios transmitir en diferentes subportadoras por cada símbolo OFDM. Así, se asegura de que las subportadoras se asignan a los usuarios que ven en ellas buenas ganancias de canal.

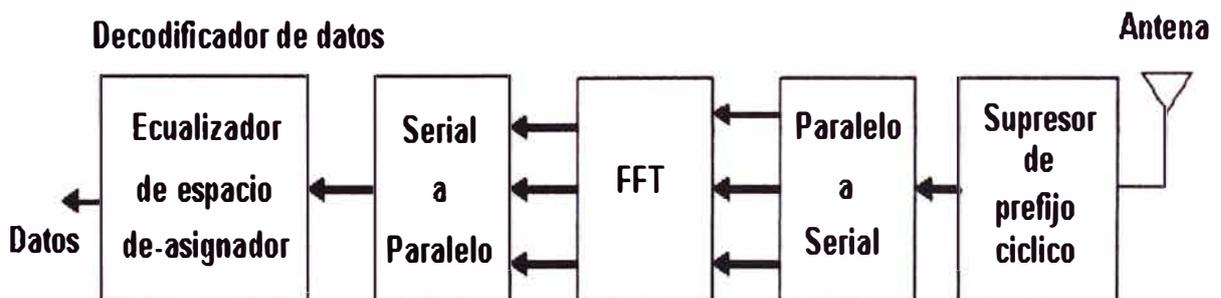
En general existen dos tipos de permutaciones de subportadora: distribuidas (que se comportan mejor en ambientes de movilidad) y adyacentes (para entornos fijos o de bajo movimiento).

### 1.19.3 Transmisor OFDM

La figura 1.8 muestra el diagrama a bloques resumido de un transmisor de OFDM, el primer paso para generar una señal OFDM es codificar la señal, enseguida se realiza una modulación digital, ya sea BPSK o QAM, enseguida el tren de símbolos resultantes de la modulación se convierte de serie en paralelo, lo cual genera N trenes de pulsos de menor velocidad (N veces menor). A cada uno de estos trenes de pulsos de baja velocidad se les realiza una transformada inversa de Fourier, para pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y cada una de las frecuencias resultantes se escoge que sean ortogonales entre sí. Generalmente se cumple la condición de ortogonalidad solo con que las frecuencias sean armónicas unas de otras. Es decir una frecuencia sea un múltiplo de la otra. El siguiente paso es sumar esas frecuencias ortogonales y modularlas en una sola portadora, que es la frecuencia a la que se transmitirán.



**Fig. 1.8:** Diagrama a bloques del transmisor OFDM, OFDMA



**Fig. 1.9:** Diagrama a bloques del receptor OFDM, OFDMA

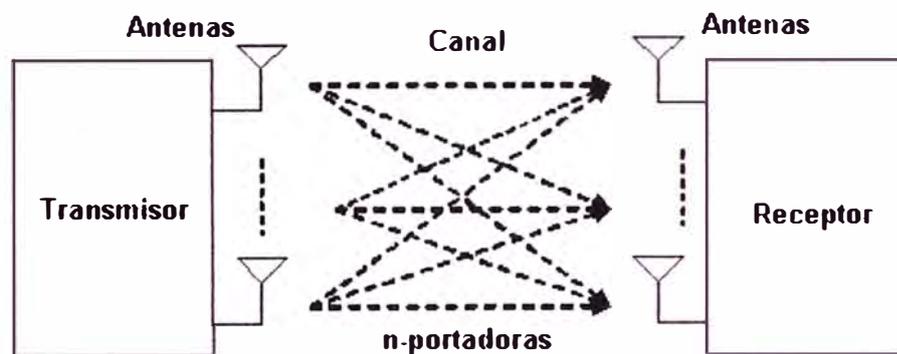
Las funciones del receptor de la técnica de modulación son inversas a la razón de método del receptor, sin embargo se debe tener un gran cuidado en el acoplamiento donde debe de existir máximo acoplamiento ó un auto escalamiento entre los dos por razones de trabajar a la misma banda de frecuencia.

Se puede obtener un sistema de comunicación MIMO que es un sistema detallado por el estándar 802.11a y 802.11g sistemas para lograr la tasa máxima de 54 Mbps.

En un MIMO-OFDM el transmisor, es un vector de transmisión de cada tono con múltiples antenas que transmiten. En el receptor, la señal en cada antena RX tendrá que transmitir todas las señales procedentes de diferentes canales.

Después de FFT, el canal de frecuencia de respuesta será una matriz en cada tono. El vector recibir en cada tono de vectores será la matriz multiplicada por el vector transmitir. Luego espacial detección se realiza a recibir el vector de cada tono a igualar para el canal y separar las señales de transmitir.

Multipath sigue siendo una ventaja para un MIMO-OFDM desde el sistema de selectividad de frecuencia causado por múltiples mejora el rango de distribución del canal de frecuencia a través de matrices de tonos, con lo que aumenta la capacidad.



*Fig. 1.10: Diagrama a bloques del sistema MIMO para OFDM, OFDMA.*

#### 1.19.4 Características del transmisor OFDM

Cada grupo se transmite en un símbolo OFDM conjuntamente con 4 subportadoras más que hacen de pilotos ( $N_{SP}$ ) y 12 subportadoras que no contienen información en un período  $T_U$ .

Por lo tanto, un símbolo OFDM está formado por un total de 64 subportadoras en las cuales 52 contienen información.

Además en el dominio temporal se añade el prefijo cíclico (CP) que es una copia de las 8 o 16 últimas muestras del símbolo OFDM con un período  $T_{CP}$ .

Al final se transmite, primero el prefijo cíclico y después el símbolo OFDM (Figura 1.11) en un período  $T_S$  ( $T_U + T_{CP}$ ).



**Fig. 1.11: Símbolo OFDM**

La longitud de un símbolo OFDM es de 64 muestras y de un período de 3,2 $\mu$ s. Para el prefijo cíclico hay dos posibles valores según el estándar: El obligatorio de 0,8 $\mu$ s y el opcional de 0,4 $\mu$ s. La Tabla 1.3 contiene los valores numéricos de los parámetros del símbolo OFDM.

**Tabla N° 1.4: Valores numéricos de los parámetros OFDM**

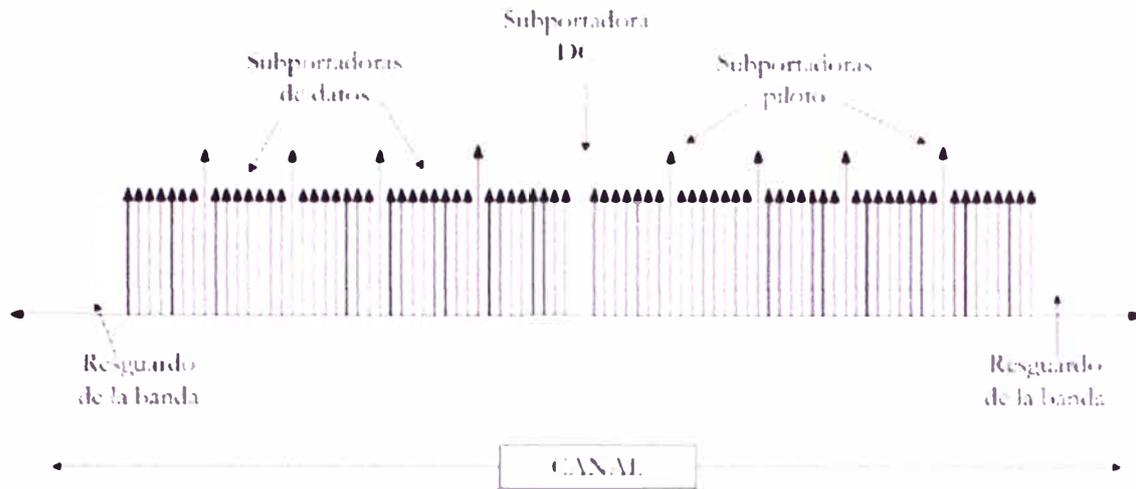
Parámetro	Valor	
Velocidad de muestreo $f_s$	20 MHz ( $f_s = 1/T$ )	
Período de un símbolo OFDM $T_U$	64 x T 3,2 $\mu$ s	
Período de un prefijo Cíclico $T_{CP}$	16 x T 0,8 $\mu$ s	8 x T 0,4 $\mu$ s
Período de un símbolo OFDM con prefijo cíclico $T_S$	80 x T 4 $\mu$ s ( $T_U + T_{CP}$ )	72 x T 3,6 $\mu$ s ( $T_U + T_{CP}$ )
Número de subportadoras de datos $N_{SP}$	48	
Numero de subportadoras de pilotos $N_{ST}$	4	
Número total de subportadoras con información $N_{ST}$	52 ( $N_{SP} + N_{ST}$ )	
Espacio entre subportadoras $\Delta_f$	0,3125 MHz ( $1/T_U$ )	

### 1.19.5 OFDM en WiMAX

Hasta ahora se ha revisado en forma breve y general el concepto de OFDM, en los párrafos siguientes se abordará desde la perspectiva de WiMAX, con los parámetros y valores que especifican los estándares 802.16 de la IEEE.

En la capa Física del estándar 802.16-2004 se especifica la interfaz Wireless MAN-OFDM, en la cual se establece que se utilizan 256 subportadoras, de las cuales 192 son utilizadas para datos, 8 son pilotos y 56 son nulas.

Las subportadoras pilotos son utilizadas como referencia para minimizar los desplazamientos de frecuencia y fase. Por último las 56 subportadoras nulas son utilizadas para resguardo de la banda y la frecuencia DC, que corresponde a la frecuencia central del canal (Fig.1.12).



**Fig. 1.12:** Diagrama con las subportadoras de OFDM

A continuación se presentan los parámetros definidos en el estándar 802.16-2004 de la IEEE en la Tabla 1.4, para caracterizar los símbolos OFDM.

**Tabla N° 1.5:** Parámetros del símbolo OFDM

Parámetros	Descripción
$BW$	Es el ancho de banda nominal del canal
$N_{used}$	Número de subportadoras utilizadas
$n$	Factor de muestreo. Este parámetro, en conjunto con $BW$ y $N_{used}$ determinan la distancia entre subportadoras, y el tiempo útil del símbolo
$G$	Es la razón entre el tiempo del CP y el tiempo útil del símbolo
$N_{FFT}$	Es la potencia de dos más pequeña, pero mayor a $N_{used}$

En la Tabla 1.5 se muestran algunos de los valores especificados para la interfaz Wireless MAN-OFDM en la transmisión de la señal OFDM, en el estándar 802.16-2004 de la IEEE.

**Tabla N° 1.6:** Valores para los parámetros de la señal OFDM transmitida

Parámetros	Valor
$N_{FFT}$	256
$N_{used}$	200
$n$	8/7 para canales con ancho de banda múltiplos de 1,75 MHz 86/75 para canales con ancho de banda múltiplos de 1,5 MHz 144/125 para canales con ancho de banda múltiplos de 1,25 MHz 316/275 para canales con ancho de banda múltiplos de 2,75 MHz 57/50 para canales con ancho de banda múltiplos de 2,0 MHz 6/7 para canales con ancho de banda no especificados acá
$G$	¼, 1/8, 1/16, 1/32

Número de subportadoras utilizadas como resguardo en el límite inferior	28
Número de subportadoras utilizadas como resguardo en el límite superior	27

### 1.19.6 OFDMA en WiMAX

OFDMA consiste en una técnica de acceso múltiple basado en OFDM, en el cual a cada usuario se le asigna una o más subportadoras, con lo cual los usuarios comparten un determinado ancho de banda. La forma en que las subportadoras son asignadas dependerá de la estrategia de despliegue del operador, ya que tienen directa relación con la calidad de servicio y la tasa de transferencia de éstos, la finalidad de todo esto es que los usuarios se beneficien.

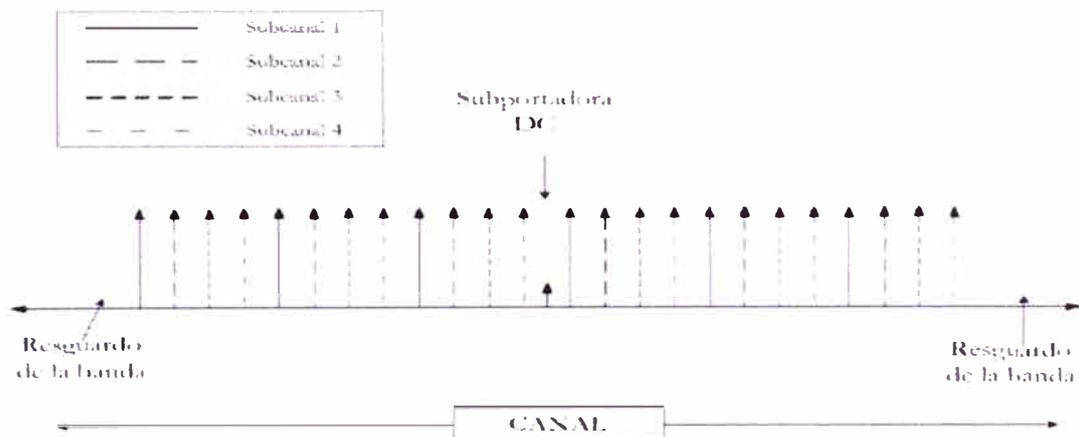
En la Fig.1.13 se muestra un diagrama donde se explica cómo se agrupan las subportadoras para formar un subcanal, el cual es asignado a un usuario.

Para OFDMA se definen los mismos parámetros, pero con la diferencia que se especifica los valores a utilizar.

Se hace explícito que  $N_{used}$  incluye la subportadora DC, el factor de muestreo  $n$ , era fijado en  $8/7$  pero se hace una corrección, exigiendo lo siguiente:

Para canales con ancho de banda múltiplo de 1,75 MHz se utilizará  $n = 8/7$ ; para múltiplos de 1,25; 1,5; 2 o 2,75 MHz se utilizará  $n = 28/25$ ; y en el caso que el ancho de banda del canal no sea múltiplo de ninguna de las opciones antes mencionadas se utilizará  $n = 8/7$ .

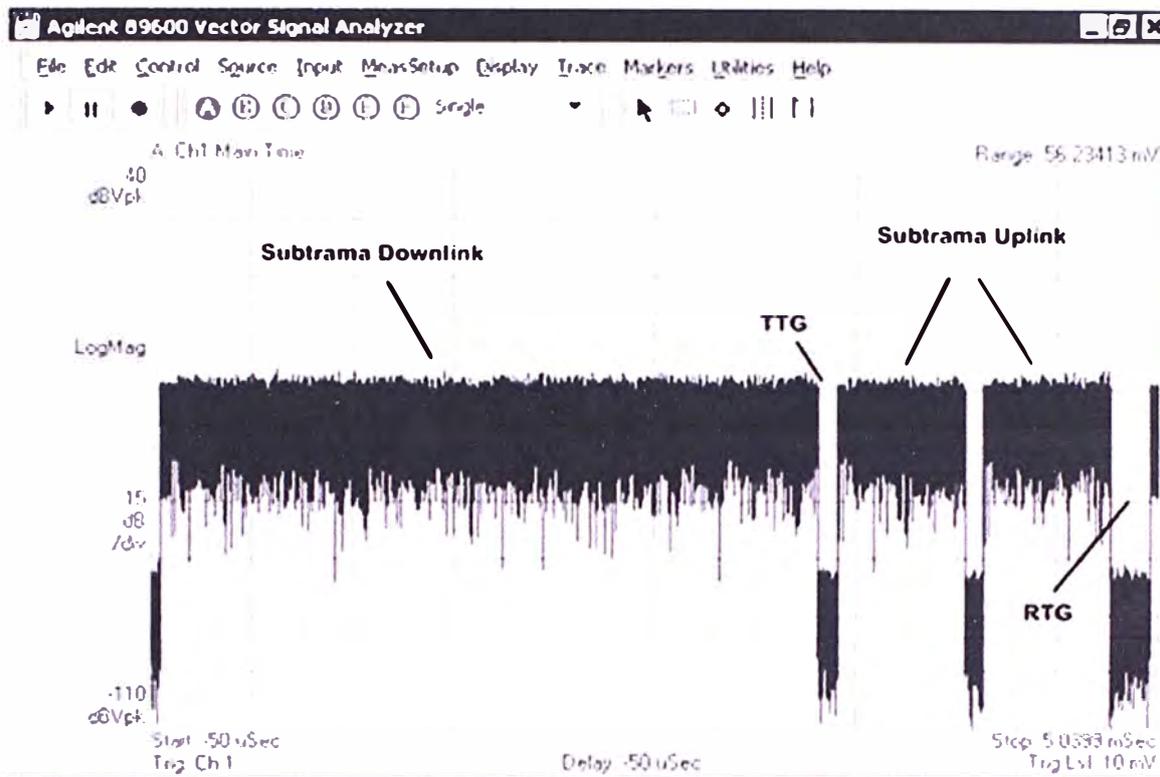
Finalmente para la razón entre el tiempo del prefijo cíclico y el útil,  $G$ , se deben soportar los siguientes valores:  $1/32$ ,  $1/16$ ,  $1/8$  y  $1/4$ .



**Fig. 1.13:** Diagrama con la subcanalización utilizada en OFDMA

A partir del hecho que el parámetro  $N_{FFT}$  variará, nace la necesidad de utilizar OFDMA pero en forma flexible.

### 1.19.7 Estructura de la Trama



**Fig. 1.14:** Respuesta en el dominio del tiempo de una trama de WiMAX

Una trama en WiMAX consiste en una subtrama downlink (DL) (las subtramas son generalmente ráfagas de Radio Frecuencia), y una subtrama uplink (UL).

La trama TDD consiste en una subtrama downlink DL seguida por una o varias subtramas uplink UL.

Actualmente existen siete periodos de tramas especificadas para su uso en el estándar IEEE 802.16- 2004 en el rango de los 2,5 a los 20 ms.

La estructura flexible de la trama en la señal TDD consiste en un límite adaptable entre las subtramas DL y UL.

Un pequeño hueco en la transición es colocado entre las subtramas DL y UL y es llamado intervalo de transición transmisor / receptor (TTG por sus siglas en ingles). Después de ser completada la subtrama UL, otro pequeño intervalo es agregado entre esta subtrama y la siguiente subtrama DL.

Este hueco es llamado intervalo de transición receptor / transmisor (RTG). La duración en tiempo de estos intervalos de transición está fuera de las especificaciones del estándar 802.16 y se encuentran en función del ancho de banda del canal y de la duración del símbolo de OFDM.

Una trama típica de WiMAX es mostrada en la Fig. 1.14. Esta figura muestra la respuesta en el dominio del tiempo de las subtramas DL y UL.

También muestra el espaciado TTG y RTG entre las subtramas.

### 1.19.8 Procesado de la señal

En este capítulo se verán las técnicas principales en procesado de señal, dentro de las que incluimos las técnicas de modulación adaptivas, la radio definida por software, las diferentes técnicas de control de errores y reenvío de tramas y, por último, las técnicas de control de potencia.

### 1.19.9 Modulación adaptativa

Los diferentes órdenes de modulación permiten enviar más bits por símbolo y, por tanto, alcanzar un mayor throughput y eficiencia espectral. A pesar de ello, utilizar técnicas de modulación como 64-QAM, implica que sea necesaria una mayor relación señal a ruido (SNR) para evitar las interferencias y mantener una tasa de error de bit moderada.

El uso de modulación adaptativa permite que un sistema inalámbrico pueda escoger el orden de modulación en función de las condiciones del canal. Para el caso de WiMAX, a mayor distancia de la estación base menor es el orden de modulación, pasando por las siguientes técnicas: 64QAM, 16QAM, QPSK y BPSK.

Así el sistema para trabajar en 64QAM necesita unos 22 dB de relación señal a ruido, para 16QAM son necesarios unos 16 dB y para QPSK 9 dB.

## 1.20 Características y ventajas de WiMAX

- a) Mejoras en las interferencias aéreas: WiMAX móvil utiliza OFDMA para mejorar el rendimiento en ambientes donde no se tiene línea de vista y alta flexibilidad para asignar recursos a usuarios con diferentes requerimientos de velocidad de datos.
- b) Alta velocidad de datos: Una variedad de técnicas y antenas son soportadas por WiMAX móvil para incrementar el monto de datos procesados especialmente en el borde de la cobertura. Por ejemplo, el uso de antenas MIMO (múltiples-entradas múltiples-salidas), combinada con esquemas flexibles de sub-canalización, modulación adaptable y rangos de codificación variable hacen posible que WiMAX pueda alcanzar velocidades superiores a los 46 Mbps (en el caso de downlink) por sección, y superiores a 14 Mbps por sección (hablando de uplink) en un canal de 10 MHz.
- c) Quality of service (QoS): La base fundamental de la arquitectura de control al medio (MAC) del IEEE 802.16e es QoS. WiMAX móvil provee operadores para optimizar el rendimiento de la red dependiendo del tipo de servicio (voz, video, juegos) y el tipo de conexión de los usuarios. El estándar define servicios. Además, subcanalización y

protocolo de acceso al medio (MAP) basados en esquemas de señalización ofrecen un óptimo mecanismo flexible para organizar el tráfico de broadcast y unicast.

- d) Escalabilidad: Utiliza OFDMA escalable (SOFDMA) y, de acuerdo con la descripción inicial del sistema WiMAX móvil, tiene la capacidad para operar en canales de 5, 7, 8,75 y 10 MHz y cumplir con varios anchos de banda del espectro de la red mundial.
- e) Seguridad: WiMAX móvil incorpora la más avanzada seguridad actualmente usada en IEEE 802 para acceso a sistemas inalámbricos. Esto incluye Extensible Authentication Protocol (EAP) autenticación base, Advanced Encryption Estándar (AES) encriptación autenticada básica, Cipher-based Message Authentication Code (CMAC) y Hashed Message Authentication Code (HMAC).
- f) Movilidad: La tecnología WiMAX soporta esquemas optimizados con latencias menores a los 50 ms para ayudar a asegurar aplicaciones de tiempo real como VoIP son soportadas eficientemente sin pérdidas en el servicio.

**Tabla N° 1.7: Características de WiMAX**

	<b>802.16</b>	<b>802.16d-2004 (Wimax Fijo)</b>	<b>802.16e-2005 (WiMax Móvil)</b>
<b>Espectro</b>	10-66 GHz	2-11 GHz	< 6GHz
<b>Funcionamiento</b>	Solo con visión directa	Sin visión directa (NLOS)	Sin visión directa (NLOS)
<b>Tasa de bit</b>	32-134 Mbits/s con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbits/s con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbits/s con canales de 5 MHz
<b>Modulación</b>	QPSK, 16 QAM y 64 QAM	OFDMA con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDMA con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM
<b>Movilidad</b>	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
<b>Anchos de banda</b>	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz	Igual que 802.16a con los canales de subida para ahorrar potencia
<b>Radio de celda típico</b>	2-5 Km aprox.	5-10 Km aprox. (alcance máximo de unos 50 Km.)	2-5 Km aprox.

### 1.21 Comparativo de WiMAX con otras tecnologías Inalámbricas

La comparación de características entre las tecnologías inalámbricas de WiMAX móvil y otras tecnologías entre ellos los de la tercera generación 3G, debe incluir ancho de banda, seguridad, calidad de servicio, velocidad pico y velocidad promedio, la frecuencia de los espectros, modulación, tasa de bits transportadas, entre otros.

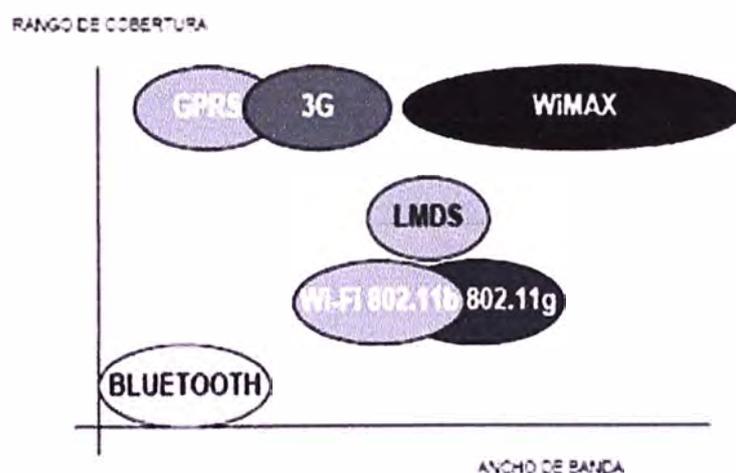
Todo esto se requiere para transmitir señales radioeléctricas, que son las portadoras de toda la información de datos, voz, video y otras aplicaciones, cada vez a mayor velocidad, ancho de banda y seguridad.

La siguiente tabla (1.7) resume las principales características de WiMAX y 3G.

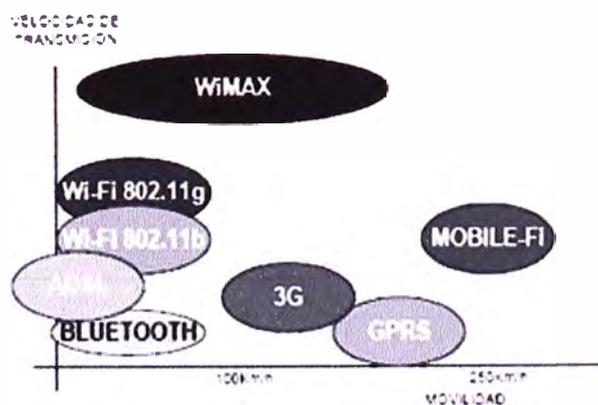
**Tabla N° 1.8: Comparativa de tecnologías inalámbricas**

Características	WiMAX	3G
Espectro requerido	3.5 GHz	450 MHz
Velocidad Pico	75 Mbps	3.1 Mbps
Velocidad Promedio	2 Mbps	1.8 Mbps
Alcance Máximo por radió base	48 Km.	90 Km.
Alcance Promedio	15 Km.	45 Km.

Como podemos observar WiMAX ofrece una mayor velocidad pico y promedio fundamentalmente, debido a que requiere una mayor frecuencia, sin embargo la evolución de tercera generación ó simplemente 3G requiere menos espectro y cuenta con mayor alcance promedio y mayor alcance por radio base.



**Fig. 1.15: Comparación de rango de cobertura y ancho de banda**



**Fig. 1.16: Comparación: velocidad de transmisión y movilidad**

## 1.22 Tendencias actuales de WiMAX

Crecimiento de demanda y otros servicios requeridos por los usuarios

Crecimiento de infraestructura instalada (diversas compañías han iniciado el tendido de infraestructura para ofrecer servicios de acceso en BA fijo vía WiMAX, es decir lograr una cobertura total de WiMAX)

Mayor penetración de mercado (más usuarios)

Reducción de costos de conexión

## 1.23 WiMAX y el camino hacia la tecnología móvil 4G

Mientras nos ponemos al día, cambiamos nuestros celulares y optamos por la tecnología en la onda 3G, el panorama volverá a cambiar antes de lo esperado con el lanzamiento de teléfonos con tecnología 4 G.

¿Qué es la tecnología 4G? Se espera que sea end-to-end (una de las bases del Transmission Control Protocol), con uso total de IP (Protocolo de Internet) y redes packet-switched.

Probablemente no entiendas bien de qué se trata, pero estas características vienen a resolver lo que se espera que sea un incremento altísimo en el uso de las transmisiones wireless de audio, video y datos. La idea es aumentar la velocidad de transmisión e incluso mejorar el precio.

Las grandes expectativas y la anticipación de esta noticia vienen un poco a meter presión para definir desde ahora los estándares de interoperabilidad y todo lo que hace a 4G y sus componentes.

Creando estándares y parámetros bien definidos existe la esperanza de evitar problemas de compatibilidad entre productos certificados y otros que no lo estén, por eso el actual revoloteo con 4G: la idea es que se trate a tiempo.

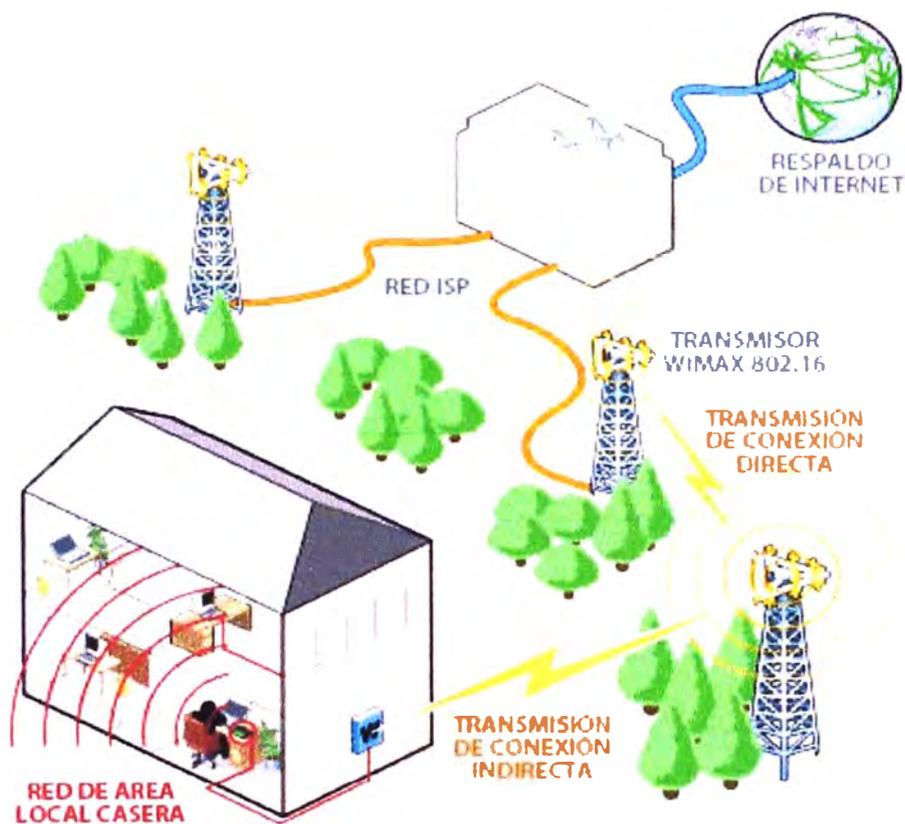
IEEE 802.16, el grupo que se dedica a establecer los estándares de acceso a la banda ancha wireless considera que WiMAX ya es 4G, teniendo en cuenta que 4G será basada en OFDMA y MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) para antenas de radio... la misma tecnología que posee WiMAX. En el gráfico de HowStuffWorks se puede tener una idea real del funcionamiento de WiMAX.

WiMAX ha propuesto e impulsado la creación de nuevos e innovadores dispositivos que permiten llevar el servicio de Internet wireless a casi cualquier lugar, incluso donde no se tiene acceso a Internet.

Esto, sumado a la tecnología IP, hacen de WiMAX el responsable (y productor) de impulsar la telefonía móvil 4G. Por otro lado, los proveedores de telecom en Europa, junto con Verizon, prefieren el camino de la migración a 4G que propone LTE.

Se espera que WiMAX sea elegido por aquellos operadores que no tengan licencias 3G de WCDMA. Así, los que actualmente ofrecen Internet a través de una red local podrán competir mejor teniendo WiMAX.

El WiMAX Forum hizo algunas predicciones entre las que indican que en 2012 ya habrá 133 millones de personas usando las redes WiMAX.



**Fig. 1.17:** Como funciona WiMAX

## CAPITULO II

### BASES TEÓRICAS MATEMÁTICAS

**MARCO TEÓRICO:** desarrollaremos el marco teórico para un modulador digital, modulación digital BPSK, modulación digital M-PSK, modulación digital QAM y OFDM.

#### 2.1 Acceso múltiple OFDMA



**Fig. 2.1:** Acceso múltiple OFDMA

##### 2.1.1 Modulador Digital

En general la señal  $S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} \cos(2\pi f_c t + \frac{2\pi i}{M} + \Delta\varphi)$   $i = 1, 2, 3, \dots, M$

Puede escribirse como  $S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} \cos(\frac{2\pi i}{M} + \Delta\varphi) \sin(2\pi f_c t)$   $i = 1, 2, 3, \dots, M$

$$S_i(t) = A_t \cos(2\pi f_c t) - A_Q \sin(2\pi f_c t)$$

Podemos representar la señal en un espacio  $(\cos(2\pi f_c t), \sin(2\pi f_c t))$  conocido como I-Q

En síntesis un modulador digital transforma el tren de bits de entrada en una senoide con una amplitud y fase de acuerdo al patrón de bits. Conociendo los bits de entrada se genera la señal de salida correspondiente.

##### 2.1.2 Modulación Digital BPSK

Cada bit representa un símbolo en la constelación y está asociado a un valor de fase de la señal modulada.

Sea  $f_c$  la portadora,  $T_S$  y  $E_S$  el tiempo de símbolo y la energía de símbolo respectivamente entonces:

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} \cos(2\pi f_c t). \text{ Si se envía un "1"}$$

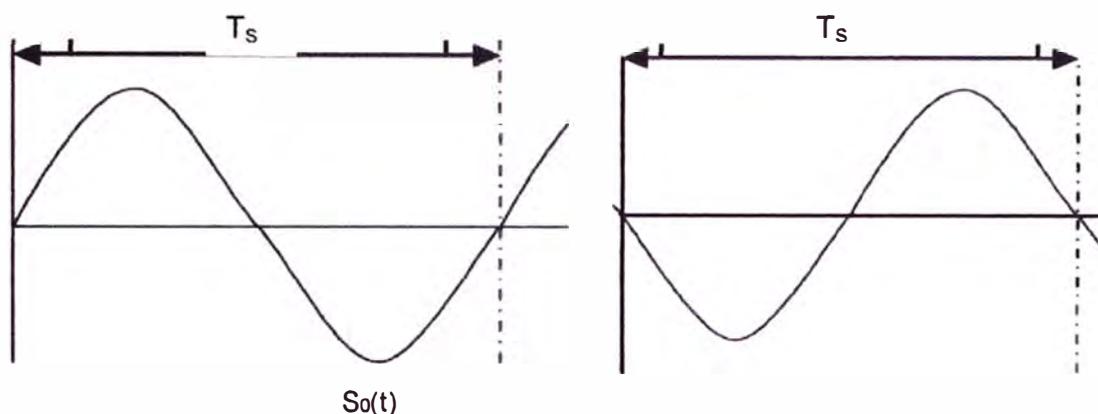
$$S_0(t) = -\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t). \text{ Si se envía un "0"}$$

Vemos que existe los dos bits se diferencia solo por un cambio de fase y que en ambos casos se tiene la misma amplitud.

En general un modulador digital transforma los bits de entrada en la portadora cuya amplitud y fase depende del patrón de bits entrante durante el tiempo símbolo

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \frac{2\pi i}{M} + \Delta\varphi) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M$$

Por ejemplo, en QPSK  $n = 2$  y  $M = 4$



**Fig. 2.2:** Modulación digital BPSK

En este caso existen dos símbolos a la salida del modulador. Cada símbolo se representa por un bit.

Ambos símbolos tiene la misma amplitud pero difieren en  $180^\circ$  de fase. La ventaja de modulación digital es que la capacidad de sinusoides, con fases y amplitudes diferentes, es previamente conocida.

En el caso particular de un BPSK, sabemos que a la salida del modulador tendremos 2 sinusoides.

El número de sinusoides posibles es igual a  $M = 2^n$ , siendo  $n$  el numero de bits usados para representar un símbolo.

### 2.1.3 Modulación Digital M-PSK

Cada símbolo se representa por  $n$  bits y corresponde a una señal cuya fase depende de la combinación de los  $n$  bits. Todos los símbolos tienen la misma amplitud.

Existen  $M = 2^n$  símbolos distintos y la señal viene dada por:

$$S_0(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 45^\circ) \text{ para } 00$$

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 135^\circ) \text{ para } 01$$

$$S_2(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 225^\circ) \text{ para } 10$$

$$S_3(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 315^\circ) \text{ para } 11$$

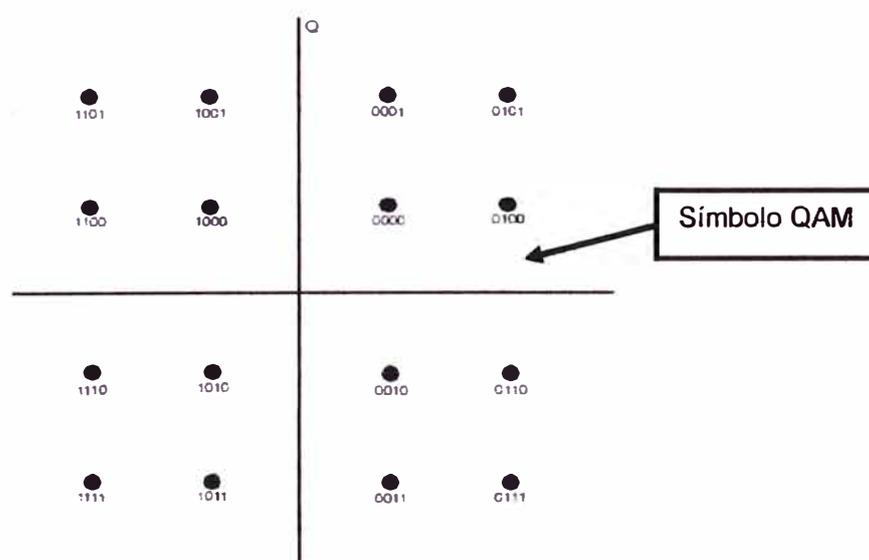
En síntesis un modulador digital transforma el tren de bits de entrada en una senoide con una amplitud y fase de acuerdo al patrón de bits. Conociendo los bits de entrada se genera la señal de salida correspondiente.

### 2.1.4 Modulación Digital QAM / Quadrature Amplitud Modulación

Cada símbolo se representa por n bits y corresponde a una señal cuya fase y amplitud depende de la combinación de esos n bits. Los símbolos pueden tener fase y amplitud diferente.

Existen  $M = 2^n$  símbolos distintos.

Por ejemplo, en 16QAM  $n = 4$  y  $M = 16$



*Fig. 2.3: 16 QAM. 4 bits por símbolo*

Tal como se muestra en QAM existen varias combinaciones de fase y amplitud.

En 16QAM los bits son de baja prioridad, en QPSK los bits son de alta prioridad, siendo la tasa conjunta de los dos canales parciales la misma que para la de un canal representado por 64QAM.

En la tabla (2.1) se muestran la existencia de símbolos de modulación con combinaciones de fase y amplitud.

**Tabla Nº 2.1: Combinaciones de fase y amplitud**

Fases	Amplitud
Iguales	Diferentes
Diferentes	Iguales
Diferentes	Diferentes

En IEEE 802.16e se usa QPSK, 16QAM y 64QAM, tanto en el canal de bajada como en el de subida.

### 2.1.5 OFDM

Es una técnica de modulación y de acceso Múltiple.

Estudiada por más de 25 años.

- Recientemente ha encontrado aplicaciones comerciales actualmente se usa en una variedad de aplicaciones

WiFi IEEE 802.11g/a

Estándares de HDTV, que es la TV digital usan OFDM

WiMAX IEEE 802.16 tiene dos capas físicas basadas en OFDM

3G Long Term Evolution (LTE) usa OFDM en el canal de bajada

Las propuestas para 4G, recientemente sometidas a consideración de la ITU, por parte de del 3GPP y del Grupo de Trabajo 802.16 del IEEE, también están basadas en OFDMA

Estrictamente hablando OFDM es una técnica de multicanalización basada en el uso de varias subportadoras. Estas subportadoras son escogidas de manera precisa de forma tal que sus espectros no interfieran a la frecuencia central de cada subportadora. El estándar IEEE 802.16e tiene dos capas físicas basadas en OFDM: una que usa OFDM como tal, y otra que usa una variable de esta última llamada OFDMA, donde varios usuarios comparten un símbolo OFDM.

La últimas versiones de acceso banda ancha propuestas para 3G lideradas por el 3GPP, 3G (Long Term Evolution /LTE) tendrán un canal de bajada que usa OFDM.

### 2.1.6 Expresión Matemática de la Ortogonalidad en el Dominio del Tiempo

Por definición dos señales  $g_1(t)$  y  $g_2(t)$  continuas son ortogonales, si su producto interno en el intervalo  $t_1-t_2$ , es nulo, este resultado es trascendental en las modulaciones de señales periódicas y son la base teórica matemática.

$$\langle g_1(t), g_2(t) \rangle = \int_{t_1}^{t_2} g_1(t)g_2(t)dt = 0$$

Existen muchas familias de funciones que son ortogonales. Para aplicaciones prácticas es necesario utilizar aquellas que puedan generarse fácilmente. En general las funciones sinusoidales cuyas frecuencias son un múltiplo entero de una fundamental son ortogonales, para  $m$  y  $n$  enteros:

$$\int_0^T A_n \cos(n\omega_{fund}t) A_m \cos(m\omega_{fund}t + \Delta\varphi) dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ A_n A_m \frac{T}{2} \cos\varphi & m = n \end{cases}$$

$$\int_0^T A_n \cos(n\omega_{fund}t) A_m \sin(m\omega_{fund}t + \Delta\varphi) dt = 0 \quad \text{Cualquier valor de } m \text{ y } n$$

Para cualquier valor de  $\varphi$ , siempre que  $\Delta\varphi = \pm K\pi$ ,  $K = 0, 1, 2, 3, \dots$

Donde  $T$  es el periodo de la fundamental, en este caso  $\omega_{fund} = \omega$  y  $T = 2\pi/\omega$

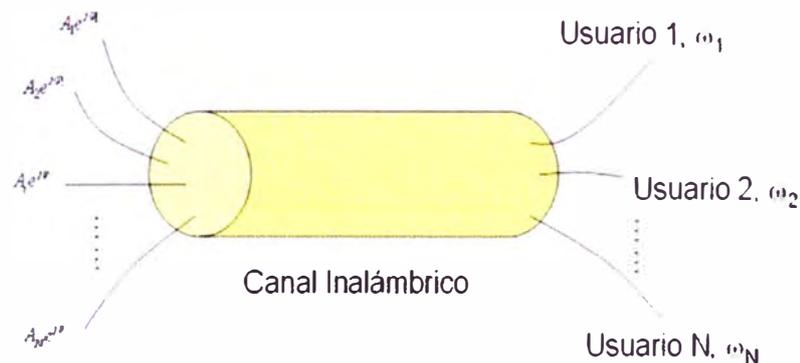
La clave de OFDM está en la ortogonalidad de las señales, esto permite mezclar varias de ellas en transmisión para luego separarlas en recepción sin que exista interferencia.

Entre otras, las señales sinusoidales son ortogonales entre si, en un tiempo igual al periodo de la señal de más baja frecuencia, siempre que la frecuencia de todas ellas sean un múltiplo entero de una fundamental.

### 2.1.7 Detectando la información de cada subportadora

Supongamos que por un canal ideal enviamos una señal compuesta por varias señales sinusoidales ortogonales, donde  $A_i$  contiene la información a transmitir:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t)$$



**Fig. 2.4:** Detectando la información de cada subportadora

Para recuperar la subportadora de frecuencia  $\omega_k$  basta realizar la siguiente operación:

$$\int_0^T \cos(\omega_k t) S(t) dt = \int_0^T \cos(\omega_k t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) dt$$

Debido a que las señales son ortogonales entonces, las señales representadas por el producto de cosenos en el intervalo de 0 a  $T$  es:

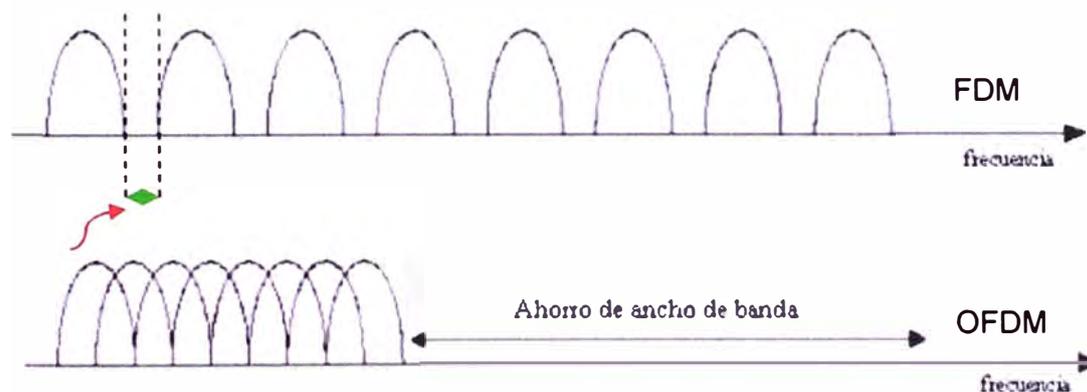
$$\int_0^T \cos(\omega_k t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) dt = A_k \int_0^T \cos(\omega_k t) \cos(\omega_k t) dt = \frac{A_k T}{2}$$

Si colocamos varias señales ortogonales en el canal inalámbrico, en el receptor las podemos separar calculando la integral, en un periodo, entre la señal compuesta que llega al receptor y una senoide con frecuencia igual a la que queremos detectar. La diferencia de fase no es importante ya que la ortogonalidad no se ve afectada por la fase.

### 2.1.8 Principios de OFDM / Dominio de la frecuencia

OFDM es muy similar a FDM pero mucho más eficiente espectralmente. Mientras que FDM debe dejar una banda de guarda entre canales, OFDM por su parte trata de acercar los canales lo más posible hasta superponerlos. Esto se logra escogiendo frecuencias que sean ortogonales, lo cual significa que son perpendiculares en el sentido matemático; permitiendo que sus espectros se superpongan sin interferir.

OFDM es similar a FDM, sin embargo, la idea es acercar los espectros tanto como sea posible sin que exista interferencia entre ellos. De esta forma se usa el espectro en forma más eficiente. Esto implica que las frecuencias de las diferentes portadoras deben escogerse adecuadamente.



**Fig. 2.5:** Dominio de frecuencia

### 2.1.9 Banda Base OFDM

La banda base de un transmisor OFDM se parece a una cadena de producción en serie. Al llegar el flujo de bits de alta velocidad, debe agruparlos en  $N_{\text{used}}$  grupos de  $\log_2(M)$  bits cada uno, donde  $M$  es la cantidad de puntos en la constelación. De acuerdo con el patrón de unos y ceros de cada grupo se asigna una amplitud, una fase y una frecuencia a cada subportadora. Todos los  $N_{\text{used}}$  grupos, cada uno en una de las  $N_{\text{used}}$  subportadoras, se envían de manera simultánea. De esta forma se crea un símbolo OFDM de duración  $T_s$ , integrado por  $N_{\text{used}}$  símbolos de modulación; es necesario aclarar que  $T_s$  es el tiempo de símbolo que modula a cada subportadora y no incluye ningún prefijo cíclico. Una vez que se coloca el símbolo de la interface de aire, se procede a

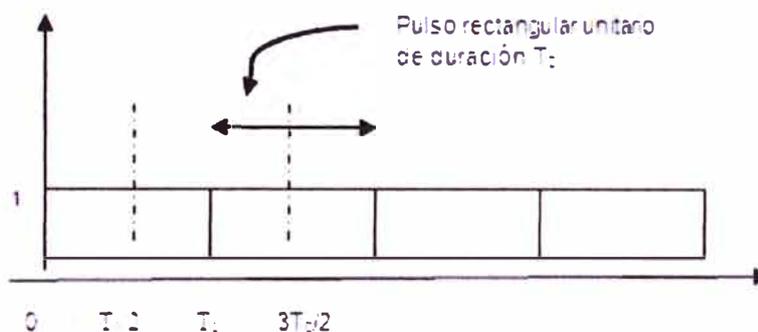
crear el próximo símbolo OFDM, y así sucesivamente. Entonces haciendo el símil podemos decir que un transmisor OFDM es una cadena de producción en serie de símbolos OFDM de duración  $T_s$ .

En ese sentido podríamos decir que el flujo de bits es multiplicado por una serie infinita de funciones ventanas rectangulares, cada una de duración  $T_s$  y desplazadas en tiempo. Si consideramos que el proceso se inicio en  $t=0$ , entonces los pulsos están centrados en  $iT_s/2$  donde  $i=1, 3, 5, \dots$

Cada pulso es una versión desplazada a la derecha del primer pulso, en general los pulsos pueden representarse por:

$$\prod_s \left( \frac{t}{T_s} - \frac{i}{2} \right) = \begin{cases} 1 & \frac{T_s}{2}(i-1) < t < \frac{T_s}{2}(i+1) \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

$Q=(i+1)/2$  es un índice que identifica el pulso. Por ejemplo, si  $i=3$  nos referimos al pulso #2



**Fig. 2.6:** Pulso rectangular unitario de duración  $T_0$

El flujo de bits que entra al transmisor OFDM es cortado en paquetes de bits de acuerdo a la modulación, esto equivale a multiplicar el flujo de bits entrante, después de hacer la conversión serie paralelo, por una ventana rectangular de duración  $T_s$ . A la salida del modulo de cada uno de los  $N_{\text{usado}}$  moduladores o Mapper de la Fig. 2.6, tenemos una señal sinusoidal que representa un punto en la constelación. En realidad el proceso de formar las  $N_{\text{usado}}$  símbolos de la modulación, equivale a multiplicar los pulsos rectangulares por la salida de cada modulador.

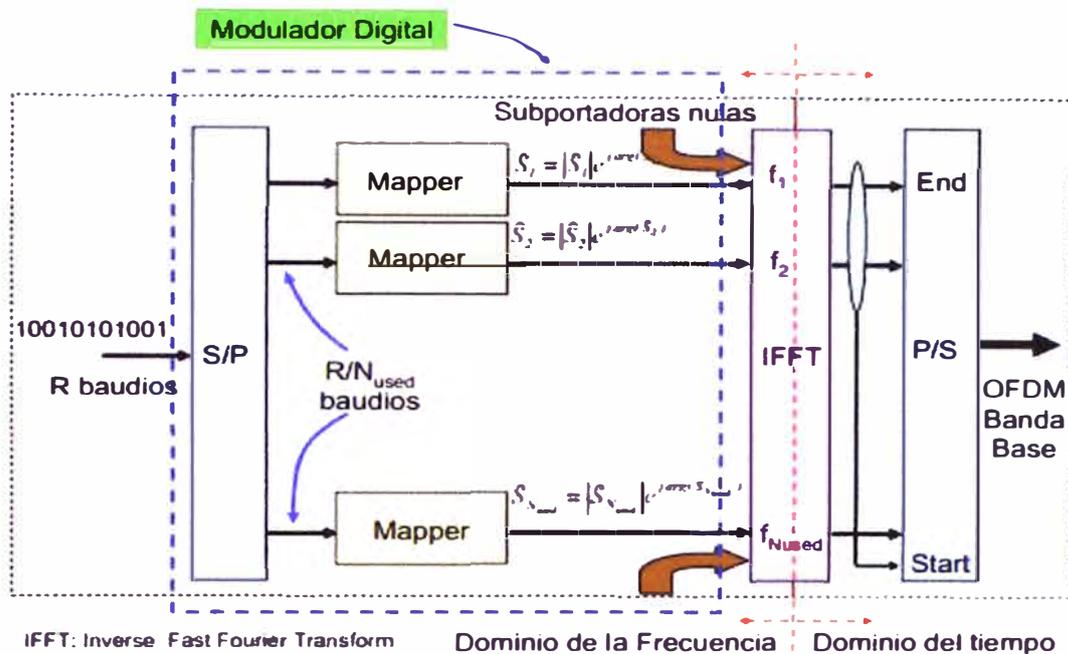
### 2.1.10 Señal OFDM Banda Base

Como se ha mencionado OFDM se considera una técnica de modulación y también una de acceso múltiple. Ambas opciones son válidas. Si consideramos sólo el tren de bits de entrada y la señal banda base de salida OFDM, entonces vemos que la salida es una señal que lleva información de los bits de entrada, en ese sentido es una modulación.

Si las diferentes subportadoras se comparten entre varios usuarios finales, entonces es una técnica de acceso múltiple, en ese caso hablamos entonces de OFDM.

En la figura las  $N_{\text{used}}$  subportadoras son ortogonales. En el canal de bajada de LTE el número de las subportadoras NFFT siempre es una potencia entera de 2, sin embargo sólo se usa una cantidad inferior, las restantes se dejan como bandas de guarda, son las indicadas como subportadoras nulas.

Los bits que entran al convertidor S/P provienen de la salida del codificador de canal.



**Fig. 2.7:** Señal OFDM banda base

La modulación digital consiste en asociar a una portadora una amplitud y una fase de acuerdo a las combinaciones de bits de datos que entran al modulador, para crear así la constelación.

En cualquier caso la ubicación de los símbolos es conocida de antemano así como el espectro correspondiente a cada uno de ellos.

La fase y la amplitud de un punto en la constelación correspondiente a la subportadora  $k$  es:

$$\hat{S}_k = |\hat{S}_k| e^{j \arg(S_k)}$$

La señal OFDM banda base de la subportadora  $k$ , en el tiempo se representa por:

$$OFDM_{BB,k} = \underbrace{|\hat{S}_k| e^{j \arg(S_k)}}_{\text{Punto de la constelación}} \underbrace{e^{j 2\pi f_k t}}_{\text{Subportadora } k} \underbrace{\prod (t/T_s)}_{\text{Pulso rectangular}}$$

La modulación digital tiene la ventaja de que los puntos en la constelación son finitos y conocidos previamente. Por ejemplo en M-PSK, todos los símbolos tienen la misma amplitud pero fases distintas, si  $M=8$  entonces hay ocho fases distintas. En cualquier caso la transformada de Fourier es conocida. Para QAM aunque cambia la fase

y la amplitud, todos los puntos de la constelación también son conocidos. En estos casos la señal resultante es un coseno con una fase y amplitud dada por la constelación, la transformada de Fourier consiste de una respuesta de amplitud que incluye dos impulsos unitarios localizados en  $\omega_0$  y  $-\omega_0$  y una respuesta de fase que también tiene dos impulsos con la fase respectiva.

Por lo tanto al conocer la cadena de bits, podemos saber cuál es la fase y la amplitud correspondiente, por lo tanto también se conoce el espectro, tanto en amplitud como en fase.

Es por esto que es más fácil construir la señal banda base OFDM en el dominio de la frecuencia y luego para ir al dominio del tiempo a través de la IFFT.

Actualmente existen dispositivos electrónicos que pueden hacer esta función de manera eficiente y muy rápida.

### 2.1.11 Transformada de Fourier de las señales involucradas

La Transformada de Fourier (TDF) de un pulso rectangular de duración  $N$ , que podría representar un símbolo, es la función Seno cuyos cruces por cero corresponden a las frecuencias  $\pm iR/N$  donde  $i=1,2,3,\dots$

Por su lado la TDF de una función coseno son dos impulsos situado en la frecuencia de la señal seno y a su negativo. El producto temporal de ambas señales produce un espectro que corresponde a la convolución de ambos espectros, lo que produce la función Seno desplazada a la frecuencia  $f_0$  de la función.

Si escogemos cada subportadora de forma tal que coincida con los nulos de la función Seno, garantizamos que la interferencia, en el caso ideal, sea nula.

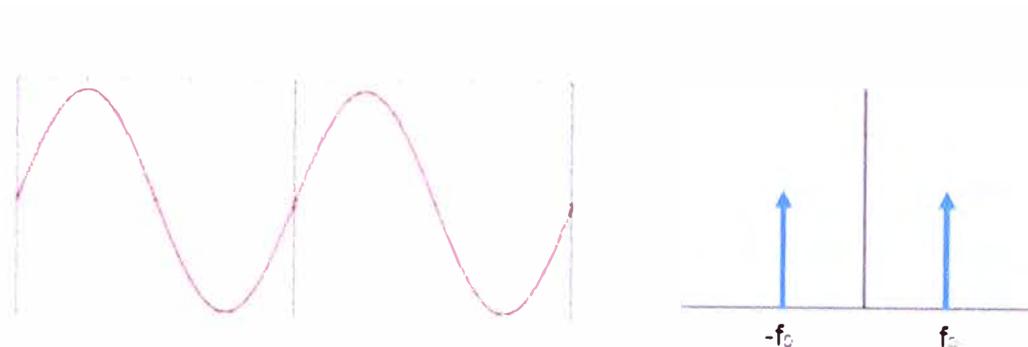
De esta manera en todas las subportadoras las contribuciones de las otras es nula y tenemos interferencia cero.

Así la diferencia entre una subportadora y las siguientes es igual a  $R/N$ .

Si aumentamos  $N$  se reduce la diferencia de frecuencia lo cual requiere mayor precisión en los dispositivos, pero se aumenta la tasa de bits.

El tiempo de símbolo es igual a la duración del pulso rectangular  $N/R$ .





**Fig. 2.8:** Representación Temporal (izquierda) y Frecuencial (derecha)

### 2.1.12 La señal OFDM Banda Base en el tiempo

Si consideramos las  $N$  subportadoras en un solo intervalo de tiempo, obtenemos:

$$OFDM_{BB}(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} S_k e^{j2\pi f_k t} \prod(t/T_s)$$

Podemos observar que la señal  $OFDM_{BB}$ , durante el intervalo  $T_s$ , tiene la misma forma de una serie de Fourier Inversa, por lo tanto puede obtenerse a partir de un algoritmo de IFFT si conocemos  $S_k$  que representa la información de amplitud y fase que queremos enviar.

En recepción, los coeficientes  $S_k$ , se obtienen a través de la transformada directa de Fourier por medio de un algoritmo de FFT.

Cada punto de la constelación se puede representar en forma fasorial como una amplitud y una fase.

La información contenida en la constelación, es decir los bits de datos, se puede incorporar al espectro de cada subportadora.

Esto se hace modificando el espectro de fase y de amplitud de cada subportadora de acuerdo con la fase y la amplitud de cada punto de la constelación.

De esta forma la información a transmitir se incorpora en las subportadoras en el dominio de la frecuencia, y no en el tiempo como usualmente se hace.

La señal Banda Base OFDM puede obtenerse directamente a partir de la expresión mostrada arriba, pero en un proceso que consume mucho tiempo si se hace de esta forma y no es conveniente.

Sin embargo, usando los algoritmos de IFFT y FFT se reduce considerablemente la cantidad de operaciones matemáticas y se gana en tiempo de cálculo.

En un sistema de comunicaciones digital compacto, se busca un punto óptimo de operación. Este consiste en transmitir y recibir datos a la mayor velocidad admisible con la mínima tasa de error de bit (BER) posible. La limitante principal para alcanzar este punto de operación está dada por el canal de comunicaciones, el cual tiene una respuesta física finita.

### 2.1.13 Organización de las subportadoras en OFDM

Para que las subportadoras sean ortogonales es suficiente con que sus frecuencias sean un múltiplo de una fundamental. Pero como la ordenamos y cuales serian sus frecuencias? Si tenemos un fundamental, cual es la frecuencia de la primera subportadora? Es la fundamental, o es un múltiplo?

Si fijamos  $\Delta f = 1/T_s$  es la separación entre subportadoras, sabemos que cada frecuencia se obtiene sumándole a la anterior la separación en frecuencia  $\Delta f$ . Por ejemplo, la frecuencia  $\omega_1$  se obtiene a partir de:  $\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$

Donde  $\omega_0$  es la menor frecuencia que se puede asignar a una subportadora. Para que  $\omega_1$  y  $\omega_0$  sean ortogonales se debe cumplir que:

$$\int_0^{T_s} \sin(\omega_0 t) \sin(\omega_1 t) dt = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\sin(2\omega_0 T_s)}{2\omega_0 + \Delta\omega} \right] = 0$$

Entonces se anula si  $\sin(2\omega_0 T_s) = 0$  y eso ocurre cuando  $2\omega_0 T_s = n\pi$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Y sabiendo que  $T_s = 2\pi/\Delta\omega$ , obtenemos:

$$\frac{4\omega_0 \pi}{\Delta\omega} = n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

El caso  $n = 0$  no tiene sentido ya que implicaría que  $\omega_0 = 0$ . Calculamos  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{n\Delta\omega}{4}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

El menor valor de  $n$ , es decir  $n=1$ , corresponde también con la menor frecuencia que se puede obtener y representa la frecuencia fundamental, así podemos escribir:

$$\omega_{fund} = \frac{\Delta\omega}{4}$$

El valor de  $n$  determina la frecuencia más baja  $\omega_0$ .

Por ejemplo,  $n=1$  entonces  $\omega_0$  y  $\omega_{fund}$  son iguales. En este caso, la serie de frecuencias es:

$$\omega_0, \omega_0 + \Delta\omega, \omega_0 + 2\Delta\omega, \omega_0 + 3\Delta\omega, \dots$$

$$\frac{\Delta\omega}{4}, \frac{5\Delta\omega}{4}, \frac{9\Delta\omega}{4}, \frac{13\Delta\omega}{4}, \dots$$

Otro ejemplo interesante es cuando  $n=4$ ; entonces  $\omega_0 = \Delta\omega$  y las frecuencias de las subportadoras son:  $\Delta\omega, 2\Delta\omega, 3\Delta\omega, \dots, (N_{used} - 1)\Delta\omega$

En esta secuencia no está la fundamental.

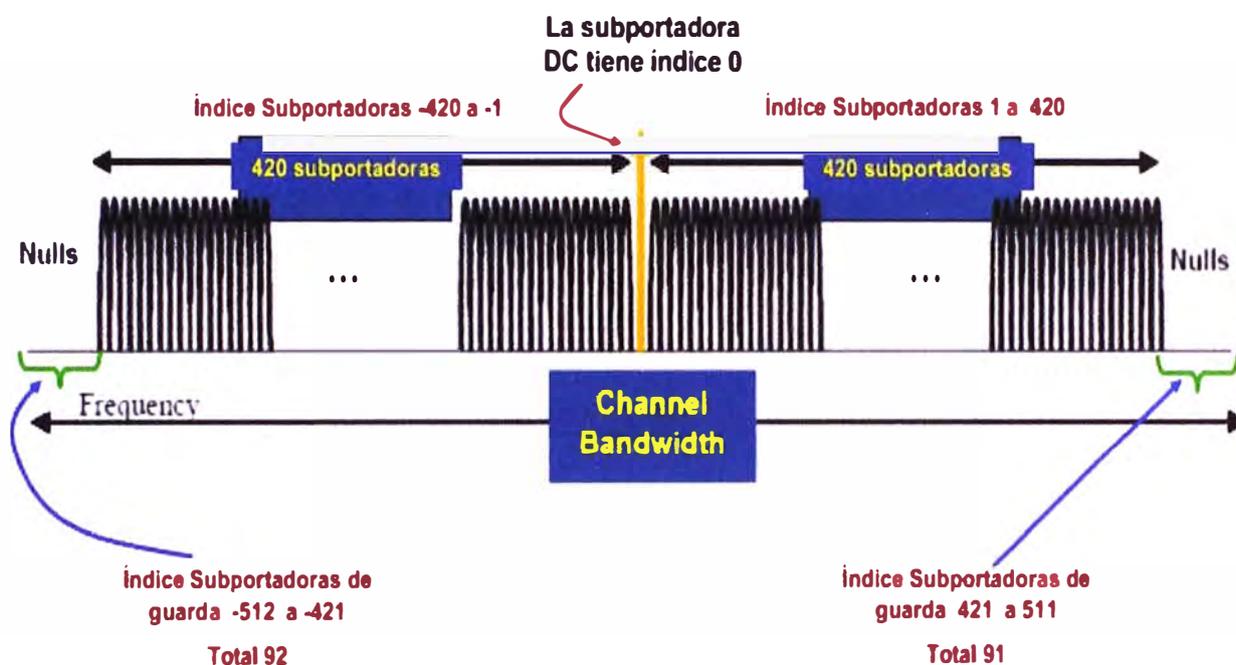
El índice  $n$ , sólo define la frecuencia inicial y el tiempo de símbolo lo define la fundamental; la cual puede o no estar dentro de las frecuencias asignadas a las subportadoras.

En los sistemas prácticos la cantidad de subportadora encendidas  $N_{used}$ , significa que tienen una potencia no nula, es menor a la cantidad total de subportadora  $N_{FFT}$  esto evita la interferencia con canales adyacentes. Con OFDM se debe tener cuidado con las colas espectrales de los espectros Seno de cada subportadora, es decir la señal OFDM no es limitada en banda; por eso se prefiere dejar apagadas una cierta cantidad de ellas en los extremos; estas subportadoras apagadas hacen el papel de una banda de guarda en el dominio de la frecuencia.

#### 2.1.14 OFDM de 1024 subportadoras - Capa Física OFDM IEEE 802.16e

841 Subportadoras usadas: 1 DC. 120 Pilotos y 720 para datos.

183 nulas: banda de guarda en los extremos.



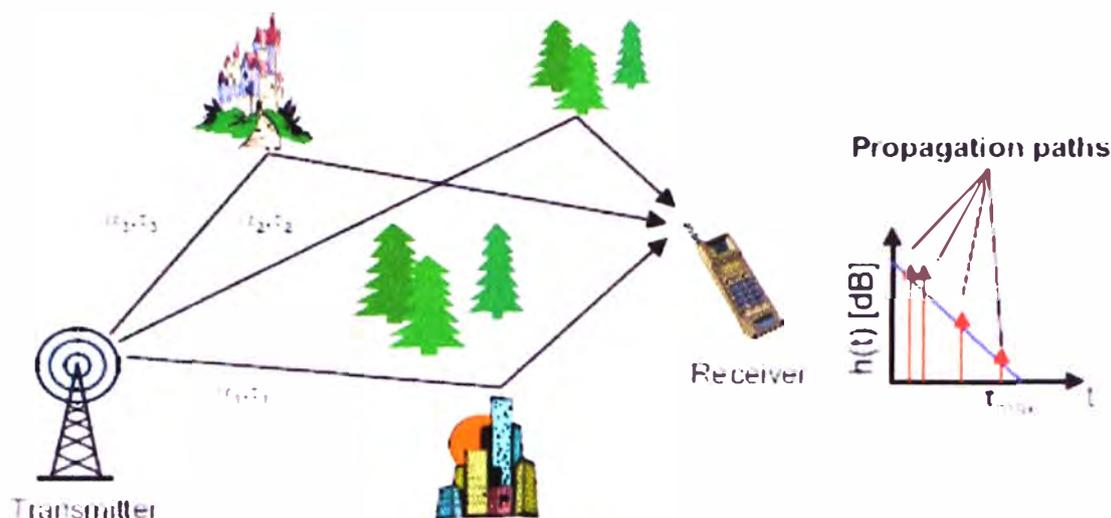
**Fig. 2.9:** Índice de subportadora

Este caso corresponde a una capa física de IEEE 802.16e. El ancho de banda asignado se divide en 1024 subportadoras, de las cuales 720 se usan para transmitir datos, 120 para pilotos usadas para propósitos de estimación del canal, 183 se dejan en los extremos como bandas de guarda y la DC que no se usa.

La cantidad de subportadoras dejadas como bandas de guarda siempre es un número impar, entonces al distribuirlas en los extremos, se deja una más en el extremo izquierdo que en el derecho. Es sólo una cuestión de nomenclatura.

Cuando la OFDM se emplea junto con codificación de canal para detección y corrección de errores, se designa como COFDM (multiplexado por división de frecuencia ortogonal codificado).

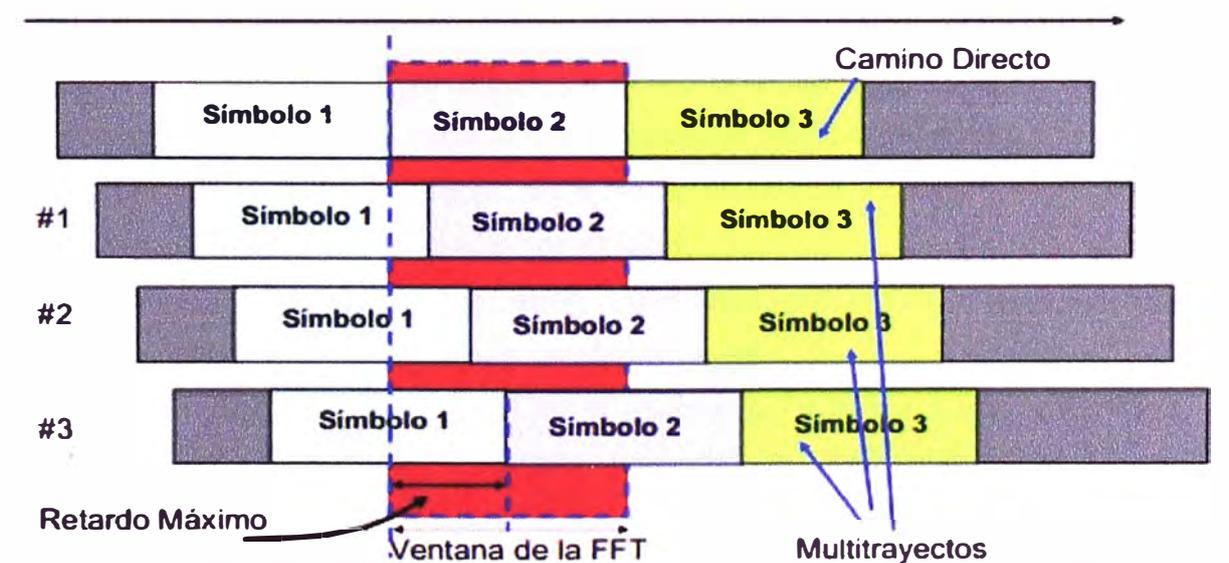
### 2.1.15 Canal inalámbrico con multitrayectos



**Fig. 2.10:** Canal inalámbrico con multitrayectos

El canal inalámbrico es un canal multitrayectoria debido a las reflexiones y difracciones que sufre la onda electromagnética entre el emisor y el receptor. Entonces la señal llega al receptor por diferentes caminos y por supuesto con retardos diferentes, lo cual se traduce en una diferencia de fase. Esta diferencia de fase produce interferencia que puede ser destructiva o constructiva. En principio la señal que llega primero tiene mayor potencia, y las de mayor retardo tienen menor intensidad. El máximo retardo, correspondiente al último multitrayecto, se denomina Delay Spread, el cual puede obtenerse a través de mediciones estadísticas en el canal.

En un canal con multitrayectos, debido al retardo entre símbolos que llegan al receptor, se pierde la ortogonalidad, tal como se muestra.

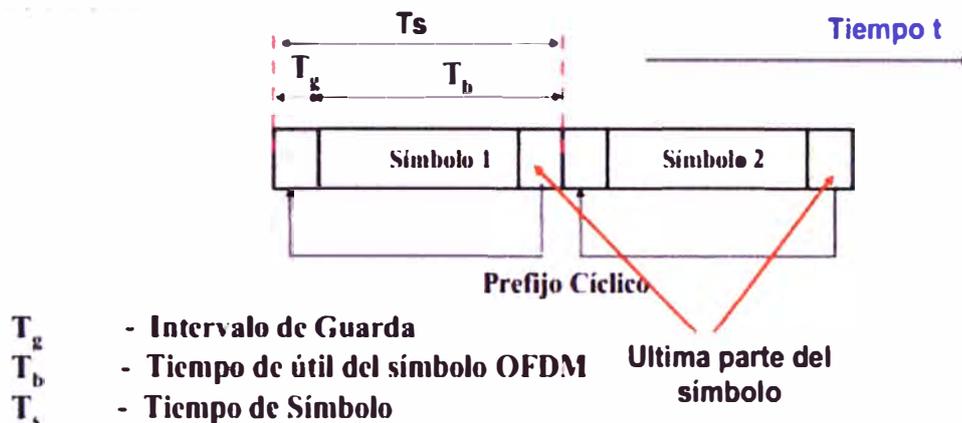


**Fig. 2.11:** Canal con multitrayectos

Los multitrayectos rompen con la ortogonalidad debido a la interferencia entre símbolos, la cual se produce por el retardo entre los multitrayectos. Tal como se muestra, en la ventana de integración, existe información del símbolo 2 y del anterior el número 1. Una solución es agrandar artificialmente el símbolo, de manera que siempre veamos sólo un símbolo en la ventana de la FFT. La mayor interferencia inter simbólica se produce con el multitrayecto #3 ya que tiene el mayor retardo.

Como vemos, hay una porción del símbolo que no aparece en la ventana de integración y corresponde a la última parte del símbolo 2.

### 2.1.16 Prefijo Cíclico PC



**Fig. 1.12: Prefijo cíclico PC**

El tamaño del prefijo Cíclico se escoge adecuadamente para que sirva como tiempo de guardia para eliminar el ISI. Esto se logra escogiendo el cyclic prefix superior al mayor tiempo de retardo del canal.

La selección de la duración del cyclix prefix es un compromiso entre el overead producido y el delay spread aceptado y el doppler spread.

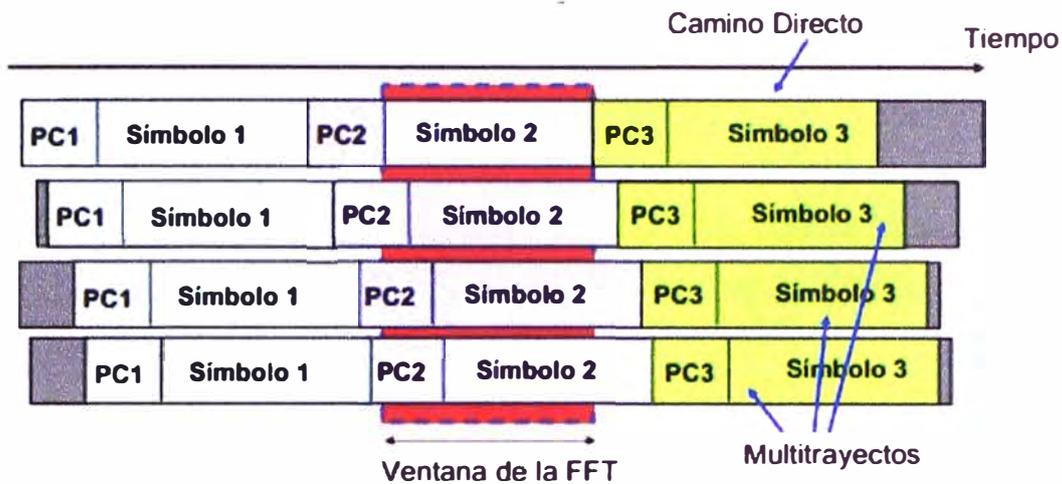
El tiempo adicional que se agrega a cada símbolo se denomina Prefijo Cíclico o Tiempo de Guarda. Debido al retardo, se pierde la última parte del símbolo, es por ello que esa es la parte de cada símbolo que se coloca al principio del mismo.

Debido a la característica de la señal sinusoidal, con este procedimiento es posible recuperar toda la información de un ciclo.

Como las subportadoras están moduladas por señales representadas por números complejos, que cambian de un símbolo a otro.

Si el periodo de integración en el receptor se extiende a una duración de dos símbolos, como en el caso de señales retrasadas no solamente habrá ISI sobre la subportadora correspondiente al símbolo que se pretende integrar, sino que además habrá interferencia entre subportadoras y como consecuencia destrucción de la información procesada.

### 2.1.17 Con Prefijo Cíclico



El prefijo cíclico es suprimido en la recepción, debido a esto se produce una pérdida de energía del símbolo, esta pérdida se calcula a partir de:

$$Guard\_Time\_loss_{dB} = 10 \log \left( \frac{T_h}{T_h + T_g} \right)$$

**Fig. 2.13:** Con prefijo cíclico

Si el Prefijo Cíclico se escoge igual o superior al retardo máximo, en la ventana de integración siempre tendremos información de un sólo símbolo y así se incrementa el valor de la señal recibida.

Al agrandar el símbolo en transmisión también se incrementa su energía. Sin embargo, debido a que en el receptor se debe eliminar la porción de tiempo correspondiente al TG, se produce una pérdida.

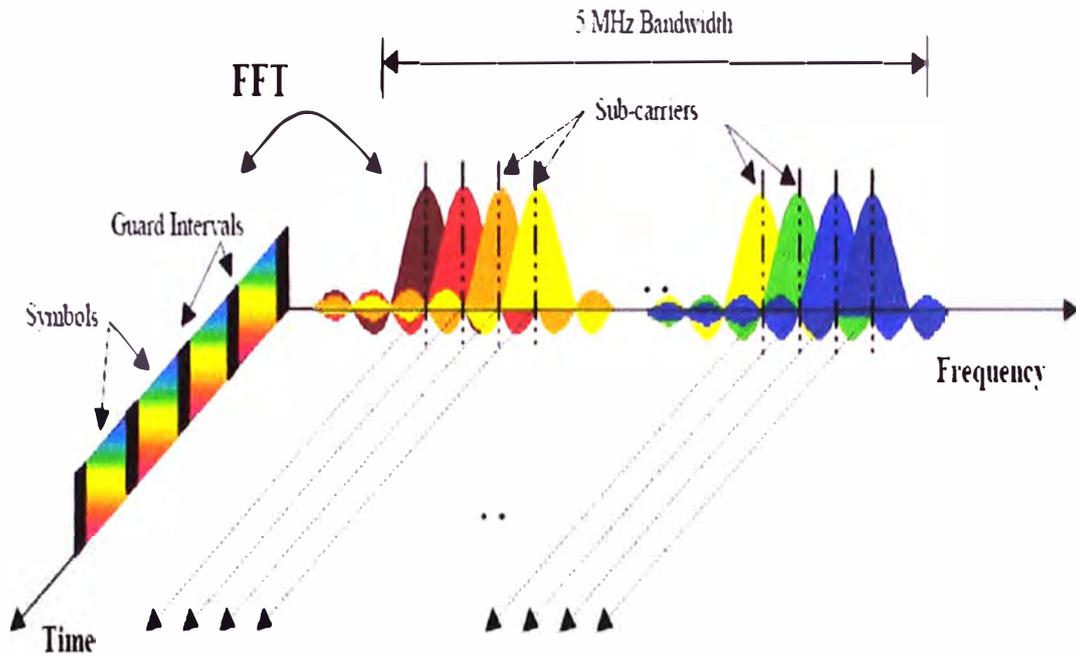
### 2.1.18 OFDM: Ventajas y Desventajas

*Ventajas:*

- Reducción de la referencia intersimbólica.
- Robustez ante los multitrayectos.
- Alta eficiencia espectral.
- Implementación fácil a través del uso de FFT e IFFT.

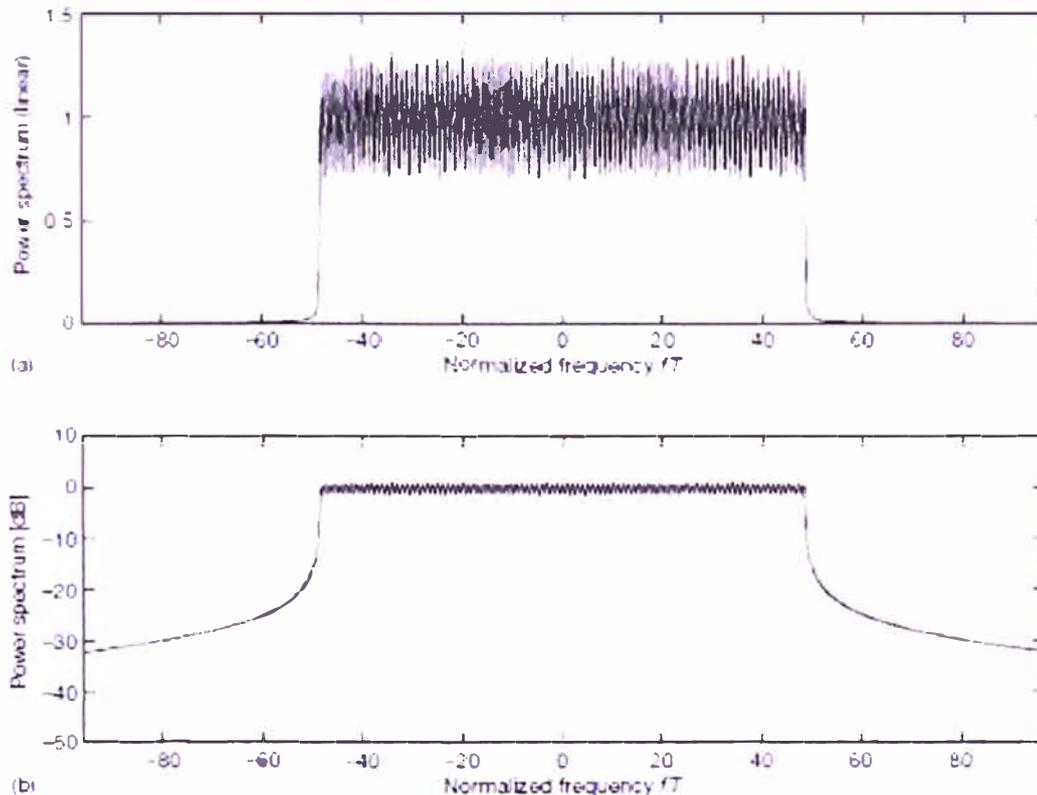
*Desventajas:*

- Alto Peak to Average Power Ratio (PAPR)
- Se produce debido a que para algunas secuencias muchas subportadoras están en fase y al sumarse se producen picos muy grandes.
- Muy sensible a cambios en la frecuencia de las subportadoras.
- Sobre todo cuando NFFT es muy grande.



**Fig. 2.14: OFDM**

Una de las desventajas de la transmisión OFDM es la presencia de un PARP elevado. El PARP es la relación entre el pico de la potencia de transmisión y su valor promedio. Un PARP elevado impone muchas limitaciones a los dispositivos electrónicos de los sistemas, en particular a los amplificadores.



**Fig. 2.15: OFDMA y SC-FDMA**

## 2.2 Transformadas de Fourier

El análisis de Fourier fue introducido por JOSEPH FOURIER el año 1807, para estudiar el fenómeno de la conducción de calor en diferentes medios y resolver aplicaciones de problemas de valor de frontera. Actualmente se ha convertido en herramienta indispensable en el tratamiento de la Física Moderna, en la teoría de comunicaciones modernas y sus aplicaciones en modulación FDMA, OFDMA, SC-FDMA, BPSK, M-BPSK, QAM, LTE, WiMAX en sus distintas generaciones, especialmente en la cuarta generación 4G, los espectros continuos que es el tema principal de este informe. Hay otras aplicaciones a: Sistemas Lineales, TV Digital, Transmisión en Fibras Ópticas tanto en señal Analógica como digital.

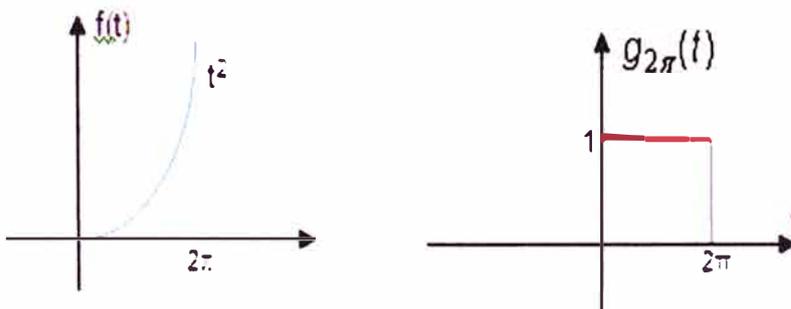
En los temas mencionados se usan las series y transformadas de Fourier en su forma analógica por el método de compuerta llamadas funciones Gate y la discreta ó Digital, para lo cual es indispensable el estudio de las transformadas de Fourier rápida FFT y su transformada inversa IFFT.

Las bases teóricas de estas herramientas Matemáticas se presentaran en el Presente informe.

## 2.3 Transformada continua de Fourier / Método de pulsos o función compuerta/ función Gate

Una aplicación sencilla para obtener la transformada de Fourier de una onda periódica por el método de Modulación que incluye la función dada y el modulador que es una función compuerta (Gate), usando impulsos o funciones Delta de Dirac.

Transformada de Fourier de la señal periódica  $f(t)$  definida por



$$f(t) = t^2; 0 \leq t \leq 2\pi \text{ y } f(t+2\pi) = f(t)$$

Se determina el coeficiente complejo  $C_n$  de la serie compleja de Fourier

$$f(t) = t^2 g_{2\pi}(t) = t^2 [u_{-1}(t) - u_{-1}(t - 2\pi)]$$

$$F(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \delta(\omega - n\omega_0) \dots (1)$$

Derivando y usando el teorema del producto y la función impulso:

$$f(t)\delta(t-t_0) = f(t_0)\delta(t-t_0) \text{ y } \int_{-\infty}^{\infty} \delta^n(t-t_0)\phi(t)dt = (-1)^n \phi^n(t_0)$$

$$f'(t) = t^2[\delta(t) - \delta(t-2\pi)] + 2tg_{2\pi}(t)$$

$$f''(t) = -4\pi^2\delta(t-2\pi) + 2tg_{2\pi}(t)$$

$$f'''(t) = -4\pi^2\delta'(t-2\pi) + 2t[\delta(t) - \delta(t-2\pi)] + 2g_{2\pi}(t)$$

$$f''''(t) = -4\pi^2\delta''(t-2\pi) - 4\pi\delta'(t-2\pi) + 2\delta(t) - 2\delta(t-2\pi) \dots (2)$$

$$\text{De (1): } f''''(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} -jn^3 c_n e^{jnt} \text{ y } -jn^3 c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f''''(t) e^{-jnt} dt \dots (3)$$

$$(2) \text{ en (3) : } -jn^3 c_n = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{2\pi} [-4\pi^2\delta''(t-2\pi) - 4\pi\delta'(t-2\pi) + 2\delta(t) - 2\delta(t-2\pi)] e^{-jnt} dt \right]$$

$$\text{Por lo tanto: } C_n = \frac{2}{n^2} + \frac{2\pi}{n} J$$

$$\text{En (1): } F(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \delta(\omega - n\omega_0)$$

La transformada de Fourier se emplea con señales no periódicas a diferencia de la serie de Fourier. Las condiciones de convergencia que garantizan la existencia y así obtener la transformada de Fourier en el dominio del tiempo fueron establecidas por el matemático Dirichlet:

Que la señal sea absolutamente integrable, es decir:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty$$

Que tenga un grado de oscilación finito.

Que tenga un número máximo de discontinuidades.

La transformada de Fourier se define con  $S=jw$  (siendo  $w=2\pi f$ )

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

Y su transformada inversa se define como:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

He mencionado al principio que la transformada de Fourier se usa con señales no periódicas. Que cumplen las condiciones de Dirichlet. Con la función impulso es posible calcular la transformada de Fourier de una señal periódica:

$$\text{Sabido que } \delta(t-t_0) \xleftrightarrow{F} e^{-j\omega t_0}$$

Y que la transformada de Fourier cumple el teorema de la dualidad:

$$x(t) \xrightarrow{F} X(\omega)$$

$$x(t) \xrightarrow{F} 2\pi X(-\omega)$$

$$\text{Obtenemos que } e^{j\omega_0 t} \xrightarrow{F} 2\pi\delta(\omega - \omega_0)$$

De esta forma, podemos calcular la transformada de Fourier de cualquier señal periódica  $x(t)$  de potencia media finita, esto es:

$$\frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} |x(t)|^2 dt < \infty$$

Ya que

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \xrightarrow{F} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k 2\pi\delta(\omega - k\omega_0)$$

Luego para una  $x(t)$  periódica se cumple que:

$$x(t)_{\text{periodica}} \xrightarrow{F} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k 2\pi\delta(\omega - k\omega_0)$$

### 2.3.1 Transformada rápida de Fourier / FFT

FFT (Fast Fourier Transform) es un eficiente algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y su inversa. La FFT es de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital, en general en la resolución de ecuaciones en derivadas parciales o los algoritmos de multiplicación rápida de grandes enteros. El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo: la señal de la que se tomaron muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos. La mayoría de los analizadores TRF permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis TRF depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

Uno de los algoritmos aritméticos más ampliamente utilizados es la transformada rápida de Fourier, un medio eficaz de ejecutar un cálculo matemático básico y de frecuente empleo.

La transformada rápida de Fourier es de importancia fundamental en el análisis matemático y ha sido objeto de numerosos estudios. La aparición de un algoritmo eficaz para esta operación fue una piedra angular en la historia de la informática.

Las aplicaciones de la transformada rápida de Fourier son múltiples. Es la base de muchas operaciones fundamentales del procesamiento de señales, donde tiene amplia

utilización. Además, proporciona un medio oportuno para mejorar el rendimiento de los algoritmos para un conjunto de problemas aritméticos comunes.

### Definición

Sean  $x_0, \dots, x_{n-1}$  números complejos. La transformada discreta de Fourier (DFT) se define por la sumatoria de los valores de  $x_k$  que van desde 0 hasta  $n-1$ .

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} ; \quad j = 0, \dots, n-1$$

La evaluación directa de esta ecuación requiere  $O(n^2)$  operaciones aritméticas. Mediante un algoritmo FFT se puede obtener el mismo resultado con sólo  $O(n \log n)$  operaciones. En general, dichos algoritmos dependen de la factorización de  $n$  pero, al contrario de lo que frecuentemente se cree, existen FFTs para cualquier  $n$ , incluso con  $n$  primo.

La idea que permite esta optimización es la descomposición de la transformada a tratar en otras más simples y éstas a su vez hasta llegar a transformadas de 2 elementos donde  $k$  puede tomar los valores 0 y 1. Una vez resueltas las transformadas más simples hay que agruparlas en otras de nivel superior que deben resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto. Al final de este proceso, los resultados obtenidos deben reordenarse.

Dado que la transformada discreta de Fourier inversa es análoga a la transformada discreta de Fourier, con distinto signo en el exponente y un factor  $1/n$ , cualquier algoritmo FFT puede ser fácilmente adaptado para el cálculo de la transformada inversa. Por lo general, tenemos que:

$$x[n] = IDFT\{X[k]\} = \frac{1}{N} \left( DFT\{X^*[k]\} \right)^*$$

Un algoritmo que es mucho más eficiente en cuanto al tiempo de cómputo para grandes arreglos de entrada cuya longitud es una potencia entera de dos, recibe el nombre de Transformada de Fourier Rápida (TFR), y dicho algoritmo fue propuesto por Cooley y Tukey en 1965.

Se puede ilustrar mediante el siguiente ejemplo, calculando la TFR de un conjunto de cuatro muestras de datos utilizando el algoritmo, se define el conjunto de muestras de una señal como la señal  $X_0[n]$  en TD de forma que los datos de entrada para el algoritmo sea  $\{X_0[0], X_0[1], X_0[2], X_0[3]\}$ . La ecuación de la TFD es la siguiente:

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N_F-1} X[n] e^{j2\pi(kn/N_F)}$$

Se recomienda usar la notación:

$$\omega = e^{-j(2\pi / N_F)}$$

Para este caso de 4 puntos de datos, es posible escribir la TFR en forma de Matriz como:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_0[0] \\ X_0[1] \\ X_0[2] \\ X_0[3] \end{bmatrix}$$

**Fig. 2.16:** TTF para cuatro puntos

Efectuar la multiplicación usual de matrices directa requeriría  $N^2$  multiplicaciones complejas y  $N(N-1)$  adiciones complejas. Por lo tanto puedes escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ X[2] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_0[0] \\ X_0[1] \\ X_0[2] \\ X_0[3] \end{bmatrix}$$

**Fig. 2.17:** TTF matriz de producto

Debido a que  $W_n = W_m + mN_F$ , donde  $m$  es un entero, es posible factorizar la matriz en el producto de dos matrices;

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[2] \\ X[1] \\ X[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_0[0] \\ X_0[1] \\ X_0[2] \\ X_0[3] \end{bmatrix}$$

**Fig. 2.18:** TTF producto de dos matrices [1]

Los elementos "1" y "2" han cambiado de lugar en el vector que se encuentra del lado izquierdo. Cuando se multipliquen las matrices, los renglones 1 y 2, también se intercambiarán. Después se calcula el número de multiplicaciones y adiciones que se requieren.

Primero se identifica el resultado de multiplicar la segunda matriz cuadrada por el conjunto de datos de entrada como:

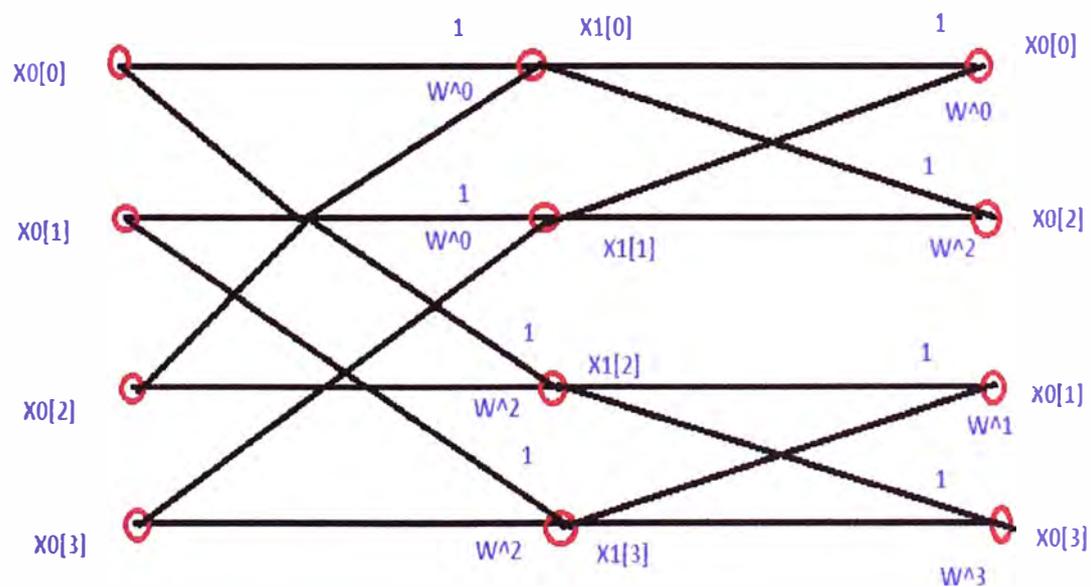
$$\begin{array}{|c|} \hline X[0] \\ \hline X[2] \\ \hline X[1] \\ \hline X[3] \\ \hline \end{array} = * \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & W^0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & W^0 \\ \hline 1 & 0 & W^2 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & W^2 \\ \hline \end{array} * \begin{array}{|c|} \hline X_0[0] \\ \hline X_0[1] \\ \hline X_0[2] \\ \hline X_0[3] \\ \hline \end{array}$$

**Fig. 2.19:** TTF producto de dos matrices[2]

El primer elemento es:

$$X_1[0] = X_0[0] + W_0 X_0[2]$$

Como una multiplicación para llegar a una conclusión general. De manera similar  $X_1[1]$  requiere una multiplicación y una adición. Sin embargo,  $X_1[2]$  requiere sólo una adición debido a que este cálculo requiere una multiplicación y una adición. Aunque  $W_0$  es uno, se dejará esto  $W_0 = -W_2$  y el producto ya se ha obtenido en el cálculo del primer elemento y puede, en consecuencia, sólo almacenarse hasta que se necesite y luego restarse en vez de sumarse. De manera similar  $X_1[3]$  sólo requiere una adición más. Hasta ahora se tienen dos multiplicaciones y cuatro sumas. Apelando a condiciones de simetrías similares en la segunda multiplicación de matrices se encuentra que se requieren dos multiplicaciones y cuatro sumas más. Así, en total, se necesitan cuatro multiplicaciones y ocho adiciones. Puesto que, computacionalmente, las multiplicaciones requieren por lo general mucho más tiempo de cómputo que las adiciones, el algoritmo de TFR para cuatro puntos es alrededor de cuatro veces más rápido que la TDF directa.



**Fig. 2.20:** gráfica de flujo de señales para una TFR de cuatro puntos

### 2.3.2 Algoritmo de diezmado en el tiempo

Es el algoritmo más famoso para el cálculo de una FFT, diseñado por J.W. Cooley y J. Tukey en 1965. Tomando como entrada una señal discreta  $x[n]$  con  $N$  muestras, se basa en dividir la señal de entrada en otras dos señales de  $N/2$  muestras (por un lado los coeficientes pares y por otro los impares), y se envían cada una de estas subseñales a una FFT de tamaño  $N/2$  puntos. Cada uno de los coeficientes de salida de

la FFT de las muestras impares se multiplica por  $W_N^k = e^{-i\frac{2\pi}{N}k}$ , donde  $k$  es la posición del vector salida, y se suma a las muestras pares. A su vez, las FFT de  $N/2$  puntos se pueden resolver de esta misma manera, realizando esta operación de manera recursiva hasta obtener una FFT de una señal de tamaño 2, cuyo resultado es:

$$X[0] = x[0] + x[1]$$

$$X[1] = x[0] - x[1]$$

### 2.3.3 Polinomio de interpolación trigonométrica

El polinomio interpolador trigonométrico

$$p(t) = \frac{1}{N} \left[ X_0 + X_1 e^{it} + \dots + X_{N/2-1} e^{(N/2-1)it} + X_{N/2} \cos(Nt/2) + X_{N/2+1} e^{(-N/2+1)it} + \dots + X_{N-1} e^{-it} \right]$$

Para  $N$  par,

$$p(t) = \frac{1}{N} \left[ X_0 + X_1 e^{it} + \dots + X_{[N/2]} e^{[N/2]it} + X_{[N/2]+1} e^{-[N/2]it} + \dots + X_{N-1} e^{-it} \right]$$

Para  $N$  impar, donde los coeficientes  $X_k$  vienen dados por la DFT de  $X_n$  anterior, satisface la propiedad de interpolación  $p(2\pi n / N) = x_n$ , para  $n = 0, \dots, N - 1$ .

Para  $N$  par, véase que la Frecuencia de Nyquist  $\frac{X_{N/2}}{N} \cos(Nt/2)$  se maneja de forma especial.

Esta interpolación no es única: el aliasing implica que se podría sumar  $N$  a cualquier frecuencia compleja sinusoidal (por ejemplo, cambiando  $e^{-it}$  por  $e^{i(N-1)t}$ ) sin que se altere la propiedad de interpolación, pero dando valores diferentes entre  $x_n$  puntos. De todos modos, esto tiene dos propiedades interesantes. En primer lugar, consiste en sinusoides cuyas frecuencias tienen las magnitudes más pequeñas posibles: la interpolación es limitada en banda. Y en segundo lugar, si  $x_n$  son números reales, entonces  $p(t)$  es también real.

En contraste, el polinomio de interpolación trigonométrica más obvio es el que cuyo rango de frecuencias va de 0 a  $N-1$  (en lugar de  $-N/2 + N/2$  como se ha visto

previamente), similar a la fórmula de la DFT inversa. Esta interpolación no minimiza la pendiente, y en general no toma valores reales para un  $x_n$  real; su uso es un error común.

### 2.3.4 La DFT unitaria

Otra forma de interpretar la DFT es dándose cuenta que en puede expresarse como una matriz de Vandermonde:

$$F = \begin{bmatrix} \omega_N^{0,0} & \omega_N^{0,1} & \dots & \omega_N^{0,(N-1)} \\ \omega_N^{1,0} & \omega_N^{1,1} & \dots & \omega_N^{1,(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_N^{(N-1),0} & \omega_N^{(N-1),1} & \dots & \omega_N^{(N-1),(N-1)} \end{bmatrix}$$

Donde  $\omega_N = e^{-2\pi i / N}$  es una raíz de la unidad. La transformada inversa viene entonces

dada por la inversa de la matriz anterior:  $F^{-1} = \frac{1}{N} F^*$

Con constantes de normalización unitarias  $1/\sqrt{N}$ , la DFT se convierte en una transformación unitaria, definida por una matriz unitaria:

$$U = \frac{F}{\sqrt{N}}$$

$$U^{-1} = U^*$$

$$|\det(U)| = 1$$

Donde  $\det(U)$  es el determinante. Dicho determinante es el producto de los valores propios, que siempre son  $\pm 1$  o  $\pm i$ . En un espacio vectorial real, una transformación unitaria puede verse simplemente como una rotación rígida del sistema de coordenadas, y todas las propiedades de esta rotación rígida pueden hallarse en la DFT unitaria. La ortogonalidad de la DFT se convierte ahora en ortonormalidad.

$$\sum_{m=0}^{N-1} U_{km} U_{mn}^* = \delta_{kn}$$

Si  $X$  se define como la DFT unitaria del vector  $\mathbf{x}$  entonces

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} U_{kn} x_n$$

y el Teorema de Plancherel se expresa como:

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_n y_n^* = \sum_{k=0}^{N-1} X_k Y_k^*$$

Si vemos la DFT simplemente como una transformación de coordenadas que simplemente expresa los componentes de un vector en un nuevo sistema de coordenadas, entonces lo anterior es la demostración de que el producto escalar de dos vectores se conserva en una transformación unitaria de la DFT. Para el caso especial  $x = y$ , esto implica que la longitud del vector también se mantiene—esto es el Teorema de Parseval:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2$$

### 2.3.5 La transformada inversa de Fourier discreta (IDFT)

Viene dada por

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn} ; n = 0, \dots, N-1$$

Una descripción simple de estas ecuaciones es que los números complejos  $X_k$  representan la amplitud y fase de diferentes componentes sinusoidales de la señal de entrada  $x_n$ . La DFT calcula  $X_k$  a partir de  $x_n$ , mientras que la IDFT muestra cómo calcular  $x_n$  como la suma de componentes sinusoidales  $(1/N)X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn}$  con una frecuencia de  $k/N$  ciclos por muestra. Escribiendo las ecuaciones de este modo, estamos haciendo un uso extensivo de la ecuación de Euler para expresar sinusoides en términos de exponentes complejas, lo cual es mucho más sencillo de manipular. Del mismo modo, escribiendo  $X_k$  en forma polar, obtenemos una senoide de amplitud  $A_k/N$  y fase  $\phi_k$  a partir del módulo y argumento complejos de  $X_k$ , respectivamente:

$$A_k = |X_k| = \sqrt{\text{Re}(X_k)^2 + \text{Im}(X_k)^2}, \quad \phi_k = \arg(X_k) = \text{arctg2}(\text{Im}(X_k), \text{Re}(X_k)),$$

Donde  $\text{arctg2}$  es la forma bi-argumental de la función arcotangente. Nótese que el factor de normalización que multiplica a la DFT y la IDFT (que son 1 y  $1/N$ ) y los signos de los exponentes se colocan meramente por convenio, y varían dependiendo de la aplicación.

El único requisito para este convenio es que la DFT y la IDFT tengan exponentes de signo opuesto y que el producto de sus factores de normalización sea  $1/N$ . Una normalización de  $1/\sqrt{N}$  para ambas DFT y IDFT hace las transformadas unitarias, lo cual tiene ciertas ventajas teóricas, pero suele ser más práctico a la hora de efectuar operaciones numéricas con el ordenador efectuar el escalado de una sola vez (y un escalado unitario suele ser conveniente en otras ocasiones).

El convenio del signo negativo en el exponente suele ser adecuado porque significa que  $X_k$  es la amplitud de una frecuencia positiva  $2\pi k / N$ .

De forma equivalente, la DFT se suele considerar como un filtro adaptado: cuando se busca una frecuencia de  $+1$ , se corre la señal de entrada con una frecuencia de  $-1$ .

En adelante, los términos secuencia y vector serán considerados equivalentes.

### 2.3.6 Teoremas

#### Linealidad

La transformada discreta de Fourier es una transformación lineal e invertible.

$$\mathcal{F}: \mathbb{C}^N \rightarrow \mathbb{C}^N$$

donde  $\mathbb{C}$  denota el cuerpo de los números complejos. En otras palabras, para cada  $N > 0$ , cualquier vector complejo  $N$ -dimensional tiene una DFT y una IDFT que consisten también en vectores complejos  $N$ -dimensionales.

#### Ortogonalidad

Los vectores  $e^{\frac{2\pi i}{N} kn}$  forman una base ortogonal sobre el cuerpo de los vectores complejos  $N$ -dimensionales:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \left( e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \right) \left( e^{-\frac{2\pi i}{N} k'n} \right) = N \delta_{kk'}$$

Donde  $\delta_{kk'}$  es la delta de Kronecker.

Esta condición de ortogonalidad puede ser utilizada para obtener la transformada inversa de Fourier discreta IDFT a partir de la definición de la DFT, y es equivalente a al teorema de la unicidad.

#### Los teoremas de Plancherel y Parseval

Si  $X_k$  y  $Y_k$  son las DFTs de  $x_n$  y  $y_n$  respectivamente, entonces el teorema de Plancherel establece que:

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_n y_n^* = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k Y_k^*$$

Donde el asterisco denota la conjugada compleja de las funciones discretas que están expresadas. El teorema de Parseval es un caso especial del teorema de Plancherel, y dice que:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2$$

Estos teoremas son también equivalentes a la condición de unicidad.

## Periodicidad

Si la expresión que define la DFT se evalúa para todos los enteros  $k$  en lugar de únicamente para  $k = 0, \dots, N-1$ , la secuencia infinita resultante es una extensión periódica de la DFT, de período  $N$ .

Esta periodicidad puede demostrarse directamente a partir de la definición:

$$X_{k+N} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}(k+N)n} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \underbrace{e^{-2\pi in}}_1 = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} = X_k$$

De forma similar, se puede demostrar que la fórmula de la IDFT lleva a una extensión periódica.

## Teorema del desplazamiento

Multiplicando  $x_n$  por una fase lineal  $e^{\frac{2\pi i}{N}nm}$  para cualquier entero  $m$  equivale a un desplazamiento circular de la salida  $X_k$ :  $X_k$  se reemplaza por  $X_{k-m}$ , donde el subíndice se repite periódicamente (período  $N$ ). De forma similar, un desplazamiento circular de la entrada  $x_n$  equivale a multiplicar la salida  $X_k$  por una fase lineal. Matemáticamente, si  $\{x_n\}$  representa el vector  $x$  entonces:

$$\text{Si: } F(\{x_n\})_k = X_k$$

$$\text{Entonces } F\left(\left\{x_n e^{\frac{2\pi i}{N}nm}\right\}\right)_k = X_{k-m} \quad \text{y} \quad F(\{x_{n-m}\})_k = X_k e^{-\frac{2\pi i}{N}km}$$

## Teorema de la convolución circular y teorema de la correlación cruzada

El teorema de la convolución para la transformada de Fourier continua y discreta indica que una convolución de dos secuencias infinitas se puede obtener como la transformada inversa del producto de las transformadas de cada una de ellas. Con secuencias y transformadas de longitud  $N$ , la convolución circular se define:

$$F^{-1}\{XY\}_n = \sum_{\ell=0}^{N-1} x_{\ell} \sum_{m=0}^{N-1} y_m \left( \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{\frac{2\pi i}{N}k(n-\ell-m)} \right)$$

El número entre paréntesis es 0 para todos los valores de  $m$  excepto aquellos de la forma  $n - \ell - pN$ , donde  $p$  es un entero cualquiera.

En estas posiciones vale 1. Puede ser por tanto reemplazado por una suma infinita de deltas de Kronecker.

Nótese que se pueden extender los límites de  $m$  hasta infinito, siendo las secuencias  $x$  e  $y$  definidas nulas fuera de  $[0, N-1]$ :

$$F^{-1}\{XY\}_n = \sum_{\ell=0}^{N-1} x_{\ell} \left( \sum_{p=-\infty}^{\infty} y_{n-\ell-pN} \right) \underline{\text{def}} (x * y_N),$$

que es la convolución de la secuencia  $x$  con la secuencia  $y$  que está extendida periódicamente y definida:

$$(Y_N)_n \underline{\text{def}} \sum_{p=-\infty}^{\infty} y(n - pN) = y_{n(\text{mod } N)}$$

También se puede demostrar que:

$$F^{-1} = \{X^*Y\}_n = \sum_{\ell=0}^{N-1} x_{\ell}^* (y_N)_{n+\ell} \underline{\text{def}} (x^* y_N)_n,$$

que es la correlación cruzada de  $x$  y  $y_N$

Una evaluación directa de la convolución requiere  $O(N^2)$  operaciones para una secuencia de entrada de longitud  $N$ . El método indirecto, usando transformadas, puede sacar provecho de la transformada rápida de Fourier (FFT), que necesita tan sólo  $(N \log N)$  operaciones, de modo que se consigue una eficiencia mucho mayor. Además, las convoluciones pueden ser utilizadas para calcular de forma eficiente DFTs mediante el algoritmo FFT de Rader y el algoritmo FFT de Bluestein.

Se han creado otros métodos que usan la convolución circular como parte de un proceso eficiente que obtiene convoluciones normales (no circulares) con una secuencia  $x$  o  $y$  potencialmente mucho más larga que  $N$ . Ambos métodos se conocen como overlap-save y overlap-add.

### Dualidad del teorema de la convolución

Es posible demostrar que:

$$F\{xy\}_k \underline{\text{def}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n y_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} = \frac{1}{N} (X * Y_N)_k,$$

es la convolución circular de  $X$  y  $Y$ .

## **CAPITULO III**

### **APLICACIONES TANTO EN EL UPLINK COMO EN EL DOWN LINK EN LA RED DE ACCESO 4G**

#### **3.1 Antecedentes y evolución tecnológica**

Los nuevos dispositivos, como el nuevo iPad, confirman que tendrá tecnología 4G, la compañía Apple, adelantó que la tableta tendrá Retina Display, cámara de 5 megapíxeles, asistente de voz, y otros.

El anuncio más esperado por los fanáticos de la tecnología Apple fue confirmado.

El presidente de la compañía Apple, reveló que la firma lanzará un nuevo iPad que tendrá una pantalla táctil de gran resolución gracias a la tecnología Retina Display que soportará 2048 × 1536 píxeles.

Durante una conferencia ante los medios en el Yerba Buena Center de San Francisco, la compañía confirmó, muchos de los datos que se manejaban como rumores hasta hace unos días.

El ejecutivo indicó que el nuevo iPad tendrá una cámara de 5 megapíxeles de resolución y grabará video en HD (1080 p).

Además, incorporará el reconocimiento de voz y contará con la tecnología LTE (4G) que garantiza mayor velocidad durante la transmisión de datos.

Con relación a los aspectos técnicos, se indicó que la nueva tableta contará con un procesador A5X de cuatro núcleos y se aseguró que con todas estas características puede ofrecer hasta 10 horas de autonomía de la batería.

La nueva tableta saldrá al mercado estadounidense en el presente año y estará disponible en México y España solo una semana después.

Por otro lado, Apple también presentó una versión actualizada del Apple TV, un equipo que permite conectar el televisor con Internet, y que soportará de 1080p. Estará disponible la próxima semana.

El iPad 2 es la segunda generación del iPad, un dispositivo electrónico tipo Tablet PC desarrollado por Apple Inc. Esta interfaz de usuario esta rediseñada para aprovechar el mayor tamaño del dispositivo y la capacidad de utilizar software para lectura de libros.

### 3.2 Evolución de aplicaciones en 3G

La empresa Sony fabricará un PSP con conexión 3G antes de que acabe el 2011  
La firma japonesa desea ingresar al mercado de los smartphones y así competir contra el iPhone de Apple



**Fig. 3.1:** Sony PSP. Archivo (AP)

La compañía japonesa de aparatos electrónicos Sony creará este año una PlayStation portátil (PSP) con capacidad para conectarse a redes de telefonía móvil 3G que le permitirá entrar en el rentable mercado de los smartphones, informa los medios especializados en estas tecnologías.

El fabricante electrónico Sony espera tener lista la nueva consola con mayor conectividad móvil a finales de 2011 en Japón, donde entraría de la mano del proveedor telefónico NTT DoCoMo.

Hasta el momento, las versiones de PSP pueden conectarse a redes WiFi para descargar software, pero el nuevo modelo, con conexión 3G, permitirá un acceso permanente a la red aunque no se contempla su uso como teléfono, sino para realizar descargas y jugar online.

No obstante, esta nueva PSP se enfrentará, debido a sus características, a los smartphones, que tras la exitosa aparición de los iPhone de Apple se ha convertido en un rentable negocio de venta de aplicaciones, juegos o música gracias a su acceso a Internet.

Sony quiere frenar con esta nueva PSP la caída en las ventas de su dispositivo de juegos portátil, que además competirá con la esperada Nintendo 3DS, en tres dimensiones sin necesidad de gafas.

La nueva PSP introducirá como novedad una pantalla táctil de alta resolución y un chip gráfico más potente.

Además de la PSP, Sony planea desarrollar un teléfono móvil que otorgue prioridad a las funciones de entretenimiento y juegos con el sistema operativo Android.

### **3.3 Avances tecnológicos y transmisión móvil en 4G**

Corea del Sur anunció haber desarrollado la transmisión móvil 4G.

El 4G es 40 veces más rápido que el 3G y comenzaría a funcionar el 2015, aseguró el país asiático, que reclama ser el primero en implementar esa tecnología.

Corea del Sur indicó hoy que se ha convertido en el primer país del mundo en desarrollar un sistema móvil de cuarta generación (4G), cuya velocidad de transmisión es 40 veces superior al actual 3G y que podría entrar en funcionamiento en 2015.

Según fuentes oficiales surcoreanas, el Instituto de Investigación de Electrónica y Comunicaciones (ETRI) ha conseguido probar con éxito fuera de las condiciones de laboratorio el llamado sistema "Long Term Evolution-Advanced", que considera responde a las características del 4G.

El sistema ensayado permitió ver imágenes de televisión en 3D y alta definición en un vehículo que se movía a menos de 40 kilómetros por hora, además de descargar datos a una velocidad de 600 megabits por segundo, lo que permite bajar un archivo de 700 Megabytes en 9,3 segundos.

Corea del Sur ha presentado este logro poco antes de que comience en julio a poner en funcionamiento el Long Term Evolution (LTE) o 3.9 G en Seúl, un sistema internacional para transmitir datos a móviles que ya ha sido adaptado en otros países, como en EEUU con Verizon, y que algunos expertos no consideran aún 4G.

### **3.4 Actualidad**

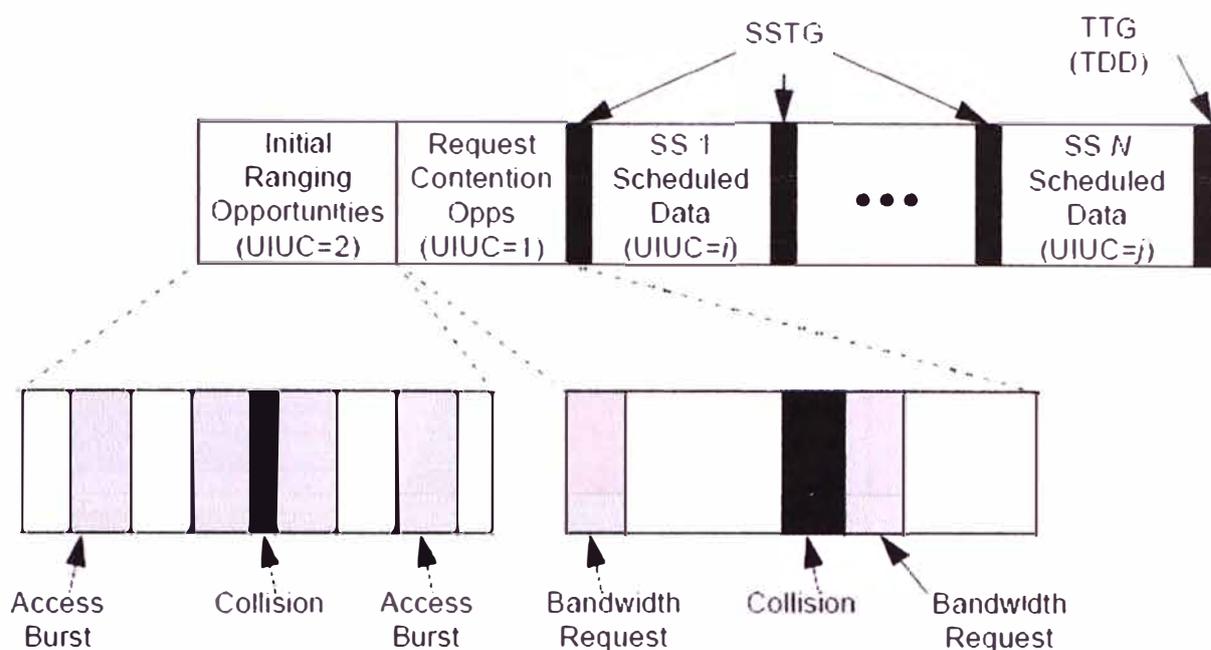
Se han previsto las bandas de 700 Mhz para América del Norte, 900, 1800 y 2600 Mhz para Europa, 1800 y 2600 Mhz para Asia y 1800 Mhz para Australia. En septiembre del 2010, los operadores CenterNet y Mobyland de Polonia, anunciaron la puesta en marcha de la primera red LTE comercial con 20 Mhz de espectro en la banda de 1800 Mhz.

Según el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (UIT), LTE es una 3.9G en el estandar 3GGP porque no llega a los objetivos de la cuarta generación (4G). Por eso, el sucesor previsto para implantar la cuarta generación es LTE Advanced.

### **3.5 Técnica de acceso Downlink en LTE/ OFDM**

#### **3.5.1 Subtrama uplink**

La estructura de la subtrama uplink usada por las estaciones suscriptoras para transmitir a las estaciones base se muestra a continuación:



**Fig. 3.2:** Estructura de la subtrama uplink

Donde UIUC (Uplink Interval Usage Code) es un código que identifica el intervalo de transmisión uplink. Existen tres clases de ráfaga que pueden ser transmitidas por las estaciones suscriptoras durante la subtrama uplink: 12

Aquellas que son transmitidas en oportunidades de contención, reservadas para el Initial Ranking.

Aquellas que son transmitidas en oportunidades de contención, definidas por los Request Intervals.

Aquellas que son transmitidas en intervalos definidos.

Los SSTG (Subscriber Station Transition Gap) separan las transmisiones de varias estaciones suscriptoras durante la subtrama uplink. Este intervalo permite la disminución de la intensidad de las ráfagas previas, seguido de un preámbulo que permite la sincronización entre las estaciones bases y las nuevas estaciones suscriptoras.

Cada ráfaga uplink comenzará con un preámbulo uplink que está basado en la repetición de la secuencia de auto-correlación de amplitud cero y de rotación constante de +45 grados. La longitud del preámbulo puede ser de 16 y de 32 símbolos, en donde realmente ocurre una repetición de la secuencia con longitudes de 8 y 16 respectivamente.

La modulación utilizada en los canales de uplink deberá ser variada y establecida por las estaciones base. La modulación QPSK deberá ser soportada, mientras que 16-QAM y 64-QAM son opcionales.

### 3.5.2 Uplink / SC- FDMA

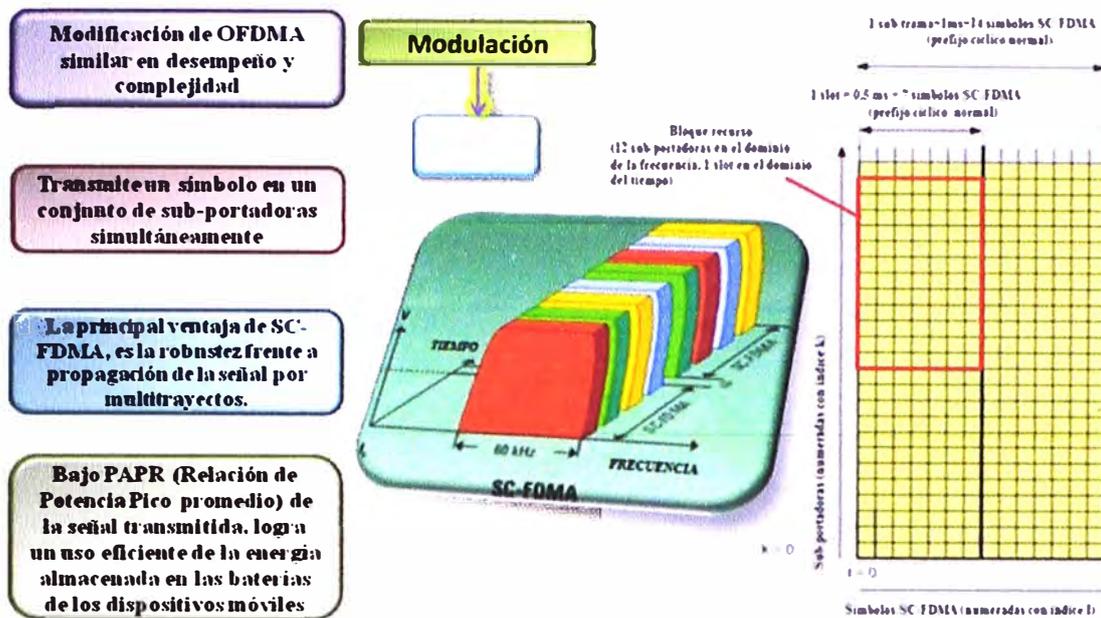


Fig. 3.3: UPLINK – SC FDMA

### 3.5.3 Uplink

Referente a las comunicaciones por satélite, un enlace ascendente (UL o U / I) es la porción de un enlace de comunicaciones utilizado para la transmisión de señales desde un terminal de tierra a un satélite o de una plataforma aérea. Un enlace ascendente es el inverso de un enlace descendente. Un enlace ascendente o descendente se distingue de enlace inverso o enlace directo.

Referente a GSM redes y celulares, el enlace ascendente radio es el camino de transmisión de la estación móvil (teléfono celular) a una estación base (sitio de la célula). Tráfico y los flujos de señalización dentro de la BSS y NSS también puede ser identificado como enlace ascendente y descendente.

Perteneciente a las redes de computadoras, un enlace ascendente es una conexión de datos de equipos de comunicación hacia el núcleo de la red. Esto también se conoce como un flujo de conexión.

### 3.5.4 El juego

Uplink se desarrolla en el año 2010, en el que el jugador asume el rol de un hacker trabajando para la misteriosa corporación "Uplink". El jugador gana dinero, software, hardware, y habilidad en el hacking de corporaciones multinacionales. Entonces un día, un agente despedido de Uplink ahora trabajando para la Corporación de Investigación Andromeda (ARC por sus siglas en inglés) envía un e-mail al jugador.

Esto comienza una de las muchas historias posibles en el juego. El jugador puede trabajar para ARC o para su compañía rival "Arunmor". ARC está construyendo un virus

informático conocido como "Virus Revelación", que destruirá Internet. Arunmor está tratando de detenerlos.

### 3.5.5 Plataformas

El juego fue lanzado para Microsoft Windows y Linux por la misma Introversion, y fue portado al Mac por Contraband y Ambrosia Software. Una versión lanzada en los Estados Unidos fue editada y distribuida por Strategy First bajo el título Uplink: Hacker Elite.

### 3.5.6 Modding

Uplink posee una fuerte comunidad de modding, con nuevos temas, gateways, sonidos, conjuntos de imágenes, y otras adiciones. A mediados del 2003 Introversion comenzó a vender el código fuente del juego, junto con otras herramientas en el "CD para desarrolladores de Uplink". Esto llevó a algunas modificaciones en el modo de juego como lo es el mod del FBI, que añade el servidor del FBI al juego, junto con nuevos sistemas de seguridad y misiones. Actualmente Introversión ha dejado de producir parches para el juego, dejando el trabajo a la comunidad de modding

### 3.5.7 El Hud

El enfoque de todo el juego, sus Heads Up Display. A lo largo de la parte superior, tiene la fecha, la IP que está actualmente conectado, el uso de la CPU y los controles de tiempo, y el mapa del mundo. Por debajo del indicador de uso de la CPU es una lista de todos los programas actualmente en ejecución, la cantidad de la CPU que está utilizando actualmente, y los botones para aumentar o disminuir el uso de CPU de cada programa. Los controles de tiempo de 4 botones que permiten hacer una pausa, y acelerar el tiempo, y por supuesto, volver a la normalidad. El mapa del mundo muestra la ruta de la conexión actual, y haciendo clic sobre ella, se obtiene una versión de gran tamaño que le permite seleccionar las rutas de rebote, y botones para guardar las rutas, mientras que el juego todavía está funcionando.



Fig. 3.4: El Hud

## **El Hud Uplink**

En la parte inferior de la pantalla hay 6 botones, y un área que contiene las declaraciones de correo electrónico / misión que tiene. La primera y más grande de los botones se abre el menú del software, lo que le permite ejecutar cualquier software que tiene actualmente en su memoria. El resto de los botones le permiten ver su hardware actual, los archivos, el estatus personal, y para enviar correo electrónico. Al hacer clic en uno de estos botones, la pantalla apropiada aparece a la derecha.

## **Conexión de Bouncing**

Cuando intenta hackear un servidor, usted necesitará para recuperarse de su conexión a través de otros servidores de lo contrario se remonta al instante, y desconectado antes de que haya tenido acceso.

Cuando desee conectarse a un servidor, vaya al Mapa del Mundo, y haga clic en los servidores de otros (representados por cuadrados blancos) en todo el mapa antes de hacer clic en la máquina que se quiere conectar. Esto le dará tiempo para hacer lo que es lo que necesita hacer en el servidor.

El tiempo que usted reciba dependerá de cuántos servidores que saltas por, y qué tipo de acceso que se tenga en esos servidores. Una cuenta normal en una máquina, como una cuenta bancaria, (indicado por las líneas que rodean adoraba el servidor) le dará más de una máquina que no tiene una cuenta en, y una máquina que haya acceso de administrador (indicado por la caja sólida que rodea el servidor) le dará más tiempo. Cuando usted comienza a recuperarse la conexión, es una buena idea utilizar como punto de InterNIC primer rebote (es decir, el primer servidor que haga clic en). Esto se explicará en la próxima sección.

Si usted encuentra que un área del mapa es demasiado desordenada para ver lo que los enlaces que hacen clic, puede utilizar la función de zoom para ampliar una sección del mapa, y que sea más fácil hacer clic en el enlace que usted necesita.

## **Se realiza un seguimiento**

Casi cualquier servidor que se conecte a la voluntad de tratar de remontar el segundo de empezar a hackear su seguridad. El tiempo de esta traza se depende de cómo se han recuperado la conexión, pero al final, ocurre lo mismo. Los acabados de seguimiento, se desconecta, y desautorizó lo más probable, o por lo menos una multa y tener algo añadido a su registro de antecedentes penales. Es parte de su trabajo para terminar lo que cada vez que usted está haciendo antes de que el tiempo llegue a 0. Para ello, tiene el rastreador de seguimiento, a decir cuánto tiempo hay antes de que se tracen. Usted siempre debe dar su tiempo libre suficiente para hacer el trabajo, no hay

nada peor que tener la mitad fue a través de un trabajo, para que luego de desconectar porque no tienen tiempo suficiente. Los más experimentados lo convierten en el mejor de sus habilidades, conseguirá ser el más rápido y usted será capaz de hacer cosas, por lo que necesitan menos tiempo. La única cosa para esto es la práctica. Cuanto más lo haga, mejor lo hace.

## **Registros**

Cada vez que se conecta a un servidor, se crean los registros. El uso de estos registros, una empresa / Hacker puede hacer un 'Rastreo Pasivo' en la que, siguiendo los registros por vuelta a través de su ruta de rebote y de su equipo. Para evitar esto, usted necesita para limpiar sus registros. La manera más segura de hacer esto es eliminar los registros desde su punto de primer rebote. Debido a que la contraseña InterNIC nunca cambia, y no realiza un seguimiento, que es el mejor servidor para utilizar como punto de rebote en primer lugar, como se puede fácilmente acceder a los registros del servidor y eliminarlos.

Cuando usted va a borrar sus registros, usted debe asegurarse de eliminar las correctas. Los registros principales que usted necesita para eliminar son los "rebotar" los registros, y la 'Contraseña aceptadas "los registros, que se parecen a lo siguiente: "Conexión de 127.0.0.1 dirigida a xxx.xxx.xxx.xxx '(sesión de rebote) "De 127.0.0.1: autenticación de la contraseña aceptada "(Accepted Contraseña Iniciar sesión).

Estos son los registros que necesita eliminar. Es importante que usted deje la conexión real registra allí, sin embargo, debido a que también salen los registros cuando se desconecta, y parecería sospechoso si había un registro de la desconexión, pero ninguna conexión.

Al eliminar estos registros desde su punto de primer rebote después de cada truco, nunca debe ser capturado, siempre y cuando usted no está demasiado lento en hacerlo. Recuerde, todo el mundo mantiene los registros, incluyendo los sistemas de teléfono de voz. Sólo porque usted no puede llegar a los registros, no quiere decir que no están allí.

## **Enlaces Server**

Lo más importante que usted verá cuando usted no está conectado a un servidor es la pantalla de vínculos. Esto muestra todos los enlaces que tiene actualmente. En la parte inferior de esta pantalla, hay un filtro, que permite escribir en un trozo de texto, y mostrar sólo los enlaces que contengan ese texto. Esto es útil si usted tiene un gran número de enlaces y la necesidad de encontrar uno específico. A cada lado de cada enlace, hay una caja azul. El de la izquierda tiene una cruz en él.

Haciendo clic en este borrará el enlace de su sistema, y ya no aparecerá en el mapa del mundo. El de la derecha contiene 2 círculos. Al hacer clic en esto hará que desaparezca el cuadro, a continuación, ese vínculo no aparecerá en el mapa del mundo útil, si el mapa está lleno, pero no quiere eliminar sus enlaces.

También se puede conectar directamente a cualquier servidor, simplemente haciendo clic en el enlace correspondiente.

Usted puede encontrar una colección de la mayoría de los enlaces en el juego en InterNIC. Conectando con el servidor de InterNIC, y haciendo clic en el botón Examinar se abrirá una lista similar a la pantalla del propio enlace, que contiene un gran número de enlaces que se puede agregar a su lista haciendo clic en el cuadro azul con el símbolo + i

### **3.5.8 Uplink de Servicios Internos**

Este es el servidor más importante en el juego, y debe ser el primero que se conecta. Aquí es donde usted recibe sus misiones, hardware, software, pasarelas, Rankings de agentes y de las noticias. Estos son los tipos que ofrecen y mantienen su puerta de enlace y actualiza cuando sea necesario.

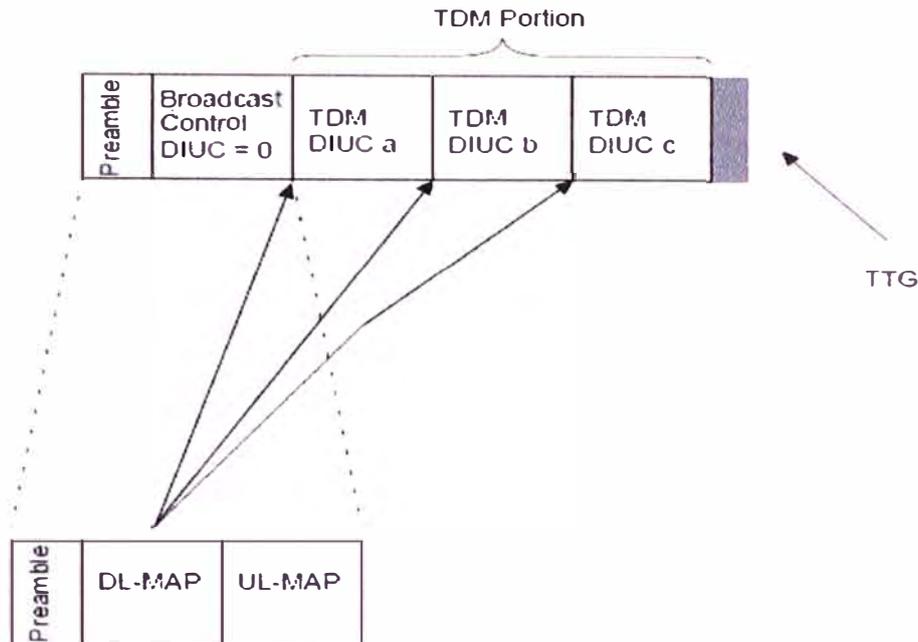
Te proporcionará la capacidad de ponerse en contacto con los empleadores que deseen hablar, con el fin de obtener más detalles sobre las misiones, o un salario mejor. También tendrá que gastar un poco de tiempo allí viendo las noticias

## **3.6 Downlink**

### **3.6.1 Downlink PHY**

La subtrama downlink comienza con un preámbulo usado por la capa física para la sincronización y la ecualización. Esto es seguido de una trama de sección de control, la cual contiene el DL-MAP (Downlink Map, un mensaje MAC que describe las características físicas del canal downlink) y el UL-MAP (Uplink Map, información que define el acceso completo para un intervalo programado).

La siguiente porción TDM (Time Division Multiplexing, una porción contigua de secuencia de datos TDM usando parámetros físicos, determinados por el código de uso del intervalo downlink, que permanece constante durante la ráfaga. Estas ráfagas TDM no son separadas por intervalos ni por preámbulos) contiene la información organizada en ráfagas con diferentes perfiles de ráfaga y por lo tanto diferentes niveles de confiabilidad. Las ráfagas son transmitidas en orden decreciente de confiabilidad. Para el caso de TDD, hay un TTG que separa la subtrama downlink de la subtrama uplink. Cada estación suscriptora recibe y decodifica la información de control del downlink y analiza la cabecera MAC. La siguiente figura muestra la estructura de la subtrama downlink usando TDD.



**Fig. 3.5:** Subtrama Downlink usando TDD

Donde DIUC (Downlink Interval Usage Code) es un código que identifica el intervalo de transmisión downlink. Para el caso de FDD, y de manera similar a la anterior, la subtrama downlink comienza con un preámbulo seguido de una trama de sección de control y una porción TDM organizada en ráfagas y transmitidas en orden decreciente de confiabilidad de perfil de ráfaga.

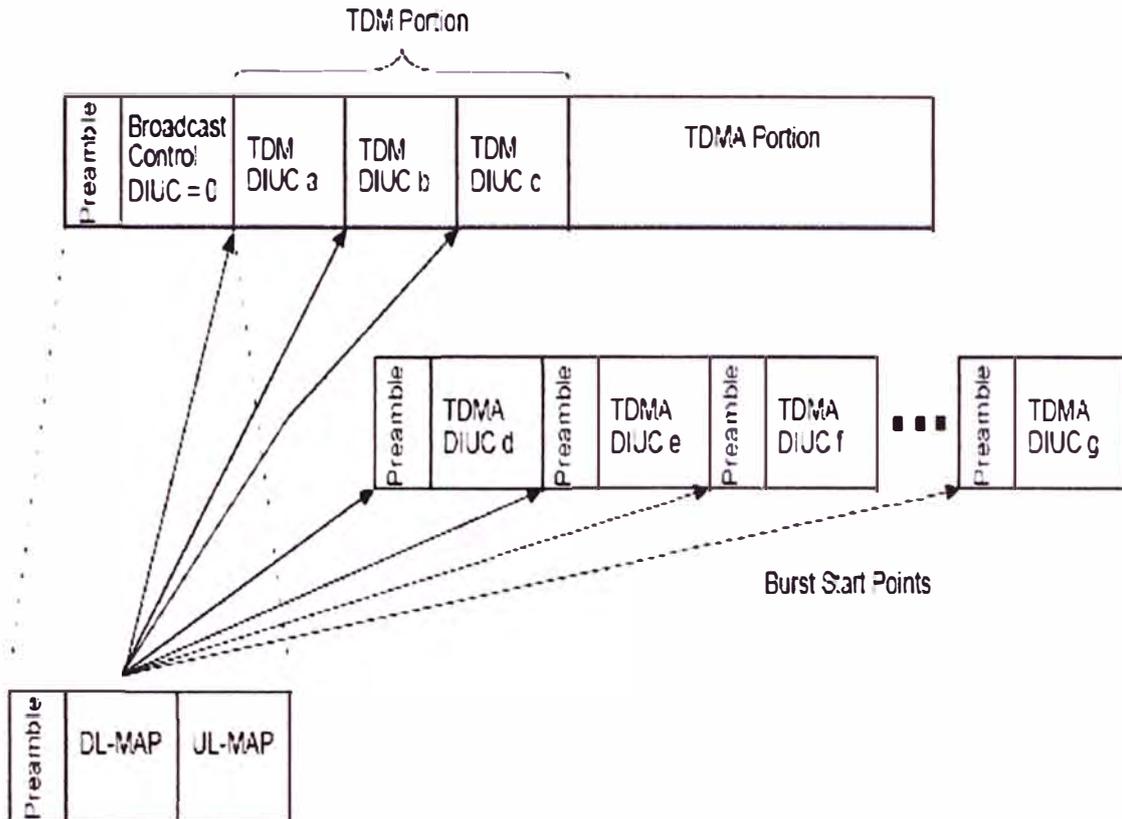
La subtrama downlink de FDD continúa con una porción TDMA (Time Division Multiple Access, una porción contigua del uplink y downlink usando parámetros físicos, determinados por el código de uso del intervalo downlink o por el código de uso del intervalo uplink, que permanece constante durante la ráfaga.

Las ráfagas TDMA están separadas por preámbulos y están separadas por intervalos en la transmisión, si las ráfagas subsiguientes son de diferentes transmisores usadas para transmitir información hacia cualquier estación suscriptora half-duplex programada para transmitir antes de recibir.

Esto permite a las estaciones suscriptoras, individualmente, decodificar una porción específica del downlink sin tener que decodificar toda la subtrama downlink. En la porción TDMA, cada ráfaga comienza con un preámbulo de ráfaga para la fase de re-sincronización. Las ráfagas en la porción TDMA no necesitan ser ordenadas por perfiles de ráfaga en orden de confiabilidad de transmisión.

La trama de sección de control en FDD incluye un mapeo de ambas ráfagas: TDM y TDMA.

La siguiente figura (3.6) muestra la estructura de la subtrama downlink usando FDD.



**Fig. 3.6:** Estructura de la subtrama downlink usando FDD

La subtrama downlink, en TDD, es idéntica en estructura a la subtrama downlink en FDD para el caso en el que ninguna estación suscriptora half-duplex este programada para transmitir antes de recibir.

En la figura (3.6) nos muestra los dos tipos de preámbulos existentes: preámbulo de comienzo de trama, el cual se utiliza en el comienzo de cada trama downlink, y preámbulo de ráfaga downlink TDMA, el cual se utiliza en cada ráfaga TDMA en la porción TDMA de la subtrama downlink.

### 3.6.2 Subtrama downlink

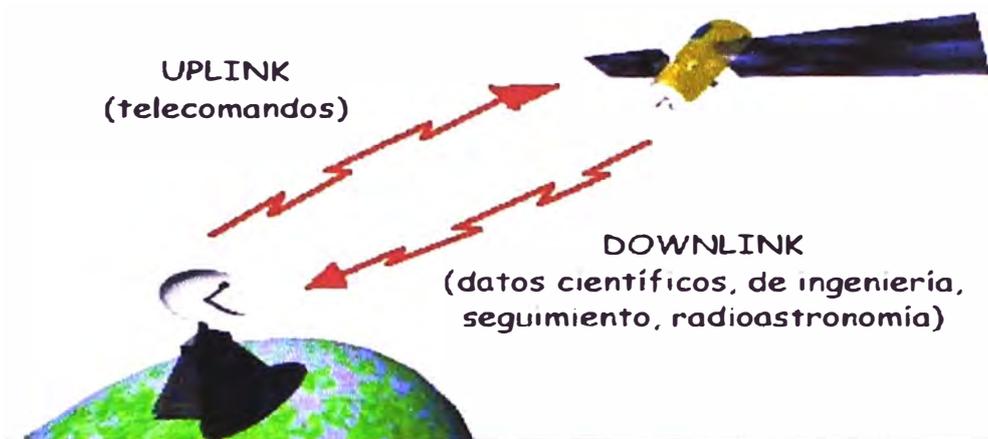
En el contexto de las comunicaciones por satélite, un enlace descendente (DL) es el vínculo de un satélite a una estación terrestre.

Pertenciente a las redes celulares, la bajada de radio es la ruta de transmisión de una estación base al teléfono móvil.

Tráfico y los flujos de señalización dentro del subsistema de estación base (BSS) y subsistema de red de conmutación (NSS) también puede ser identificado como enlace ascendente y descendente.

Pertenciente a una red informática, un canal de transmisión es una conexión de datos de equipos de comunicación hacia el equipo terminal de datos. Esto también se conoce como un intermedio de conexión.

### 3.7 Aplicaciones en Down Link /En el espacio



**Fig. 3.7:** Esquema uplink - downlink

La comunicación entre una sonda espacial y la recepción en tierra es puramente digital; es decir, sólo se transmiten símbolos binarios ("1" y "0"). El tipo de modulación utilizada es la modulación en fase. Todas las comunicaciones que se realicen entre la sonda espacial y la estación de seguimiento ubicada en la Tierra se pueden dividir en dos grupos, el uplink y el downlink.

El uplink es utilizado en la estación ubicada en la Tierra para enviar órdenes al ordenador central de la sonda (tele comando). El downlink puede ser utilizado para el envío de datos (telemetría). Estos datos enviados por downlink son los obtenidos por los equipos científicos de la sonda (por ejemplo, los recogidos con cámaras de vídeo), o los datos sobre el estado de la misma obtenidos a partir de sensores estratégicamente ubicados, o incluso para el seguimiento de la propia sonda (tracking). Además, el downlink es utilizado para realizar estudios de radioastronomía.

Las comunicaciones donde sólo existe downlink son conocidas como simplex. Por otro lado, si existe comunicación uplink y downlink funcionando al mismo tiempo se denominan dúplex.

Es la evolución de la tercera generación (3G) de tecnología móvil, llamada 3.5G, y se considera el paso previo antes de la cuarta generación (4G), la futura integración de redes.

La tecnología HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) es la optimización de la tecnología espectral UMTS/WCDMA, incluida en las especificaciones de 3GPP release 5 y consiste en un nuevo canal compartido en el enlace descendente (downlink) que mejora significativamente la capacidad máxima de transferencia de información hasta alcanzar tasas de 14 Mbps. Soporta tasas de throughput promedio cercanas a 1 Mbps.

Es totalmente compatible en sentido inverso con WCDMA y aplicaciones ricas en multimedia desarrolladas para WCDMA funcionarán con HSDPA.

La mayoría de los proveedores UMTS dan soporte a HSDPA

### **3.8 Tecnología**

De la misma manera en que UMTS incrementa la eficiencia espectral en comparación con GPRS, HSDPA incrementa la eficiencia espectral en comparación con WCDMA. Esto permite habilitar nuevas clases de aplicaciones, además de permitir que la red sea utilizada simultáneamente por un número mayor de usuarios; HSDPA provee tres veces más capacidad que WCDMA.

En cuanto a la interfaz de las aplicaciones en tiempo real tales como:  
videoconferencia

Juegos entre múltiples jugadores

Actualiza a la tecnología WCDMA

HSDPA emplea un eficiente mecanismo de programación para determinar qué usuario obtendrá recursos. Están programadas varias optimizaciones para HSDPA que aumentarán aún más las capacidades de UMTS/HSDPA, comenzando con un enlace ascendente optimizado (HSUPA), receptores avanzados y antenas inteligentes/MIMO.

Finalmente, comparte sus canales de alta velocidad entre los usuarios del mismo dominio de tiempo, lo que representa el enfoque más eficiente.

La mayoría de los operadores de 3G ofrecen esta tecnología en su red. La principal utilidad del servicio es acceso a internet con mayor ancho de banda y menor latencia. Esto permite navegar, hacer descargas de correo electrónico, música y vídeo a mayor velocidad. Los operadores han enfocado el servicio como un acceso móvil a Internet de banda ancha para ordenadores portátiles.

## **CAPITULO IV**

### **ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 Long Term Evolution /LTE**

La evolución en el largo plazo LTE y la convergencia de tecnologías través del protocolo IP, es el futuro de las telecomunicaciones, para satisfacer la gran demanda que ya no es posible acceder por las tecnologías de tercera generación 3G ó sus respectivas evoluciones, además el cambio al Protocolo Internet (IP) y a las redes de la siguiente generación (NGN), permitirá separar la Red del Servicio, este cambio además de la digitalización de las señales analógicas, el desarrollo de nanotecnologías, el desarrollo de memorias de muy alta capacidad, las tecnologías de multicapa, el desarrollo de terminales inteligentes, la inteligencia residirá en los extremos de los usuarios finales, no en la propia red y su objetivo es simplemente la entrega de bits, la red no necesita información sobre las aplicaciones., estos son los factores principales que permite los procesos de convergencia en las telecomunicaciones modernas del futuro. De esta manera se consigue las redes multiservicio que permite soportar señales de voz, de imágenes, de datos, de manera simultánea y por la misma infraestructura. En el pasado, las redes telefónicas fueron diseñadas para entregar un servicio, telefonía de voz. La televisión de cable fue diseñada para entregar video. Las redes fueron diseñadas para transportar un solo servicio, todo esto cambiará con la migración que presentará cambios e impactos tecnológicos, económicos, regulatorios y normativos y sobre todo calidad de servicio (QoS)

LTE es el futuro de la red de Verizon Wireless de banda ancha inalámbrica. Esta tecnología permitirá a Verizon Wireless para ofrecerlos usuarios más de lo que quieren, que es la movilidad sin ataduras. Además, LTE apoyará varios de los productos y servicios en el uso de estas tecnologías

Hoy en día, debido a su compatibilidad con las redes 3GPP. Verizon Wireless se ha comprometido plenamente a LTE móvil la tecnología y la mejora de su red inalámbrica. A tal fin, la compañía participa activamente en el desarrollo de los estándares de tecnología para asegurar que las futuras normas serán de gran beneficio a sus clientes. Verizon Wireless cree en la viabilidad de la norma LTE y su potencial futuro, después de haber

pasado incontables horas investigando y probando las tecnologías de 4G para determinar el mejor ajuste para su red. Por estas razones, Verizon Wireless escogió a LTE como la tecnología para ofrecer la próxima generación de servicios y aplicaciones móviles a sus clientes.

Diferentes mercados, diferentes necesidades, diferentes soluciones y estrategias tecnológicas.

ALL IP una realidad tarde temprano, hay que decidir cuándo y cómo estar preparado.

LTE como complemento de las redes existentes y en despliegue.

¿Está usted preparado para LTE hoy? Ya es posible con tecnología Multi-Code, ese es reto del futuro a la cual debemos converger.

#### **4.2 Worldwide Interoperability for Microwave Access /WiMAX**

Debido al gran desarrollo y sus aplicaciones que se obtienen a través de WiMAX, además de sus ventajas, son requisitos indispensables para converger en el desarrollo de la cuarta generación 4G, es decir WiMAX y LTE deben conformar las redes de la siguiente generación (NGN), basadas en conmutación de paquetes, usando el Protocolo de Internet (IP). Los cambios serán complejos, como pasar a redes de banda ancha, utilización en la optimización del espectro radioeléctrico que permita un adecuado uso de tecnologías de acceso como el LTE. En un entorno NGN, un proveedor de servicio podrá ofrecer un servicio independientemente de la tecnología de acceso usado por el cliente. El usuario solo necesitará acceso a una red de banda ancha para continuar usando el servicio.

La modulación OFDM es muy robusta frente al multicamino (multi-path), que es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias de RF. Debido a las características de esta modulación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales con distintos retardos y amplitudes que llegan al receptor, por lo que existe la posibilidad de crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia.

Por otra parte. Las aplicaciones inalámbricas están alcanzando un lugar muy importante en el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas. Los estándar , entre ellos el IEEE 802.16 se perfila con un gran potencial para brindar aplicaciones de multimedia.

El estándar IEEE 802.16 se posiciona como elemento importante para el desarrollo de la siguiente generación de servicios móviles denominada 4G.

La 802.16m es la norma de la IEEE que puede calificar como tecnología 4G en vista que ofrecerá movilidad total y proporcionará un ancho de banda comparable con el LTE

La arquitectura WiMAX es diferente a las arquitecturas de los sistemas móviles tradicionales, principalmente por el hecho que los servicios de voz deben ser proporcionados sobre una red de datos en vista que no existe un dominio de conmutación de circuitos.

La competitividad de WiMAX en el mercado de las redes de banda ancha, dependerá en gran medida de las tarifas y los servicios reales que se ofrezcan, lo cual resulta difícil de valorar debido a las enormes posibilidades del sistema, se tendrá en cuenta los procesos de reestructuración de la industria, que implicaría, tales como fusiones, cambio en las estructuras de las empresas, reacomodo en el mercado tanto en la oferta como en la demanda ,reacomodos en las empresas operadoras , se puede mencionar la aparición de nuevos productos que consideran varios servicios, entre ellos triple play, cuádruple play etc. También incluyen los procesos normativos y regulatorios que permitan la defensa de los derechos de los usuarios, facilitar los acuerdos de interconexión de los operadores, mejora y control de calidad de servicio (QoS), evaluación de la oportunidad de una regulación "ex ante", ó "ex post", entre muchos otros.

## CONCLUSIONES

1. La ortogonalidad de dos señales es fundamental para la migración de la tecnología analógica a digital en las telecomunicaciones modernas.
2. La modulación OFDMA es la base para el desarrollo de la tecnología WiMAX que tiene dos capas físicas basadas en OFDM, también son importantes las modulaciones digitales BPSK, M-PSK, QAM, OFDMA, QPSK, 16QAM y 64QAM.
3. También es fundamental en el desarrollo de LTE, que usa OFDM en el canal de bajada ó Downlink.
4. Las herramientas matemáticas para el desarrollo de las tecnologías WiMAX y LTE son las Transformadas Discretas directa e inversa de Fourier FFT y IFFT, que se basan en algoritmos para su desarrollo.
5. En el dominio del tiempo la onda es creada por medio de la IFFT, donde el tiempo de duración de la onda se conoce como tiempo útil.
6. En el dominio de la frecuencia un símbolo OFDM está compuesto de varias subportadoras, cuyo número determina el tamaño de la FFT utilizada
7. Otro de los conceptos es la Convolución de señales discretas, que se usan como parámetros fijos de OFDMA.
8. Actualmente la creación de la banda base de OFDMA se realiza por Software, primero se genera el espectro, luego se hace la Transformada Inversa de Fourier IFFT, para obtener la señal en el tiempo.
9. En LTE la transmisión de datos esta definida por la triada tiempo, frecuencia y espacio. El tiempo se define por la cantidad de simbolos FDMA que se asignan, la frecuencia por la cantidad de subportadoras y el espacio por la cantidad de antenas usadas.
10. Una variante de OFDMA es el SC-FDMA que presenta las mismas ventajas pero adicionalmente el PAPR es reducido con relación a OFDMA. SC-FDMA tiene un transmisor sencillo pero un receptor complejo, por eso es ideal en el Uplink, donde la unidad móvil debe ser sencilla y económica, mientras que la complejidad del receptor y los altos costos que se pudiesen generar se dejan a la estación base.

## RECOMENDACIONES PARA LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA

11. Debido al impacto de las nuevas tecnologías tratados en este Informe de suficiencia, WiMAX y LTE, desde la evolución 1G,2G,3G y 4G, teniendo en cuenta además que es necesario actualizar la enseñanza de la Ingeniería en nuestra facultad FIEE y como un aporte de este trabajo, desarrollar en un curso denominado Señales y Sistemas de Comunicaciones en un semestre que puede sustituir al curso de Matemáticas V, usando los conceptos de funciones compuerta(Gate),funciones impulso (Delta de Dirac) conceptos de modulación y otros aportes con el siguiente temario y contenido.

### **Análisis de Fourier**

1. Series de Fourier Complejas y Trigonométricas.
2. Transformadas de Fourier en el dominio analógico y digital ó discreto DFT, FFT
3. Algoritmos y Polinomios de interpolación
4. Espectros continuos y discretos
5. Aplicaciones y Ecuaciones Diferenciales Parciales.

### **II Convolución**

1. Convolución en el dominio del tiempo y Convolución gráfica
2. Convolución en frecuencia y Transformadas de Fourier
3. Funciones de Correlación y Autocorrelación

### **III Sistemas Lineales**

1. Sistemas analógicos y digitales
2. Circuitos Eléctricos y Electrónicos
3. Rectificadores de media onda, onda completa
4. Filtros ideales

### **IV Teoría de las Comunicaciones**

1. Modulación en amplitud y frecuencia
2. Modulación digital.FDM ,BPSK, M-PSK, QAM , OFDM,OFDMA
3. Aplicaciones diversas.

**ANEXO**  
**GLOSARIO DE TÉRMINOS**

BW	: Bandwidth
CAPEX	: Capital Expenditures
CP	: Cyclic Prefix
CRC	: Cyclic Redundancy Check
CPE	: Customer Premises Equipment
DCD	: Downlink Channel Descriptor
DIUC	: Downlink Interval Usage Code
FDD	: Frequency Division Duplex
FEC	: Forward Error Correction
FFT	: Fast Fourier Transform
FITEL	: Fondo de Inversion en Telecomunicaciones
GPRS	: General Packet Radio Service
GSM	: Global System for Mobile Communications
HO	: Handover
HSDPA	: High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	: High Speed Uplink Packet Access
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IDU	: Indoor Unit
IP	: Internet Protocol
LTE	: Long Term Evolution
MAC	: Medium Access Control Layer
MS	: Mobile Station
NLOS	: Non Line of Sight
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PDU	: Protocol Data Unit
PMP	: Point to Multipoint
PS	: Physical Slot
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation
QoS	: Quality of Service
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
RF	: Radio Frequency
SC-FDMA	: Simple Carrier Frecuency División Multiple Access
TDD	: Time Division Duplex
TDM	: Time Division Multiplexing
TDMA	: Time Division Multiple Access
UIUC	: Uplink Interval Usage Code
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System

UWB	: Ultra Wide Band
VoIP	: Voice over IP
WIFI	: Wireless Fidelity
WIMAX	: Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	: Wireless Local Area Network
WMAN	: Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	: Wireless Personal Area Network
WWAN	: Wireless Wide Area Network

## BIBLIOGRAFÍA

- [01] Hwei P. Hsu, Análisis de Fourier. Addison – Wesley 1973
- [02] Alan Oppenheim, Señales y Sistemas II Edición 1998
- [03] S. Soliman, Señales y Sistemas Continuos y Discretos, Prentice-Hall, 1999
- [04] Erwin Kreyszig, Tomo II, Matemáticas Avanzadas en Ingeniería, Limusa 1976
- [05] Diógenes Marcano, Acceso Multiple OFDMA, Attel asesores C:A
- [06] Ing. Percy Fernández Pilco, Temas Normativos y Regulatorios sobre las Telecomunicaciones en el Perú 2011, Universidad Nacional de Ingeniería
- [07] Evolución de las Tecnologías Móviles, Temas Normativos y Regulatorios sobre las Telecomunicaciones en el Perú 2011, Programa de Titulación Profesional Por Actualización de Conocimientos, UNI-FIEE 2012
- [08] Desarrollo de Redes WiMAX, Universidad Carlos III, Madrid, España
- [09] Aplicaciones Triple Play en Internet por WiMAX, Instituto Politécnico Nacional, México DF, 2008
- [10] Andrés Rosas, Diseño de Red WiMAX, Móvil en Trujillo, PUCP
- [11] Long Term Evolution LTE, Wikimedia Project, 3GPP
- [12] Matías Savia, ¿Que es LTE?, Xatoka Móvil
- [13] Long Term Evolution LTE, Wikitel, Alcatel Lucent
- [14] Long Term Evolution LTE, an Intruduction White Paper Ericson
- [15] Long Term Evolution LTE, La Evolución 4G, 2007, Xatoka Móvil