



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y ELÉCTRICA**

**UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ  
MATEOS” ZACATENCO**

**“FORMAS DE ONDA DE 5G”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTA

**KASSANDRA ANALI HERNÁNDEZ GALICIA**

ASESORES

**ING. ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ**

**ING. JORGE ALBERTO GÓMEZ GARCÍA**



**CIUDAD DE MÉXICO, MAYO 2018**

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"**

**TEMA DE TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
DEBERA (N) DESARROLLAR C. KASSANDRA ANALI HERNANDEZ GALICIA

**"FORMAS DE ONDA DE 5G"**

CREAR UNA INTERFAZ GRÁFICA QUE REPRODUZCA LAS CARACTERÍSTICAS TEMPORALES Y ESPECTRALES DE FORMAS DE ONDA PROPUESTAS PARA SISTEMAS CELULARES DE 5G, CON EL FIN DE INTEGRAR LAS BASES DEL PROCESO DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN.

- ❖ ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DE LA TELEFONÍA CELULAR
- ❖ PERSPECTIVA DE LA TELEFONÍA CELULAR DE QUINTA GENERACIÓN
- ❖ FORMAS DE ONDA PARA 5G
- ❖ GENERACIÓN DE FORMAS DE ONDA CANDIDATAS PARA 5G

CIUDAD DE MÉXICO, A 09 DE MAYO DEL 2018.

**ASESORES**

  
ING. JORGE ALBERTO GÓMEZ GARCÍA

  
ING. ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ

  
  
DR. SALVADOR RICARDO MENESES GONZÁLEZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

Presente

Bajo protesta de decir la verdad la que suscribe **Kassandra Anali Hernández Galicia** manifiesta ser autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Formas de Onda de 5G**" en adelante "**La Tesis**" y de la cual se adjunta copia, un impreso y un CD, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **EL IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio. Y el uso que se pretenda hacer de la tesis; consulta, aportación del desarrollo del proyecto para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema "**La Tesis**" por un periodo de **1 año** contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EL IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EL IPN** deberá reconocer en todo momento la calidad de la autora de "**La Tesis**".

Adicionalmente, y en calidad de la autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de "**La Tesis**", manifiesto que a misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "**La Tesis**", por lo que deslindo de toda responsabilidad a **EL IPN** en caso de que el contenido de "**La Tesis**" o la autorización concebida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que pueda derivarse del caso.

Ciudad de México, a 30 de Agosto de 2018

Atentamente



---

Kassandra Anali Hernández Galicia

*DEDICATORIA*

*A mis abuelos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecer a todas aquellas personas con las que conté a lo largo de la carrera, quienes gracias a su apoyo me permitieron culminar mis estudios de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, pero principalmente...*

### **A mis padres Esteban y Teresa.**

*Por ser mi fortaleza y soporte en todo momento. Por ser mi ejemplo a seguir al mostrarme su perseverancia para continuar siempre hacia delante y convertirme en una persona de bien gracias a la educación que me proporcionaron. Pero más que nada, por su amor incondicional.*

### **A mis familiares.**

*A mi hermana Alondra por demostrarme la fe que tiene en mí y ser de gran apoyo siempre. A mis abuelos Gonzalo y Andrea por criarme con sus sabios consejos y ejemplos de vida. A mis padrinos Jorge y Pilar por quererme y cuidarme como otra hija y a todos aquellos que ayudaron a conseguir mis metas.*

### **A mi asesor de Tesis.**

*Ing. Jorge Alberto Gómez García por ser parte fundamental para la elaboración de esta tesis al compartirme sus conocimientos con gran tolerancia, respeto y motivación.*

# ÍNDICE

<i>DEDICATORIA</i> .....	iv
<i>AGRADECIMIENTOS</i> .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xvii
OBJETIVO GENERAL .....	xviii
OBJETIVOS PARTICULARES.....	xviii
JUSTIFICACION .....	xix
Acrónimos .....	xii
Capítulo 1 Antecedentes y evolución de la Telefonía Celular. ....	1
1.1    Introducción. ....	1
1.1.1    Antecedentes Históricos de Comunicaciones Inalámbricas. ....	1
1.2    Generalidades de los Sistemas de Comunicaciones. ....	2
1.2.1    Componentes de un Sistema de Comunicaciones. ....	3
1.2.2    Modulación.....	4
1.2.3    Diagramas de constelación.....	5
1.2.4    Tipos de Sistemas de Comunicaciones. ....	6
1.2.5    Organismos reguladores y grupos de trabajo en comunicaciones inalámbricas.....	8
1.3    Introducción a los sistemas de comunicación Celular.....	10
1.3.1    Telefonía móvil y concepto de “celular”.....	10
1.3.2    Elementos de un sistema de comunicaciones celulares.....	11
1.3.3    Demandas y Requerimientos de un sistema de Comunicación Celular. ....	13
1.4    Evolución de los sistemas Celulares. ....	14
1.4.1    Primera Generación de los Sistemas Celulares. ....	14
1.4.2    Sistemas Celulares Digitales 2G. ....	15
1.4.3    Sistemas Celulares de Banda Ancha 3G. ....	16
1.4.4    Más allá de 3G, sistemas 4G. ....	17
1.5    Introducción a los sistemas Celulares de 5G.....	18
1.5.1    Requerimientos para 5G.....	19
1.5.2    Tecnologías Clave para 5G. ....	20
1.5.3    Iniciativa para 5G.....	21
1.5.4    Estandarización para 5G.....	22
Capítulo 2 Perspectiva de la Telefonía Celular de Quinta Generación. ....	24

2.1	Introducción.....	24
2.2.1	Concepto del sistema 5G.....	24
2.2	Arquitectura 5G.....	25
2.2.1	Características de la arquitectura 5G.....	25
2.3	Casos de uso y requerimientos generales.....	27
2.4	Comunicaciones Dispositivo a Dispositivo.....	28
2.4.1	Introducción a las Comunicaciones Dispositivo a Dispositivo.....	28
2.4.2	Comunicaciones D2D hacia 5G.....	29
2.5	Comunicaciones Máquina a Máquina.....	30
2.5.1	Introducción a las Comunicaciones Máquina a Máquina.....	30
2.5.2	Requisitos de M2M para Sistemas Celulares.....	30
2.5.3	Desafíos de M2M para redes celulares móviles.....	31
2.6	Comunicaciones MIMO Masivo.....	32
2.6.1	Arreglos de Antenas.....	32
2.6.2	Características de MIMO Masivo.....	32
2.7	Redes inalámbricas Radio-Cognitivas para 5G.....	33
2.7.1	Características de las Redes radio-cognitivas.....	34
2.7.2	Funciones de las Redes radio-cognitivas.....	34
2.7.3	Arquitectura de redes Radio cognitivas hacia 5G.....	35
2.8	Comunicaciones de Ondas Milimétricas para 5G.....	35
2.8.1	Limitaciones de ondas Milimétricas.....	36
2.8.2	Acceso Inicial en Ondas Milimétricas.....	36
2.9	Tecnologías de Acceso en 5G: NOMA.....	37
2.9.1	Características de NOMA.....	38
2.9.2	Principio Básico de NOMA.....	39
2.9.3	Esquema NOMA con MIMO.....	39
2.10	Diseño de Formas de Onda para 5G.....	40
2.10.1	Formas de onda basadas en Filtros.....	40
2.10.2	Filtrado de subportadoras.....	40
2.10.3	Filtrado de subbanda.....	41
2.10.4	Filtrado de banda completa.....	43
Capítulo 3 Formas de Onda para 5G.....		45
3.1	Introducción.....	45

3.1.1	Principio OFDM.....	45
3.2	Formatos de Modulación para redes 5G.....	46
3.2.1	Banco de Filtros de Multiple Portadora FBMC. ....	47
3.2.2	Filtrado Universal de Multiple Portadora UFMC. ....	48
3.2.3	Multiplexaje por División de Frecuencia Generalizada GFDM.....	49
3.2.4	Filtrado-OFDM (F-OFDM).....	51
3.3	Esquema OFDM.....	51
3.3.1	Transmisor-Receptor OFDM. ....	52
3.3.2	Limitaciones OFDM. ....	53
3.3.3	Esquema SC-FDM. ....	53
3.4	Diseño de Forma de Onda OFDM. ....	54
3.5	Diseño de Forma de Onda FBMC.....	56
3.6	Diseño de Forma de Onda F-OFDM.....	57
Capítulo 4.	Generación de Formas de Onda Candidatas para 5G.....	59
4.1	Introducción. ....	59
4.2	Generador Propuesto.....	59
4.2.1	Diagrama a Bloques.....	59
4.2.2	Especificaciones Técnicas.....	60
4.3	Interfaz Gráfica. ....	61
4.4	Formas de Onda Generadas.....	65
4.4.1	OFDM. ....	65
4.4.2	F-OFDM.....	67
4.4.3	FBMC.....	69
4.5	Escenarios de Prueba.....	71
4.6	Resultados. ....	73
4.6.1	Formas de Onda Temporales.....	74
4.6.2	Espectros de Frecuencia Obtenidos.....	76
4.7	Aplicación del generador propuesto.....	79
Conclusiones	.....	80
Mejoras al trabajo propuesto	.....	81
Referencias	.....	82



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes de un Sistema de Comunicación. ....	4
Figura 1.2 Tipos de Modulación Digital. ....	5
Figura 1.3 Diagrama de Constelación QAM. ....	6
Figura 1.4 Diagrama de Constelación PSK. ....	6
Figura 1.5 Elementos de un Sistema Celular. ....	12
Figura 1.6 Esquemas Celulares. ....	13
Figura 1.7 Especificaciones 3GPP. ....	18
Figura 2.1 Concepto de sistema 5G. ....	25
Figura 2.2 Arquitectura de 5G. ....	26
Figura 2.3 Tecnologías y Servicios de la Arquitectura de 5G. ....	27
Figura 2.4 Tipos de Comunicaciones D2D. ....	29
Figura 2.5 Arquitectura de redes radio cognitivas. ....	35
Figura 2.6 Acceso Inicial. ....	37
Figura 2.7 Acceso Multiple Celular para 3G, 3.9/4G y FRA. ....	38
Figura 2.8. Principio de NOMA. ....	39
Figura 2.9. Técnicas de cancelación de interferencias. ....	40
Figura 2.10. Estructura del sistema para FBMC. ....	41
Figura 2.11 Estructura del sistema para RB-F-OFDM. ....	41
Figura 2.12. Estructura del sistema UFMC. ....	42
Figura 2.13 Demodulación de UFMC. ....	43
Figura 2.14 Estructura del sistema F-OFDM. ....	43
Figura 2.15 Filtración de Banda Completa con a) RB continuos b) RB discontinuos. ....	44
Figura 3.1 Espectro de Símbolo OFDM. ....	46

Figura 3.2 Transceptor de un sistema FBMC.....	47
Figura 3.3 Espectro filtro de filtrado de subportadoras. ....	47
Figura 3.4 Transceptor de un sistema UFMC. ....	49
Figura 3.5 Diagrama a Bloques de un transceptor GFDM. ....	50
Figura 3.6 Diagrama a bloques de un sistema F-OFDM. ....	51
Figura 3.7 Diagrama a bloques de Transmisor OFDM. ....	52
Figura 3.8 Diagrama a Bloques de Receptor OFDM. ....	52
Figura 3.9 Espectro de una señal OFDM.....	55
Figura 3.10 Espectro de una señal FBMC. ....	57
Figura 3.11 Espectro de una señal F-OFDM. ....	58
Figura 4.1 Diagrama de flujo del Generador de Formas de Onda.....	60
Figura 4.2 Vista General del Generador.....	62
Figura 4.3 Datos de Diseño. ....	62
Figura 4.4 Datos de Modulación. ....	63
Figura 4.5 Datos para Coseno Alzado de F-OFDM. ....	63
Figura 4.6 Datos para resolución de Gráficas.....	64
Figura 4.7 Funciones de Proceso.....	64
Figura 4.8 Conjunto de Portadoras OFDM en el dominio del Tiempo. ....	65
Figura 4.9 Gráfica por subportadoras OFDM en el dominio del tiempo.....	66
Figura 4.10 Espectro de un conjunto de Portadoras OFDM.....	66
Figura 4.11 Espectro de 12 subportadoras OFDM.....	67
Figura 4.12 Conjunto de Portadoras F-OFDM en el dominio del Tiempo.....	68
Figura 4.13 Espectro de un conjunto de subportadoras F-OFDM.....	69
Figura 4.14 Espectro de 12 subportadoras F-OFDM. ....	69

Figura 4.15 Conjunto de Portadoras FBMC en el dominio del Tiempo.....	70
Figura 4.16 Espectro de un conjunto de subportadoras FBMC.....	70
Figura 4.17 Espectro de 12 subportadoras FBMC. ....	71
Figura 4.18 Circuito conversor de señales digitales a analógicas. ....	72
Figura 4.19 Generador RIGOL modelo DG-2041A.....	73
Figura 4.20 Osciloscopio Tektronix modelo TDS-2014 de 4 canales.....	73
Figura 4.21 Escenario de Pruebas. ....	73
Figura 4.22 Símbolo OFDM obtenido del generador. ....	74
Figura 4.23 Símbolo OFDM medido en el osciloscopio. ....	74
Figura 4.24 Símbolo F-OFDM obtenido del generador. ....	75
Figura 4.25 Símbolo F-OFDM obtenido en el osciloscopio. ....	75
Figura 4.26 Símbolo FBMC obtenido del generador. ....	76
Figura 4.27 Símbolo FBMC obtenido del osciloscopio. ....	76
Figura 4.28 Espectro del símbolo OFDM obtenido del generador.....	77
Figura 4.29 Espectro del símbolo OFDM en el osciloscopio.....	77
Figura 4.30 Espectro del símbolo F-OFDM del generador.....	78
Figura 4.31 Espectro del símbolo F-OFDM en el osciloscopio. ....	78
Figura 4.32 Espectro del símbolo FBMC del generador. ....	78
Figura 4.33. Espectro del símbolo FBMC del osciloscopio. ....	79
Figura 0.1 Gráfica de puntos FFT usando decimación en frecuencia. ....	108
Figura 0.2. Diagrama esquemático del generador de señales vectoriales.....	110
Figura 0.3 Vista 3D del diseño de la placa. ....	110
Figura 0.4 Diagrama a bloques de generador de señales vectoriales. ....	111

## Acrónimos

1G	First Generation, Primera Generación.
2G	Second Generation, Segunda Generación.
3G	Third Generation, Tercera Generación.
3GPP	3rd Generation Partnership Project, Proyecto Asociado de Tercera Generación.
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2, Proyecto Asociado de Tercera Generación 2.
4G	Fourth Generation, Cuarta Generación
5G PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership, Asociación de 5G de Infraestructura Pública y Privada.
5G	Fifth Generation, Primera Generación.
5G NOW	5G Non-Orthogonal Waveforms, Formas de Onda no Ortogonal 5G.
ACI	Adjacent Channel Interference, Interferencia de Canal Adyacente.
AM	Amplitude Modulated, Amplitud Modulada.
AMPS	Advanced Mobile Phone Services, Servicios Avanzados de Telefonía Móvil.
API	Application Programming Interface, Interfaces de Programación Aplicadas.
ASK	Amplitude-Shift Keying, Modulaci3n por Cambio de Amplitud.
AT&T	American Telephone and Telegraph, Telégrafos y Teléfonos Americanos.
AWGN	Additive White Gaussian Noise, Ruido Blanco Aditivo Gaussiano.
BER	Bit Error Rate, Tasa de Error de Bit.
BRAN	Broadband Radio Access Networks, Redes de Radio Acceso De Banda Ancha.
BS	Base Station, Estaci3n Base.
BSC	Base Station Controller, Controladores de Estaci3n Base.
CCK	Complementary Code Keying, Codificaci3n por C3digo Complementario.

CDMA	Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
CoMP	Coordinated Multi-Point, Coordinado Multi-Punto.
D2D	Device-to-Device, Dispositivo a Dispositivo.
CP	Cyclic Prefix, Prefijo Cíclico.
CS	Cell Search, Búsqueda de Células.
SP	Suffix Cyclic, Sufijo Cíclico.
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency, Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa.
DCS1800	GSM1800, Digital Celular System 1800, Sistema Digital Celular.
DFT	Discrete Fourier Transform, Transformada Discreta de Fourier.
DMS	Data and Messaging Service, Servicio de Mensajes y Datos.
E2E	Everything to Everyone, Todo a Todo.
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution.
ETACS	Extended TACS, TACS Extendidas.
ETRI	Electronics and Telecommunications Research Institute, Instituto de Investigación Electrónica y Telecomunicaciones.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, Instituto Europeo de Estandarización de las Telecomunicaciones.
FBMC	Filter Bank Multi-carrier, Banco de Filtros de Multiportadoras.
FCC	Federal Communications Commission, Comisión Federal de Comunicaciones.
FDD	Frequency-Division Duplexing, Duplexaje por División de Frecuencia.
FDMA	Frequency Division Multiple Access, Acceso Multiple por Division de Frecuencia.
FM	Frequency Modulated, Frecuencia Modulada.
FMT	Filtered Multitone, Filtrado Multi Tono.
F-OFDM	Filtered OFDM, Filtrado OFDM.
FRA	Future Ratio Access, Futuro Radio Acceso.
FSK	Frequency-Shift Keying, Modulación por Cambio de Frecuencia.

GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing, Multiplexaje por División de Frecuencia Generalizado.
GPRS	General Packet Radio Service, Servicio de Radio de Paquete General.
GSM	Global System Mobile, Sistema Móvil Global.
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access, Acceso Rápido de Paquetes de Bajada.
IA	Initial Access, Acceso Inicial.
ICI	Inter Carrier Interference, Interferencia Inter Portadora.
ICN	Information Centric Networking, Información centralizada de Redes.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform, Transformada Rápida de Fourier Inversa.
IoT	Internet of Things, Internet de las Cosas.
IP	Internet Protocol, Protocolo de Internet.
ISI	Inter Symbol Interference, Interferencia Inter Símbolo.
ISM	Industrial, Scientific and Medical, Industria Científica y Medica.
ITU	International Telecommunications Union, Union Internacional de Telecomunicaciones.
KPI	Key Performance Indices, Índices Clave de Rendimiento.
LAN	Local Area Networks, Red de Área Local.
LTE	Long-Term Evolution.
M2M	Machine to Machine, Máquina a Máquina.
MAC	Media Access Control, Medio de Control de Acceso.
MAMMOET	MAssive MIMO for Efficient Transmission, MIMO Masivo para Eficiente Transmisión.
MCN	Mobile Cloud Networking, Nube Móvil de Redes.
MCS	Modulation and Codification Scheme, Esquema de Modulación y Codificación.
METIS	Mobile and wireless communications Enablers for Twentytwenty (2020) Information Society.

MIMO	Multiple Input-Multiple Output, Multiple Entradas Múltiples Salidas.
MOTO	Mobile Opportunistic Traffic Offloading, Descarga de Tráfico Oportunista Móvil.
MS	Mobile Station, Estación Móvil.
MSC	Mobile Switching Center, Centrales de Conmutación de Servicios Móviles.
MTC	Machine Type Communication, Comunicaciones Tipo Máquina.
MU_MIMO	Multi-User MIMO, MIMO multiusuario.
NMT	Nordic Mobile Telephony, Telefonía Móvil Nórdica
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access, Acceso Multiple No Ortogonal
NPRM	Noticed of Proposed Rule Making.
NPRM	Noticed of Proposed Rule Making, Observación de la Regla Propuesta de Fabricación.
OQAM	Offset-QAM, Compensación QAM.
PAM	Pulse Amplitud Modulación, Modulación por Amplitud de Pulso.
PARP	Peak-to-Average Power Ratio, Relación de Potencia Promedio a Pico.
PCS	Personal Communications System, Sistemas de Comunicación Personal.
PDM	Power Division Multiplexing, Multiplexaje por Division de Potencia.
PLC	Power Line Communications, Corrientes Portadoras.
PPM	Pulse Phase Modulation, Modulación por Posición de Pulso.
PSK	Phase-Shift Keying, Modulación por cambio de fase.
PWM	Pulse Width Modulation, Modulación por Ancho de Pulso.
QAM	Quadrature Amplitud Modulation, Modulación en Amplitud y Cuadratura.
QoS	Quality of Service, Calidad de los Servicios.
RA	Random Access, Acceso Aleatorio.
RAN	Radio Access Network, Red de Radio Acceso.
RAT	Radio Access Technology, Tecnología de Radio Acceso.
RB-F-OFDM	Resource Block Filter OFDM, Filtro de Bloques de Recursos OFDM

R <sub>x</sub>	Receptor.
SC-FDM	Single Carrier Frequency Division Multiplexing, Multiplexaje por División de Frecuencia de Única Portadora.
SDN	Software Defined Network, Redes Definidas por Software.
SINR	Signal Interference and Noise Ratio, La señal de interferencia más ruido.
SNR	Signal to Noise Ratio, Razón Señal-Ruido.
TACS	Total Access Communications Systems, Sistemas de Comunicación de Acceso Total.
TD-CDMA	Time Division Code Division Multiple Access, Acceso Multiple por División De Código y División de Tiempo.
TDD	Time-Division Duplexing, Duplexaje por Division de Tiempo.
TDMA	Time Division Multiple Access, Acceso Multiple por Division de Frecuencia.
TIA	Telecommunications Industry Association, Asociación de la Industria de Telecomunicaciones.
T <sub>x</sub>	Transmisor.
UFMC	Universal Filtered Multi Carrier, Filtrado Universal de Multi Portadora.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universales.
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure, Infraestructura Nacional de Información No Licenciada.
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access, Acceso Multiple por Division de Código de Banda Ancha.
WLAN	Wireless Local Area Networks, Red de Área Local Inalámbrica.



## RESUMEN

El presente trabajo plasma los antecedentes y características de los sistemas celulares a lo largo de su evolución. Además, describe las bases de las interfaces aéreas de las primeras generaciones junto con las características que debe poseer la siguiente forma de onda para los sistemas celulares 5G; presentado un generador de formas de onda para la comprensión y análisis de sus características tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia para facilitar su estudio y realizarlo de manera dinámica y versátil.

## OBJETIVO GENERAL

Crear una interfaz gráfica que reproduzca las características temporales y espectrales de formas de onda propuestas para sistemas celulares de 5G, con el fin de integrar las bases del proceso de transmisión y recepción.

## OBJETIVOS PARTICULARES

- Describir las principales características de los sistemas celulares de 1G, 2G, 3G y 4G.
- Definir las bases, objetivos y propuestas de los sistemas celulares 5G.
- Evaluar las propuestas para la interfaz aérea de un sistema celular 5G.
- Presentar los diseños de las formas de onda potenciales para la interfaz aérea de los sistemas 5G, incluidos en la interfaz gráfica.

## JUSTIFICACION

Mantener una comunicación eficiente en un sistema celular ha tomado cada vez mayor importancia, por lo cual, es necesario que la interfaz aérea del sistema sea diseñada con el fin de proporcionar tales requerimientos. El estándar para la forma de onda que será utilizada en 5G aún no es definido y la forma de onda actualmente utilizada en los sistemas celulares 4G no es adecuado para su implementación debido a que no cumple con las características y requerimientos previstos para la siguiente generación. Por lo cual se han investigado formas de onda alternativas capaces de proporcionar los requerimientos necesarios para 5G, donde un generador de formas de onda basado en estas investigaciones puede proporcionar una mayor noción de las características de cada una de ellas y dependiendo de los requerimientos determinar el potencial que poseen.

# **Capítulo 1 Antecedentes y evolución de la Telefonía Celular.**

## **1.1 Introducción.**

El objetivo de este capítulo es dar a conocer los antecedentes y características futuras de la telefonía celular, presentando de manera general los conceptos que serán utilizados a lo largo del presente trabajo que ayudarán a la comprensión del desarrollo y la razón de los esfuerzos realizados ante las nuevas tecnologías y direcciones que la siguiente generación celular pretende abarcar.

### **1.1.1 Antecedentes Históricos de Comunicaciones Inalámbricas.**

A comienzos del siglo XIX gracias al descubrimiento y estudio de la electricidad y magnetismo, con la invención de la pila de Volta y los estudios de Faraday se dio pauta al inicio de transmisión de tipo inalámbrica.

En 1820 el físico danés Hans Oersted realizó investigaciones sobre inducción generada con corrientes eléctricas, al mover agujas imantadas; con base en este trabajo las primeras investigaciones orientadas a comunicaciones las realizaron Carl Friedrich Gauss y Wilhelm Weber.

En 1833 Gauss desarrolló un aparato para enviar mensajes que utilizaban un código de 25 letras basado en una matriz que ocupaba una aguja que giraba de un lado a otro para enviar los mensajes. En ese año Gauss y Weber instalaron la primera línea telegráfica electromagnética en la universidad de Gottingen y el observatorio de esa ciudad.

El primer telégrafo de uso comercial lo crearon Charles Wheastone y William Fothergill Cooke. Funcionó por primera vez el 8 de abril de 1837 en el ferrocarril Great Western entre dos estaciones. Sin embargo, pese a estos desarrollos y que algunos otros investigadores habían hecho otros procesos significativos, el nacimiento de las telecomunicaciones públicas puede fijarse al 24 de mayo de 1944 cuando Samuel Morse (inventor del telégrafo eléctrico) envió los primeros mensajes entre las ciudades de Washington y Baltimore.

Los primeros radio sistemas eran de tipo análogos, el siguiente tipo de comunicación de radio fue “packet ratio”. La primera red basada en esta técnica se desarrolló en la Universidad de

Hawái en 1971, ALOHANET. Habilitó sitios de computadoras en el campus, propagación a través de cuatro islas y comunicación con una central de cómputo en Oahu. Incorporó los primeros protocolos de acceso y ruteo de paquetes en sistemas de radio.

En la década de los ochenta la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa) investigó las redes ad hoc para fines militares para luego introducir servicios de datos y área amplia; a principios de la década de los 90 se habilitaron servicios de acceso de datos incluyendo e-mail, transferencia de archivos, y buscador Web con bajas velocidades del orden de 20Kbps.

Las WLANs (Wireless Local Area Network, redes de Área Local Inalámbricas) fueron desarrolladas por la FCC(Federal Communications Commission, Comisión Federal de Comunicaciones) para superar las capacidades de Ethernet (para redes LAN) y los servicios anteriores en 1985 bajo la autorización del uso público de las bandas de frecuencia de la ISM (Industrial, Scientific and Medical, Industria Científica y Medica), debido a muchas limitaciones por parte de ISM poseían bajo rendimiento en velocidad de transmisión y cobertura, carencia de estandarización y alto costo. Los teléfonos móviles fueron introducidos en 1915 y otorgaron servicios públicos en 1946 con problemas de ineficiente uso de radio espectro y poca capacidad, fue así como la solución a dichos problemas fue presentada entre 1950 y 1960 por los laboratorios Bell de AT&T con el concepto de celular. De esta manera las comunicaciones inalámbricas, comenzaron una nueva etapa con desarrollos en la telefonía móvil y la evolución de los mismos, mediante sistemas y organismos que regulan sus estándares y trabajos por mejoras continuas.

## **1.2 Generalidades de los Sistemas de Comunicaciones.**

Debido a la necesidad de comunicación, la sociedad recurre al uso de sistemas de comunicaciones para realizar un proceso de intercambio de información de un punto a otro cualquiera que sea. Existe una gran cantidad de aplicaciones por lo cual es imposible abarcarlas en un solo sistema, ya que las características son específicas por cada aplicación.

En general, los sistemas de comunicaciones son atractivos por ser lo suficientemente accesible en cuanto a costo y flexibilidad ante gran variedad en servicios con calidad en los

mismos, lo cual genera su alta demanda y gran alcance. Teniendo en cuenta esto, en la actualidad se les considera como altamente rentables y una herramienta necesaria para la mayor parte de la sociedad.

### 1.2.1 Componentes de un Sistema de Comunicaciones.

Se entiende por sistema a todo conjunto de elementos y procesos con un propósito, de donde el propósito de un sistema de comunicaciones es el transporte de una señal de información desde un punto a través de un canal que entrega una estimación de esta señal a otro punto; de manera general una forma de definir a un sistema de comunicaciones es:

“Proceso en el cual las señales de entrada son transformadas por la interconexión de componentes o dispositivos que provocan que los mismos respondan de alguna forma, lo que da como resultado otras salidas, con el objetivo principal de enviar información de un lugar a otro.”<sup>1</sup>

Los elementos que componen a un sistema de comunicaciones dependen de su aplicación; los elementos principales son:

**Fuente de información:** Elemento del sistema que produce la información que será transmitida. Las fuentes de información pueden ser digitales o analógicas.

**Transmisor:** Representado como  $T_x$ . Procesa la señal de entrada y produce una señal adaptada a las características del canal de comunicación.

**Canal:** Es el medio eléctrico que crea la conexión entre la fuente y el destino.

**Receptor:** Representado como  $R_x$ . Es el elemento del sistema que recibe la señal del medio y la reconstruye.

**Destino:** Elemento final del sistema que utiliza la información para ser comprendida y analizada.

Los componentes de un sistema de comunicación se muestran en la Figura 1.1.

---

<sup>1</sup> (Alan V. Oppenheim, 1994)

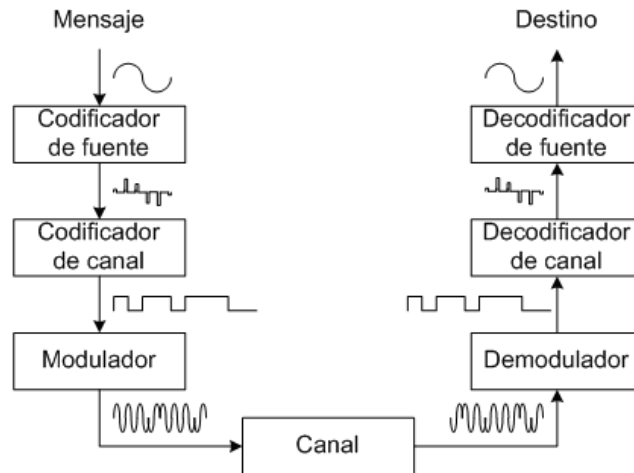


Figura 1.1 Componentes de un Sistema de Comunicación.

## 1.2.2 Modulación.

Para realizar el intercambio de información, el transmisor procesa la señal de información y la adapta al medio para un intercambio eficiente y confiable.

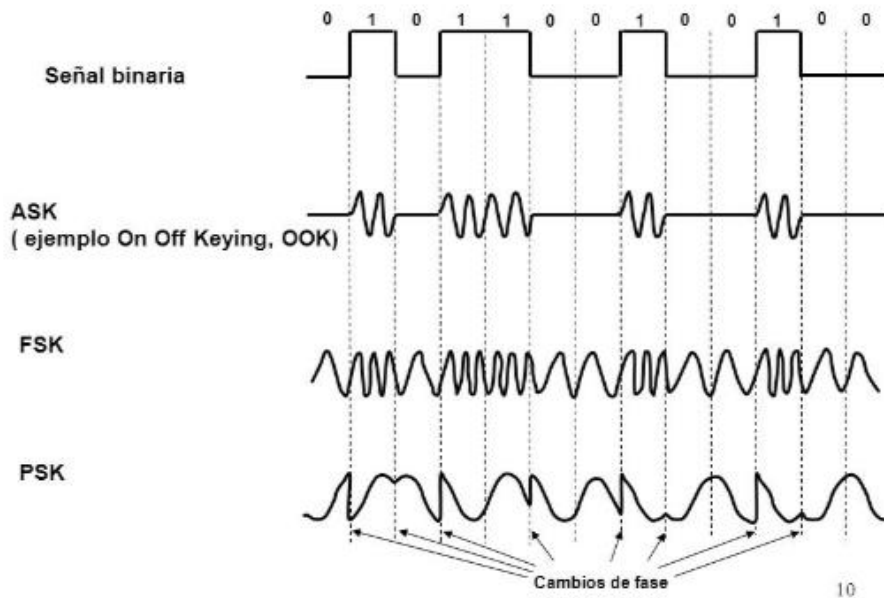
“En general un sistema de modulación es aquel en el que se emplea una señal para controlar algún parámetro de otra señal. La modulación comprende dos formas de onda: una señal *moduladora* que representa el mensaje y una *onda portadora* que satisface la aplicación particular. Un modulador altera sistemáticamente la onda portadora en correspondencia con las variaciones de la señal moduladora. Por ello, la onda modulada resultante lleva la información del mensaje.”<sup>2</sup>

Este proceso requiere ser una operación reversible de modo que el mensaje puede ser recuperado por medio de su proceso complementario de demodulación. En la modulación digital se transforman símbolos digitales a las características de un canal pasa banda, la señal de información deseada modula una senoide llamada portadora (onda portadora) para la transmisión. Entre los tipos de modulación digital básica se encuentran los siguientes y sus características se pueden observar en la Figura 1.2:

- PSK (Phase-Shift Keying): Modulación por cambio de fase de la portadora

<sup>2</sup> (Alan V. Oppenheim A. S., 1998)

- ASK (Amplitude-Shift Keying): Modulación por cambio de amplitud de la portadora también conocida como OOK (On Off Keying) en su modalidad binaria.
- FSK (Frequency-Shift Keying): Modulación por cambio de frecuencia de la portadora.
- QAM (Quadrature Amplitud Modulation, Modulación en Amplitud y Cuadratura): es una variante de los dos primeros en la que se modifica conjuntamente tanto amplitud como fase de la portadora.



*Figura 1.2 Tipos de Modulación Digital.*

En la modulación digital por pulsos, en banda base, los tipos de modulación son:

- PAM (Pulse- Amplitude Modulation, Modulación por amplitud).
- PWM (Pulse-Width Modulation, Modulación por ancho de pulso).
- PPM (Pulse- Phase Modulation, Modulación por posición de pulso).

### 1.2.3 Diagramas de constelación.

Los diagramas de constelación son métodos que representan símbolos digitales de un esquema de modulación digital en un plano complejo, a esta representación se le llama mapeo. El mapeo de los esquemas de modulación depende del orden de este y especifica la



cantidad de símbolos que serán representados en el plano complejo llamados “punto de la constelación”.

En donde el eje “x” del plano representa la componente en fase, mientras que el eje “y” representa la componente en cuadratura, la longitud de la línea que conecta el punto al origen representa la amplitud pico de la señal. Los diagramas de constelación son representados como se muestran en la Figura 1.3 y Figura 1.4.

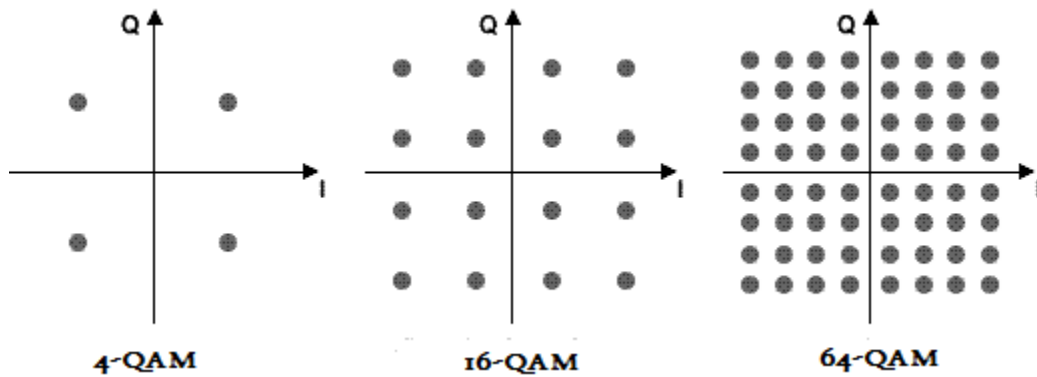


Figura 1.3 Diagrama de Constelación QAM.

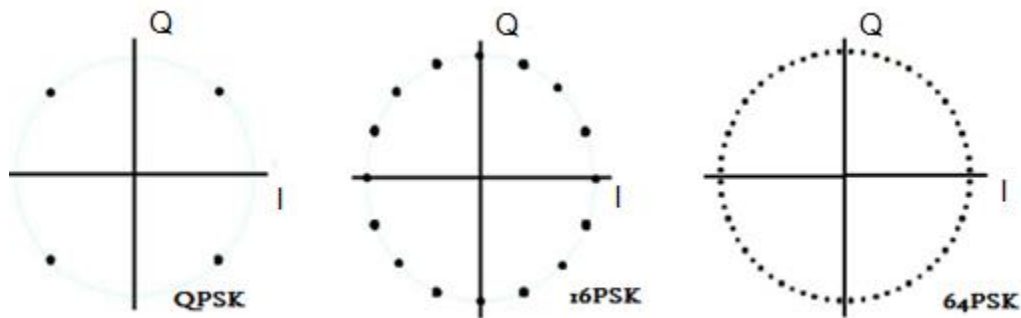


Figura 1.4 Diagrama de Constelación PSK.

### 1.2.4 Tipos de Sistemas de Comunicaciones.

Los sistemas de comunicación pueden ser clasificados utilizando diversas características como parámetro de comparación, algunas de sus clasificaciones son:

- **En función del sentido de transmisión.**
  - a) *Modo simplex*. La información se transmite en un único sentido, desde un origen (transmisor) a un destino (receptor).
  - b) *Modo half-dúplex*. La información se transmite en ambos sentidos de origen a destino, pero no de manera simultánea.
  - c) *Modo full-dúplex*. La información se transmite en ambos sentidos y de manera simultánea.
- **Medio de transmisión:**
  - a) *Medio Guiado*. También se les conoce como alámbricas o conducidas, a su vez se clasifican en: *Eléctricos* (cables de tipo coaxial, par trenzado, líneas abiertas, por las que circulan ondas de voltaje y corriente), *Ópticos* (utilizan fibra óptica, por las que circulan ondas luminosas) y *Corrientes Portadoras* (Power Line Communications, PLC).
  - b) *Medio no guiado*. También conocidos como inalámbricos; a su vez se clasifican en: *Radiofrecuencia* (electromagnéticos), *Infrarrojos* (emisión haz de luz), *Ultrasónicos* (ondas de presión).
- **Ubicación de transmisor y receptor**
  - a) *Fijos*. Ambas terminales transmisoras como receptor se encuentran en una ubicación fija. A su vez se clasifican en Terrestres y Satelitales.
  - b) *Móviles*. Cualquier terminal o ambas pueden encontrarse en movimiento.
- **Tipo de señal.**
  - a) Analógicos. Utiliza señales analógicas, modulación de carácter lineal o angular.
  - b) Digitales. Utiliza modulación de pulsos o con señales digitales, a su vez se pueden clasificar en binarios y multinivel.
- **Tipo de servicio**
  - a) Públicos.
  - b) Privados.

## 1.2.5 Organismos reguladores y grupos de trabajo en comunicaciones inalámbricas.

Existen diversos organismos que regulan las comunicaciones inalámbricas, algunos de los más importantes son:

### IEEE y sus grupos de trabajo

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos “Es una organización internacional sin fines de lucro, líder en el campo de la promoción de estándares internacionales, particularmente en el campo de las telecomunicaciones, la tecnología de información y la generación de energía”.

- *IEEE 802.11 Redes Ethernet Inalámbricas.*  
Para redes de área local inalámbricas WLAN en el espectro de los 2,4 GHz.
- *IEEE 802.11b Ethernet Inalámbrico de alta velocidad.*  
Permite velocidades de 5,5 y 11Mbps incluye nueva técnica de modulación llamada CCK (Complementary Code Keying, Codificación por código Complementario).
- *IEEE 802.11g Velocidades de 54Mbps en la banda de 2,4GHz.*  
Asegura compatibilidad con equipos Wi-Fi preexistentes.
- *IEEE 802.11a Redes inalámbricas en la banda de los 5 GHz.*  
Se aplica a la banda de UNII (Unlicensed National Information Infrastructure, Infraestructura Nacional de Información No Licenciada)
- *IEEE 802.11n 802.11n "Wireless N"*  
Diseñado para mejorar 802.11g en la cantidad de ancho de banda y para la utilización de múltiples señales y antenas en lugar de una proporciona 300Mbps.

### Instituto Europeo de Estandarización de las Telecomunicaciones ETSI

*HiperLAN2. 54Mbps en la banda de 5GHz.* Desarrollada bajo el proyecto BRAN (Broadband Radio Access Networks, Redes de Radio Acceso De Banda Ancha).

- Estándar ETSI
- Guía ETSI
- Especificaciones Técnicas ETSI

- Reporte Grupal ETSI
- Especificaciones Grupales ETSI

**GSM** sus especificaciones son elaboradas y editadas por ETSI, se dividen en las series:

- 01 cuestiones generales.
- 02 aspectos de servicio.
- 03 aspectos de Red.
- 04 interfaz BS-MSC y protocolos.
- 05 capa Física en el trayecto Radio eléctrico.
- 06 codificación de la Voz.
- 07 adaptadores de Terminal MS.
- 08 interfaces BS-MSC.
- 09 Inter funcionamiento de la Red.
- 10 Inter funcionamiento de Servicios (carece documentos).
- 11 especificaciones y Homologación de los equipos.
- 12 operación y mantenimiento.

### **Comisión Federal de Comunicaciones.**

Regula e integra comunicaciones internacionales vía radio, televisión, cable, satélite en territorio estadounidense.

### **Unión Internacional de Telecomunicaciones**

La UIT comenzó a elaborar las normas de interfaz radioeléctrica para comunicaciones móviles la víspera de los despliegues iniciales de los primeros sistemas celulares digitales (denominados 2G).

- *IMT para las telecomunicaciones móviles internacionales*  
Identificación de disposiciones relativas a las bandas y al espectro de frecuencias radioeléctricas. Abarca IMT-2000 e IMT-Avanzadas

### **3GPP**

Contiene las siguientes especificaciones.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> (Iniciative, 2017)

- TSG RAN Plenary.
- TSG RAN WG1. Especificación de capa de radio 1.
- TSG RAN WG2. Especificación de capa de radio 2 y 3.
- TSG RAN WG3. Requerimientos - UTRAN O&M.
- TSG RAN WG4. Rendimiento de Radio y aspectos de Protocolo de Sistema.
- TSG RAN WG5. Pruebas de conformidad de Terminales Móviles.

### **1.3 Introducción a los sistemas de comunicación Celular.**

Telefonía vía radio y Telefonía móvil son conceptos que ayudan a la comprensión de los sistemas de comunicación celular. Ambos conceptos son similares a diferencia de que el segundo se refiere a aquellas tecnologías que cuentan con el abonado de otros servicios además de lo que ofrece la telefonía fija cuando los usuarios se encuentran o no en movilidad, mediante terminales portátiles. El objetivo de este apartado es explicar las características que sustentan un sistema de comunicación celular, además de un panorama general del surgimiento de estos y los elementos de los que se componen.

#### **1.3.1 Telefonía móvil y concepto de “celular”.**

Hablar de telefonía móvil hace referencia a sistemas en los cuales el usuario puede o no encontrarse en movimiento, este tipo de tecnología tal y como se conoce hoy en día comenzó a principios de la década de los 80s con sistemas analógicos con características muy distintas a las que se poseen ahora. La telefonía vía radio en movilidad surge con los experimentos de transmisión a larga distancia del Italiano Guillermo Marconi, a comienzos del siglo XX, al instalar los primeros sistemas de “radio móvil” sobre vehículos de tranvías. Desde entonces los conceptos y tecnologías han surgido dependiendo de las necesidades como lo es el concepto de “celular” introducido por la compañía AT&T en la década 50 del siglo pasado alcanzando un crecimiento espectacular a partir del año 1995. Dicho concepto se entiende como “sistema compuesto por un conjunto de estaciones base coordinadas donde se reutilizan

las frecuencias disponibles, lo que permite que un único sistema tenga una extensión y capacidad prácticamente ilimitadas haciendo las células cada vez más pequeñas”<sup>4</sup>.

De esta manera, un usuario con una terminal portátil puede efectuar transmisión y recepción al mismo tiempo dentro de una zona de cobertura llamada “celda o célula” a la que se hace mención en la definición de celular.

### **1.3.2 Elementos de un sistema de comunicaciones celulares.**

Los sistemas se denominan celulares porque se sustentan en dos conceptos principales, la reutilización de frecuencias y dimensionamiento celular basado en una geometría (conjuntos polígonos) que otorga mayor eficacia en cuanto a cobertura sin zonas de sombra y solapamiento. Debido a esto, durante los últimos años las tecnologías móviles aumentaron su crecimiento e importancia en el desarrollo personal y profesional de los usuarios, pues la necesidad de comunicación es vital.

Se dice que un sistema móvil es de cobertura amplia o ilimitada ya que es posible la división del área de cobertura en células y por ende la división de potencia para la emisión de cada frecuencia; además, la reutilización de estas es permitida a distancias cortas con lo cual la capacidad de los sistemas aumenta.

En cada celda, un sistema de radio realiza la cobertura y la conexión de los terminales móviles al sistema (estación base) mientras que un sistema de conmutación (centro de servicios móviles) realiza la conexión del sistema a la red de conmutación pública.

Las funciones de los elementos de un sistema celular son:

*MS (Mobile Station, Estación Móvil):* Son los equipos que suministran el servicio a los usuarios. Cada estación móvil puede actuar en modo emisor y/o receptor.

*BS (Base Station, Estaciones base):* Controlan la conexión radio de los terminales móviles además de su localización. Puede estar situada en el centro o las esquinas de la celda.

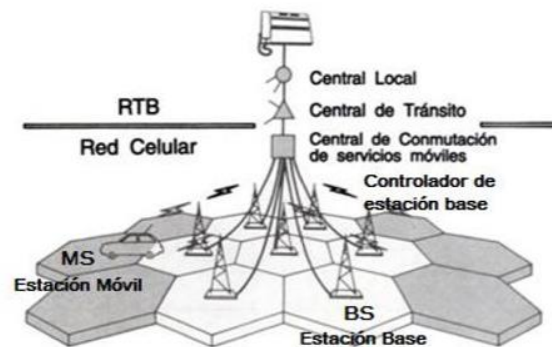
---

<sup>4</sup> (Moya, 2002)

*BSC (Base Station Controller, Controladores de estación base):* Realizan las funciones de gestión y mantenimiento del servicio,

*MSC (Mobile Switching Center, Centrales de conmutación de servicios móviles):* Realizan la conexión entre los distintos abonados o entre estos y la red telefónica fija. Además, son las responsables de las funciones de operación y mantenimiento de tarificación.

Los elementos de un sistema celular se muestran en la Figura 1.5.



*Figura 1.5 Elementos de un Sistema Celular.*

Los esquemas celulares se clasifican dependiendo del área de cobertura que maneja basada en la potencia y la cantidad de usuarios; conforme aumenta la cantidad de los usuarios en una celda (elemento fundamental), es necesario dividirla en celdas de menor tamaño para proporcionar la misma calidad de servicio; los diferentes tipos de celdas que se conocen son:

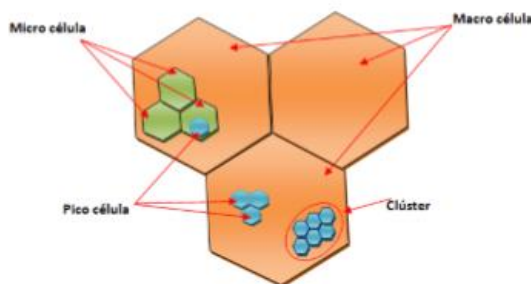
*Macro celdas.* Abarcan un radio de 1.5 km hasta 20 km desde la estación base, por lo regular son utilizadas en zonas rurales o carreteras.

*Micro celdas.* Abarcar un radio de 0.3km hasta 0.7km desde la estación base, son utilizadas en zonas urbanas.

*Pico celdas.* Abarcan un radio de 0.03 hasta 0.3km desde la estación base, son utilizadas en zonas urbanas (grandes ciudades).

Aunque una celda es parte importante de un sistema celular también existen agrupaciones de  $n$  celdas lo cual se le denomina *Clúster*.

La representación de los esquemas celulares dependiendo de su clasificación se muestra en la Figura 1.6.



*Figura 1.6 Esquemas Celulares.*

### **1.3.3 Demandas y Requerimientos de un sistema de Comunicación Celular.**

Debido al estilo de vida moderno la demanda en los sistemas celulares aumenta en la sociedad conforme el desarrollo de su tecnología se amplía, debido a esto, el diseño, fabricación y la constante investigación en el área de telefonía celular son procesos cada vez más detallados. Los requerimientos que solicitan los clientes son más exigentes e incluso subjetivos en algunos casos, por lo cual el desarrollo de la tecnología impacta en el mercado por la cantidad de competencia existente en los sistemas de comunicación.

Algunos de los requerimientos más importantes de un sistema de telefonía celular son:

- *Velocidad de trasmisión.*
- *Latencia.*
- *Capacidad.*
- *Movilidad.*
- *Cobertura.*
- *Ancho de Banda.*
- *Manejo de Trafico.*
- *Bajo impacto en la infraestructura.*
- *Menor costo de Energía.*

Los cuáles serán abordados con mayor detalle más adelante del presente trabajo.



## **1.4 Evolución de los sistemas Celulares.**

Con la llegada de los sistemas celulares comenzó la revolución de las comunicaciones inalámbricas, permitiendo el intercambio de información entre estaciones fijas o móviles (o entre dos móviles) y la distribución del área de cobertura para menor uso de potencia. Sin embargo, su diseño se vuelve cada vez más complicado debido a factores como la disminución en el tamaño de celdas, modelos de propagación, calidad en servicios, manejo de usuarios, etc. Es por lo anterior que los sistemas celulares se diseñan acorde a las necesidades sociales dando lugar a las generaciones de los sistemas Celulares.

### **1.4.1 Primera Generación de los Sistemas Celulares.**

La 1G (First Generation, Primera Generación) fue construida a finales de los años 70s en Estados Unidos y a principios de los años 80 en Europa. Eran sistemas de tipo análogo únicamente para servicios de voz con altos niveles de interferencia de impredecible calidad, muchas conexiones caídas y baja capacidad además de no ser seguros. A pesar de esto fue desplegada en países como Japón, México y Arabia Saudita utilizando AMPS (Advanced Mobile Phone Servicios, servicios avanzados de Telefonía Móvil).

Utilizaba FDMA (Frequency Division Multiple Access, Acceso Múltiple por Division de Frecuencia) con 30kHz y voz modulada en canales FM. La FCC le asignó un espectro de 40 MHz al sistema el cual incrementó a 50MHz para el soporte de más usuarios. El ancho de banda era dividido en bandas de 25-MHz, una para el usuario móvil a BS y otra para BS a usuario móvil. Debido a las limitaciones, en Europa fueron introducidos estándares que incluían TACS (Total Access Communications Systems, Sistemas de Comunicación de Acceso Total) y NMT (Nordic Mobile Telephony, Telefonía Móvil Nórdica) en versiones NMT-450 y NMT-900, alcanzaban bandas de frecuencia entre 450 MHz y 900 MHz respectivamente, permitió intercambio de mensajes entre usuarios mediante la utilización del canal de señalización del sistema que se denominó DMS (Data and Messaging Service, Servicio de Mensajes y Datos) y posteriormente se realizó una versión mejorada en Reino Unido llamada ETACS (Extended TACS).

Muchos de los sistemas celulares de Europa eran incompatibles además de poco accesibles debido a su velocidad y la existencia de varios estándares por lo que rápidamente se comenzó a trabajar en estándares para la segunda generación llamada GSM (Global System for Mobile Communication, Sistema Global para Comunicaciones Móviles).

### **1.4.2 Sistemas Celulares Digitales 2G.**

El estándar GSM para sistemas digitales de 2G (Second Generation, Segunda Generación) utiliza una combinación de TDMA (Time Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo) con salto de frecuencia lenta para la modulación de voz. Al mismo tiempo Estados Unidos creó un contraste con las técnicas de división de frecuencia dando como resultado sistemas incompatibles por ser basados en diferentes estándares. Los cuales trabajaban en bandas de frecuencia de 900-MHz, fueron: IS-136 que utilizaba una combinación de TDMA y FDMA e IS-95 que utiliza secuencias directas CDMA (Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Código) ambos con modulación PSK. Y el espectro para celulares digitales en la banda de Frecuencia 2-GHz era subastado por lo que cualquier proveedor que cumpliera la cuota podía usar cualquier estándar.

Debido a la existencia de 3 estándares de celulares digitales la incompatibilidad era muy alta; para lograr una mejora en el soporte y alta velocidad en servicios, GSM proporcionó velocidades de transmisión arriba de 140kbps haciendo surgir el estándar GPRS (General Packet Radio Service, Servicio de Radio de Paquete General) y EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution, Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM) con velocidad de transmisión de 384kbps, EDGE utiliza un formato de modulación alto combinado con codificación, dichos estándares que conforman la llamada 2.5 G (Generación 2.5)

En la década de los 90 se desarrollaron dos nuevos estándares: DCS1800 (GSM1800, Digital Cellular System 1800, Sistema Digital Celular) empleado principalmente en Europa, y PCS1900 (GSM1900, Personal Communication Service 1900, Servicio de Comunicación Personal 1900) empleado en América del Norte. La innovación que se introdujo para estos estándares fue el uso de celdas de menor tamaño para tener mayor capacidad del sistema.

### 1.4.3 Sistemas Celulares de Banda Ancha 3G.

La 3G (Third Generation, Tercera Generación) de sistemas celulares comenzó bajo la visión de desarrollar un único estándar global para altas velocidades de transmisión y alta calidad en servicios de voz e introdujo el abonado de internet móvil. La compatibilidad con las redes 2G y las diferencias de frecuencias entre los países eran muy difíciles de superar, por lo que no se pudo llegar a un acuerdo sobre una única implementación 3G. En lugar de eso tres enfoques de los sistemas 3G fueron creados: CDMA de banda ancha W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access, Acceso Multiple por División de Código de Banda Ancha), CDMA2000 y EDGE. En 1999, la Unión Internacional de Telecomunicaciones aprobó un estándar industrial para la tercera generación de sistemas inalámbricos. En un estándar CDMA de banda ancha llamado Internacional de Telecomunicaciones Móviles 2000(IMT-2000) proporcionó diferentes velocidades de transmisión dependiendo de la movilidad y localización con valores de 384 kbps para uso peatonal, 144kbps para uso vehicular y 2Mbps para uso en interiores además de mejor QoS (Quality of Service, Calidad de los Servicios).

La constante búsqueda de mejoras introdujo la 3GPP (3rd Generación Partnership Project, Proyecto Asociado de Tercera Generación) y 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2, Proyecto Asociado de Tercera Generación 2), por medio de las cuales se acordaron otros estándares globales basados en IMT-2000 como:

- TD-CDMA (Time Division Code Division Multiple Access, Acceso Multiple por División De Código y división de Tiempo)
- TS-CDMA (TD-SCDMA, Time Division Synchronous Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Código y Sincronización por División de Código)
- UWC-136 (Universal Wireless Communications 136).

El siguiente proceso a partir de GSM, GPRS, y EDGE fue UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universales), ofreció mejoras en la voz, ancho de banda de 5 MHz. Se introdujo MIMO (Multiple Input-Multiple Output, Multiple Entradas y Múltiples Salidas) y HSDPA (High Speed Downlink Packet

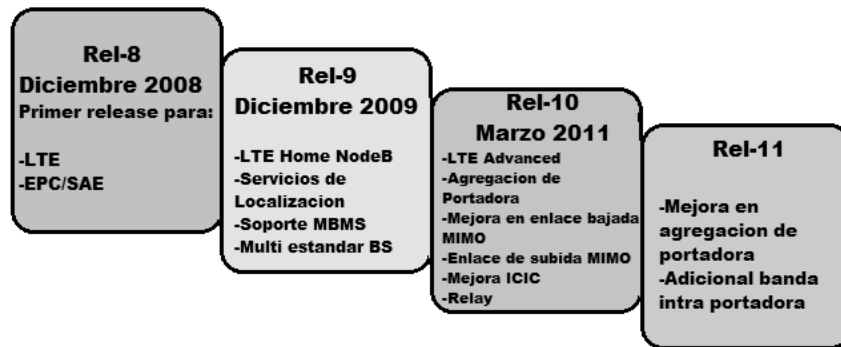
Access, Acceso Rápido de Paquetes de Bajada) que alcanza velocidades de datos en el orden de los 8 a 10 Mbps.

#### **1.4.4 Más allá de 3G, sistemas 4G.**

La primera versión de WCDMA Radio Access desarrollada en TSG RAN (TSG Radio Access Network) se llamó liberación 993 y contenía todas las características necesarias para cumplir con los requisitos IMT-2000. Después de HSDPA se agregó la versión 6 con enlace ascendente mejorado. Alcanzando una definición más allá de un sistema móvil 3G abarcando los datos móviles de banda ancha.

La evolución 3G continuó en 2004, con dos sistemas 4G, el sistema de Estado Unidos llamado WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas) que utiliza OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexaje por División de Frecuencia Ortogonal) como evolución de WiFi y el trabajo para la interfaz de radio 3GPP Long-Term Evolution (LTE) desarrollado a partir de WiMAX. Los sistemas 4G están basados en IP (Internet Protocol, Protocolo de Internet) y brindan accesos a velocidades entre 100Mbps en movimiento con servicio de punto a punto seguro. Los notables requisitos fueron: alta velocidad de datos en el borde de la celda y la importante baja latencia, además de la capacidad y los requisitos de velocidad máxima de datos. Para lo cual, se presentaron la flexibilidad del espectro y la máxima similitud con las soluciones, FDD (Frequency-Division Duplexing, Duplexaje por División de Frecuencia) y TDD (Time-Division Duplexing, Duplexaje por División de Tiempo).

En 2005, 3GPP TSG RAN WG1 (Radio Layer 1 specification, especificación de capa de radio 1) realizó estudios de diferentes tecnologías de capa física básica y en diciembre TSG RAN decidió que el acceso de radio LTE debía basarse en OFDM en el enlace descendente y DFT precodificado (Discrete Fourier Transform, Transformada Discreta de Fourier) en el enlace ascendente OFDM. Las características que forman a LTE-Advanced forman parte de la versión 10 de las especificaciones 3GPP LTE como se muestran en la Figura 1.7.



*Figura 1.7 Especificaciones 3GPP.*

Se consiguió un mayor ancho de banda a través de la agregación de múltiples portadoras y el uso evolucionado de técnicas avanzadas de antena tanto en enlace ascendente como en enlace descendente. LTE-Advanced fue presentado como candidato al UIT-R en 2009 e incluido en octubre de 2010 como parte de la interfaz de radio IMT-Advanced.

## **1.5 Introducción a los sistemas Celulares de 5G.**

Los sistemas de 4G fueron desplegados en Europa otorgando servicios móviles de banda ancha en cualquier momento en cualquier lugar, sin embargo, el tráfico móvil se encuentra en crecimiento constante y la necesidad de servicios sofisticados de banda ancha promueven la investigación hacia una nueva generación con nuevas tecnologías móviles y altas velocidades para integrar los llamados sistemas 5G.

A pesar de la reciente popularidad de las celdas de menor tamaño no existe avance tecnológico que maneje de manera simétrica la demanda de tráfico estimada para 2020 lo cual genera desafíos para la siguiente generación de sistemas. Para lograr tales avances es necesario aplicar técnicas suplementarias basadas en antenas de mmWave y MIMO masivo como candidatos potenciales a las soluciones de 5G redes celulares.

El objetivo de las comunicaciones de 5G es proveer alta velocidad en ancho de banda, capacidad infinita para redes y extensa señal de cobertura en orden de soportar un amplio rango de calidad de servicios para diferentes usuarios. El éxito también recae en el manejo confidencial de información de los usuarios al poder realizar cargas y descargas sin

problemas, alta calidad de servicio en movilidad, simétrica y asimétrica transmisión y la consideración de cuestiones ambientales para su lanzamiento.

Generalmente una nueva generación de sistemas celulares aparece cada 10 años y con la 4G introducida en 2011 se espera que la 5G sea lanzada a principios de 2020s. La estandarización de las nuevas interfaces de aérea para 5G se encuentran aún en definición y se espera tengan una mejor ganancia con la supervisión de ITU-R.

### **1.5.1 Requerimientos para 5G.**

Alta velocidad de trasmisión y el principio IP son la inicial necesidad en cualquier sistema móvil futuro. Los requerimientos previstos para 5G son basados en los 7 índices clave de Rendimiento KPI (Key Performance Índices, Índices Claves de Rendimiento) enunciadas a continuación.

1. *Velocidad de Transmisión pico Gbps.*

Se requiere soporten velocidades de 10 a 50 Gbps pico teóricamente para bajas movilidades e independiente de la localización del usuario, en la práctica el primer producto comercial otorgara una velocidad de 6 Gbps.

2. *Velocidad de Transmisión en Borde de Celda Gbps.*

Las velocidades de trasmisión en las generaciones anteriores son menores en los bordes de celda, tal cuestión será superada ya que las velocidades serán independientes de la ubicación del usuario en las celdas.

3. *Latencia ms.*

Los sistemas de 5G deben proveer latencias de extremo a extremo de 5 ms y de 1ms a través del aire. De esta manera servicios sensibles a retraso serán mejorados.

4. *Eficiencia Espectral de Celda.*

Los sistemas 5G deben ser capaces de cubrir amplias áreas además del manejo pesado y asimétrico de tráfico en la red. Logrando una capacidad por km<sup>2</sup> 1000 veces mayor a lo actual en los sistemas LTE.

5. *Movilidad.*

Deben asegurar la movilidad para las velocidades previstas y soportadas por células más pequeñas.

6. *Conexión Simultánea.*

Soporte masivo de dispositivos por celda otorgando todos los servicios conectados al mismo tiempo en la nube y para IoT (Internet of Things, Internet de las Cosas).

7. *Costo de Eficiencia.*

Para proporcionar gran capacidad y un reducido costo por unidad de red.

Fuera de las KPI otros requerimientos para 5G son<sup>5</sup>:

- *Seguridad.*

Objetivos de integridad (información no manipulable) y Confidencialidad (información alejada de usuarios no autorizados).

- *Cobertura.*

Para mejorar para las aplicaciones relacionadas con IoT y hacer que 5G sea viable para este mercado emergente.

- *Disponibilidad.* Para todos los equipos.

- *Confiabilidad.* En la red.

## 1.5.2 Tecnologías Clave para 5G.

Algunas de las tecnologías más notables en las propuestas de 5G<sup>6</sup> son:

- MIMO Masivo.
- Nuevas Formas de Onda.
- Acceso Multiple No Ortogonal (NOMA).

Surge de la técnica de PDM (Power Division Multiplexing, Multiplexaje por División de Potencia).

- Ondas mm y cm).

Las frecuencias por encima de 10 GHz presentan gran cantidad de espectro disponible y grandes trozos de espectro continuo.

- Acceso de Espectro compartido.

---

<sup>5</sup> (Américas, 2014)

<sup>6</sup> (Américas, 2014)

La FCC ha publicado un NPRM (Noticed of Proposed Rule Making, Observación de la Regla Propuesta de Fabricación) para el acceso al espectro de tres niveles en la banda de 3,5 GHz.

- Coordinación avanzada Inter-Nodo.  
Para densificación extrema de nodos sin interferencias basado en el intercambio de información entre planificadores.
- Integración y Gestión Multi-RAT.  
Facilitar una gestión y convergencia entre tecnologías dispares.
- Comunicaciones D2D (Device-to-Device, Dispositivo a Dispositivo).
- Comunicaciones M2M (Machine to Machine, Máquina a Máquina)
- Información centralizada de Redes (ICN, Information Centric Networking).

### 1.5.3 Iniciativa para 5G.

Algunas de las iniciativas relacionadas para sistemas celulares 5G <sup>7</sup>son:

Actividades Relacionadas en la Región de Asia.

**China.** Se centra en dos foros de trabajo.

- a) IMT-Grupo de Promoción 2020
- b) Proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MOST) 863-5G.

**Corea**

- a) Foro 5G. Trabajan en el ETRI (Electronics and Telecommunications Research Institute, Instituto de Investigación Electrónica y Telecomunicaciones), además de empresas como Samsung Electronics, LG Electronics, KMW and Dio Interactive.

**Japón**

- a) ARIB (The Association of Radio Industries and Businesses, La Asociación de Industrias y Negocios de Radio) "2020 y más allá" del Grupo Ad Hoc estudia conceptos de sistema, funciones distribución / arquitectura de la comunicación móvil en 2020 y más allá.

---

<sup>7</sup> (Américas, 2014)



## Actividades Relacionadas en Europa

- a) *5GNOW*
- b) *5G PPP*
- c) *COMBO*
- d) *iJOIN*
- e) *MAMMOET*
- f) *METIS*
- g) *MCN*
- h) *MOTO*

## Actividades Relacionadas en América

- a) Berkeley SWARM Lab y Berkeley Wireless Research Center (BWRC).
- b) Broadband Wireless Access & Applications Center (BWAC).
- c) ChoiceNet Project.
- d) Clean Slate Project at Stanford University for research on Software Defined Networking (SDN).

### 1.5.4 Estandarización para 5G.

Existen muchos organismos e instituciones que trabajan por la estandarización de los sistemas celulares, algunos de los más importantes son:

**a) 3GPP.**

Trabaja en la definición de estándares, se espera estar activamente envuelto en el desarrollo de estos, como en los sistemas 3G y 4<sup>8</sup>.

**b) 4G Américas**

Proporcionó un resumen general de las iniciativas 5G, describe las iniciativas actuales, estado y progreso de los diversos programas<sup>9</sup>.

**c) *ATIS Wireless Technologies and Systems Committe (WTSC) RAN***

Colabora con ITU-R en IMT-2020 e 3GPP.

---

<sup>8</sup> (Initiative, 2017)

<sup>9</sup> (Américas, 2014)

**d) GSM.**

Con su "Visión 2020", propone una agenda de colaboración de cuatro pilares (como Red 2020) e iniciativas priorizadas.

**e) IEEE 802.11.**

Ha modificado su especificación para proporcionar mayor rendimiento y acomodan nuevas bandas de frecuencia 802.11ax (2014). Consistirá en el desarrollo de una especificación de capa de control de acceso físico y medio (MAC) para redes inalámbricas, conectividad para estaciones fijas, portátiles y móviles en un área local.

**f) Actividades ITU.**

- *ITU-R & Working Party 5D.* Ha proporcionado mensajes clave sobre las IMT para 2020 y más adelante, junto con las áreas de estudio.
- *The ITU-R "Vision" towards "5G".* Realizara deliberaciones sobre espectro adicional en apoyo del crecimiento futuro de las IMT.
- *Estándares IMT.* Pretende incorporar "IMT para 2020 y más allá" como el principal medio mundial para conectar personas y dispositivos en todas partes<sup>10</sup>.

**g) Actividades TIA**

*Taller Beyond 2020: A Vision of 5G Networks, fue patrocinado por Samsung, Alcatel-Lucent e InterDigital.* Cuyo objetivo es proporcionar una comprensión del futuro de las redes móviles y las diversas tecnologías que apoyarán.

- h) WWRF (Wireless World Research Forum, Foro Mundial de Investigaciones Inalámbricas).** Tiene el objetivo de desarrollar la visión del mundo inalámbrico, permitir y facilitar la transición de la visión en realidad mediante grupos que difunden su visión y tecnología.

---

<sup>10</sup> (Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones, 2015)

## Capítulo 2 Perspectiva de la Telefonía Celular de Quinta Generación.

### 2.1 Introducción.

La visión de 5G es el acceso, transmisión y transporte eficiente de una amplia variedad de datos en cualquier lugar y en cualquier momento, que permita expandir sus comunicaciones en un entorno en el que coexistan comunicaciones de máquinas y humanos de manera masiva y eficiente con mayor productividad, sustentabilidad además de entretenimiento.

Para alcanzar su visión, las capacidades de 5G se lograrán mediante el estudio de nuevas tecnologías que cubran los requerimientos necesarios, además de los tradicionales para una RAN (Ratio Access Technology, Red de Radio Acceso). El objetivo de este capítulo es describir las características de los sistemas 5G, así como la presentación de las tecnologías potenciales que se consideran para dar solución a cada desafío.

#### 2.2.1 Concepto del sistema 5G.

El concepto de sistema de 5G previsto es aquel capaz de proporcionar una plataforma flexible diseñada para múltiples servicios y aplicaciones ya sean existentes o nuevos; el concepto del sistema 5G generaliza las características clave de los casos de uso alineado a sus requisitos, combinando los componentes tecnológicos en tres servicios genéricos de comunicación 5G que incluyen sus funciones específicas como:

*Banda ancha móvil extrema xMBB:* proporciona comunicaciones de tasa de datos extremadamente altas y comunicaciones de baja latencia y cobertura extrema.

*Comunicaciones Tipo Máquina Masivas mMTC:* proporciona conectividad inalámbrica escalable de dispositivos, cobertura de área amplia, además de buenas velocidades de datos.

*Comunicaciones Ultra Confiables Tipo Máquina uMTC:* proporciona enlaces de comunicación de baja latencia ultra confiables.

Además, se apoya por cuatro factores principales que incluyen funciones comunes para más de un servicio genérico como se muestra en la Figura 2.1.

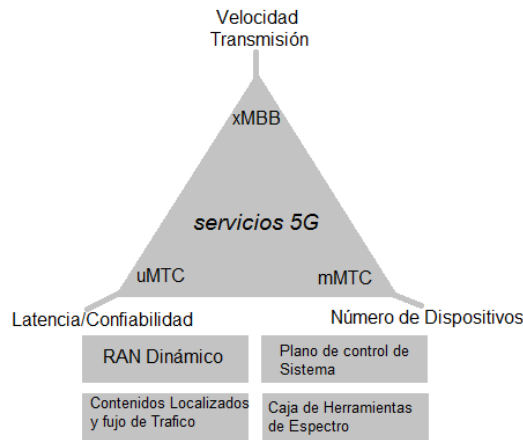


Figura 2.1 Concepto de sistema 5G.

*RAN Dinámico DyRAN:* proporciona a RAN adaptación rápida a cambios espaciotemporales.

*Plano de control de sistema LSCP:* proporciona nuevo mando de control y señalización necesaria para garantizar latencia y confiabilidad.

*Contenidos localizados y Flujo de Trafico:* Permite la descarga, agregación y distribución en tiempo real y contenido en caché.

*Herramientas de Espectro:* Proporciona un conjunto de habilitadores para permitir que los servicios genéricos de 5G operen bajo diferentes marcos reguladores.

## 2.2 Arquitectura 5G.

El diseño de una nueva arquitectura de redes móviles tiene como objetivo definir los elementos de la red, así como su interacción, con el fin de proporcionar una capacidad de gestión aumentada, así como escalabilidad ante una amplia gama de aplicaciones en comparación con las de generaciones anteriores.

El sistema se reconfigurará mediante tecnologías de servicio de red y también de virtualización funcional con elementos tales como Virtualización de la Función de Red NFV para la optimización del costo y rendimiento, y aplicación de SDN para proporcionar la flexibilidad al sistema.

### 2.2.1 Características de la arquitectura 5G.

Una propuesta de arquitectura consta de 3 capas y una gestión E2E (Everything to Everything, Todo a Todo) que coincide con la arquitectura de SDN (Software Defined Network, Red Definida por Software, como se muestra en la Figura 2.2.

*Capa de recursos de infraestructura:* que como su nombre lo indica serán aquellos dispositivos de la red que permitirán la interconexión.

*Capa de habilitación empresarial o capa de control en SDN:* en ella se realiza la interacción con las aplicaciones y servicios de red vía API (Application Programming Interface, Interfaces de Programación Aplicadas) y la capa de infraestructura para cualquier tipo de dispositivo vía instrucción estandarizada llamada OpenFlow.

*Capa de aplicaciones empresariales.*

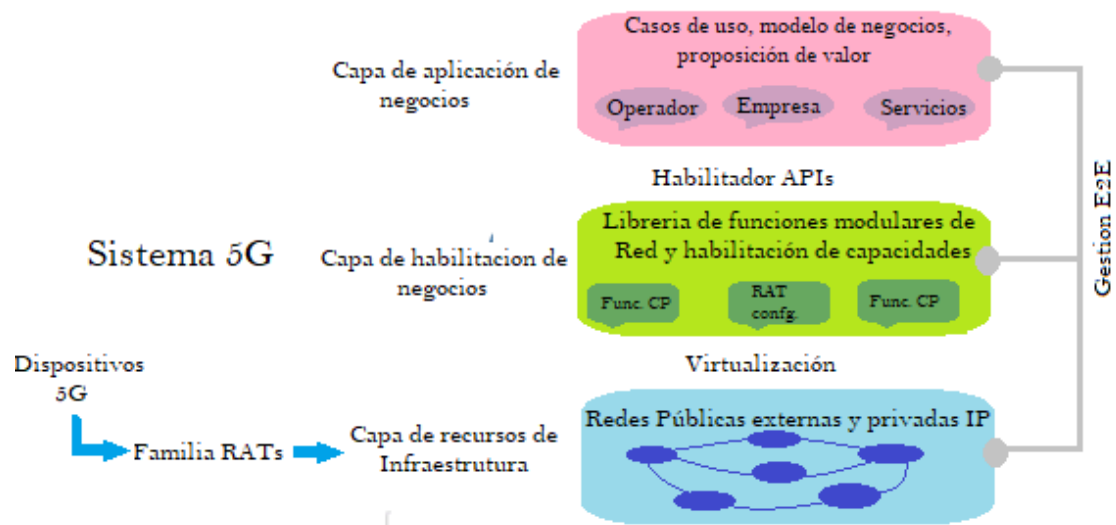


Figura 2.2 Arquitectura de 5G.

La arquitectura propuesta para 5G será capaz de integrar perfectamente las RAT (Ratio Access Technology, Tecnología de Radio Acceso) existentes (e.g. GSM, HSPA, LTE y WiFi) con las nuevas complementarias alojadas en otras bandas para proporcionar mayor eficiencia espectral. De esta manera junto con el desarrollo de nuevas RATs y el despliegue de células pequeñas, se proporcionarán mayores servicios basados en la misma arquitectura como se muestra en la Figura 2.3; se apoyará además en las comunicaciones D2D las cuales serán asistidas por la macro-BS, como plano de control y debe poseer soporte nativo para MTC (Machine Type Communication, Comunicaciones Tipo Maquina) en donde técnicas PHY (física) y MAC (Media Access Control, Medio de Control de Acceso) serán revisados para el transporte de corta distancia y sensibles a los retrasos de paquetes, en este contexto, la virtualización desempeñará un papel clave para la utilización eficiente de los recursos en los sistemas celulares, con compatibilidad a sistemas anteriores y la RAN para el intercambio

de enlaces intermedios y BS entre diferentes operadores donde además los UEs (User Equipment, Equipos de Usuario) serán lo suficientemente inteligentes para seleccionar automáticamente la mejor interfaz para conectarse a la red.

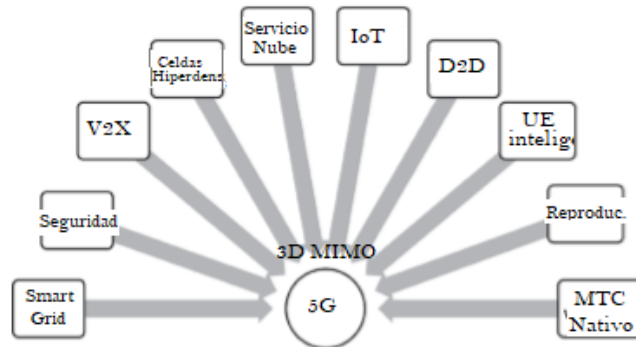


Figura 2.3 Tecnologías y Servicios de la Arquitectura de 5G.

### 2.3 Casos de uso y requerimientos generales.

Para entender los requerimientos de los sistemas celulares 5G es necesario entender que dependen de la gran cantidad de casos de uso existentes cuyas metas son brindar los servicios y superar los desafíos de los sistemas celulares. Algunos de los principales casos de uso son:

*Control de Vehículo autónomo.* Para brindar asistencia y beneficios como seguridad vial y evitar accidentes, además de la posibilidad de concentrar su atención en actividades productivas, en esta situación bajas latencias, alta confiabilidad, movilidad y control de señalización de vehículo son requeridos.

*Comunicación de Emergencia.* Para servicios de rescate y asistencia. Principalmente necesita de alta disponibilidad y eficiencia energética además de confiable enlace de comunicación entre usuario-servidor.

*Automatización de celdas en fábricas.* Para mantener dispositivos en una misma línea de montaje de comunicación con unidades de control con confiabilidad alta y adecuada latencia para el soporte de aplicaciones críticas para la vida

*Grandes Eventos al aire libre y embotellamiento.* Para tener un manejo al volumen de densidad de tráfico en el área lo que requiere de alta eficiencia espectral de celda además de soporte ante la conexión simultanea de dispositivos y en tiempo real. Además de buena cobertura.

*Demanda de servicios multimedia.* En este sentido su principal característica es que requiere de altas velocidades para descarga en los UEs, y disponibilidad de servicios independientemente de la localización.

*Servicios médicos Remotos.* Para exámenes y cirugías presentadas en diferentes lugares, necesita tener una conexión altamente confiable, segura y de muy baja latencia.

*Compras.* Para la personalización y automatización de compras por usuario. Requiere de seguridad, confiabilidad y disponibilidad.

*Smart City.* Para conexiones de los usuarios con el ambiente que los rodea que sean personalizados y dinámicos.

*Smart Grid.* Para control, distribución y ahorro de servicios públicos, confiable señal de monitoreo, seguridad e integridad son requeridos.

*Realidad Virtual y aumentada.* Para permitir interacción entre usuarios y el medio. Necesita de altas velocidades de transmisión y bajas latencias para mantener alta calidad de resolución de servicio.

## **2.4 Comunicaciones Dispositivo a Dispositivo.**

La comunicación directa a través de cualquier infraestructura de red entre dispositivos físicamente proximales, que controla recursos de radio es conocida como comunicación D2D (Device-to-Device, Dispositivo a Dispositivo), surge para proporcionar mejoras significativas en la capacidad del sistema; la eficiencia espectral y el consumo energético principalmente. En consecuencia, la comunicación D2D emerge como componente potencial importante para nuevas generaciones celulares para satisfacer la creciente demanda de servicios inalámbricos locales y proveer un modo de comunicación alternativo. Sin embargo las comunicaciones D2D pueden ser altamente ineficientes en condiciones de inestabilidad y baja calidad del enlace.

### **2.4.1 Introducción a las Comunicaciones Dispositivo a Dispositivo.**

Existen dos tipos de comunicaciones D2D propuestas para el sistema 5G: reproducción de datos y comunicaciones D2D directas como se muestran en la Figura 2.4. En estas

aplicaciones, los dispositivos inalámbricos portátiles deben ser capaces de comunicarse con cualquier otro dispositivo cercano, además, antenas circularmente polarizadas con patrones omnidireccionales son componentes clave para su implementación y proporcionarán cobertura de radiación superior.



*Figura 2.4 Tipos de Comunicaciones D2D.*

### 2.4.2 Comunicaciones D2D hacia 5G.

La comunicación D2D fue introducida en LTE como una extensión de las especificaciones, sus enlaces son capaces de utilizar recursos ortogonales (llamada red dedicada) en donde la gestión de interferencias es simplificada, pero la utilización de recursos puede ser menos eficiente. O bien reutilizan los recursos celulares (llamados red compartida) en donde los recursos de la red pueden utilizarse de manera más eficiente, a costa de un entorno de interferencia más denso, lo que complica la gestión de interferencias.

Es por lo anterior que 5G espera que D2D sea de gran soporte y solución global de acceso inalámbrico incluyendo comunicación de datos de usuario punto a punto para una cobertura de red más amplia en modo cooperativo utilizando los UE. Además, con el fin de evitar la interferencia incontrolada a otros enlaces, la comunicación D2D será controlada por la red.



## **2.5 Comunicaciones Máquina a Máquina.**

Hoy en día existe gran variedad de máquinas que se comunican entre sí sin la interacción humana, este tipo de comunicación es conocida como comunicación M2M (Machine to Machine, Máquina a Máquina). Permite realizar eficiente gestión de servicios, aplicaciones y procesos automatizados en tiempo reducido. Posee incursión en varios campos y forma parte de IoT, razón por la cual es una tecnología en constante desarrollo con el objetivo de lograr que su gestión cumpla con un estándar que brinde seguridad, flexibilidad, escalabilidad a bajo costo.

### **2.5.1 Introducción a las Comunicaciones Máquina a Máquina.**

En la actualidad, debido al tráfico generado y los ingresos que generan principalmente, la cantidad de dispositivos capaces de realizar comunicación M2M aumenta potencialmente. En este tipo de comunicaciones existen 3 tipos de enlaces los cuales son, de acceso directo a la red MTC-D, agregación de nodo MTC-A y rango corto D2D MTC-M, los cuales, en conjunto poseen una amplia gama de aplicaciones adecuados para interactuar con un gran número de dispositivos interconectados entre sí. Además, a través de este tipo de comunicación se abarcan servicios que no son en tiempo real y típicamente consumen poco ancho de banda lo cual permite un mejor desarrollo para las Redes de Radio Acceso proporcionando soluciones de extremo a extremo.

### **2.5.2 Requisitos de M2M para Sistemas Celulares.**

La gama de aplicación de las comunicaciones M2M es considerablemente amplia y sus requisitos varían dependiendo de la aplicación; algunos de las principales aplicaciones en las que hacen incursión las comunicaciones M2M además de los requisitos necesarios para las mismas son las siguientes:

*Medición y control de servicio:* Los medidores inteligentes con intervalos de tiempo cortos (minutos hasta segundos) capaces de controlar la red de energía con implementación de un control de bucle cerrado.

*eHealth*: Para el control de salud del usuario, como la presión arterial, la frecuencia cardiaca, etc., en equipos celulares que incluso sean capaces de reaccionar ante emergencias.

*Sistemas de Transporte Inteligente*): Para mejorar la seguridad y la eficiencia del transporte.

*Vigilancia*: es un aspecto del mayor caso de uso "seguridad pública".

La Tabla 2.1 sintetiza los diversos requisitos de las aplicaciones de las comunicaciones M2M.

*Tabla 2.1 Requerimientos M2M para diferentes aplicaciones.*

	Medidores Inteligentes	eHealth	ITS	Vigilancia
Movilidad	Nula	Normal	Alta	Nula
Tamaño Del Mensaje	Baja	Media	Media	Alta
Patrón De Trafico	Regular	Aleatoria	Aleatoria	Regular
Latencia	Baja	Alta	Alta	Media
Eficiencia	Alta	Alta	Baja	Media

### **2.5.3 Desafíos de M2M para redes celulares móviles.**

M2M es una tecnología en proceso de maduración puesto que no posee un estándar que rija su sistema por completo. Si bien es cierto proporciona numerosos beneficios en diferentes ámbitos, sin embargo, los desafíos de las comunicaciones M2M surgen principalmente de los requerimientos que sus servicios necesitan de acuerdo a su relación con RAN como:

- Apoyo a gran cantidad de dispositivos por célula para evitar la congestión en el canal de acceso aleatorio.
- Soporte para diferentes características de tráfico de comunicaciones M2M con priorización y aislamiento entre diferentes clases de acceso y tipos de dispositivos.
- Baja latencia y alta confiabilidad para gestión de grupos.
- Bajo consumo de energía debido a tiempos de inactividad muy largos.
- Apoyo a diferentes perfiles de movilidad para una gestión de movilidad optimizada para escenarios de movilidad estacionaria o muy alta.
- Mecanismos de seguridad de bajo peso y ligeros.

## **2.6 Comunicaciones MIMO Masivo.**

Los sistemas de comunicación se encuentran en constante desarrollo y exponencial crecimiento, a consecuencia de lo anterior y, del aumento en la demanda de un eficiente espectro y la complejidad del desvanecimiento multicaminos, se ha impulsado el uso de sistemas de comunicaciones de múltiples antenas en lugar de una; desarrollando la tecnología conocida como MIMO alcanzando el concepto de MIMO Masivo.

La idea principal de esta tecnología es que tanto señales de transmisión y antenas de recepción estén "combinadas" con el fin de mejorar la BER (Bit Error Rate, Tasa de Error de Bit) y la velocidad de datos (bits / seg) para cada usuario MIMO ya que es capaz de introducir de 100 a 1000 antenas en un arreglo en lugar de introducir 2\*2, 3\*3, 4\*4, etc. antenas, proporcionando una capacidad de canal mayor y una velocidad de transmisión atractiva para lo que 5G pretende alcanzar, resolviendo a la vez, embotellamiento en la red.

### **2.6.1 Arreglos de Antenas.**

“El tipo de antena en la que una serie de antenas permanecen conectadas de una cierta manera que está dispuesta en una estructura regular para formar una sola antena se llama antena de red”<sup>11</sup>

Esta tecnología crea canales de matriz utilizando múltiples antenas en Tx y Rx (de tamaño el número de antenas de Rx por el número de antenas de Tx). Para habilitar la transmisión de señales sin gasto de potencia adicional. En cambio, su costo se presenta en el aumento de hardware y complejidad agregada en donde cada uno de los elementos de antena debe cumplir con características específicas en velocidad de transmisión, capacidad, tamaño y adaptación de los haces. Además de la consideración de tecnologías complementarias como pueden ser ondas milimétricas para alcanzar antenas de tamaño adecuado.

### **2.6.2 Características de MIMO Masivo.**

Los sistemas MIMO se basan en el procesamiento de señales espacio-tiempo; el tiempo y la dimensión de los datos, se complementan con la dimensión espacial del uso de múltiples

---

<sup>11</sup> (Shoriful Islam, 2016)

antenas espacialmente distribuidas. Convierten la propagación por trayectos múltiples en un beneficio para el usuario como lo hacen las antenas inteligentes. Además, aprovechan el desvanecimiento aleatorio y, cuando está disponible, el diferencial de propagación por trayectos múltiples. Las características de una matriz de antenas son:

- Ganancia global mayor.
- Anulación de interferencia creada por un conjunto de direcciones.
- Diversidad de recepción.
- Utiliza los mismos recursos de radio.
- Determinación de la antena por la cual llegara la señal entrante
- SINR (Signal Interference and Noise Ratio, La señal de interferencia más ruido) maximizada por la antena de red.
- El patrón de radiación diferente al de una sola antena con mayor rendimiento.

Otro beneficio es que a pesar de la existencia de probabilidad de falla de algún elemento del arreglo y la pérdida de simetría del patrón de radiación o variación en la intensidad de campo si se presenta, el sistema no se detiene y busca un camino alternativo o bien reconstruye el patrón de haz mediante algoritmos de compensación.

## **2.7 Redes inalámbricas Radio-Cognitivas para 5G.**

Actualmente la mayor parte del espectro de radio ha sido asignado a los sistemas inalámbricos existentes, sin embargo, no todo puede ser licenciado para nuevas aplicaciones inalámbricas a pesar de que algunas bandas son utilizadas frecuentemente mientras algunas otras se encuentran desocupadas.

La siguiente generación de telefonía móvil debe poseer flexibilidad para cambiar entre diferentes redes mediante mecanismos de manejo y detección inteligente de espectro; siendo las redes radio-cognitivas una solución de acceso al espectro, puesto que su objetivo principal es aumentar la eficiencia del espectro de radio frecuencia RF manejando la saturación de las bandas de frecuencia no licenciadas y el uso eficiente de las licenciadas.

### **2.7.1 Características de las Redes radio-cognitivas.**

El derecho al acceso de espectro (o licencia) se define por la frecuencia, el espacio, la potencia de transmisión, el propietario, tipo de uso y la duración de la licencia; donde el licenciatarario debe ajustarse a las especificaciones sin poder cambiar de especificaciones o prestar recurso a otro licenciatarario, lo que resulta en una baja utilización del espectro de frecuencias.

Una red de radio cognitiva permite establecer comunicaciones entre los nodos / usuarios de radio donde los parámetros de comunicación se ajustan según el entorno, la topología, las condiciones de funcionamiento o los equipos de usuario. Los dos objetivos principales de una red radio cognitiva son lograr comunicaciones inalámbricas altamente fiables y eficientes además de mejorar la utilización del espectro de frecuencias.

### **2.7.2 Funciones de las Redes radio-cognitivas.**

Para dar soporte inteligente y lograr eficiencia de acceso dinámico de espectro, las redes radio cognitivas utilizan SDR (Software-Defined Radio, Radio Definido por Software), para modificar y controlar los parámetros de transmisión como habilitación para Operación multibanda, Soporte multiestandar, Soporte multiservicios y Soporte multicanal (para diferentes bandas simultáneamente en transmisor y receptor) dependiendo de los requerimientos y especificaciones de comunicación. De acuerdo a sus características, las principales funciones de las redes radio cognitivas son:

*Detección de espectro:* detecta un espectro no utilizado o un agujero de espectro y el método de acceder a él sin interferir con la transmisión del usuario licenciado.

*Análisis de Espectro:* utiliza la información de la detección de espectro para programar y planear el acceso de espectro para usuarios sin licencia.

*Acceso al espectro:* basado en el análisis de espectro los hoyos en las bandas son accedados por usuarios sin licencia. Sin generar colisión.

*Movilidad de espectro:* se relaciona con el cambio de la banda de frecuencia en la que operan los usuarios radio cognitivos.

### 2.7.3 Arquitectura de redes Radio cognitivas hacia 5G.

Con el fin de mejorar la utilización del espectro, la DARPA inició el programa de próxima generación. Cuya principal idea es utilizar el mecanismo de acceso del espectro dinámico a través de la radio cognitiva para redes XG, donde un usuario de radio cognitivo deberá ser capaz de detectar la disponibilidad del espectro y la presencia de usuarios titulares en una banda de frecuencias objetivo es liberar el espectro de frecuencias cuando los usuarios con licencia son detectados.

Estas funciones son sensor, gestión, compartición y movilidad de espectro respectivamente. Su arquitectura se divide en dos grupos de sistemas inalámbricos que son los licenciados y no licenciados. Los primeros proporcionan la conexión para usuarios licenciados mediante una estación base o un Access Point mientras que los no licenciados pueden o no utilizar la infraestructura utilizando un modo de acceso ad hoc como en la Figura 2.5.

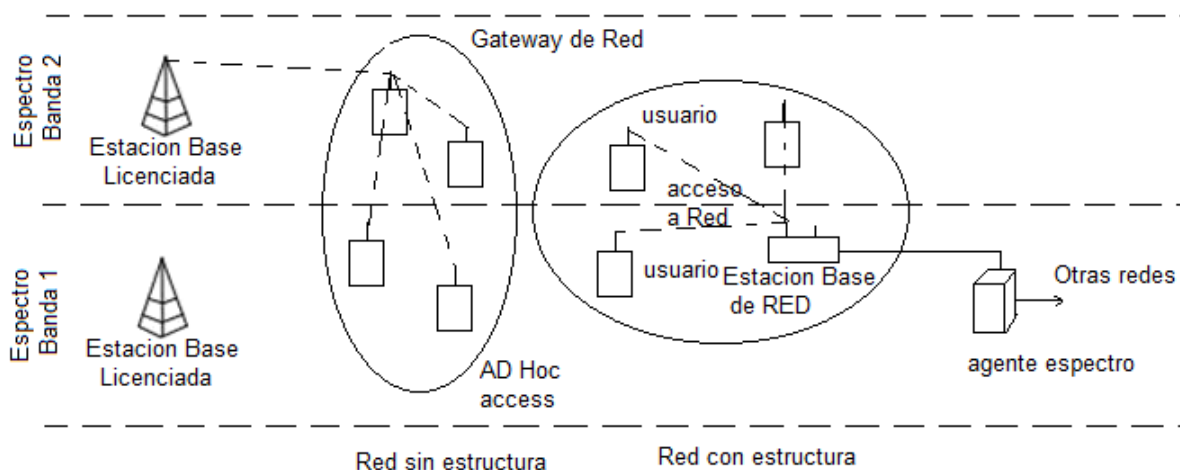


Figura 2.5 Arquitectura de redes radio cognitivas.

### 2.8 Comunicaciones de Ondas Milimétricas para 5G.

La banda de ondas milimétricas (mmWave) es capaz de soportar las velocidades requeridas para FRA de banda ancha móvil. Poseen un tamaño de longitud de onda adecuada para la implementación de arreglos de antenas de grandes cantidades lo cual genera ganancias de aislamiento espacial y multiplexación. A pesar de esto, su alta frecuencia de portadora crea exigentes condiciones de propagación como línea de vista y prevención ante atenuaciones, además de necesitar procedimientos de capa de control como IA (Initial Access, Acceso

Inicial) para conexión física entre UE-BS con alta direccionalidad de antenas para evitar pérdida de trayectoria isotópica la cual aumenta conforme lo hace la frecuencia y a su vez puede retrasar procedimientos de búsqueda y acceso de celdas.

### **2.8.1 Limitaciones de ondas Milimétricas.**

En cualquier sistema de comunicaciones al pasar del modo IDLE al conectado realiza CS (Cell Search, Búsqueda de Células), extracción de información del sistema y RA (Random Access, Acceso Aleatorio). Lo cual genera limitaciones al utilizar ondas milimétricas como:

*Diferencia de Rango de descubrimiento:* donde la señalización omnidireccional puede generar un desajuste entre el rango de descubrimiento de células.

*Multiconectividad:* Donde cada UE debe detectar simultáneamente múltiples BS.

*Fenómenos que no permiten recibir mensajes IA:* como Deafness que se refiere a una situación en la que los haces de transmisión-recepción no se apuntan entre sí y Blockage que provoca entrega de mensaje fallida debido a una caída de canal.

*Acceso dinámico y consiente:* dinámicas como la direccionalidad y la intermitencia son necesarias debido a la densidad de las topologías.

### **2.8.2 Acceso Inicial en Ondas Milimétricas.**

Existen dos propuestas principales para IA en la que tanto UE o BS pueden determinar sus direcciones de haz iniciales basadas en búsquedas de celdas CS. Las bases de dichas propuestas son:

*Búsqueda exhaustiva.*

Realiza búsqueda de haz secuencial mediante códigos UE y BS predefinidos de  $N=16$  direcciones generalmente proporcionadas por  $8 \times 8$  antenas que transmiten/reciben.

*Búsqueda iterativa.*

Realiza escaneo angular en dos etapas que son:

1. La BS transmite sobre 4 macro direcciones.

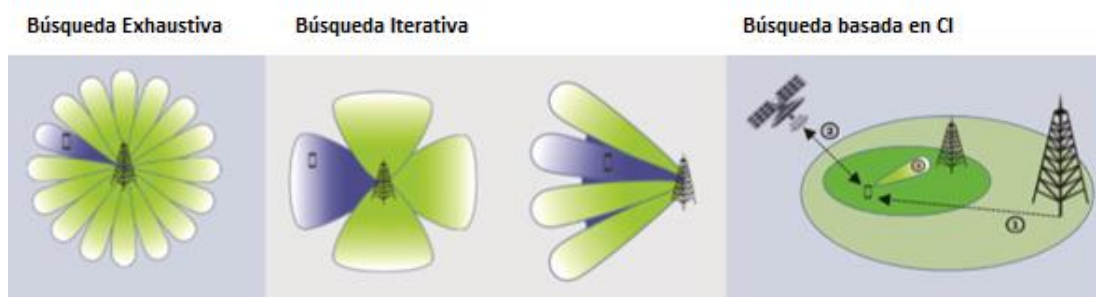
2. Refina la búsqueda en el mejor sector por lo cual presenta menor retraso de detección y mayor probabilidad de detección de errónea

#### *Búsqueda basada en CI.*

Realiza 3 etapas a la par de una búsqueda exhaustiva para detectar la mejor dirección de transmisión-recepción, las cuales son:

1. Propagación de coordenadas GPS omnidireccionales por parte de la BS.
2. Cada UE obtiene coordenadas GPS y orientación.
3. El UE selecciona la BS más cercana y fiable.

La Figura 2.6 muestra las características físicas para cada tipo de acceso inicial.



*Figura 2.6 Acceso Inicial.*

## **2.9 Tecnologías de Acceso en 5G: NOMA.**

Las tecnologías de radio acceso son caracterizadas por los esquemas de acceso múltiple como lo son TDMA, FDMA, CDMA y OFDMA. La 3GPP especifica que los estándares para 3.9/4G fueran adoptados OFDMA y SC-FDMA ya que el acceso múltiple ortogonal proporciona un alto rendimiento en el dominio de paquetes, y servicios con detección única de usuario.

Debido al esperado lanzamiento de 5G, la 3GPP está trabajando en el nuevo esquema de acceso múltiple con el objetivo de garantizar la sostenibilidad a la nueva generación con base en sus requerimientos en donde es indispensable alcanzar significantes ganancias en capacidad debido al incremento de tráfico. Razón por la cual, para proporcionar una solución a tales requerimientos, se han investigado tecnologías como NOMA (Non Orthogonal



Multiple Access, Acceso Múltiple No Ortogonal), que en conjunto de una cancelación de interferencias es colocado como un candidato potencial para futuros radio accesos FRA.

### 2.9.1 Características de NOMA.

Los esquemas de acceso múltiple son establecidos dependiendo de las características y necesidades que cada generación de sistemas celular requiere, la Tabla 2.2 muestra las diferencias entre los últimos esquemas de acceso.

Tabla 2.2 Esquemas de acceso múltiple celular.

	3G	3.9/4G	FRA (esperado)
Tipo de multiplexaje	No ortogonal CDMA	Ortogonal OFDMA	No ortogonal con SIC NOMA
Forma de onda de la señal	Única portadora	OFDM (o DFT-s-OFDM)	OFDM (o DFT-s-OFDM)
Adaptación de enlace	Rápido Control de Transmisión de Potencia TCP	Adaptativa Modulación y codificación AMC	AMC+ asignación de potencia.



Figura 2.7 Acceso Múltiple Celular para 3G, 3.9/4G y FRA.

Como se puede apreciar en la Tabla 2.2 y la Figura 2.7 NOMA mantiene las buenas propiedades de los esquemas antecesores como forma de onda de señal o incluso puede trabajar con formas de ondas alternativas basadas en filtros. Además; utiliza un dominio adicional para superponer múltiples usuarios por medio de asignación de potencia, formando una codificación de superposición y realizando la separación a través de técnicas avanzadas de transmisión / recepción como o un receptor SIC (Sucessive Interference Cancelation, Cancelación de Interferencias Sucesivas), lo cual a su vez necesita de demodulación y decodificación aumentando el tiempo de procesamiento.

## 2.9.2 Principio Básico de NOMA.

Para explicar el principio de NOMA, se parte de una circunstancia de dos usuarios UE- $i$  ( $i=1, 2$ ) superpuestos en código con una energía  $E[|x_i|^2] = 1$  y potencia de transmisión  $P_i$  como se muestra en la Figura 2.8.

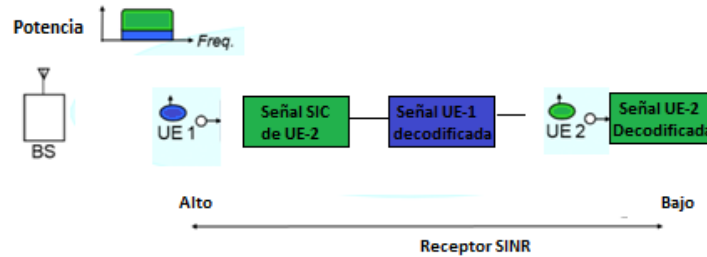


Figura 2.8. Principio de NOMA.

El proceso SIC es implementado en el receptor UE, el orden para la decodificación está en el orden de la ganancia de canal creciente normalizada por el ruido y la potencia de interferencia entre celdas  $\frac{|h_i|^2}{N_0}$ . De esta manera, cualquier usuario puede correctamente decodificar las señales de otros usuarios cuya orden de decodificación viene antes del usuario, con la cancelación de interferencia. Por lo tanto, UE- $i$  puede eliminar la interferencia entre usuarios del  $j$ -ésimo usuario cuyos  $\frac{|h_i|^2}{N_{0,j}}$  es baja que un  $i$ -ésimo usuario  $\frac{|h_i|^2}{N_{0,i}}$ .

## 2.9.3 Esquema NOMA con MIMO.

Para conseguir mayor eficiencia de espectro, NOMA, además de utilizar SIC utiliza avanzadas multi-antenas donde la BS genera múltiples haces como MU\_MIMO (multi-user MIMO, MIMO multiusuario) y superpone múltiples UEs en cada haz. Así, en el UE (lado receptor) se utilizan dos aproximaciones de cancelación de interferencias los cuales se pueden apreciar en la Figura 2.9, basadas en el criterio SIC, utilizado para multiplexaje usuario intra-haz aplicando pesos de precódigo iguales UEs de un grupo para evitar decodificar otra señal e IRC con pesos de precódigo diferentes para cada grupo el cual independiente de las ganancias de canal y los pesos de formación de precodificación / formación de haces de MIMO para otros UE.

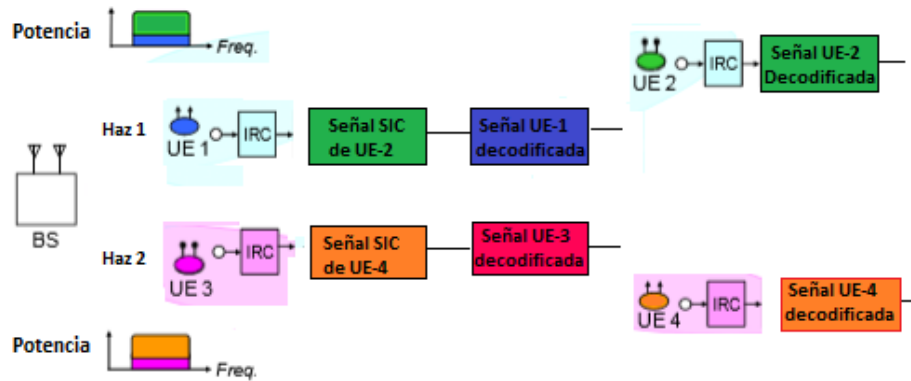


Figura 2.9. Técnicas de cancelación de interferencias.

## 2.10 Diseño de Formas de Onda para 5G.

Además de las características tradicionales, 5G requiere de un apropiado diseño de forma de onda de la señal para la interfaz aérea, la cual debe cumplir con ser flexible y poseer capacidad para soportar transmisión asincrónica en orden de evitar sobrecarga de señalización de sincronización causada por terminales masivos.

OFDM no cumple con esta capacidad debido a que la ortogonalidad entre subportadoras se pierde en este tipo de transmisión y la emisión fuera de banda (OOB, out of Band) de la señal causará ACI (Adjacent Channel Interference, Interferencia de Canal Adyacente). Además, la señal de sincronización causa consumo de energía extra y reduce la vida útil de las terminales.

### 2.10.1 Formas de onda basadas en Filtros.

Los sistemas celulares 5G requieren de buenas propiedades de localización en el dominio del tiempo para proporcionar servicios de baja latencia y soportar la transmisión de paquetes pequeños de manera eficiente. Una forma de satisfacer estos requerimientos es mediante formas de onda basadas en filtros, ya que pueden realizar transmisión asíncrona y reducir las emisiones OOB mediante diferentes diseños basados en la granularidad del filtro.

### 2.10.2 Filtrado de subportadoras.

El diagrama a bloques del sistema para FBMC (Filter Bank Multi-carrier, Banco de Filtros de Multiportadoras) se muestra en la Figura 2.10.

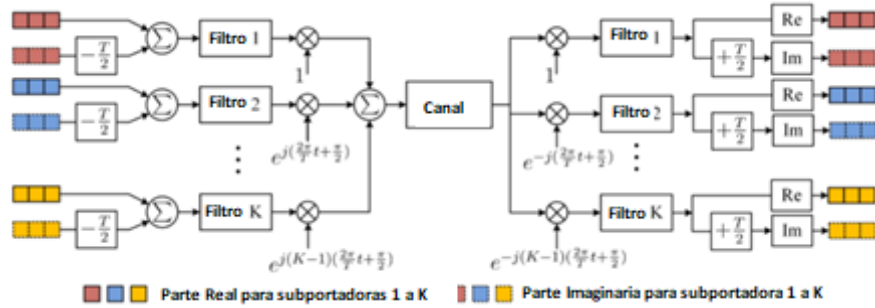


Figura 2.10. Estructura del sistema para FBMC.

Dónde:

T=intervalo de cada FBMC símbolo.

K=número de subportadoras.

Los símbolos QAM se dividen en parte real e imaginaria con T/2 de retardo entre componente, luego, señales O-QAM combinadas se modulan por la frecuencia de subportadora correspondiente antes de enviarlo al canal y un proceso inverso en el receptor toma lugar.

### 2.10.3 Filtrado de subbanda.

Este tipo de filtrado supera los inconvenientes del filtrado de subportadoras como la longitud de la respuesta de impulso del filtro la cual, al ser menor posee mayor potencial para aplicaciones de baja latencia en la red 5G. La estructura del sistema de RB-F-OFDM (Resource Block Filter OFDM, Filtro de Bloques de Recursos OFDM) se muestra en la Figura 2.11.

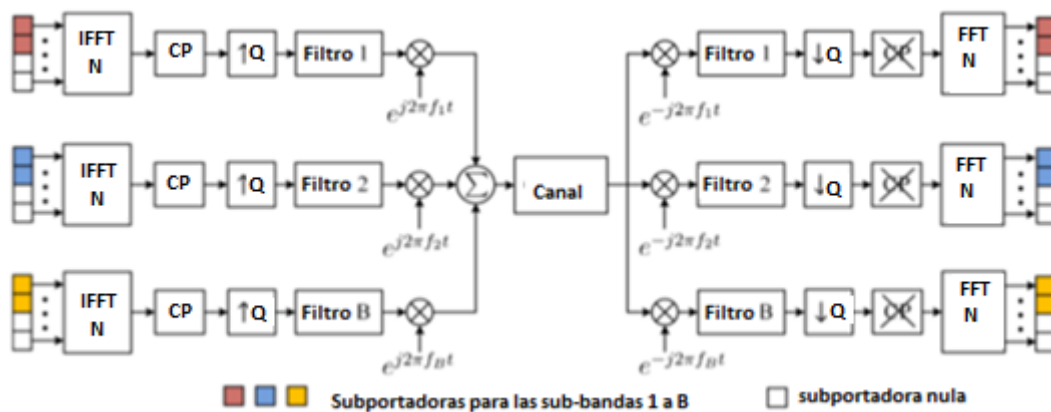


Figura 2.11 Estructura del sistema para RB-F-OFDM

RB-F-OFDM agrega un prefijo cíclico y convierte cada símbolo al dominio de tiempo por medio de modulación OFDM estándar, acto seguido la señal se envía al filtro de transmisión y se desplaza a la frecuencia portadora de la sub-banda perteneciente realizando un procedimiento inverso en el receptor. Utiliza up sampling en el transmisor y down sampling en el receptor para reducir la frecuencia de muestreo de la Transformada de Fourier FFT / IFFT denotada por  $N$  para proporcionar menor complejidad de implementación. De manera similar, si múltiples RB para diferentes usuarios son adyacentes en el dominio de la frecuencia, existen fugas en espectro entre cada RB si es pequeño. Sin embargo, dichas fugas suelen ser tan pequeñas provocando una interferencia entre usuarios suficientemente pequeña como para ignorarse.

En cambio, la estructura del sistema para UFMC (Universal Filtered Multi Carrier, Filtrado Universal de Multi Portadora) se muestra en la Figura 2.12.

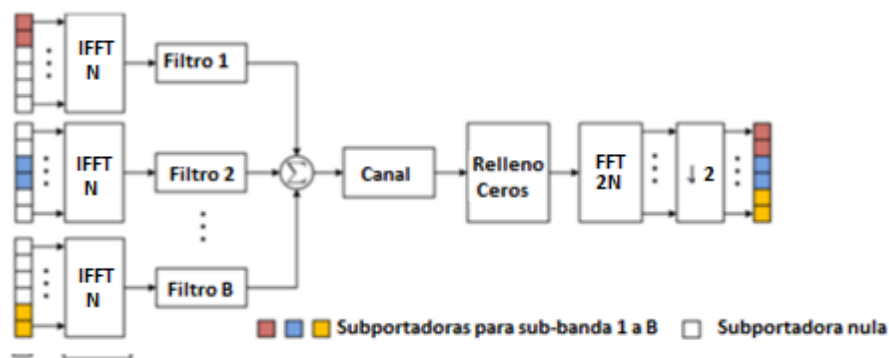


Figura 2.12. Estructura del sistema UFMC.

Donde  $N$  representa el tamaño de IFFT en el transmisor. Este tipo de onda posee una estructura similar a la de RB-F-OFDM. Con la excepción de que no requiere desplazamiento de frecuencia ya que los símbolos son asignados a las sub-bandas correspondientes antes de IFFT. Solo utiliza filtros de transmisión, mientras la demodulación depende de una FFT de  $2N$  puntos que permite recuperar los símbolos sin necesidad de aplicar CP ni upsampling, utilizando  $L$  como la longitud de la respuesta del impulso del canal, para obtener una longitud de la señal  $N+L-1$  y conocer la cantidad de ceros con que se rellenara el final de la señal recibida mediante  $N-L-1$  para poder aplicar FFT de  $2N$  puntos seguido de una decimación de factor dos. Como se muestra en la Figura 2.13.

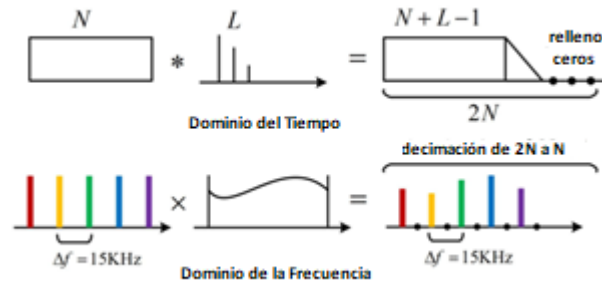


Figura 2.13 Demodulación de UFMC.

### 2.10.4 Filtrado de banda completa.

En este tipo de filtrado existe la técnica F-OFDM (Filtered OFDM, Filtrado OFDM) se adopta un par de filtros de transmisión y recepción independientemente de la estructura del espectro en el ancho de banda. La estructura del sistema de F-OFDM se muestra en la Figura 2.14.

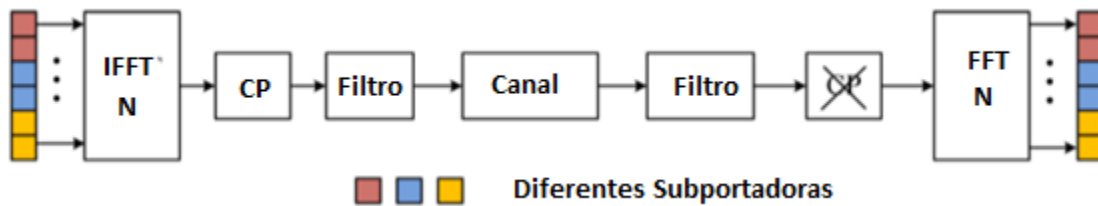
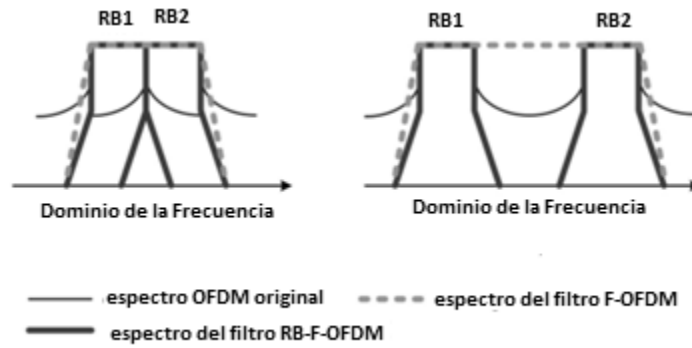


Figura 2.14 Estructura del sistema F-OFDM.

Posee una estructura similar con RB-F-OFDM cuando sólo hay un RB, excepto el upsampling y decimación. Y las OOB dependen de la estructura del espectro, como se muestra en la Figura 2.15



*Figura 2.15 Filtración de Banda Completa con a) RB continuos b) RB discontinuos.*

Como se observa en la *Figura 2.15* si los RB asignados son adyacentes en el dominio de frecuencia, generan un ancho de banda único por lo que las OOB pueden reducirse eficazmente usando el filtro de transmisión. Sin embargo, cuando no lo son, las OOB solo pueden reducirse en la banda de parada mientras que en la banda de paso no puede reducirla a diferencia de RB-F-OFDM que si lo realiza.

## Capítulo 3 Formas de Onda para 5G.

### 3.1 Introducción.

Las comunicaciones a través del canal de radio son consideradas una tarea desafiante que requiere de varias consideraciones en su diseño, especialmente cuando se trata del diseño de la forma de onda para la interfaz de radio de una nueva generación de sistemas celulares, debido a que deben proporcionar mejores características y mayores beneficios sobre la generación anterior. Razón por la cual, el objetivo de este capítulo es presentar las características y beneficios de las formas de onda más eficaces para la transmisión en la 5G de sistemas celulares.

#### 3.1.1 Principio OFDM.

En los sistemas celulares 4G específicamente en el estándar LTE la forma de onda utilizada es

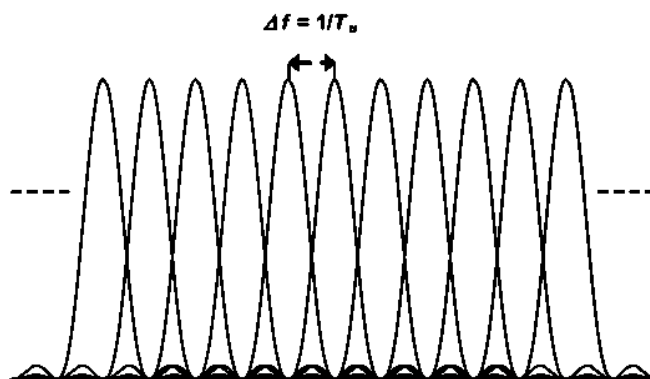
OFDM razón por la cual para abordar los nuevos diseños de forma de onda es necesario conocer el principio en que se basa OFDM. La idea básica de modulación multi portadora se basa en el principio de la transmisión de mensajes simultáneos a través de un canal libre de ICI (Inter Carrier Interference, Interferencia Inter Portadora) e ISI (Inter Symbol Interference, Interferencia Inter Símbolo), un ejemplo de ello es OFDM, la cual es una técnica que se beneficia de la Transformada Discreta de Fourier DTF para aumentar el rendimiento de la modulación y demodulación en banda base e incrementando la eficiencia del procesamiento.

El principio fundamental de un sistema OFDM es dividir el flujo de datos con velocidad  $W$  en  $N$  flujos de menor velocidad para ser transmitidos simultáneamente sobre un gran número de subportadoras ortogonales de banda angosta, típicamente bajo condiciones de propagación ideal por medio de IFFT, que junto con un intervalo de guarda entre cada símbolo OFDM proporciona robustez contra la transmisión multitrayecto.

La elección de subportadoras individuales es tal que, si son ortogonales entre sí o bien múltiplos de una frecuencia base, se permite la superposición de estas en el extremo receptor; y la separación se asegura con la ortogonalidad dando como resultado una mejor eficiencia



espectral. El receptor OFDM puede construirse como un banco de demoduladores e integrar después sobre un periodo de símbolo para recuperar los datos transmitidos. La superposición de subportadoras debe tener una separación entre ella un múltiplo de  $1 / T$  como se muestra en la Figura 3.1.



*Figura 3.1 Espectro de Símbolo OFDM.*

En cambio, se debe preservar la ortogonalidad entre ellas. Sin embargo, en un canal de tiempo dispersivo la ortogonalidad no se alcanza entre subportadoras, para lo cual se introduce la noción de CP (Cyclic Prefix, Prefijo Cíclico), que sugiere llenar el espacio de guarda con la extensión cíclica del símbolo OFDM el cual actúa como si estuviera realizando la convolución cíclica por él, con este proceso no solo se mantiene la ortogonalidad entre subportadoras también se evitan degradaciones por ISI e ICI.

### **3.2 Formatos de Modulación para redes 5G.**

En la actualidad OFDM ha sido adoptado como solución a los requerimientos de sistemas celulares actuales, principalmente debido a su robustez contra los canales multi camino y la facilidad de implementación de algoritmos basados en FFT. Sin embargo, proporciona consumo de energía ineficiente debido al requerimiento de estricta sincronización de ortogonalidad entre subportadoras, además, no posee baja latencia para cierto de tipo de aplicaciones y genera emisiones fuera de banda (OOB) por lo cual, su implementación no es la más prometedora para las redes de próxima generación. Debido a lo anterior, evaluaciones de diseños de forma de onda alternativos se han llevan a cabo para su implementación en la próxima generación de sistemas celulares como las que a continuación se presentan.

### 3.2.1 Banco de Filtros de Múltiple Portadora FBMC.

Uno de los sistemas de filtrado de múltiples portadoras más investigados es FBMC, el cual filtra las subportadoras individualmente para reducir las emisiones OOB. Donde, de acuerdo con el diseño del filtro, los niveles de lóbulo lateral son reducidos. La Figura 3.2 muestra el esquema de un transceptor de un sistema FBMC.

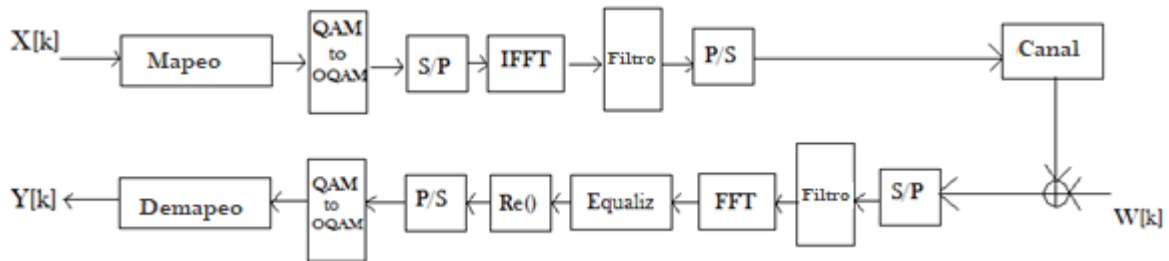


Figura 3.2 Transceptor de un sistema FBMC.

En otros tipos de filtros la ICI se evita al no permitir solapamiento, sin embargo, se desperdicia ancho de banda y la ortogonalidad es difícil de mantener. Para evitar lo anterior, FBMC permite la superposición del espectro de las subportadoras adyacentes, como en la Figura 3.3.

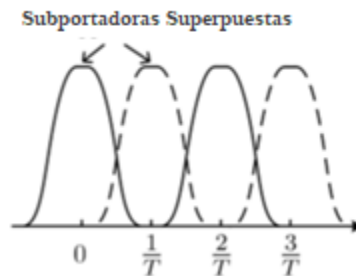


Figura 3.3 Espectro filtro de filtrado de subportadoras.

Esta técnica no aplica CP y por lo tanto es capaz de aproximarse a una eficiencia de tiempo-frecuencia (si el número de símbolos a transmitir tiende a infinito). Sin embargo, las longitudes del filtro son bastante largas (típicamente cuatro veces la longitud básica de símbolo) y en consecuencia los símbolos individuales se solapan en el tiempo lo cual resulta inadecuado para servicios de baja latencia. Los símbolos QAM se dividen en parte real e imaginaria con  $T/2$  de retardo entre componentes, luego, para lograr la ortogonalidad, se debe

aplicar O-QAM (offset-QAM, Compensación QAM) por lo que FBMC no es ortogonal con respecto al plano complejo. Algunas de las principales diferencias entre OFDM y FBMC son:

*Comunicaciones MIMO.* FBMC se utiliza solo en ciertas configuraciones MIMO mientras que OFDM es flexible totalmente.

*Comunicaciones de acceso múltiple.* En el enlace descendente, OFDM ofrece una menor complejidad, mientras que FBMC proporciona una mayor eficiencia de ancho de banda. En el enlace ascendente, FBMC es menos estricto respecto a la sincronización y no necesita técnicas de cancelación de interferencias como OFDM.

*Comunicaciones de radio cognitivas.* El filtrado de subportadoras en FBMC resulta ideal para redes radios cognitivas.

### **3.2.2 Filtrado Universal de Multiple Portadora UFMC.**

Esta forma de onda es una modificación de la forma de onda CP-OFDM. Esta técnica no aplica CP y realiza filtrado de sub-banda, es decir filtra un grupo de subportadora para reducir la emisión OOB con respuesta al impulso corta por lo que mejora la separación entre sub-bandas en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, debido a que no hay CP resulta inadecuado para aplicaciones que requieren sincronización de tiempo.

La Figura 3.4 representa el diagrama a bloques de un transceptor UFMC. Donde,  $X_k$  representa el vector de transmisión en el dominio del tiempo para un símbolo de multiportadora de un usuario y  $k$  representa la superposición de los componentes filtrados en banda secundaria cuya longitud de filtro es  $L$  y  $N$  es la longitud de FFT.

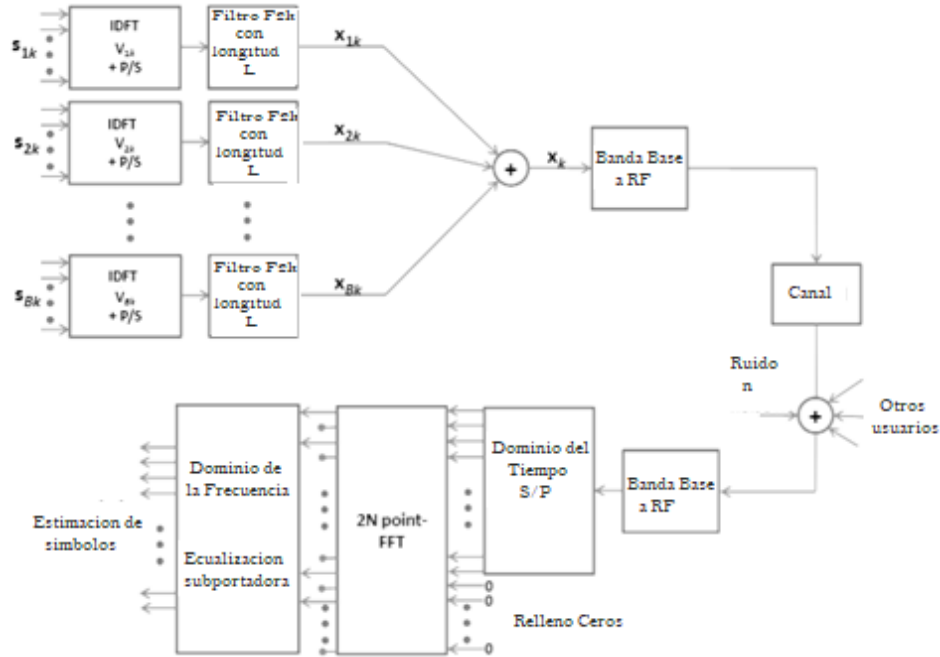


Figura 3.4 Transceptor de un sistema UFMC.

Al utilizar solo filtros de transmisión, la demodulación depende de un algoritmo 2N-point FFT para la recuperación de símbolos. Sin embargo, su rendimiento se degrada en comparación con OFDM. Algunas de las principales ventajas de UFMC son:

*Compatibilidad con OFDM:* permite reutilizar todos los esquemas diseñados para OFDM sin mayores modificaciones.

*Sincronización Relajado:* la inclusión eficiente de energía y de sobrecarga del tráfico MTC sin introducir interferencia severa.

*Soporte de transmisión de ráfaga corta.* No introduce sobrecarga de la señal excesiva gracias a su buena localización en el tiempo mientras que la mejora PAPR.

*Acceso fragmentado de espectro eficiente:* ya que se requieren menos controladores de frecuencia.

### 3.2.3 Multiplexaje por División de Frecuencia Generalizada GFDM.

Es una forma de onda de capa física unificada, puede trabajar ante requisitos de tiempo de respuesta corto y consumo de energía bajo para FRA (Future Ratio Access, Futuro Radio

Acceso). Además, los principales algoritmos de sincronización desarrollados para OFDM se pueden adaptar para GFDM.

GFDM se basa en la modulación de bloques independientes, cada bloque consta de una serie de subportadoras y subsistemas dados por  $MK$  donde  $K$  subportadoras portan  $M$  subsistemas cada uno. Las subportadoras pasan con un filtro que se desplaza circularmente en el dominio del tiempo y de la frecuencia para reducir las emisiones OOB, haciendo factible el espectro fragmentado dando lugar a subportadoras no ortogonales en donde puede existir ISI e ICI que mediante técnicas de cancelación de interferencias puede ser eliminado.

En un bloque GFDM, la sobrecarga se mantiene pequeña añadiendo un único bloque de CP o CS (Cyclic Sufix, Sufijo Cíclico). El diagrama a bloques de un transceptor GFDM se muestra en la Figura 3.5.

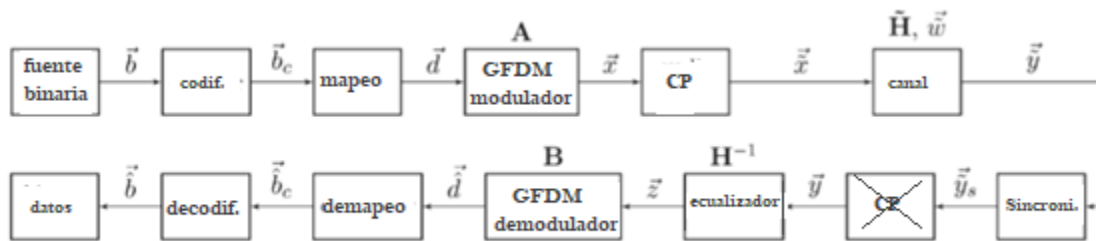


Figura 3.5 Diagrama a Bloques de un transceptor GFDM.

De acuerdo al diagrama, el vector resultante del mapeo QAM  $\vec{d}$ , es un bloque de datos de  $N$  elementos descompuesto en  $K$  subportadoras con  $M$  subsistemas cada uno. El número total de símbolos es dado por  $N=KM$ .

Los objetivos principales de GFDM son:

- Mejorar la eficiencia espectral al reducir las emisiones OOB.
- Obtener mayor robustez contra el desplazamiento de frecuencia portadora (CFO).
- Obtener mayor robustez contra el tiempo de muestreo.
- Obtener menor consumo de energía.

### 3.2.4 Filtrado-OFDM (F-OFDM).

El diseño de F-OFDM, se realizó para mejorar la contención espectral de señales de subportadora en OFDM, es compatible con MIMO, viable para acceso múltiple asíncrono y su PAPR se puede reducir fácilmente usando precodificación DFT como en DFT-S-OFDM. El rendimiento del filtrado se consigue sin añadir sobrecarga de señalización. Agrega un bloque de CP y logra una mejor localización de espectro mediante la supresión de las emisiones OOB por sub-banda.

El diagrama a bloques de un sistema F-OFDM se muestra en la Figura 3.6.

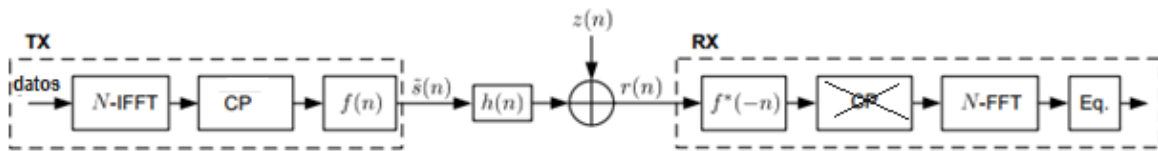


Figura 3.6 Diagrama a bloques de un sistema F-OFDM.

De acuerdo con el diagrama, el transmisor genera una señal OFDM asignado por M subportadoras consecutivas en una serie de símbolos OFDM consecutivos. Durante cada periodo de símbolo OFDM, el transmisor por medio de IFFT proporciona una longitud N, junto con M nuevos datos de símbolos con un CP.

El filtro  $f(n)$  está centrado en la frecuencia de las subportadoras asignadas, su ancho de banda es igual al total de la frecuencia de las subportadoras asignadas, y su tiempo de duración es una parte de una duración del símbolo OFDM.

En el lado del receptor, la señal recibida pasa primero a través del filtro  $f^*(-n)$  adaptado al transmisor. A la señal filtrada en símbolos OFDM consecutivos y CP, se le aplica una FFT de longitud N a cada símbolo OFDM para extraer los datos de los símbolos de las subportadoras correspondientes.

### 3.3 Esquema OFDM.

OFDM es un esquema que divide el rango de espectro disponible en varias subportadoras usando canales de banda estrecha para propagar los símbolos de los usuarios. De esta manera

se consigue un desvanecimiento plano y mayor eficiencia espectral al permitir que las subportadoras se solapen.

Cada subportadora es ortogonal y porta el símbolo de un solo usuario. Dado que se transmiten en paralelo, a cada usuario le corresponde una porción de banda y la duración del símbolo es más largo. Los modelos de sistemas OFDM se clasifican en dos clases: continuos en el tiempo y discretos en el tiempo.

### 3.3.1 Transmisor-Receptor OFDM.

Como ya se mencionó, la ortogonalidad en OFDM se puede mantener completamente, si se introduce un prefijo cíclico CP, el cual es una copia de la última parte del símbolo OFDM para tener una señal transmitida periódica. Sin embargo, el CP introduce una degradación de la SNR (Signal to Noise Ratio, Razón señal-ruido).

El modelo de un sistema OFDM se muestra en la Figura 3.7 para el transmisor y en la Figura 3.8 para el Receptor.

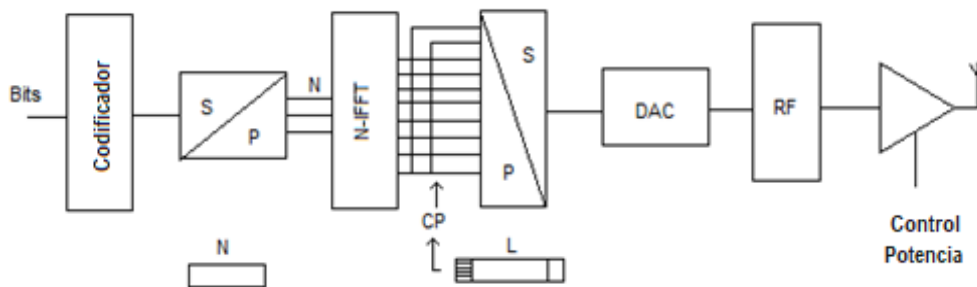


Figura 3.7 Diagrama a bloques de Transmisor OFDM.

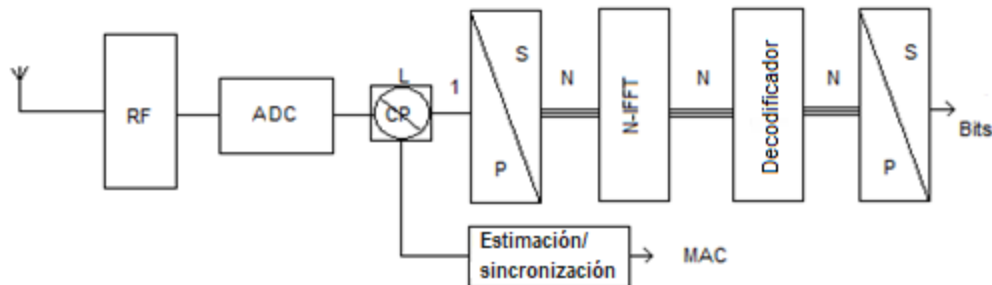


Figura 3.8 Diagrama a Bloques de Receptor OFDM.

Por otra parte, es importante que en un sistema OFDM se tomen en cuenta las siguientes consideraciones además del CP.

- El transmisor y receptor deben estar perfectamente sincronizados.
- El canal de ruido es aditivo, blanco Gaussiano.

### **3.3.2 Limitaciones OFDM.**

OFDM proporciona múltiples beneficios en los sistemas celulares actuales como: eficiencia espectral, confiabilidad ante pérdida de datos y gran robustez ante errores de codificación. Además, el nivel de ISI es menor ya que la tasa de datos es baja por subportadora. Sin embargo, al igual que cualquier otra tecnología posee ciertas desventajas en su diseño e implementación, las cuales dependiendo de la situación pueden o no ser ignoradas.

*Dispersión:* se presenta tanto en tiempo como en frecuencia, puede afectar completamente la ortogonalidad del sistema y provocar ISI e ICI si no son lo suficientemente mitigados por el CP.

*No linealidades y distorsión truncada:* tienen alta PARP (Peak-to-Average Power Ratio, Relación de Potencia Promedio a Pico) y alta demanda en amplificadores lineales. Las no linealidades de estos amplificadores provocan ISI e ICI causando una grave degradación en el sistema si el amplificador no tiene buen diseño.

*Eficiencia Espectral:* disminuye debido al uso del CP.

*Sensible a los problemas de sincronización de frecuencia:* El Transmisor y el receptor deben estar perfectamente sincronizados. Y la muestra del símbolo se debe tomar exactamente en el tiempo de señalización o no se podrá recuperar el símbolo.

### **3.3.3 Esquema SC-FDM.**

En la actualidad, el alto rendimiento en un sistema de radio es mayormente demandado y a pesar de que OFDM es un diseño con buenas características para el enlace de bajada en sistemas LTE, existen determinados requerimientos para el enlace de subida que no pueden ser provistos por este tipo de diseño, como bajo nivel de PAPR en la onda transmitida, bajo consumo de potencia en el UE y mejor rendimiento de enlace; por esta razón, se desarrolló



una variante de este diseño conocida como SC-FDM (Single Carrier Frequency Division Multiplexing, Multiplexaje por División de Frecuencia de Única Portadora), que similar a OFDM divide el ancho de banda en múltiples subportadoras manteniendo la ortogonalidad y añadiendo un intervalo de guarda en lugar de un CP como lo hace OFDM.

La diferencia en ambos diseños es que los símbolos SC-FDM se transmiten en serie a una velocidad cuatro veces mayor y no son directamente asignados a cada subportadora independiente como en OFDM. En su lugar, la señal asignada a cada subportadora es una combinación lineal de una transmisión de símbolos modulados en el mismo instante de tiempo. Otra diferencia con OFDM es un bloque adicional DFT antes del mapeo de subportadoras lo cual hace que sea un sistema de única portadora en donde cada una contiene información de todos los símbolos transmitidos y no de un símbolo único como OFDM.

Los símbolos en el dominio del tiempo modulados pasan por el bloque DFT en el transmisor, el cual los convierte al dominio de la frecuencia repartiéndolos en todas las subportadoras que ocupan el ancho de banda destinado al usuario, operación que debe ser removida en el receptor, por lo que en el receptor se añade un bloque IDFT que no existe en OFDM. Al realizar esta operación de precodificación se reduce el PAPR.

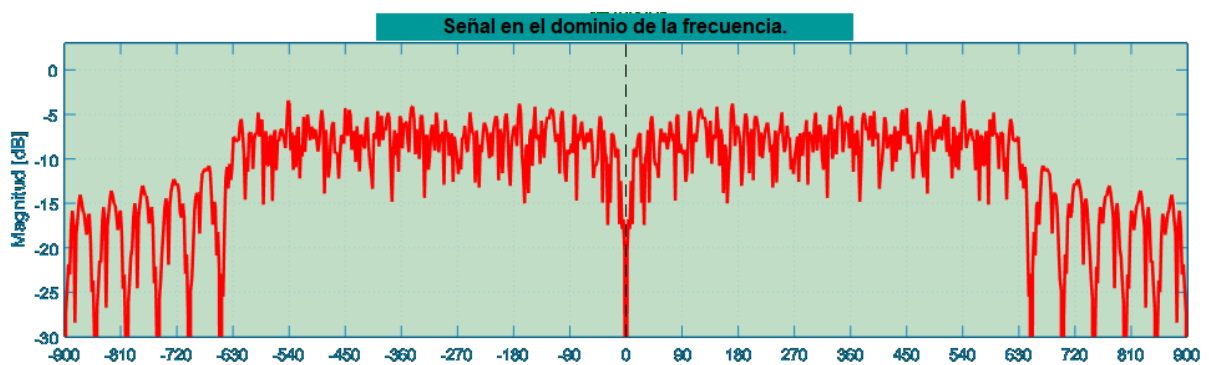
### **3.4 Diseño de Forma de Onda OFDM.**

Para el diseño de una forma de onda OFDM el mensaje generado en el transmisor es modulado a un formato PSK o QAM para la obtención de los símbolos digitales.

Siguiendo las bases de OFDM, se crea una portadora base y 11 subportadoras múltiplos de esa frecuencia. Conforme a lo anterior, las subportadoras utilizadas en este formato de modulación son ortogonales con un ancho de banda de  $f_0 - 12f_0$  para las 12 subportadoras.

Para el formato de los símbolos obtenidos de la modulación digital, los símbolos son separados en componente real R e imaginaria I para ser convolucionados por separado con un filtro pulso formador de tipo pulso cuadrado de longitud N, definida como la razón entre Frecuencia de señalización  $F_{sen}$  y la Frecuencia de muestreo  $F_s$ . Para realizar este proceso, es necesario que antes ambas componentes sean interpoladas con N-1 cantidad de ceros para la obtención correcta de los pulsos.

De este proceso se obtienen los símbolos digitales en banda base, los cuales deberán ser modulados en amplitud multiplicando la componente real por un coseno y la imaginaria por un seno negativo cuya frecuencia es determinada por la frecuencia de cada una de las 12 subportadoras. Para su transmisión, es necesario realizar la suma de las 12 subportadoras, obteniendo así, el símbolo OFDM en banda base que será enviado por el Transmisor. Operación que se facilita al tener una señal de tipo pasa banda lo cual se consigue al desplazar la señal a una frecuencia más alta determinada por una frecuencia de portadora, la cual se posiciona a cada usuario OFDM, lo anterior, capacita al sistema para enviar múltiples mensajes y distinguir a cada usuario con base en esa frecuencia. En cambio, si este desplazamiento no se realiza, al obtener el espectro de la señal la diferencia recaerá en que el espectro se encontrará centrado alrededor de la frecuencia 0 y no centrado en la frecuencia de la portadora como se observa en la Figura 3.9.



*Figura 3.9 Espectro de una señal OFDM.*

Como se puede apreciar en la Figura 3.9 la caída de los lóbulos laterales lo cual es un desperdicio en ancho de banda ya que interferirá a otros usuarios.

En muchas aplicaciones, el rendimiento de alta velocidad es necesario, y las técnicas convencionales de multiportadora generalmente no lo proporcionan; por lo que OFDM basa su procesamiento en la implementación de algoritmos IFFT y FFT en el transmisor y receptor OFDM respectivamente. El diseño OFDM anterior es realizado por varios bloques de procesamiento, los cuales gracias a estos algoritmos matemáticos se pueden sustituir por un solo bloque de procesamiento en el receptor aplicando IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, Transformada Rápida de Fourier Inversa), mientras el resto de los bloques se convierten en

datos de un formato a otro, resultando en una contribución del procesamiento principal otorgando, además, velocidad ante la misma cantidad de datos.

### **3.5 Diseño de Forma de Onda FBMC.**

Para el diseño de una forma de onda FBMC se realiza una compensación a los símbolos digitales obtenidos de la modulación digital con el fin de evitar cambios abruptos en la fase de los símbolos ya que son los causantes de las OOB. Una vez obtenidos los símbolos digitales se separan en componente Real R e Imaginaria I y se aplica un retraso  $T_{simbolo}/2$  a la componente imaginaria para el primer símbolo, mientras que la componente real del mismo símbolo comienza a ser enviada, para el siguiente símbolo la componente que es retrasada será la componente real mientras que la imaginaria será enviada con normalidad, para el tercer símbolo se volverá a retrasar la componente imaginaria mientras que la componente real se enviará con normalidad y así sucesivamente con cada nuevo símbolo que se envíe. Para realizarlo a nivel simulación se realiza un arreglo de 2 vectores en los que el vector 1 será compuesto por las componente reales de los símbolos impares intercaladas con las componentes imaginarias de los símbolos pares mientras el vector 2 se compondrá de las componentes imaginarias de los símbolos impares se intercaladas con las componentes reales de los símbolos pares, una vez realizada esta combinación de símbolos para poder realizar el retraso de los símbolos medio periodo de tiempo de símbolo es necesario duplicar cada valor de los vectores por posición; una vez realizado, el vector 2 será desplazado una posición en el vector lo cual equivale a retrasarlo medio tiempo de símbolo, este vector corresponderá a la componente imaginaria compensada de los símbolos digitales mientras el vector 1 corresponde a la componente real compensada. Una vez terminada esta codificación se procede a realizar la interpolación de los vectores compensados con N-1 cantidad de ceros, para realizar el proceso de convolución con un filtro pulso formador similar al de OFDM, el cual, es de tipo pulso cuadrado de longitud N definido de la misma manera en que OFDM lo define, con la diferencia de que la  $F_{sen}$  utilizada para este diseño es la mitad de la utilizada en OFDM para obtener la misma velocidad.

De este proceso se obtienen los símbolos digitales compensados en banda base, los cuales son modulados en amplitud multiplicando la componente real por un coseno y la imaginaria por un seno negativo cuya frecuencia es determinada por la frecuencia de cada una de las 12

subportadoras (una portadora base y 11 múltiplos de ellas) y sumadas para su transmisión; De este proceso se obtiene el símbolo FBMC el cual como ya se mencionó se puede desplazar a una frecuencia mayor para su transmisión; lo cual hace posible distinguir a cada usuario con base en ella. El espectro de la señal se puede ver en la Figura 3.10, dónde además se aprecia que la caída de los lóbulos laterales de la señal es más pronunciada que en OFDM tanto en sub-banda como entre subportadoras.

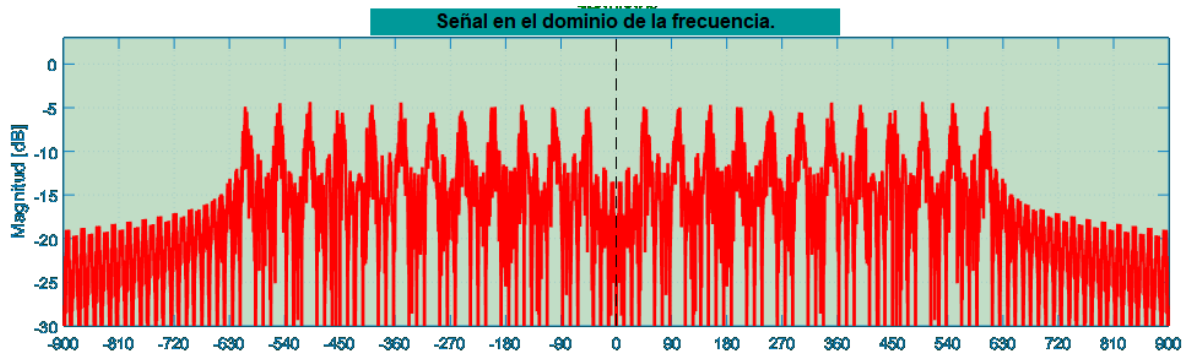


Figura 3.10 Espectro de una señal FBMC.

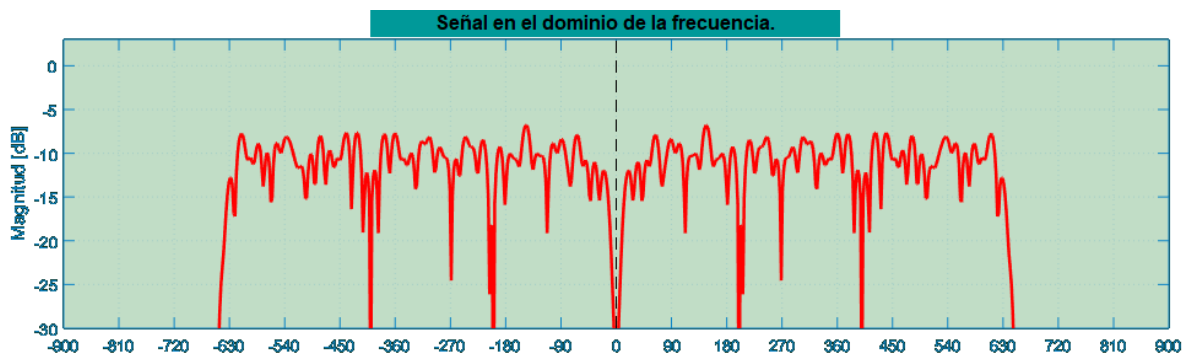
### 3.6 Diseño de Forma de Onda F-OFDM.

Para el diseño de una forma de onda F-OFDM el mensaje generado es modulado a un formato PSK o QAM para la obtención de los símbolos digitales. Similar a OFDM, se tiene una portadora base y 11 subportadoras múltiplos de esa frecuencia que resultan ser ortogonales debido a lo anterior.

Para el formato de los símbolos obtenidos de la modulación digital, de la misma manera que OFDM, los símbolos se separan en componente real R e imaginaria I para ser interpoladas con N-1 cantidad de ceros proceso seguido de una convolución con un filtro pulso formador, que a diferencia de la forma de onda de OFDM, el filtro pulso formador utilizado es de tipo coseno alzado, el cual proporciona mayor eficiencia en el ancho de banda de la señal. La longitud del filtro depende de la cantidad de lóbulos y la frecuencia de señalización de la señal.

De este proceso se obtienen los símbolos digitales en banda base los cuales deberán ser modulados en amplitud multiplicando la componente real por un coseno y la imaginaria por un seno negativo cuya frecuencia es determinada por la frecuencia de cada una de las 12

subportadoras y son sumadas para su transmisión. De este proceso se obtiene el símbolo F-OFDM, el cual, como ya se mencionó se puede desplazar a una frecuencia mayor para obtener una señal pasa banda y realizar transmisión de varios usuarios que serán distinguidos con base en esa frecuencia. El espectro de la señal observa en la Figura 3.11 donde además se puede apreciar que este tipo de técnica proporciona eficiente filtrado por sub-banda, en cambio entre subportadoras la caída de los lóbulos laterales es menor que la que proporciona FBMC.



*Figura 3.11 Espectro de una señal F-OFDM.*

Las nuevas formas de onda propuestas para 5G siguen la idea básica de multiportadora, con el abonado de poseer afinidad de filtrado de emisiones fuera de banda ya sea por subportadora o por bloque de recursos o subbanda. Actualmente existen varias propuestas basadas en este nuevo diseño, las cuales son abordadas en este trabajo, por lo cual en el siguiente capítulo se propone un generador de formas de onda capaz de reproducir algunas de estas técnicas para ser analizadas por medio de un osciloscopio y corroborar que efectivamente proporcionan un ancho de banda y supresión de OOB eficiente.

## **Capítulo 4. Generación de Formas de Onda Candidatas para 5G.**

### **4.1 Introducción.**

En este capítulo se explica el proceso empleado para llevar cabo el diseño de una forma de onda 5G con base en los requerimientos que el usuario solicite en cada uno de sus parámetros, mediante un generador de ondas diseñado en la herramienta de software matemático, MATLAB (versión R2015b a 64 bits). El generador presentado es una interfaz de usuario capaz de reproducir las formas de onda, OFDM, F-OFDM y FBMC cuyas características fueron explicadas en el capítulo anterior, y no tiene como objetivo ser un generador de tipo comercial; sin embargo es una herramienta que puede ser empleada eficazmente para el estudio y análisis de las características de diferentes formas de onda y por medio de él, aprender de manera ilustrativa los conceptos detrás de las técnicas de multiportadora y las técnicas de filtrado aplicadas a ellas para la obtención de mejores resultados.

### **4.2 Generador Propuesto.**

Actualmente los estándares para la forma de onda que será utilizada en 5G aún no son especificados, por lo que el generador de formas de onda propuesto, tiene como finalidad proporcionar las características temporales y espectrales de una forma de onda para su comprensión, las cuales siguen los conceptos base para su creación pero no especifica de manera fija los parámetros como pueden ser la frecuencia de portadora o frecuencia de muestreo con la cual trabajar, permitiendo al usuario decidir cada uno de los parámetros con los cuales quiere crear cada una de las formas de onda para su estudio.

#### **4.2.1 Diagrama a Bloques.**

Las características de las formas de onda que el generador posee varían para cada una de ellas, por lo cual, el proceso para su reproducción depende de diferentes parámetros como se muestra a continuación en el diagrama de flujo de la Figura 4.1 .

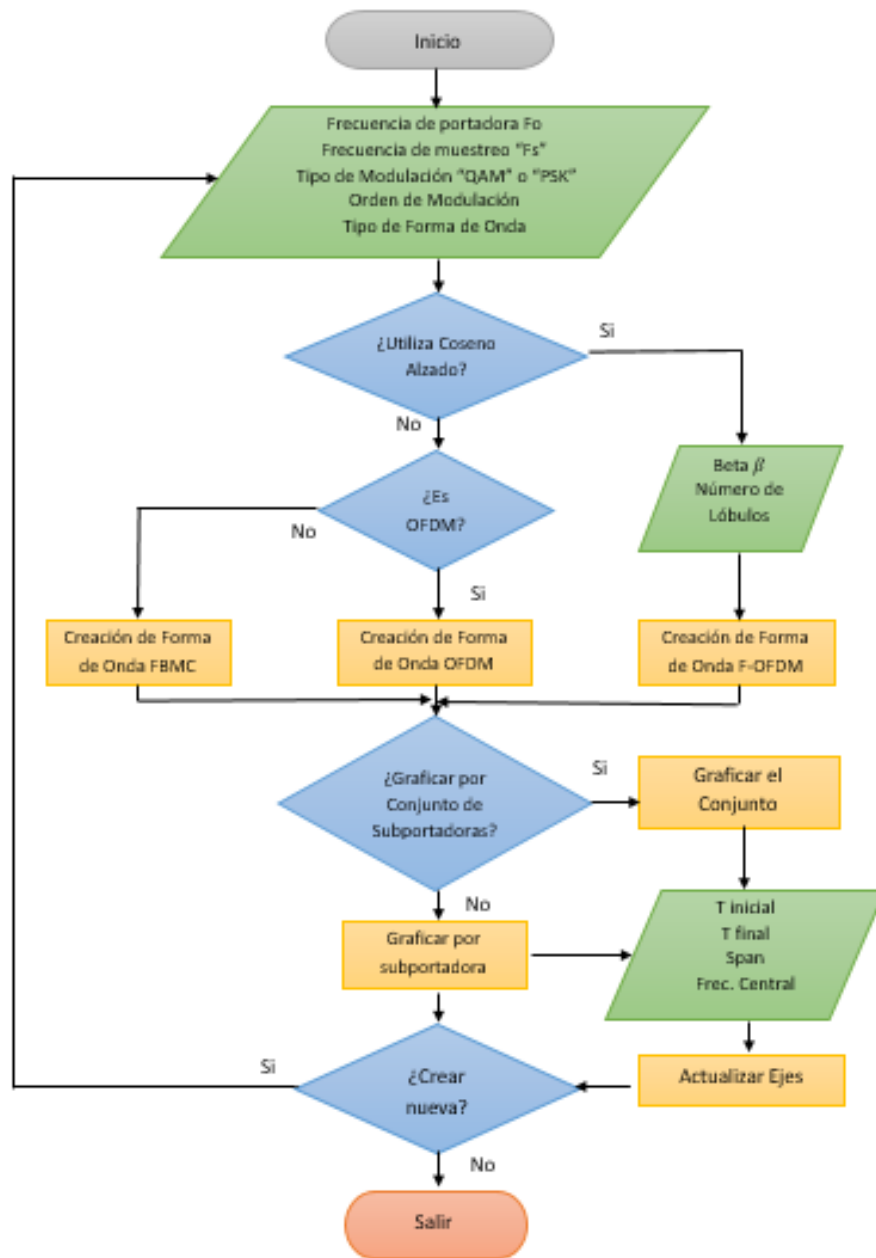


Figura 4.1 Diagrama de flujo del Generador de Formas de Onda.

#### 4.2.2 Especificaciones Técnicas.

El generador de formas de onda propuesto tiene la capacidad de reproducir 3 tipos de forma de onda. La primera forma de onda que capaz de reproducir es OFDM, la cual a pesar de no ser propuesta para 5G es introducida al generador para que con base en ella se realice la comparación con las otras dos formas de onda propuestas; además, esta de forma de onda es

la base para la comprensión del diseño de formas de onda de multiportadora. Las otras dos formas de onda que contiene fueron seleccionadas con el fin de mostrar dos de las técnicas de filtrado que se proponen para 5G, que son: filtrado por subportadora para FBMC y filtrado de banda para F-OFDM. Los parámetros que pueden ser ingresados por el usuario dependerán del tipo de forma de onda que él mismo solicite, siendo la frecuencia de portadora ( $F_0$ ), la frecuencia de muestreo ( $F_s$ ), el tipo de modulación (QAM o PSK) y el Orden de modulación los parámetros básicos, necesarios para cada uno de estos diseños. En el caso de las formas de onda OFDM y FBMC, los parámetros a ingresar son únicamente los anterior mencionados, mientras que para el tipo de Forma de onda F-OFDM, es necesario que además de los parámetros anteriores se ingresen los parámetros Beta  $\beta$  y la cantidad de lóbulos del filtro de coseno alzado, ya que a diferencia de las otras dos formas de onda no hace uso de un filtro pulso formador de tipo pulso rectangular.

Una vez generada la forma de onda con los valores ingresados por el usuario, el generador proporciona dos gráficas, las cuales muestran la señal tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de frecuencia; además, es capaz de proporcionar la opción de realizar la gráfica ya sea por portadora, hasta el número solicitado de portadoras teniendo como máximo 12 basados en el estándar de OFDM, o como la suma de todo el bloque de recursos o conjunto de subportadoras. Para el análisis de dichas gráficas, el generador tiene la opción de ajustar los ejes de tiempo y frecuencia de la correspondiente gráfica a los solicitados por el usuario para obtener una mayor resolución.

### **4.3 Interfaz Gráfica.**

La vista general de la interfaz gráfica del generador de formas de onda se muestra en la Figura 4.2, en ella se pueden apreciar cada uno de los parámetros que se permiten ingresar al usuario, además de las dos tipos de graficas que es capaz de producir junto con la selección de resolución que el usuario desee.





Figura 4.2 Vista General del Generador.

En la sección correspondiente a Forma de Onda 5G, las funciones son las siguientes:

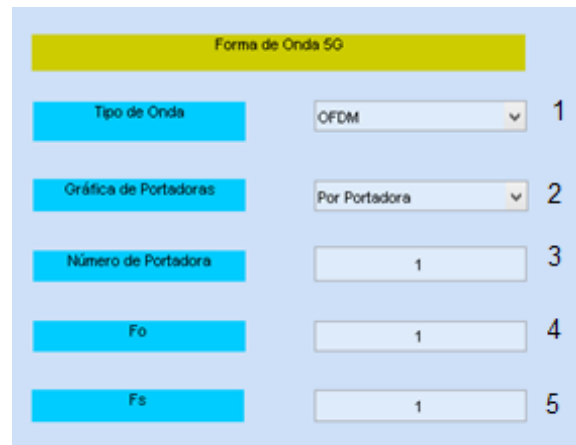
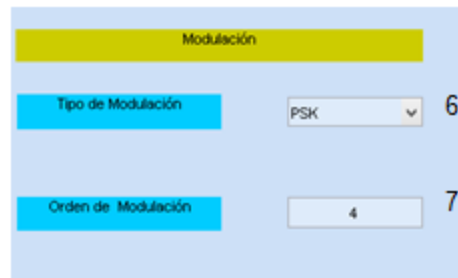


Figura 4.3 Datos de Diseño.

1. *Tipo de Onda*: despliega un menú para seleccionar entre las formas de Onda OFDM, F-OFDM y FBMC.
2. *Gráfica de Portadoras*: despliega un menú para seleccionar entre graficar varias subportadoras o la suma de ellas.
3. *Número de Portadora*: permite ingresar hasta que numero de portadora el usuario desea visualizar, el máximo es 12.
4. *Fo*: permite ingresar el valor de la frecuencia de portadora base.

5.  $F_s$ : permite ingresar el valor de la frecuencia de muestreo.

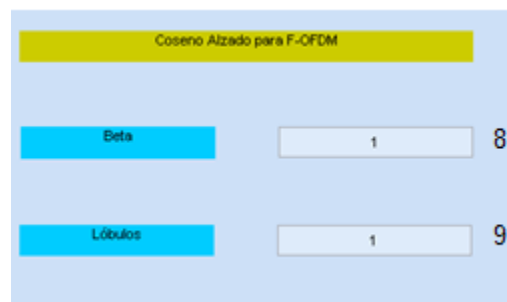
Para la sección de modulación, las funciones son las siguientes:



*Figura 4.4 Datos de Modulación.*

6. *Tipo de Modulación*: despliega un menú que permite seleccionar entre el tipo de Modulación “QAM” o “PSK”
7. *Orden de Modulación*: permite ingresar el orden de modulación deseado. Nota debe cumplir ser potencia de base 2.

Para la sección de Coseno Alzado para F-OFDM, las funciones son las siguientes:



*Figura 4.5 Datos para Coseno Alzado de F-OFDM.*

8. *Beta*: permite ingresar el factor de caída deseado.
9. *Lóbulos*: permite ingresar la cantidad de lóbulos con los que se requiera trabajar.

Para la resolución de los ejes de las gráficas, las funciones son las siguientes:

Figura 4.6 Datos para resolución de Gráficas.

10. *Tiempo Inicial*: ajusta el tiempo inicial de la gráfica en el dominio del tiempo a escalas de tiempo [s], [ms], [ $\mu$ s] y [ps].
11. *Tiempo Final*: ajusta el tiempo final de la gráfica en el dominio del tiempo a escalas de tiempo [s], [ms], [ $\mu$ s] y [ps].
12. *Frecuencia Central*: ajusta la frecuencia central de la gráfica en el dominio de la frecuencia la escala es [Hz].
13. *Span*: permite seleccionar los límites de frecuencia en los que se graficara en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 4.2 se pueden observar las gráficas en el dominio del tiempo y la frecuencia cuyas funciones 10, 11, 12 y 13 proporcionan resolución de los ejes.

Funciones de Proceso:

Figura 4.7 Funciones de Proceso.

14. *Procesar*: Presione para crear una nueva forma de onda, al modificar la forma en que se grafican las portadoras o al modificar la cantidad de subportadoras a graficar.
15. *Actualizar*: presione cada aplicar los ajustes de los límites de las gráficas.
16. *Salir*: Presiones para salir de la Interfaz de usuario.

## 4.4 Formas de Onda Generadas.

Para la creación de Formas de Onda, el generador internamente reproduce un mensaje aleatorio el cual es modulado a un formato digital ya sea QAM o PSK y aplica las técnicas de filtrado explicadas en el capítulo 3 dependiendo el tipo de onda que el usuario solicite, para luego modular el mensaje a una frecuencia determinada por un bloque de recursos de 12 subportadoras. El aspecto obtenido de cada forma de onda será determinado precisamente por la técnica de filtrado utilizada y de los valores ingresados por el usuario; dichos valores únicamente realizan un cambio en la velocidad de las portadoras más no en su apariencia, al igual que los formatos de modulación digital no deben interferir en el ancho de banda de la señal.

### 4.4.1 OFDM.

Como ya se mencionó, OFDM es la forma de onda utilizada en el estándar LTE de 4G y es la base para la comprensión de las formas de onda de múltiple portadora. Para la generación de una forma de onda OFDM se ingresaron los valores de  $F_o = 50$  Hz,  $F_s = 200$  KHz, formato de modulación PSK y orden de 256 para enviar un único mensaje aleatorio. La gráfica en el dominio del tiempo obtenida de estos valores se observa en la Figura 4.8, y es la suma de las 12 subportadoras de OFDM, que como se explicó en el capítulo 3 representa el símbolo OFDM que será transmitido.

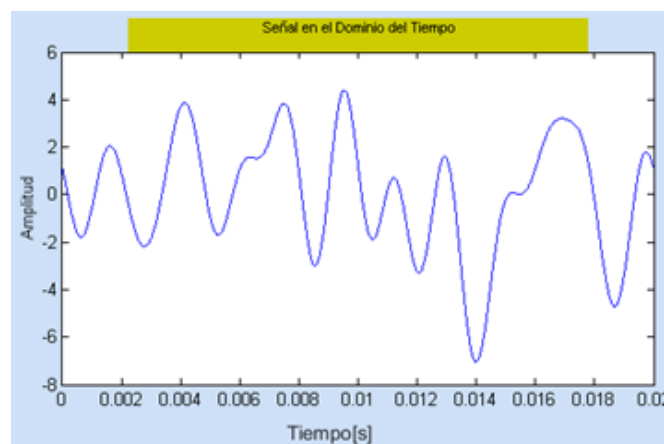


Figura 4.8 Conjunto de Portadoras OFDM en el dominio del Tiempo.

Como se puede observar, el periodo de la señal es de 20ms, lo cual concuerda con el valor de  $F_o = 50$  Hz recordando que el periodo de una señal se determina por  $T_o = 1/F_o$ , de manera

que sí se grafica cada una de las subportadoras el periodo deberá ser el mismo para la primer portadora e irá disminuyendo conforme se multiplique la frecuencia, es decir realizará más ciclos en el mismo intervalo de tiempo, como se muestra en la Figura 4.9.

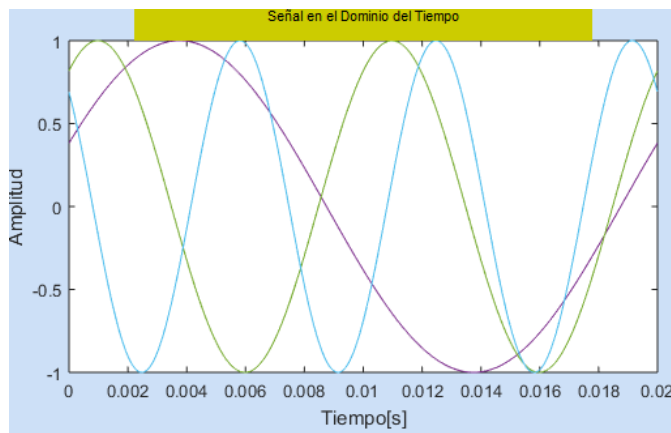


Figura 4.9 Gráfica por subportadoras OFDM en el dominio del tiempo.

En cambio, la Figura 4.10 representa el espectro del símbolo OFDM transmitido, en el cual se puede apreciar que el ancho de banda de la señal es de 0-625Hz. El cual, coincide con el ancho de banda que muestra la Figura 4.11 la cual realiza la gráfica de las 12 subportadoras por separado. Otro aspecto importante es que ante los mismos valores de frecuencia, pero diferentes tipos de modulación (PSK para el conjunto de portadoras y QAM para la representación de subportadoras por separado) el ancho de banda obtenido es el mismo.

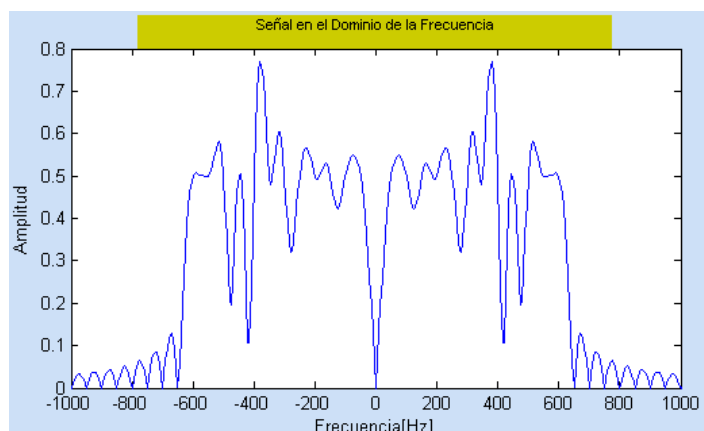


Figura 4.10 Espectro de un conjunto de Portadoras OFDM.

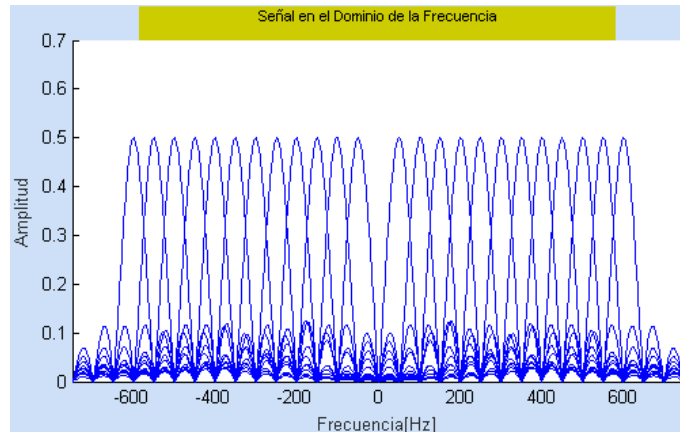
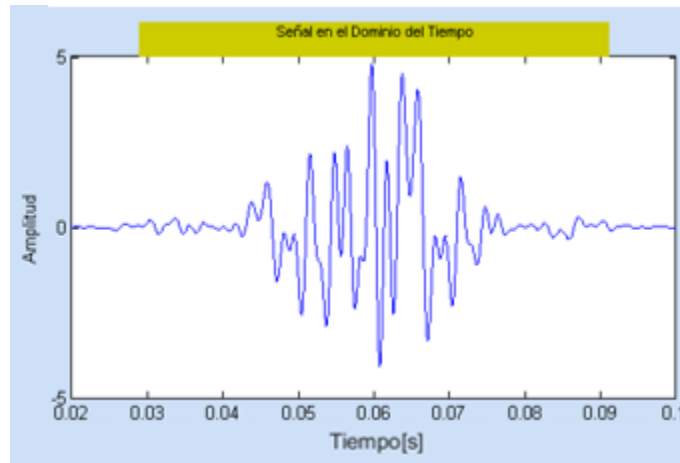


Figura 4.11 Espectro de 12 subportadoras OFDM.

Sin embargo en la Figura 4.11 se observa que los lóbulos laterales de las 12 subportadoras no son suprimidos, lo cual es una de las razones por las cuales mantener la estricta ortogonalidad en OFDM es de suma importancia, puesto que cada uno de esos lóbulos laterales, en el punto máximo de cualquier otra subportadora tiene un valor de amplitud nulo; sin embargo, si la ortogonalidad entre subportadoras se pierde, el valor de esos lóbulos laterales no es nulo lo cual provocaría interferencia con la siguiente subportadora.

#### 4.4.2 F-OFDM.

Una de las técnicas de filtrado de banda completa es la técnica conocida como F-OFDM la cual difiere de OFDM en el tipo de filtro que utiliza (filtro de coseno alzado). Esta técnica es capaz de suprimir las emisiones fuera de banda (OOB) de una banda completa como lo son el bloque de recursos de 12 subportadoras que utiliza OFDM. Para la generación de una forma de onda F-OFDM se ingresaron los valores utilizados en la generación de una forma de onda OFDM ( $F_o = 50$  Hz,  $F_s = 200000$  Hz, formato de modulación PSK y orden de 256), con la finalidad de realizar la comparación espectral y temporal; además de los valores de  $\beta = 0.75$  y lóbulos = 3. La grafica en el dominio del tiempo se observa en la Figura 4.12, y representa el símbolo F-OFDM.



*Figura 4.12 Conjunto de Portadoras F-OFDM en el dominio del Tiempo.*

Como se puede observar, el período de la señal ya no es 20ms como en OFDM a pesar de utilizar las mismas velocidades, lo anterior es debido a la utilización del filtro de coseno alzado, el cual depende de la cantidad de lóbulos y el factor de caída utilizados, los cuales provocan que en un intervalo de tiempo menor la señal disminuya más rápido por lo que después de cierto intervalo la señal es muy aproximada a cero. Además, igual que con OFDM, F-OFDM posee el mismo intervalo de tiempo en su señal sin importar si la gráfica se realiza por el conjunto de portadoras como por subportadora.

El espectro del símbolo F-OFDM se puede observar en la Figura 4.13, en ella se observa que el ancho de banda de la señal F-OFDM es de 0-625Hz, el cual coincide con el ancho de banda que muestra la Figura 4.14 que grafica por subportadoras y no se modifica a pesar de utilizar con un formato de modulación de tipo QAM.

Otro aspecto importante, en esta técnica de filtrado, los lóbulos laterales que existían en OFDM al inicio y final de la banda son suprimidos.

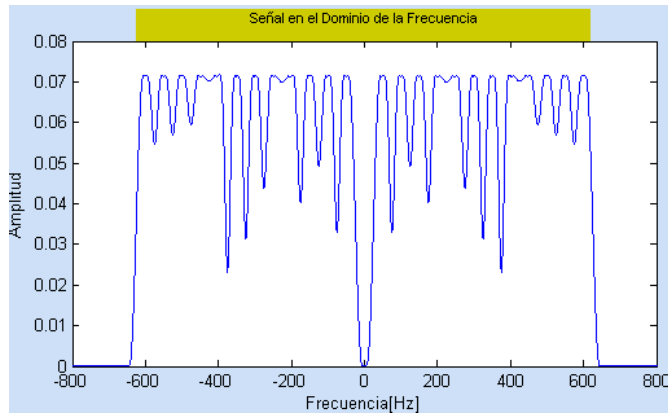


Figura 4.13 Espectro de un conjunto de subportadoras F-OFDM.

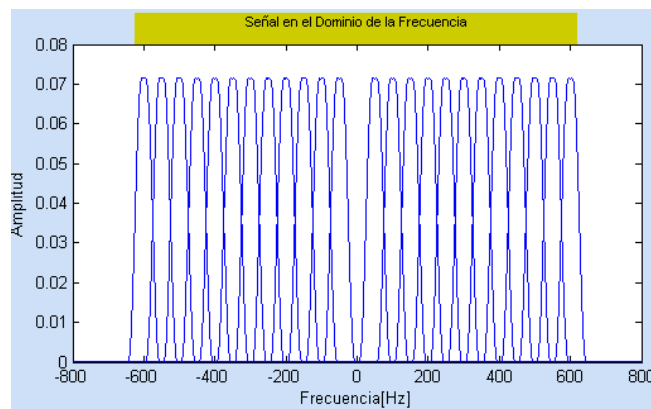


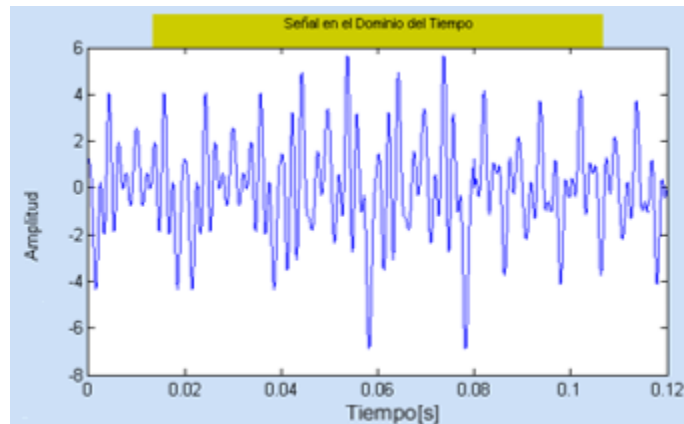
Figura 4.14 Espectro de 12 subportadoras F-OFDM.

### 4.4.3 FBMC.

Dentro del filtrado de Subportadora se encuentra la forma de onda FBMC la cual aplica una técnica de compensación a los símbolos digitales obtenidos de la modulación digital, mejor conocida como O-QAM, la cual fue explicada en el capítulo 3 en el apartado “Diseño de Forma de Onda FBMC”. En esta técnica, la transmisión de los símbolos digitales se realiza con retrasos de  $\frac{T_{\text{simbolo}}}{2}$  entre componentes alternadas, cuestión que necesita que la  $F_{\text{sen}}$  sea la mitad de la utilizada en OFDM para obtener la misma eficiencia espectral y que el generador realiza internamente; de lo contrario, el ancho de banda de la señal será el doble. Utilizando los mismos valores de OFDM para la generación de una forma de onda FBMC ( $F_0 = 50$  Hz,  $F_s = 200000$  Hz, formato de modulación PSK y orden de 256), la señal en el dominio del tiempo que representa al símbolo FBMC se observa en la Figura 4.15; en ella se observa que la duración de la señal es mayor en comparación con OFDM lo cual se debe



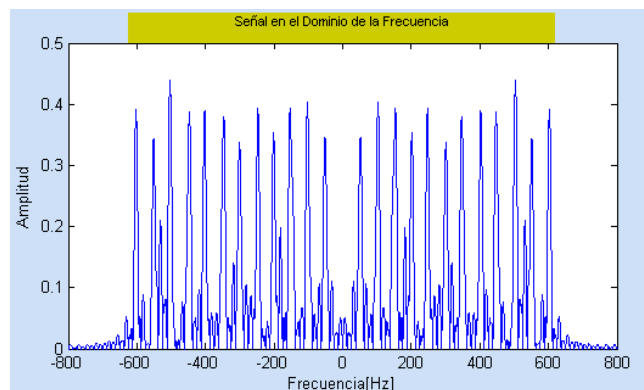
a que los símbolos son enviados cada  $\frac{T_{simbolo}}{2}$ , provocando que la señal obtenida después de la interpolación de los símbolos sea de mayor longitud como se explicó en el capítulo 3.



*Figura 4.15 Conjunto de Portadoras FBMC en el dominio del Tiempo.*

Además, de la misma manera que en OFDM, la gráfica por subportadoras en FBMC posee el mismo intervalo de frecuencia que la gráfica del conjunto de subportadoras.

El espectro del símbolo FBMC se puede observar en la Figura 4.16, en la cual realizando la comparación con OFDM se observa que el ancho de banda de la señal FBMC es el mismo que en OFDM, la diferencia recae en que el filtrado de emisiones fuera de banda se realiza entre subportadoras lo cual se traduce en una menor interferencia entre subportadoras, además, comparando con la Figura 4.17, los espectros son muy similares si se grafican ya sea como el conjunto de subportadoras o por separado ya que el filtrado se realiza precisamente por subportadora.



*Figura 4.16 Espectro de un conjunto de subportadoras FBMC.*

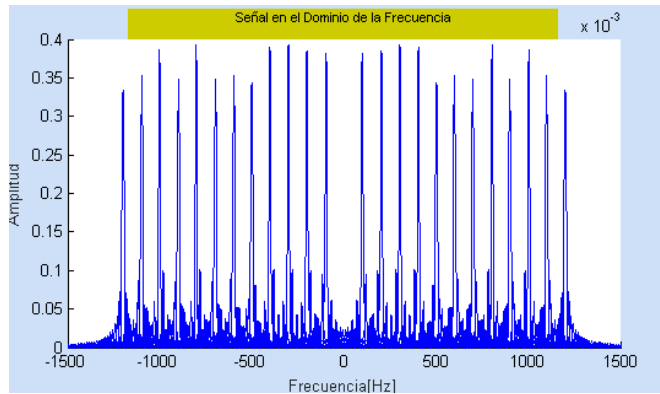


Figura 4.17 Espectro de 12 subportadoras FBMC.

## 4.5 Escenarios de Prueba.

Para obtener las mediciones de las señales tanto en el dominio de tiempo como en el dominio de la frecuencia se empleó una tarjeta que contiene un circuito conversor de señales digitales a analógicas<sup>12</sup> el cual se observa en la Figura 4.18. La tarjeta proporciona señales que se encuentran en el rango de 0-5 V de amplitud y hace uso de memorias EEPROM en las cuales se realizó el grabado de las señales digitales obtenidas mediante el generador de formas de onda, para después proporcionar la señal que fue enviada al osciloscopio para su medición; además, la tarjeta fue alimentada por un generador de funciones con el fin de obtener una señal estable cuya frecuencia a proporcionar debe ser igual a la frecuencia de muestreo utilizada en la generación de las señales grabadas en las memorias.

<sup>12</sup> La tarjeta utilizada fue desarrollada en la Tesis “Diseño y construcción de un generador de señales para un sistema de transmisión digital” en 2016.

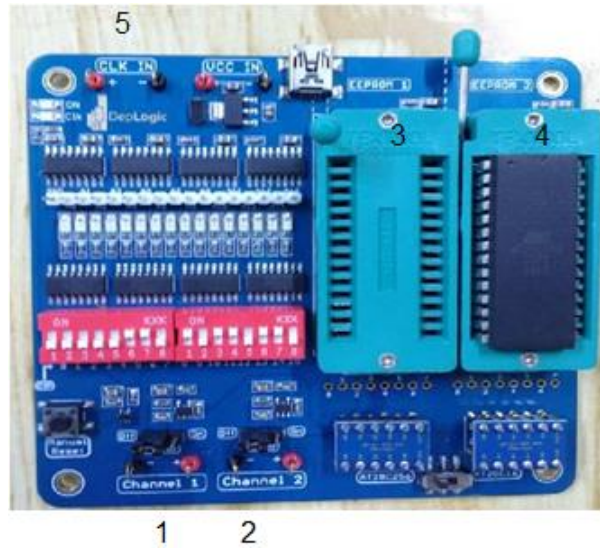


Figura 4.18 Circuito conversor de señales digitales a analógicas.

Los componentes utilizados para la medición de las señales son las siguientes<sup>13</sup>:

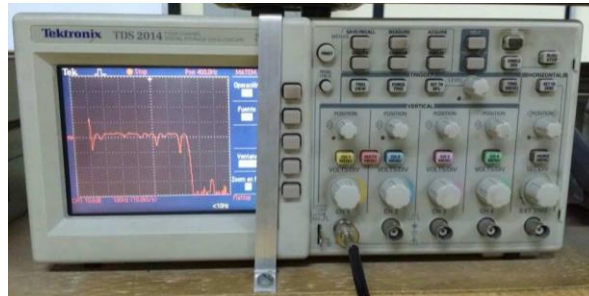
1. Channel 1: estas terminales son utilizadas para conectar la señal al osciloscopio.
  2. Channel 2: estas terminales son utilizadas por si se requiere conectar más de una señal al osciloscopio.
- Nota: La grabación de las memorias EEPROM, se realizó por medio del programa EasyProg, por medio de un grabador de muestras.
3. EEPROM1: aquí se inserta la memoria EEPROM AT28C256 con 32 mil localidades de 1 byte que contiene la señal digital a medir.
  4. EEPROM2: aquí se permite insertar una segunda memoria EEPROM AT28C256 con 32 mil localidades de 1 byte por si se requiere conectar más de una señal al osciloscopio.
  5. CLK IN: estas terminales se conectan a un generador que proporcionara la frecuencia de muestreo de la señal, la cual debe cumplir ser la misma que la establecida en el generador.

El escenario de pruebas que contiene las conexiones al generador (RIGOL modelo DG-2041A) y el osciloscopio (Tektronix modelo TDS-2014 de 4 canales) por medio de la tarjeta se observa en la Figura 4.21.

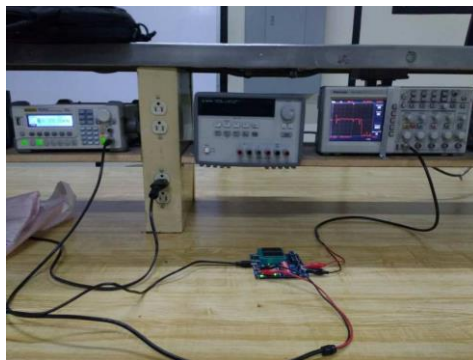
<sup>13</sup> Para mayores detalles acerca de los componentes de la tarjeta, los esquemáticos se encuentran en el Anexo 10.



*Figura 4.19 Generador RIGOL modelo DG-2041A.*



*Figura 4.20 Osciloscopio Tektronix modelo TDS-2014 de 4 canales*



*Figura 4.21 Escenario de Pruebas.*

## **4.6 Resultados.**

En esta sección se presentan las mediciones de manera física de las características temporales y en frecuencia de las formas de onda creadas por el generador, medidas en el osciloscopio con ayuda de un circuito conversor de señales para realizar la comparación con las gráficas obtenidas con la finalidad de comprobar que efectivamente los parámetros en tiempo y frecuencia medidos son los mismos que los parámetros obtenidos por medio de la interfaz. Para realizar las mediciones, es necesario que la  $F_s$  que se proporcione a la tarjeta sea la misma que la  $F_s$  utilizada para la generación de las diferentes formas de onda.

### 4.6.1 Formas de Onda Temporales.

Para la presentación de evidencias de los tres tipos de forma de onda, la reproducción de cada una de ellas se realizó con una  $F_o=50\text{Hz}$  y una  $F_s= 200\text{kHz}$ . El tipo de modulación empleado para OFDM fue PSK con un orden de 256, para ello, la gráfica analizada es la representación del conjunto de subportadoras, es decir el símbolo OFDM, como he ha explicado anteriormente; la gráfica puede observarse en la Figura 4.22. Una vez creada la forma de onda con el generador, las muestras de la señal temporal OFDM fueron grabadas en la memoria EEPROM de la tarjeta para ser conectada al osciloscopio y de esta manera obtener la señal temporal en el osciloscopio como la que se muestra en la Figura 4.23.



Figura 4.22 Símbolo OFDM obtenido del generador.

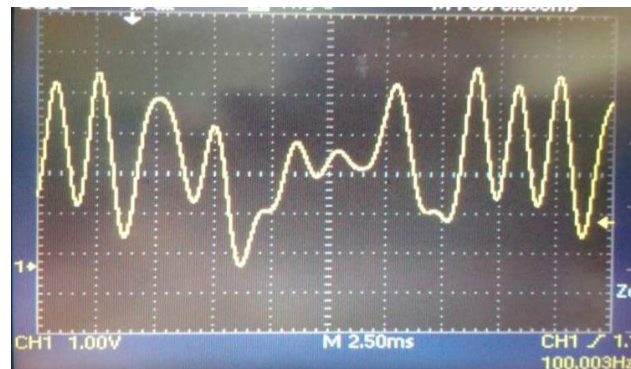


Figura 4.23 Símbolo OFDM medido en el osciloscopio.

Como se puede observar, las señales poseen similitud que tienen entre ellas, con la diferencia de que en el generador solo se muestra un ciclo de la señal mientras que en el osciloscopio la señal se muestra periódicamente por lo que se pueden ver porciones de la señal que comienzan a reproducirse nuevamente a los costados.

En el caso de la forma de Onda F-OFDM los parámetros utilizados son los mismos para  $F_o$ ,  $F_s$  y el orden de modulación mientras que el tipo de modulación utilizado es QAM; la finalidad de utilizar un tipo de modulación diferente es para que en el momento de analizar el espectro de la señal se observe que el tipo de modulación no tienen efecto en el ancho de banda. La gráfica obtenida del generador se observa en la Figura 4.24. Mientras que la señal temporal obtenida en el osciloscopio por medio de las muestras proporcionadas por el generador se muestra en la Figura 4.25. De la misma manera, al comparar ambas figuras se puede observar la similitud que poseen.

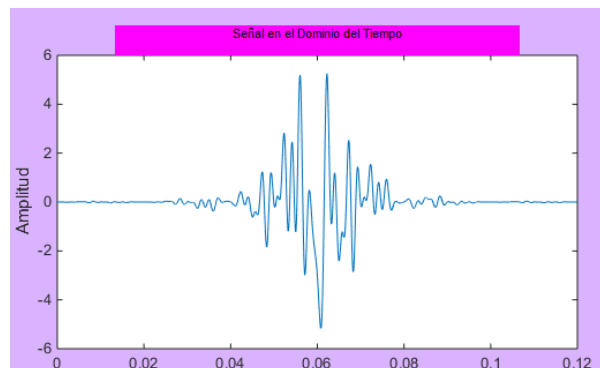


Figura 4.24 Símbolo F-OFDM obtenido del generador.

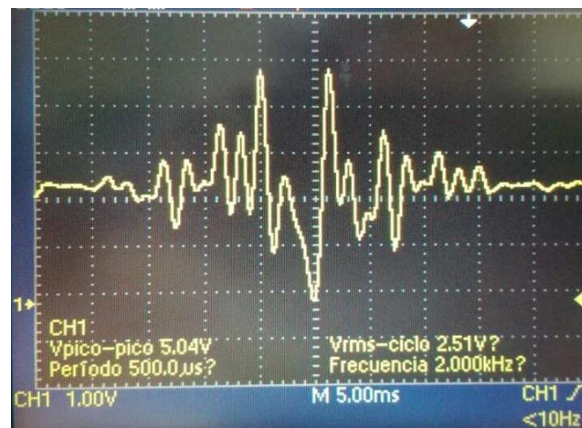


Figura 4.25 Símbolo F-OFDM obtenido en el osciloscopio.

La última forma de Onda es FBMC; para su reproducción se utilizan los mismos parámetros que las formas de onda anteriores. La gráfica obtenida del generador se observa en la Figura 4.26. Mientras que la señal temporal obtenida en el osciloscopio se muestra en la Figura 4.27. De la misma manera, al comparar ambas figuras se puede observar la similitud que poseen

dentro del intervalo mostrado, recordando que en el osciloscopio la señal se muestra de manera periódica.

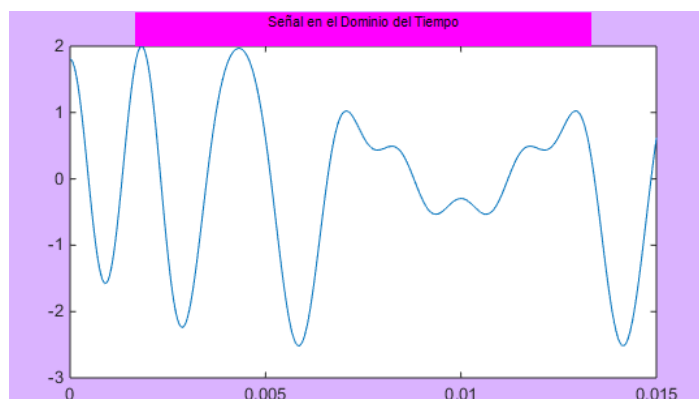


Figura 4.26 Símbolo FBMC obtenido del generador.

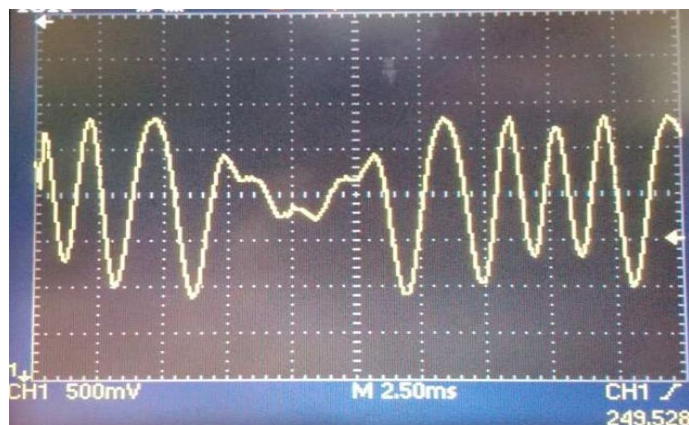


Figura 4.27 Símbolo FBMC obtenido del osciloscopio.

#### 4.6.2 Espectros de Frecuencia Obtenidos.

La obtención del espectro de la forma de Onda OFDM en el osciloscopio se realizó a partir de las muestras grabadas en la memoria EEPROM de la tarjeta de la señal temporal; la obtención del espectro del generador se obtuvo directamente al generar la forma de onda y se puede observar en la Figura 4.28. Mientras que, para obtener el espectro en el osciloscopio, se aplicó la función de IFFT obteniendo el espectro mostrado en la Figura 4.29.

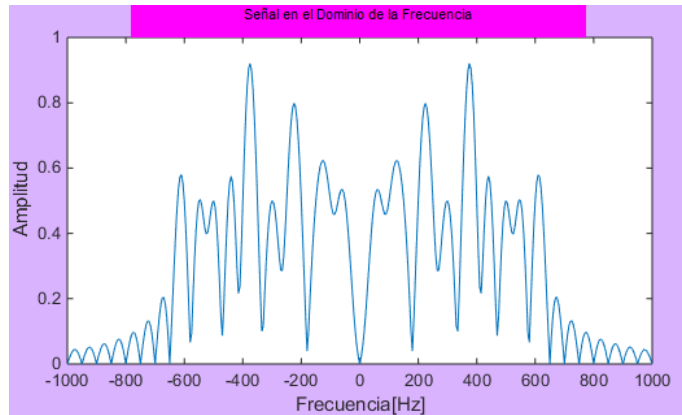


Figura 4.28 Espectro del símbolo OFDM obtenido del generador.

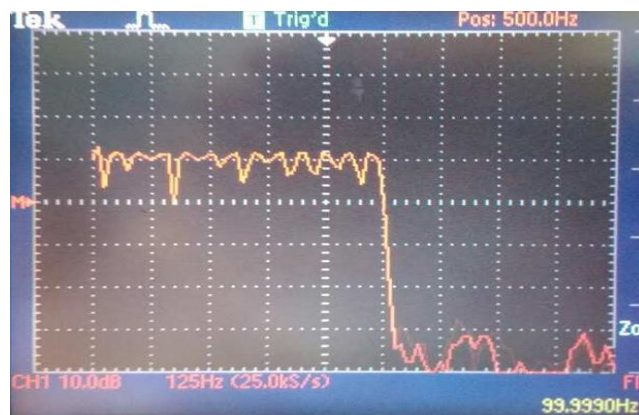


Figura 4.29 Espectro del símbolo OFDM en el osciloscopio.

Como se puede observar en ambas figuras el ancho de banda obtenido es de 625Hz para la señal obtenida en el generador mientras que para la señal obtenida del osciloscopio al ocupar 5 divisiones de 125Hz la señal abarca los mismos 625 Hz de la señal del generador. En cambio la diferencia de las señales es debida a la resolución de amplitud que se tiene de cada una.

Algo similar sucede con la obtención de espectro de una señal F-OFDM en el que el ancho de banda obtenido en la Figura 4.30 es de 625Hz al igual que el de la Figura 4.31, el mismo que el obtenido en OFDM a pesar de haber utilizado un tipo de modulación digital diferente, en ellas además se puede observar que al término de la banda son menores las emisiones OOB.



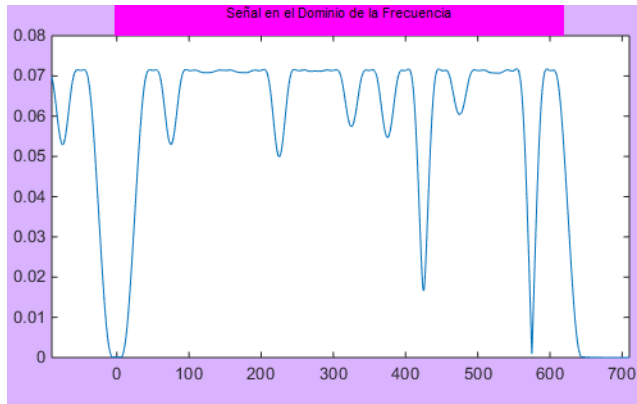


Figura 4.30 Espectro del símbolo F-OFDM del generador.



Figura 4.31 Espectro del símbolo F-OFDM en el osciloscopio.

Para finalizar, al obtener el espectro de una señal FBMC, el ancho de banda obtenido es el mismo que el de las dos formas de onda anteriores, lo cual se debe a que la frecuencia de portadora utilizada para cada una de ellas fue del mismo valor por lo cual su espectro debe abarcar el mismo ancho de banda tanto para la señal obtenida del generador como el de la Figura 4.32 y corresponder a la medición del osciloscopio como lo hace la Figura 4.33.

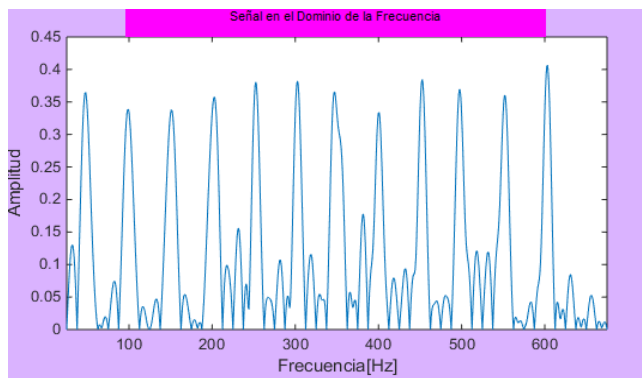


Figura 4.32 Espectro del símbolo FBMC del generador.

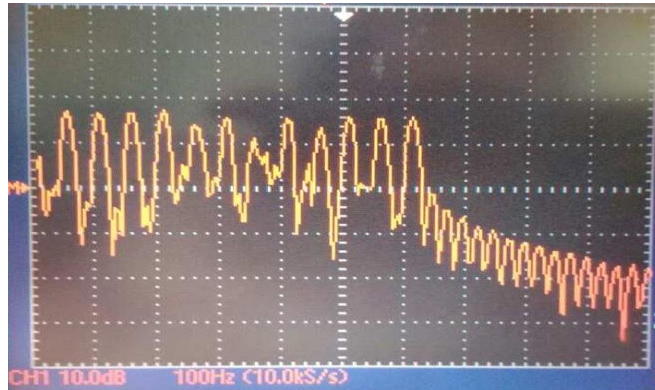


Figura 4.33. Espectro del símbolo FBMC del osciloscopio.

#### 4.7 Aplicación del generador propuesto.

El ámbito en el cual el generador de formas de onda tiene aplicación es principalmente en la enseñanza e investigación de nuevas formas de onda, sin propósito de implementación de tipo comercial. Por medio de él, se pueden analizar las características de las técnicas de modulación de múltiple portadora además de las características espectrales de una señal para aprender acerca de conceptos como ancho de banda de la señal o eficiencia espectral de una manera práctica, dinámica y sencilla.

## Conclusiones

Cada generación de sistemas celulares surge con la finalidad de proporcionar mayores y mejores beneficios a diferencia de los beneficios con los que se cuentan; por esta razón las radiocomunicaciones son un desafío cada vez mayor cuando se habla del diseño de una interfaz de radio. Una de las maneras en las que se pueden proporcionar los beneficios y requerimientos para una nueva generación de sistemas celulares es mediante el diseño de una adecuada forma de onda que sea capaz de proporcionar eficiente transmisión, flexibilidad y eficiencia de espectro.

La forma de onda OFDM actualmente utilizada en los sistemas celulares 4G, no es recomendable para la utilización en los sistemas celulares 5G, debido a sus requerimientos de perfecta sincronización y ortogonalidad, los cuales no se adaptan a la visión de 5G.

En cambio, las nuevas técnicas de filtrado de formas de onda son capaces de proporcionar las capacidades y requerimientos que 5G necesita, y su estudio por lo tanto es una propuesta para mejorar las capacidades de los sistemas actuales.

De las formas de onda presentadas, OFDM no posee eficiencia para filtrar las emisiones fuera de banda, como lo hace F-OFDM que proporciona eficiencia de filtrado de emisiones fuera de banda para un bloque de recursos, en cambio su filtrado entre subportadoras no es igual de eficiente como el de FBMC, que proporciona eficiencia entre subportadoras, sin embargo, no proporciona eficiencia para un bloque de subportadoras como F-OFDM. Además, para cada una de ellas, el espectro de la señal no se ve afectado por el tipo de modulación digital si no por la frecuencia de portadora y la cantidad de subportadoras utilizadas.

El estudio de nuevas formas de onda es de suma importancia, pues cada una proporciona diferentes beneficios. Además, analizarlas desde el generador de formas de onda propuesto es más sencillo pues se obtienen de manera visual y dinámica las características de estas, lo cual permite determinar aquella que más se adecue a las necesidades.

## **Mejoras al trabajo propuesto**

La complejidad del generador depende de la cantidad de funciones que el mismo realiza y debido a que cada tipo de técnica de multiportadora proporciona diferentes características y beneficios, algunas de las mejoras que se le pueden aplicar son: la adición de nuevas formas de onda basadas en las nuevas técnicas de filtrado, permitir que la velocidad de señalización sea ingresada por el usuario, una sección para resolución de la amplitud de las gráficas o inclusive permitir al usuario ingresar el número de portadora la cual desea analizar. De esta manera al tener mayor variedad de formas de onda el estudio de estas será más amplio y se podrá realizar la comparación entre una cantidad mayor de formas de onda con características diferentes.

## Referencias

### Libros

- [1] A. Bruce Carlson, Paul B. Crilly, Janet C. Rutled. *Sistemas de Comunicación*. 4ta Edición. Mc Graw Hill. 2007.
- [2] Afif Osseiran, Jose F. Monserrat, Patrick Marsch. “5G Mobile and Wireless Communications”. 1ra Edición. Cambridge University Press. 2016.
- [3] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky. *Señales y Sistemas*. 1ra Edición. Prentice Hall Hispanoamericana. S. A. 1994.
- [4] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, S. Hamid Nawab. *Señales y Sistemas*. 2da Edición. Pearson. 1998.
- [5] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. 1ra Edición. Cambridge University Press. 2005.
- [6] Domingo Lara Rodriguez, David Muñoz Rodriguez, Salvador Rosas García. *Sistemas de Comunicación Móvil*. 1ra Edición. Alfaomega. S. A. 1995.
- [7] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold “4G LTE/LTE Advanced form Mobile Broadband”, 1ra Edición. Editorial Elsevier Ltd. 2011.
- [8] Hidelberto Jardon Aguilar. *Fundamentos de los Sistemas Modernos de Comunicación*. 1ra Edición. Alfaomega. S. A. 2002.
- [9] Huidobro Moya; *Comunicaciones móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE*; Editorial Ra-Ma S.A.; primera edición; pp. 39-43, 56-58.
- [10] Jonathan Rodriguez, “Fundamental of 5G Mobile Networks”, 1ra Edición. Editorial Wiley. 2015.
- [11] Martyn Mallic. *Mobile and Wireless Desing Essentials*. 1ra Edición. Wiley. 2003.
- [12] Sergio Gallardo Vazquez. *Elementos de Sistemas de Telecomunicaciones*. 1ra Edición. Paraninfo, S.A. 2015.
- [13] Domingo Lara Rodriguez, David Muñoz Rodriguez, Salvador Rosas Garcia. *Sistemas de Comunicación Móvil*. 1ra Edición. Alfaomega. S. A. 1995.

### Artículos

- [17] Andreas Maeder, Peter Rost y Dirk Staehle., “The Challenge of M2M Communications for the Cellular Radio Access Network”
- [18] Behrouz Farhang-Boroujeny (2011). “OFDM vs Filter Multicarrier” *IEEE Signal Processing Magazine*.
- [19] Javad Abdoli, Ming Jia, and Jianglei Ma Huawei (2011). “Filtered OFDM: A New Waveform for Future Wireless Systems.

[20] Jialing Li, Kenneth Kearney, Erdem Bala, Rui Yang (2013). “A Resource Block Based Filtered OFDM Scheme and Performance Comparison”, IEEE Communications Magazine.

[25] Marco Giordani, Marco Mezzavilla, y Michele Zorzi (2016). “Initial Access in 5G mmWave Cellular Networks”, IEEE Communications Magazine.

[26] Md. Shoriful Islam, Md. Kamruzzaman, TazkiaJessy, Md. SalimZahan y Md. Sabuj Hassan (2016). “Performance Analysis of Massive MIMO for 5G Wireless Communication Systems”, International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2016).

[27] M. Benisha, R. Thandaiah Prabu y Dr.V. Thulasi Bai, (2016). “Requirements and Challenges of 5G Cellular Systems”, International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB16).

[28] Nicola Michailow, Maximilian Matthé, Ivan Simões Gaspar (2014). “Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Network” IEEE.

[29] Weijia Han y Xiao Ma (2016) “Power Division Multiplexing” International Conference in Communications in China (ICCC) IEEE/CIC.

[30] Yinsheng Liu, Xia Chen, Zhangdui Zhong, Bo Ai, Deshan Miao, Zhuyan Zhao, Jingyuan Sun, Yong Teng, y Hao Guan. (2016), “WaveformDesignfor5GNetworks: Analysis and Comparison”.

[31] Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anass Benjebbour, Takehiro Nakamura, Anxin y Kenichi Higuchi (2013) “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access” Vehicular Technology Conference 77th (VTC Spring), IEEE.

Paginas

[32] 5G Américas (2014). Estados Unidos, Recuperado de [http://www.5gamericas.org/files/2714/1471/2645/4G\\_Americas\\_Recommendations\\_on\\_5G\\_Requirements\\_and\\_Solutions\\_10\\_14\\_2014-FINALx.pdf](http://www.5gamericas.org/files/2714/1471/2645/4G_Americas_Recommendations_on_5G_Requirements_and_Solutions_10_14_2014-FINALx.pdf)

[33] 3GPP A Global Initiative (2017). “Specification Groups” recuperado de <http://www.3gpp.org/specifications-groups/ran-plenary/ran1-radio-layer-1>

[34] 5G Américas (2014). Estados Unidos, Recuperado de [http://www.5gamericas.org/files/2114/0622/1680/2014\\_4GA\\_Summary\\_of\\_Global\\_5G\\_Initiatives\\_FINAL.pdf](http://www.5gamericas.org/files/2114/0622/1680/2014_4GA_Summary_of_Global_5G_Initiatives_FINAL.pdf)

[35] Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (2015). ITU News, “Normas de las IMT- Avanzadas para comunicaciones móviles de banda ancha”. Recuperado de <https://itunews.itu.int/es/2220-normas-de-las-imt-avanzadas-para-comunicaciones-moviles-de-banda-ancha.note.aspx>

# Anexos

## Anexo 1

%Función para realizar Modulación Digital

```
function [grupos, simbolos]=Modulacion(t,orden,mensaje)
    k=log(orden);           %saca la cantidad de bits para crear los grupos
    sobra = mod(t,k);       %los que sobran al hacer grupos de k elementos
    if sobra > 0
        padded = k-sobra;   %para saber cuantos ceros agregar
        padded = zeros(1, padded); %pone 1 cero padded veces
        padded = dec2bin(padded);
        padded =padded';
        mensajesbits =[mensaje padded %concatena los dos vectores
        grupos=reshape(mensajesbits',[k,t/k]); %reordena en k filas (grupos) y
        %t/k columnas (elementos)
        grupo=bin2dec(grupos)'); %saca los valores decimales de
        %los grupos de tamaño k

        if tipo =='QAM'
            simbolo=qammod(grupo,orden);
        else if tipo == 'PSK'
            simbolo=pskmod(grupo,orden);
        else fprintf('\n\n\t\nDebe escribir "QAM" o "PSK": ')
            end
        end
    end

    end

grupos=reshape(mensaje',[k,t/k]) %reordena en k filas y t/k
%columnas
grupo=bin2dec(grupos)'); %saca los valores decimales de
%los grupos de tamaño k

    if tipo =='QAM'
        simbolo=qammod(grupo,orden);
    else if tipo == 'PSK'
        simbolo=pskmod(grupo,orden);
    else fprintf('\n\n\t\nDebe escribir "QAM" o "PSK": ')
        end
    end

end

simbolos=simbolo;
grupos=grupo;
end
```

## Anexo 2

```
%Función para realizar Demodulacion Digital

function [g, bits]=Demodulacion(orden,t,simbolos)
    k=log2(orden);           %saca la cantidad de bits para crear los grupos
    sobra=mod(k,3);

    if tipo=='QAM'
        grupo=qamdemod(simbolos,orden); %regresa valores de grupos en
                                         % decimal
    else if tipo == 'PSK'
        grupo=pskdemod(simbolos,orden);
        else fprintf('\n\n\t\nDebe escribir "QAM" o "PSK": ')

    end
end

digitos= dec2bin(grupo); %convierte los grupos de 5 de valor decimal a
                          % binario
digitos=reshape(digitos,[1,numel(digitos)]); %arregla los grupos en un
                                              %vector fila para tenerlos
                                              % juntos

if sobra>0
    a=numel(digitos);
    x=a/4;           %para que sepa cuantos bits son del mensaje
    x=ceil(x)-1;    % se redondea y resta uno para tener cantidad
                   %de caracteres
    y=(x*4);        %para tener cantidad de digitos
    for i=1:y       % cambia la longitud del vector hasta el
                   %elemento de interes con la cantidad de bits

        simb(i)=digitos(i);
    end
    digitos=simb;   %para realizar el cambio

end
b=digitos;         %digitos sin ceros
grupos=grupo;
end
```



### Anexo 3

%Funcion para deterinar el espectro de una señal

```
function [F , XF]=EspectroFun(F,N,senal)
```

```
Ts=1/Fs;
```

```
XF=fft(senal, N);
```

```
XF2=(fftshift(XF))/N;
```

```
k=-N/2:(N/2);
```

```
f=k/N;
```

```
F=f*Fs;
```

```
% %%%%%%%%%%para graficar%%%%%%%%%
```

```
% figure(1)
```

```
% plot(F,abs(XF2))
```

```
espectros de las portadoras
```

```
% hold on
```

```
end
```

%grafica de 12

## Anexo 4

```
% Funcion para crear el coseno alzado  
  
function [t,CA]=CosAlzado(F,Beta,LT,Fs)  
  
T=1/(F);  
L=LT;  
Ts=1/Fs;  
Inc=Ts;  
t=-T:Inc:T;  
  
A=sinc(t/T);  
B=cos(pi*Beta*t/T);  
C=1-((2*Beta*t/T).^2);  
CA=A.*B./C;  
i=find(abs(abs(t)-T/(2*Beta))<Inc*1e-10);  
CA(i)=(Beta/2)*sin(pi/(2*Beta));
```

## Anexo 5

```
%Diseño de forma de onda OFDM

clc
clear all
close all

tipo = 'QAM';
orden = 4;
xt=0;
sumatot=0;
senaltot=0;

for k=1:-0.25:0.5
    mensaje = randi(255,1,3);
    mensaje= double(mensaje);
    mensaje= dec2bin(mensaje,8);
    mensajesbits=reshape(mensaje, numel(mensaje));
    [grupos,simbolos]= Modulacion(orden,tipo,mensaje);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %simbolos=simbolos(1);
    reales=real(simbolos);
    imagin=imag(simbolos);
    total=0;

    for l=1: 12 %el barrido es hasta 12 porque son 12 subportadoras OFDM

        Fc=10000;
        Fsen=50;
        Fs= Fc;
        Ts=1/Fs;
        N=(Fc*20)/Fsen;

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Interpolacion%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        interReal=upsample(real, N);
        interImag=upsample(imag, N);
        Fc=k*Fc;
        Fo=50*1;

        %Filtro Pulso Formador
        PulseRec = ones(1, N);
        convReal=conv(interReal, PulseRec);
        convReal=convReal(1:end+4000+1);
        convImag=conv(interImag, PulseRec);
        convImag=convImag(1:end+4000+1);
        x=0:length(convReal)-1;
        n=0:length(convReal)-1;
        t1=Ts*n;

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulacion en amplitud%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        r=cos(2*pi*Fo*t1);
        im=sin(2*pi*Fo*t1);
    end
end
```

```

        I=r.*(convReal);
        Q=im.*(convImag);
        suma=I-Q;
        Itot=Itot+I;
        Qtot=Qtot+Q;
        tot=suma+tot;

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Graficas%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t1,I, 'y')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(t1, Q)
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%suma todas subportadoras moduladas en amplitud%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(t1,sum, 'c')
subplot(2,1,2)
plot(t1,tot, 'c')
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dexplazamiento a la frecuencia de portadora Fc%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
senal=tot.*cos(2*pi*Fc*t1);
N1=length(senal);
[F , XF2]= EspectroFun(Fs,N1*10,senal);
senaltot=senaltot+senal;

figure(3)
plot(senal)
hold on

figure(4)
plot(F,abs(XF), 'r')
hold on
figure(5)
subplot(2,1,1)
stem(F,real(XF)) %grafica de 12 espectros de las portadoras
hold on
subplot(2,1,2)
stem(F,imag(XF)) %grafica de 12 espectros de las portadoras
hold on
pause();

end

[F2 , XF2]= EspectroFun(Fs,N,tot);
figure(6)
plot(F2, abs(XF2), 'c')
hold on

```

## Anexo 6

```
%Diseño de forma de onda F-OFDM

clc
clear all
close all

Beta1=1; %decaida
LT=1; %lobulos

tipo = 'QAM';
orden = 4;
xt=0;
sumatot=0;
senaltot=0;

for k=1:-0.25:0.5
    mensaje = randi(255,1,20);
    mensaje= double(mensaje);
    mensaje= dec2bin(mensaje,8);
    mensajebits=reshape(mensaje', numel(mensaje));
    [grupos,simbolos]= Modulacion(orden,tipo,mensaje);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    reales=real(simbolos);
    imagin=imag(simbolos);

    for l=1: 12
        tot=0;
        Itot=0;
        Qtot=0;
        Fc=10000;
        Fsen=50;
        Fs= Fc*20;
        Ts=1/Fs;
        N= (Fc*20) /Fsen;

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Interpolacion%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        interReal=upsample(real, N);
        interImag=upsample(imag, N);
        Fc=k*Fc;
        Fo=50*l;
        %Filtro Pulso Formador
        [t,CA]=CosAlzado(Fsen,Beta1,LT,Fs);
        convReal=conv(interReal, CA);
        convImag=conv(interImag, CA);
        x=0:length(convReal)-1;
        n=0:length(convReal)-1;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulacion en amplitud%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        r=cos(2*pi*Fo*t1);
        im=sin(2*pi*Fo*t1);
        I=r.*(convReal);
        Q=im.*(convImag);
        suma=I-Q;
    end
end
```

```

        Itot=Itot+I;
        Qtot=Qtot+Q;
        tot=suma+tot;

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Graficas%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Componente R & I%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t1,Itot, 'y')
subplot(2,1,2)
plot(t1, Qtot)
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%suma todas subportadoras moduladas en amplitud%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(t1,suma, 'c')
subplot(2,1,2)
plot(t1,tot, 'c')
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dexplazamiento a la frecuencia de portadora Fc%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
senal=suma.*cos(2*pi*Fc*t1);
N1=1000;
[F , XF2]= EspectroFun(Fs,N1,senal);
senaltot=senaltot+senal;

figure(3)
plot(senal)
hold on

figure(4)
plot(F,abs(XF2), 'r')
hold on
figure(5)
subplot(2,1,1)
stem(F,real(XF2)) %grafica de 12 espectros de las portadoras
hold on
subplot(2,1,2)
stem(F,imag(XF2)) %grafica de 12 espectros de las portadoras
hold on
pause();

end

[F2 , XF22]= EspectroFun(Fs,N1,senaltot);
figure(6)
plot(F2,abs(XF22), 'c')
hold on

```

## Anexo 7

```
%HERNANDEZ GALICIA KASSANDRA ANALI
%ESPECTROS TRANSMISION DIGITAL 12 PORTADORAS OFDM

clc
clear all
close all

tipo = 'qam';
orden = 4;
xt=0;
sumatot=0;
senaltot=0;
tot=0;

Fc=10000;
Fsen=25;
Fs= Fc;
Ts=1/Fs;
N=(Fc*20)/Fsen;
PulseRec = ones(1, N);

for l=1: 12
%el barrido es hasta 12 porque son 12 subportadoras en OFDM
mensaje = randi(255,1,3);
mensaje= double(mensaje);
mensaje= dec2bin(mensaje,8);
%convierte letra a bytes
mensajebits=reshape(mensaje, numel(mensaje));
[grupos,simbolos]= Modulacion(orden,tipo,mensaje);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
real=real(simbolos);
imag=imag(simbolos);
reales1=[];
imagin1=[];
for y=1:1:numel(reales)

if rem(y,2)~= 0
reales1=[reales1 real(y)];
imagin1=[imagin1 imag(y)];
else
reales1=[reales1 imagin(y)];
imagin1=[imagin1 reales(y)];
end
end
reales=kron(reales1,ones(1,2));
imagin=kron(imagin1,ones(1,2)); %duplica cada
posicion del vector
reales=[reales zeros(1,1)]; %modifica el valor
del vector por el retraso del siguiente
```

```

    imagin=[0 imagin];
de simbolos

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Interpolacion%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    interReal=upsample(reales, N);
    interImag=upsample(imagin, N);
    Fo=50*1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Convolucion con Filtro Pulso Formador
    convReal=conv(interReal, PulseRec);
    convReal=convReal(1:end-N+1);
    convImag=conv(interImag, PulseRec);
    convImag=convImag(1:end-N+1);
    x=0:length(convReal)-1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Vector de tiempo de tamaño de ConvReal%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    n=0:length(convReal)-1;
%valor de incremento de 1
    t1=Ts*n;
%Por la cantidad de Muestras por ciclo de muestreo
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulacion en amplitud%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    r=cos(2*pi*Fo*t1);
    im=sin(2*pi*Fo*t1);
    I=r.*(convReal);
    Q=im.*(convImag);
    suma=I-Q;
%
%
    Itot=Itot+I;
    Qtot=Qtot+Q;
    total=suma+total;

end
Nombre='FBMC';
Crea_archivo(tot,Nombre)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Graficas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%suma todas subportadoras moduladas en amplitud%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1)
plot(t1,tot, 'c')
hold on

N1=length(tot);
[F , XF2]= EspectroFun(F,N1*10,tot);
senaltot=senaltot+tot;
figure(2)
plot(F,abs(XF2), 'r')
hold on

[F2 , XF22]= EspectroFun(Fs,100*N1,senaltot);
figure(6)
plot(F2, abs(XF22), 'c')
hold on

```



## Anexo 8

```
function varargout = Interfaz_FormaOnda5G(varargin)
% INTERFAZ_FORMAONDA5G MATLAB code for Interfaz_FormaOnda5G.fig
% INTERFAZ_FORMAONDA5G, by itself, creates a new
INTERFAZ_FORMAONDA5G or raises the existing
% singleton*.
%
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Interfaz_FormaOnda5G_OpeningFcn,
                  ...
                  'gui_OutputFcn',  @Interfaz_FormaOnda5G_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% --- Executes just before Interfaz_FormaOnda5G is made visible.
function Interfaz_FormaOnda5G_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargout)
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Interfaz_FormaOnda5G_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on mouse press over axes background.
function grafica_tiempo_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function grafica_tiempo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes on button press in procesar.
function procesar_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla(handles.grafica_tiempo);
cla(handles.grafica_frecuencia);
global num_portadora;
num_portadora = get(handles.numero_portadora);
global Fo;
Fo = get(handles.frecuencia_portadora);
global Fs;
Fs = get(handles.frecuencia_muestreo);
global beta;
beta = get(handles.beta);
global LT;
LT = (handles.lobulos);
global orden;
orden = get(handles.orden_modulacion);
global onda ;
```

```

onda = get(handles.tipo_onda, 'value');

    xt=0;
    sumatot=0;
    senaltot=0;
    tot=0;
    totmatriz=[];
    Fsen=50;
    Ts= 1/Fs ;
    N=Fs/Fsen;

global tipomodulacion;
tipomodulacion = get(handles.tipo_modulacion, 'value');
switch tipomodulacion
    case 1
        tipo = 'PSK';
    case 2
        tipo = 'QAM';
    end

switch onda
    case 1
        PulseRec = ones(1, N);
        for l=1: 12
            mensaje = randi(255,1,1);
            mensaje= double(mensaje);
            mensaje= dec2bin(mensaje);
            mensajebits=vec2mat(mensaje, numel(mensaje));
            [grupos,simbolos]= Modulacion(tipo,orden,mensaje);

            real=real(simbolos);
            imag=imag(simbolos);
            interReal=upsample(real, N);
            interImag=upsample(imag, N);

            convReal=conv(interReal, PulseRec);
            convReal=convReal(1:end-4000+1);
            convImag=conv(interImag, PulseRec);
            convImag=convImag(1:end-4000+1);
            x=0:length(convReal)-1;
            n=0:length(convReal)-1;
            t1=Ts*n;
            r=cos(2*pi*Fo*l*t1);
            im=sin(2*pi*Fo*l*t1);
            I=r.*(convReal);
            Q=im.*(convImag);
            suma=I-Q;

            global cuantas;
            cuantas = get(handles.cuantas, 'value');
            switch cuantas

                case 1
                    totmatriz=[totmatriz; suma];
                    if l <= num_portadora

```

```

plot(handles.grafica_tiempo, t1, totmatriz(1:1,:))
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud ')

[Fcs TF1]=T_F(totmatriz(1,:),Fs,numel(suma));
plot(handles.grafica_frecuencia, Fcs, abs(TF1))
hold on
ylabel('Amplitud ')
end

case 2
tot= tot + suma;
plot(handles.grafica_tiempo, t1, tot)
xlabel('Tiempo[s] ')
ylabel('Amplitud ')
[xq2 xc]=Digitalizacion(tot,8,'OFDM.txt');
[Fcs TF1]=T_F(tot,Fs,numel(tot));
plot(handles.grafica_frecuencia, Fcs, abs(TF1))
%xlabel('Frecuencia Hz ')
ylabel('Amplitud ')
end

end
hold off

case 2

[t,CA]=CosAlzado(Fsen,beta,LT,Fs);
for l=1: 12
mensaje = randi(255,1,1);;% [5 250 115]
mensaje= double(mensaje);
mensaje= dec2bin(mensaje);
mensajebits=vec2mat(mensaje, numel(mensaje));
[grupos,simbolos]= Modulacion(tipo,orden,mensaje);
real=real(simbolos);
imag=imag(simbolos);
interReal=upsample(real, N);
interImag=upsample(imag, N);

convReal=conv(interReal, CA);
convImag=conv(interImag, CA);
x=0:length(convReal)-1;
n=0:length(convReal)-1;
t1=Ts*n;
r=cos(2*pi*Fo*l*t1);
im=sin(2*pi*Fo*l*t1);
I=r.*(convReal);
Q=im.*(convImag);
suma=I-Q;

global cuantas;
cuantas = get(handles.cuantas, 'value');
switch cuantas
case 1

```

```

        totmatriz=[totmatriz; suma];
        if l<= num_portadora
plot(handles.grafica_tiempo, t1, totmatriz(1:l,:))
xlabel('Tiempo ')
ylabel('Amplitud ')
hold on
[Fcs TF1]=T_F(totmatriz(1,:),Fs,numel(suma));
plot(handles.grafica_frecuencia, Fcs, abs(TF1))
xlabel('Frecuencia Hz ')
ylabel('Amplitud ')

        end
case 2
        tot= tot + suma;
        plot(handles.grafica_tiempo, t1, tot)
        xlabel('Tiempo ')
        ylabel('Amplitud ')
        [xq2 xc]=Digitalizacion(tot,8,'F-OFDM.txt');
        [Fcs TF1]=T_F(tot,Fs,numel(tot));
        plot(handles.grafica_frecuencia, Fcs, abs(TF1))
        %xlabel('Frecuencia Hz ')
        ylabel('Amplitud ')
end
end
hold off

case 3
Fse=Fsen;
Fsen=Fse/2; %cambia por que se mandan los simbolos por mitad
N=Fs/Fsen;
PulseRec = ones(1, N);
for l=1: 12
mensaje = randi(255,1,1);
mensaje= double(mensaje);
mensaje= dec2bin(mensaje);
mensajebits=vec2mat(mensaje, numel(mensaje));
[grupos,simbolos]= Modulacion(tipo,orden,mensajebits);

real=real(simbolos);
imag=imag(simbolos);
reales1=[];
imagin1=[];
for y=1:1:numel(reales)

        if rem(y,2)~= 0
                reales1=[reales1 real(y)];
                imagin1=[imagin1 imag(y)];
        else
                reales1=[reales1 imag(y)];
                imagin1=[imagin1 real(y)];
        end
end
real=kron(reales1,ones(1,2));
imag=kron(imagin1,ones(1,2));
reales=[reales zeros(1,1)];

```

```

imagin=[0 imagin];
interReal=upsample(real, N);
interImag=upsample(imag, N);

convReal=conv(interReal, PulseRec);
convReal=convReal(1:end+N+1);
convImag=conv(interImag, PulseRec);
convImag=convImag(1:end+N+1);           %N=4000
x=0:length(convReal)-1;
n=0:length(convReal)-1;
t1=Ts*n;

r=cos(2*pi*Fo*1*t1);
im=sin(2*pi*Fo*1*t1);
I=r.*(convReal);
Q=im.*(convImag);
suma=I-Q;

global cuantas;
cuantas = get(handles.cuantas, 'value');
switch cuantas
    case 1
        totmatriz = [totmatriz; suma];
        if l<=num_portadora

            plot(handles.grafica_tiempo, t1, totmatriz(1:l,:))
            xlabel('Tiempo ')
            ylabel('Amplitud ')

            hold on
            [Fcs TF1]=T_F(totmatriz(l,:),Fs,numel(suma));
            plot(handles.grafica_frecuencia, Fcs, abs(TF1))
            xlabel('Frecuencia Hz ')
            ylabel('Amplitud ')
            hold on
            end

        case 2
            tot= tot + suma;
            plot(handles.grafica_tiempo, t1, tot)
            xlabel('Tiempo ')
            ylabel('Amplitud ')
            [xq2 xc]=Digitalizacion(tot,8,'FBMC.txt');

            [Fcs TF1]=T_F(tot,Fs,numel(tot));
            plot(handles.grafica_frecuencia, Fcs, abs(TF1))
            xlabel('Frecuencia Hz ')
            ylabel('Amplitud ')
        end
    end
end
hold off

end

```

```

% --- Executes on button press in actualizar.
function actualizar_Callback(hObject, eventdata, handles)

global tiempo_final ;
tiempo_final = handles.tiempo_final;
global tiempo_inicial;
tiempo_inicial = get(handles.tiempo_inicial);
handles
tiempo_inicial
global frecuencia_central;
frecuencia_central = get(handles.frecuencia_central);
global span;
span = handles.span;

global escala_tiempoi;
escala_tiempoi = get(handles.escala_tiempoi, 'value');
switch escala_tiempoi
    case 1
        tinicial=tiempo_inicial*1;
    case 2
        tinicial = tiempo_inicial*(0.001);
    case 3
        tinicial=tiempo_inicial*(0.000001);
    case 4
        tinicial=tiempo_inicial*(0.000000001);
    end
global escala_tiempof;
escala_tiempof = get(handles.escala_tiempof, 'value');
switch escala_tiempof
    case 1
        tfinal=tiempo_final*1;
    case 2
        tfinal=tiempo_final*(0.001);
    case 3
        tfinal=tiempo_final*(0.000001);
    case 4
        tfinal=tiempo_final*(0.000000001);
    end

xlim(handles.grafica_tiempo,[tinicial tfinal])
xlabel('Tiempo[s]')
ylabel('amplitud')

xlim(handles.grafica_frecuencia,[(span/2)) (frecuencia_central +
(span/2))])
%xlabel('Frecuencia[Hz]')
ylabel('Amplitud')

% --- Executes on button press in salir.
function salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close()

% --- Executes on selection change in tipo_onda.
function tipo_onda_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function tipo_onda_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
set(hObject, 'String', {'OFDM', 'F-OFDM', 'FBMC'});

% --- Executes on selection change in cuantas.
function cuantas_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function cuantas_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
set(hObject, 'String', {'Por Portadora', 'Conjunto de Portadoras'});

function numero_portadora_Callback(hObject, eventdata, handles)
global numero_portadora;
numero_portadora = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(numero_portadora)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.numero_portadora = numero_portadora;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function numero_portadora_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global numero_portadora;
numero_portadora = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(numero_portadora)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.numero_portadora = numero_portadora;
guidata(hObject,handles)

function frecuencia_portadora_Callback(hObject, eventdata, handles)
global frecuencia_portadora;
frecuencia_portadora = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(frecuencia_portadora)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.frecuencia_portadora = frecuencia_portadora;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frecuencia_portadora_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global frecuencia_portadora;
frecuencia_portadora = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(frecuencia_portadora)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.frecuencia_portadora = frecuencia_portadora;
guidata(hObject,handles)

function frecuencia_muestreo_Callback(hObject, eventdata, handles)
global frecuencia_muestreo;
frecuencia_muestreo = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(frecuencia_muestreo)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.frecuencia_muestreo = frecuencia_muestreo;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frecuencia_muestreo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global frecuencia_muestreo;
frecuencia_muestreo = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(frecuencia_muestreo)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.frecuencia_muestreo = frecuencia_muestreo;
guidata(hObject,handles)

function beta_Callback(hObject, eventdata, handles)
global beta;
beta = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(beta)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.beta = beta;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function beta_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global beta;
beta = str2double(get(hObject, 'String'));

```



```

if isnan(beta)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.beta = beta;
guidata(hObject,handles)

function lobulos_Callback(hObject, eventdata, handles)
global lobulos;
lobulos = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(lobulos)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.lobulos = lobulos;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function lobulos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global lobulos;
lobulos = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(lobulos)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.lobulos = lobulos;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes on selection change in tipo_modulacion.
function tipo_modulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tipo_modulacion_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
set(hObject, 'String', {'PSK', 'QAM'});

function orden_modulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
global orden_modulacion;
orden_modulacion = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(orden_modulacion)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.orden_modulacion = orden_modulacion;
guidata(hObject,handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function orden_modulacion_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global orden_modulacion;
orden_modulacion = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(orden_modulacion)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.orden_modulacion = orden_modulacion;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes on mouse press over axes background.
function grafica_frecuencia_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function grafica_frecuencia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function [grupos, simbolos]=Modulacion(t,orden,mensajebits)
    end

function [Fcs TF1]=T_F(x,Fs,P)

TF=fft(x,10*P);
N=numel(TF);
N1=numel(x);
TF=TF/N1;
TF1=fftshift(TF);
if mod(N,2)==0
    K=(-N/2):(N/2)-1;
else
    K=(-(N-1)/2):((N-1)/2);
end
Fcs=(K/N)*Fs;

function [t,CA]=CosAlzado(F,Beta,LT,F)

T=1/(F);
L=LT;
Ts=1/Fs;
Inc=Ts;
t=-T:Inc:L;

A=sinc(t/T);
B=cos(pi*Beta*t/T);
C=1-((2*Beta*t/T).^2);
CA=A.*B./C;
i=find(abs(abs(t)-T/(2*Beta))<Inc*1e-10);
CA(i)=(Beta/2)*sin(pi/(2*Beta));

```

```

function tiempo_inicial_Callback(hObject, eventdata, handles)

global tiempo_inicial;
tiempo_inicial = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(tiempo_inicial)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.tiempo_inicial = tiempo_inicial;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tiempo_inicial_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global tiempo_inicial;
tiempo_inicial = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(tiempo_inicial)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.tiempo_inicial = tiempo_inicial;
guidata(hObject,handles)

function tiempo_final_Callback(hObject, eventdata, handles)
global tiempo_final;
tiempo_final = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(tiempo_final)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.tiempo_final = tiempo_final;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tiempo_final_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

global tiempo_final;
tiempo_final = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(tiempo_final)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.tiempo_final = tiempo_final;
guidata(hObject,handles)

```

```

function frecuencia_central_Callback(hObject, eventdata, handles)
global frecuencia_central;
frecuencia_central = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(frecuencia_central)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.frecuencia_central = frecuencia_central;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frecuencia_central_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
global frecuencia_central;
frecuencia_central = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(frecuencia_central)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.frecuencia_central = frecuencia_central;
guidata(hObject,handles)

function span_Callback(hObject, eventdata, handles)
global span;
span = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(span)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.span = span;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function span_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

global span;
span = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(span)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.span = span;
guidata(hObject,handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function escala_tiempo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

set(hObject, 'String', {'s', 'ms', 'us', 'ns'});

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function escala_tiempof_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

set(hObject, 'String', {'s', 'ms', 'us', 'ns'});

```

## Anexo 9

En esta sección, se proporciona descripción general de los algoritmos IFFT y FFT los cuales se basan en una matriz de ecuaciones matemáticas específicos y la manera en que los sistemas OFDM la utilizan. En estos algoritmos cierta cantidad de datos se reemplaza para contar DFT (Discrete Transfer Fourier, Transformada Discreta de Fourier) que proporcionan procesos de mayor velocidad.

### Transformada Rápida de Fourier Inversa

La FFT y la IFFT se derivan de la función principal DFT. En DFT, el cálculo de N puntos del DFT se calculará uno por uno para cada punto. Mientras que para FFT / IFFT, el cálculo se realiza simultáneamente lo cual disminuye el tiempo de procesamiento. Las ecuaciones para la función FFT / IFFT se pueden derivar de la ecuación general DFT

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{j\pi k n}{N}}$$

$X(k)$  representa la salida de frecuencia DFT en el k-el punto espectral donde k varía de 0 a (N-1). La cantidad N representa al número de puntos de muestra de datos DFT. La cantidad  $x(n)$  representa la n-ésima muestra de tiempo, donde n también varía de 0 a N-1. En general,  $x(n)$  puede ser real o compleja. La ecuación DFT puede ser reescrita en:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}$$

Donde  $W_N^{nk}$  se define como :

$$W_N^{nk} = e^{-\frac{j\pi k n}{N}}$$

Para la decimacion en frecuencia radix-2, la entrada se divide en dos mitades como:

$$x(0), x(1), x(2), \dots \dots \dots x(N/2 - 1) \text{ y}$$
$$x(N/2), x\left(\frac{N}{2} + 1\right), x(2), \dots \dots \dots x(N - 1)$$

Por lo tanto, el DFT también se puede separar en dos sumas y Sustituyendo  $k = 2k$  por par y  $k = 2k + 1$  por impar, la ecuación se convierte en:

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} [x(n) + x(n + \frac{N}{2})] W^{2nk}$$

$$K = 0,1,2, \dots \dots (N/2 - 1)$$

Y

$$X(2k + 1) = \sum_{n=0}^{N/2-1} [x(n) + x(n + \frac{N}{2})] W^{nk} W^{2nk}$$

$$K = 0,1,2, \dots \dots (N/2 - 1)$$

La ecuación anterior muestra que para la decimación en la frecuencia de FFT radix 2, la entrada se puede agrupada en números impares y pares. Por lo tanto, gráficamente, la operación se puede en la

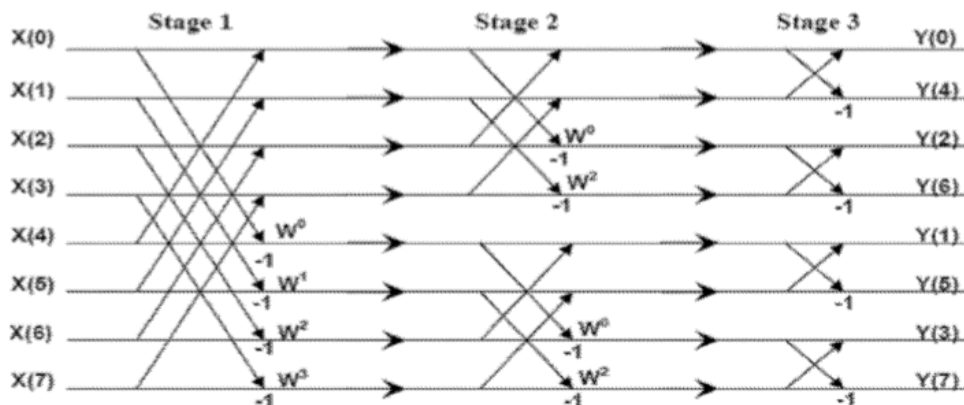


Figura 0.1 Gráfica de puntos FFT usando decimación en frecuencia.

El cálculo de FFT se lleva a cabo en tres etapas. Las variables X (0) hasta X (7) se denotan como los valores de entrada para el cálculo de FFT mientras que Y (0) hasta Y (7) se denotan como las salidas. Hay dos operaciones para completar el cálculo en cada etapa. La flecha hacia arriba ejecutará la operación de suma mientras que la flecha hacia abajo ejecutará la operación de resta. El valor restado se multiplica con factor de tiempo antes de ser procesado en la etapa de nido. Esta operación se realiza al mismo tiempo y se conoce como proceso de mariposa.

## Transformada Rápida de Fourier Inversa

La IFFT se usa para generar símbolos OFDM. IFFT convierte las señales del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y se utiliza en el transmisor para manejar este proceso de conversión. IFFT se define como la siguiente ecuación:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W^{-nk}$$

Los cambios que incorporados en la ecuación IFFT son mediante la adición de un factor de escala de  $1/N$  y la sustitución del valor del factor de dos en dos con el conjugado. Con estos cambios, el mismo diagrama de flujo FFT también se puede usar para la Transformada de Fourier rápida Inversa.

### Algoritmo FFT de decimación en frecuencia (DIF)

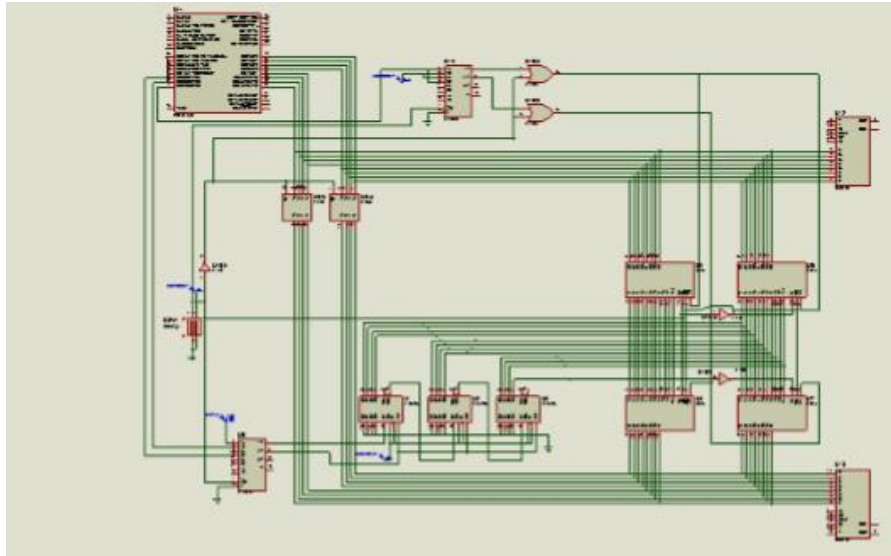
En el algoritmo de decimación en frecuencia, los puntos de salida o frecuencia se reagrupan o subdividen en:

$$X(2r) = \sum_{n=0}^{N/2-1} [x(n) + (-1)^k x(n + \frac{N}{2})] W_{N/2}^{nr}$$
$$X(2r + 1) = \sum_{n=0}^{N/2-1} [x(n) + (-1)^k x(n + \frac{N}{2})] W_{N/2}^{nr} W_N^n$$

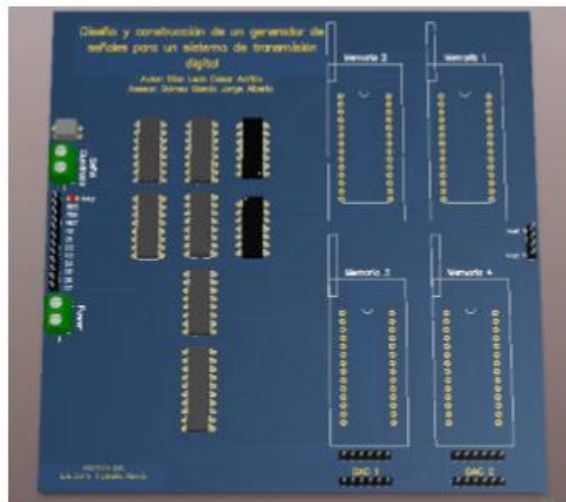
Las dos ecuaciones anteriores se reconocen como  $(N/2)$  punto DFT. Los cuales se puede subdividir hasta que solo queden dos puntos en cada DFT.



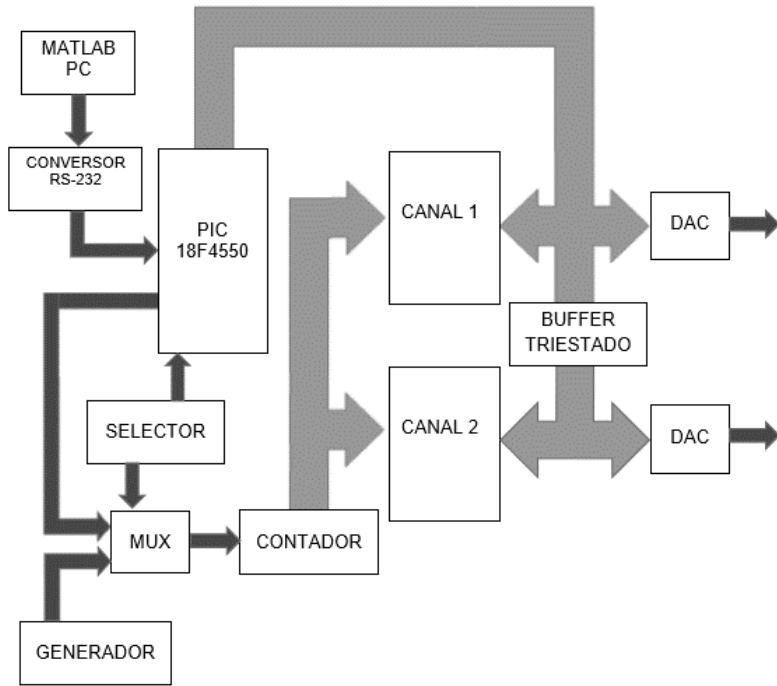
**Esquematicos del generador vectorial de señales.**



*Figura 0.2. Diagrama esquemático del generador de señales vectoriales.*



*Figura 0.3 Vista 3D del diseño de la placa.*



*Figura 0.4 Diagrama a bloques de generador de señales vectoriales.*