



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas
móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA.**

AUTOR:

Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 2 de septiembre de 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 2 de septiembre de 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “**Diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 2 de septiembre de 2020

EL AUTOR

Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **“Diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 2 de septiembre de 2020

EL AUTOR

Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto

REPORTE DE URKUND

URKUND Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

Documento [Carlos Chicaiza .MET.docx](#) (D77838088)

Presentado 2020-08-16 21:25 (-05:00)

Presentado por fernandopm23@hotmail.com

Recibido edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

Mensaje Revisión TT MET Carlos Chicaiza [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 23 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes **Bloques**

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	https://docplayer.es/79187623-Universidad-catolica-de-santiag...
	https://docplayer.es/amp/11211733-Seminario-de-titulacion-pr...
	https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/736/1/T-ESPE...
Fuentes alternativas	
Fuentes no usadas	

0 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA.

AUTOR: Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

19 de julio del 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto como requisito parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en

Dedicatoria

A Dios, por concederme la vida, la sabiduría y guía necesaria y para ubicarme en el lugar y tiempo indicado para de esta manera poder lograr un objetivo más en mi desarrollo profesional, así como personal.

A mis padres, por ser mi inspiración en las metas propuestas y con sus consejos y amor han sabido guiarme.

A mi esposa Marjorie Ibarra, a mis hijos Doménica y Bruno, por ser mi motivación y brindarme las fuerzas necesarias para seguir adelante, a ellos este trabajo de titulación.

Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto

Agradecimientos

A Dios, por brindarme la oportunidad de lograr este objetivo en mi vida profesional.

A mis queridos padres, a mi amada esposa Marjorie Ibarra y a mis hijos por su paciencia, apoyo inconmensurable y mucho amor durante ese proceso.

A los docentes de esta Maestría, por compartir sus conocimientos y experiencias.

A mi tutor, M. Sc. Edwin Fernando Palacios Meléndez por su soporte en todo el desarrollo de este trabajo.

Agradecimiento especial al M. Sc. Manuel Romero Paz, por su excelente gestión como Director de la Maestría en Telecomunicaciones.

A mi querida Universidad gracias infinitas por permitirme formarme profesionalmente y a la vez como persona de bien.

Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO

TUTOR

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO

REVISOR

M.Sc. QUEZADA CALLE, EDGAR RAUL

REVISOR

M. Sc. ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS

DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen.....	XIV
Abstract	XV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.	17
1.3. Definición del problema	18
1.4. Justificación del problema a investigar.....	18
1.5. Objetivos	18
1.6. Hipótesis.....	18
1.7. Metodología de investigación.....	19
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.....	20
2.1. Arquitectura de la red WiMAX.....	20
2.2. Detalles de la capa MAC en WiMAX.	22
2.2.1. Punto a multipunto (Point to Multipoint, PMP).....	23
2.2.2. Modelo de red enmallada	24
2.3. Introducción a la multiplexación por división de frecuencias ortogonales – OFDM.....	24
2.3.1. Principio de funcionamiento de OFDM	26
2.3.2. Ortogonalidad utilizando la transformada discreta de Fourier .	26
2.3.3. Prefijo cíclico – CP.	29
Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.	32
3.1. Diseño del transmisor de la capa física de WiMAX,	32
3.2. Diseño de capa física WIMAX en MatLab/Simulink.....	34
3.2.1. Caracterización del bloque de distribución al azar o aleatorizador.	35
3.2.2. Caracterización del bloque de la codificación de canales.....	36
3.2.3. Caracterización del bloque de intercalado o entrelazado.	37

3.2.4. Caracterización de la modulación de símbolos.	37
3.2.5. Caracterización de la combinación de piloto y datos.	39
3.2.6. Caracterización de la aleatorización de pilotos.....	40
3.2.7. Caracterización del preámbulo de inserción.	41
3.2.8. Caracterización de la operación IFFT y adición de prefijo cíclico.	42
3.3. Diseño e implementación de capa física WiMAX en FPGA.	43
3.4. Implementación del sistema WiMAX en la tarjeta FPGA.	53
Conclusiones.....	57
Recomendaciones	58
Bibliografía.....	59

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura básica de la red WiMAX basadas en IP.	20
Figura 2. 2: Esquema del módulo de conexión a la red de servicios de conectividad (CSN).	21
Figura 2. 3: Presentación de subportadora en el dominio de la frecuencia para OFDM.	26
Figura 2. 4: Análisis de dominio de tiempo y frecuencia de la señal OFDM.	27
Figura 2. 5: Amplitudes de subportadora de señal OFDM en tiempos de muestreo.	28
Figura 2. 6: Reconstrucción del prefijo cíclico en el sistema OFDM.	29

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Pasos de implementación del sistema definido por software. ...	34
Figura 3. 2: Bloques de capa física WiMAX en MATLAB.	35
Figura 3. 3: Bloque de aleatorizador.	35
Figura 3. 4: Estructura del codificador superpuesto.	36
Figura 3. 5: Modulación de símbolos QPSK, 16QAM y 64QAM.	38
Figura 3. 6: Información, colocación de piloto y subportadoras vacías.	40
Figura 3. 7: Modulación de señales piloto.	40
Figura 3. 8: Espectro de la trama WiMAX generada en el software MatLab/Simulink.	42
Figura 3. 9: Trama de WiMAX generada en el software MatLab/Simulink. ..	43
Figura 3. 10: Bloques de capa física WiMAX diseñados en FPGA.	44
Figura 3. 11: Esquema RTL para la multiplexación por división de frecuencias ortogonales.	45
Figura 3. 12: Gráfico de tiempos de submódulos en diseño FPGA.	46
Figura 3. 13: Verificación de bloque bloqueador aleatorio en diseño FPGA.	47
Figura 3. 14: Esquemático RTL para el bloque randomizer.	47
Figura 3. 15: Mapa de constelaciones para la modulación 16-QAM.	50

Figura 3. 16: Trama de WiMAX.	51
Figura 3. 17: Modulación de símbolos de datos, piloto y símbolos de preámbulo.	52
Figura 3. 18: Tarjeta FPGA Spartan 3 E de Xilinx.	53
Figura 3. 19: Etapas de implementación.	53
Figura 3. 20: Espectro de señal OFDM con frecuencia central de 21,4 MHz.	54
Figura 3. 21: Espectro de la señal OFDM de frecuencia central de 300 MHz.	55
Figura 3. 22: Salida del demodulador del marco WIMAX en el Arnitsu 2830A.	56
Figura 3. 23: Análisis de salida del demodulador del marco WIMAX.	56

Índice de Tablas

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Algoritmos de codificación de canales y uso de recursos.	48
---------------------------------------------------------------------------	----

Resumen

En el presente trabajo de examen complejo consiste en el diseño y simulación de la técnica de modulación de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) para redes inalámbricas móviles como WiMAX. En el capítulo 1, se describe brevemente la introducción de WiMAX y su relación con OFDM. También se describen, los antecedentes de la investigación, la definición del problema, la justificación y los objetivos del proyecto de titulación. En el capítulo 2, se presenta los fundamentos teóricos del sistema de comunicaciones WiMAX y de la técnica de modulación OFDM. Finalmente, en el capítulo 3, se presenta el diseño y simulación del trabajo propuesto. Para la implementación fue necesario utilizar el entorno de software (simulación) y hardware (matriz de compuerta programable, FPGA). A nivel de simulación se utilizaron dos entornos de programación robustos, como lo son el software MatLab/Simulink y el software ISIM de Xilinx. MatLab/Simulink también emplea librerías de FPGA's. Mientras que en el software ISIM se realiza la programación de registro de nivel de transferencia (RTL).

Palabras claves: COMUNICACIONES, MULTIPLEXACIÓN, ORTOGONALIDAD, FRECUENCIA, MODULACIÓN, WiMAX.

Abstract

This complex examination work consists of the design and simulation of the orthogonal frequency division multiplexing modulation (OFDM) technique for mobile wireless networks such as WiMAX. Chapter 1 briefly describes the introduction of WiMAX and its relationship to OFDM. The background of the research, the definition of the problem, the justification and the objectives of the degree project are also described. In Chapter 2, the theoretical foundations of the WiMAX communication system and the OFDM modulation technique are presented. Finally, in chapter 3, the design and simulation of the proposed work is presented. For the implementation it was necessary to use the software environment (simulation) and hardware (programmable gate matrix, FPGA). At the simulation level, two robust programming environments were used, such as MatLab / Simulink software and Xilinx ISIM software. MatLab / Simulink also uses FPGA libraries. Whereas in the ISIM software the transfer level register (RTL) programming is performed.

Keywords: COMMUNICATIONS, MULTIPLEXATION, ORTHOGONALITY, FREQUENCY, MODULATION, WIMAX.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

WiMAX conocido como Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX*) es una solución inalámbrica celular de banda ancha basada en el estándar IEEE 802.16, en el que el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) es el método de compartir recursos de comunicación entre un gran número de usuarios. (Kamali et al., 2012)

Rajpoot et al., (2016) expresa que la tecnología WiMAX pertenece a los estándares de comunicaciones inalámbricas (IEEE 802.16) que fue aprobada en abril de 2002. Se denomina oficialmente "Interfaz aérea para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha fija". También se denomina redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan Area Network, WMAN) o bucle local inalámbrico. Se puede utilizar como banda ancha alternativa en lugar de cable y DSL. (Tanenbaum et al., 2020)

Las primeras versiones de WiMAX (WiMAXv1) y LTE (LTE R8) no están clasificadas como sistemas inalámbricos 4G ya que no cumplen con los requisitos redactados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Sin embargo, las evoluciones de WiMAX (basado en IEEE 802.16m y en adelante llamado WiMAXv2) y la evolución de LTE llamada LTE-Advanced (LTE-A) son los principales competidores para los sistemas inalámbricos 4G. (Srikanth et al., 2012)

Se utilizan varias técnicas y tecnologías para lograr un alto rendimiento en redes WiMAX, por ejemplo, se la técnica denominada modulación multiportadora (MCM) de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Como todas las otras técnicas, la modulación multiportadora tiene ventajas y desventajas. Una ventaja es la robustez de la señal, relacionada con el canal multitrayecto según el desvanecimiento y el tamaño espectral óptimo. (Ba et al., 2019)

WiMAX y el estándar IEEE 802.16e son una solución en el acceso (*Broadband Wireless Access, BWA*) que admite velocidades de ancho de banda de hasta 70 Mbps y un radio de cobertura de 5 millas en promedio. El estándar IEEE 802.16 original se lanzó en octubre de 2001 y solo admitía operaciones de línea de vista. Posteriormente fue ratificado 802.16a, en enero de 2003, y 802.16-2004, en octubre de 2004, para incluir frecuencias sin línea de vista, entre 2-11 GHz. El estándar se modificó nuevamente en diciembre de 2005, que sería denominado 802.16e, para admitir la movilidad. (Cameron, 2013)

1.2. Antecedentes.

Existen diversos trabajos de investigación donde analizan a WiMAX mediante la técnica de modulación de multiportadora OFDM. El presente trabajo se basa en la revisión bibliográfica de revistas donde se encuentran publicados proyectos del sistema WiMAX utilizando OFDM. A continuación, se analizan 3 artículos científicos relacionados a aplicaciones de WiMAX.

- 1) En el artículo de Aldmour, (2013) se aborda las similitudes y diferencias técnicas que favorecen a una tecnología sobre la otra para determinar cuál de estos factores podría haber contribuido a ganar LTE. También se exploran factores no técnicos de naturaleza comercial e histórica que también podrían beneficiar a una tecnología sobre la otra. Finalmente, las actividades actuales en la estandarización tanto de WiMAX como de LTE se presentan con una perspectiva sobre las perspectivas de ambas tecnologías.
- 2) En el artículo de (Khadim et al., 2018) trata aspectos teóricos y prácticos de las redes de comunicación modernas en términos de sistemas de administración electrónica. Después de realizar una planificación, diseño e implementación muy sistemáticos, se registraron resultados efectivos y se mantuvieron los problemas para mejorar la experiencia de implementación de la administración electrónica en las redes de comunicación modernas.
- 3) En el artículo de Ba et al., (2019) estudiaron y optimizaron su desempeño, es decir, su probabilidad de falla de comunicación y métricas de relación señal-interferencia-más-ruido (SINR). La

herramienta matemática utilizada para realizar la evaluación y el análisis de OFDM es la transformada de Fourier y sus propiedades.

1.3. Definición del problema

A partir de la investigación relacionada con la tecnología WiMAX y la modulación de multiportadora surge la necesidad de realizar el diseño y simulación de la técnica de modulación de multiportadora llamada multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) sobre la plataforma MatLab/Simulink y entornos de programación de la tarjeta FPGA Spartan 3E.

1.4. Justificación del problema a investigar.

En la actualidad los sistemas de comunicaciones son analizados mediante el uso combinado de software y hardware de bajo costo, con relación a los equipos reales cuyos valores son muy altos. El diseño y simulación se realiza tanto en el software MatLab como el entorno de la FPGA.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Realiza el diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA.

1.5.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir la fundamentación teórica de la tecnología inalámbricas y WiMAX, así como la modulación de multiportadora OFDM.
- ✓ Diseñar el sistema de comunicación de transmisión y recepción de WiMAX usando la modulación de multiportadora OFDM.
- ✓ Interpretar los resultados obtenidos de la simulación para el sistema WiMAX.

1.6. Hipótesis

Con la implementación del sistema de comunicaciones WiMAX se demostrará que el diseño y simulación propuesto cumple con el estándar y los resultados son los esperados a nivel de la capa MAC.

1.7. Metodología de investigación.

Según Hueso González & Cascant i Sempere, (2012) los tipos de investigación más abordados actualmente son, exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. El presente trabajo integra dos tipos de investigación, exploratorio y explicativo. En el caso de investigación exploratoria, se examina un tema o problema poco abordado en la formación del masterado. Y es explicativo, porque responde a causas de eventos físicos como el de la modulación de multiportadora OFDM.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.

2.1. Arquitectura de la red WiMAX.

La arquitectura de sistemas de redes WiMAX de extremo a extremo (End-to-End) define el modelo de referencia de red (*Network Reference Model, NRM*) WiMAX. Es una representación lógica de la arquitectura de red. El NRM identifica entidades funcionales y puntos de referencia sobre los cuales se logra la interoperabilidad. La arquitectura se ha desarrollado con el objetivo de proporcionar soporte unificado de la funcionalidad necesaria en una gama de modelos de implementación de red y escenarios de uso. (Ergen, 2009)

La figura 2.1 muestra los componentes básicos de una red WiMAX, estaciones de abonado (*Subscriber Station, SS*) conectadas a través de la interfaz aérea a la estación base (*Base Station, BS*). La BS es parte de la red de servicios de acceso (*Access Service Network, ASN*) y se conecta a la red de servicios de conectividad (*Connectivity Service Network, CSN*) a través de la puerta de enlace de ASN. En terminología genérica de telecomunicaciones, ASN es equivalente a red de acceso por radio (*Radio Access Network, RAN*) y CSN es equivalente al núcleo (Core). (Alzaabi et al., 2013)

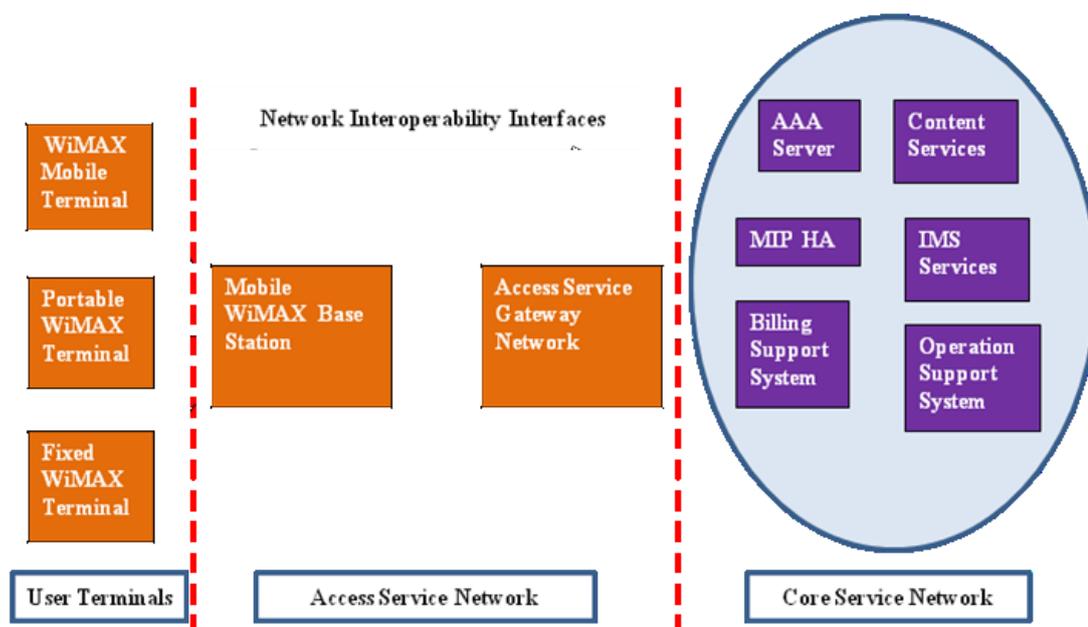


Figura 2. 1: Arquitectura básica de la red WiMAX basadas en IP.

Fuente: (Alzaabi et al., 2013; Patil & Kokare, 2014)

La red de servicios de acceso (ASN) realiza las siguientes funciones principales: (Gao et al., 2012)

1. Conectividad WiMAX de capa 2 y capa 3 con las estaciones de suscriptor, incluida la asignación de direcciones IP.
2. Detección de redes y selección de un proveedor de servicios de red adecuado al que accede la estación de abonado.
3. Gestión de recursos de radio.

Mientras que la red de servicios de conectividad (CSN) o Core realiza las siguientes funciones principales: (Gao et al., 2012)

1. Proporciona acceso a Internet
2. Autenticación, Autorización y Contabilización (AAA)
3. Control de directivas y admisión basado en perfiles de suscripción de usuario.

La arquitectura de la red de servicios de conectividad (CSN) se muestra en la figura 2.2, en la que se incluye enrutadores, el registro de ubicación, agente local y el servidor AAA. El enrutador conecta la CSN con los otros módulos. El registro de ubicación registra el inicio de sesión del usuario y la información de ubicación. Para apoyar la movilidad, CSN proporciona la función IP móvil.

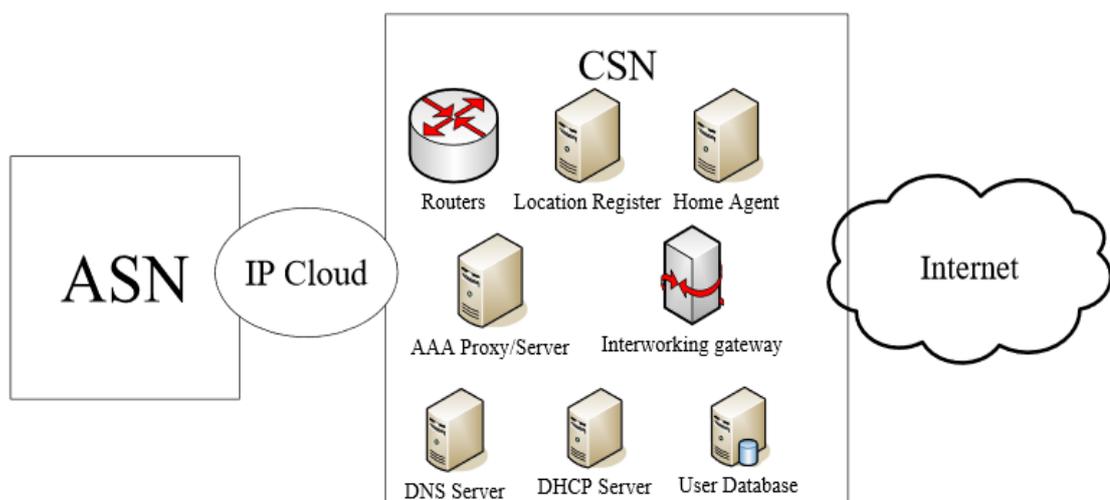


Figura 2. 2: Esquema del módulo de conexión a la red de servicios de conectividad (CSN).

Fuente: (Gao et al., 2012)

2.2. Detalles de la capa MAC en WiMAX.

La capa de control de acceso al medio (*Medium Access Control, MAC*) realiza la función de proporcionar una interfaz medianamente independiente a la capa física (PHY). Los sistemas WiMAX se basan en el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*), que proporciona un mejor rendimiento y funcionamiento de múltiples rutas en entornos sin línea de vista. Posteriormente, se agregó una enmienda al estándar IEEE 802.16e, en este caso OFDMA escalable (*Scalable OFDMA, SOFDMA*) para admitir anchos de banda de canal escalables. Algunas de las características clave compatibles con WiMAX incluyen las siguientes.

1. Altas velocidades de datos: se pueden lograr velocidades de datos de hasta 63 Mbps en enlaces descendentes y hasta 39 Mbps en enlaces ascendentes en WiMAX en un canal de 10MHz. Esto es posible debido a la inclusión de las técnicas de antenas de múltiples entradas – múltiples salidas (*Multiple Input Multiple Output, MIMO*) junto con esquemas de sub-canalización flexibles, tramas MAC más grandes, codificación y modulación avanzadas.
2. Escalabilidad: la tecnología WiMAX está diseñada para ser capaz de escalar, para trabajar en diferentes canalizaciones de 1.25 a 20 MHz para cumplir con los requisitos variados en todo el mundo. Esto también permite implementar a WiMAX en diferentes regiones geográficas en función de las diferentes necesidades.
3. Seguridad: Otra característica clave de las redes WiMAX es que la capa de seguridad está integrada en la pila de protocolos en lugar de agregarse más adelante. La capa de seguridad se intercala entre las capas PHY y MAC. Los mensajes de autenticación e intercambio de claves se definen como parte de la capa MAC. La capa MAC realiza el cifrado basado en las claves negociadas durante la fase de intercambio de claves.
4. Movilidad: WiMAX admite esquemas de transferencia optimizados con latencias inferiores a 50 ms para garantizar que las aplicaciones en tiempo real, como voz sobre IP (*Voice over IP, VoIP*), funcionen

sin degradación del servicio. Los esquemas de gestión de claves garantizan que se mantenga la seguridad durante la transferencia.

5. QoS: finalmente la premisa fundamental de la arquitectura de MAC IEEE 802.16 es la calidad de servicio (Quality of Services, QoS).

El enfoque principal de la capa MAC es manejar los recursos del enlace inalámbrico de una manera eficiente. La capa MAC es responsable del procesamiento general de la conexión y de la sesión. Las capas de control de acceso al medio (MAC) en la estación base (BS) y estaciones de abonados (SS) se comunican para configurar una conexión de radiofrecuencia (RF) y para configurar, agregar y eliminar servicios según sea necesario. El protocolo MAC IEEE 802.16 está diseñado para admitir dos modelos de red, que son: (a) punto a multipunto, y (b) modelo de red enmallada.

2.2.1. Punto a multipunto (Point to Multipoint, PMP).

En el modo PMP, los nodos se organizan en una estructura de tipo celular que consiste en una estación base (BS) y algunas estaciones de abonado (SS). Los canales se dividen en enlace ascendente (desde SS hasta BS) y enlace descendente (desde BS hasta SS), ambos compartidos entre las SS. Este tipo de red requiere que todas las estaciones de abonado estén dentro del rango de transmisión. El protocolo MAC IEEE 802.16 está orientado a la conexión, es decir que, al entrar en la red, cada SS crea una o más conexiones a través de las cuales sus datos se transmiten hacia y desde la estación base (BS). La capa MAC programa el uso de los recursos del enlace inalámbrico y proporciona la diferenciación de la calidad de servicio (QoS).

En el modo PMP, las transmisiones de datos de enlace ascendente y descendente ocurren en tramas de tiempo separados. En la subtrama de enlace descendente, la BS transmite una ráfaga de unidades de protocolo de datos (*Protocol Data Units, PDU*) de MAC. Dado que la transmisión se emite, todas las SS escuchan los datos transmitidos por la BS. Sin embargo, una SS solo está obligada a procesar las PDU que están dirigidas a ella o que están destinadas explícitamente a todas las SS's. En la subtrama de enlace ascendente, por otro lado, cualquier SS transmite una ráfaga de MAC PDU a

la BS en una forma de acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*). Las SS's pueden ser full dúplex o dúplex completo (es decir, pueden transmitir y recibir simultáneamente) o semidúplex (es decir, pueden transmitir y recibir a intervalos de tiempo no superpuestos).

El protocolo MAC está orientado a la conexión. Todas las transmisiones de datos tienen lugar en el contexto de conexiones. Una conexión es un enlace lógico unidireccional entre la capa MAC de la BS y la capa MAC de la SS. Un flujo de servicio se asigna a una conexión y la conexión se asocia con un nivel de QoS. Las conexiones en la dirección de enlace descendente son unidifusión o multidifusión, mientras que las conexiones de enlace ascendente son siempre unidifusión. Durante la inicialización de una SS, se establecen tres conexiones particulares en ambas direcciones. La conexión básica se utiliza para mensajes críticos de corta duración. La conexión de gestión primaria se utiliza para intercambiar mensajes más largos y tolerantes a retardos.

2.2.2. Modelo de red enmallada

En el modo de malla, los nodos se organizan de forma Ad-hoc. Todas las estaciones son iguales y cada nodo puede actuar como enrutadores para retransmitir paquetes para sus nodos vecinos. En instalaciones típicas, todavía hay ciertos nodos que brindan la función de la BS de conectar la red enmallada a los enlaces de retorno (backhaul). Sin embargo, no es necesario tener un enlace directo desde la SS a la BS de la red enmallada. Un nodo puede elegir los enlaces con la mejor calidad para transmitir datos; y con un protocolo de ruteo inteligente, el tráfico se puede rutear para evitar el área congestionada.

2.3. Introducción a la multiplexación por división de frecuencias ortogonales – OFDM.

Con la tecnología en desarrollo, la necesidad de velocidad de transmisión de datos en los sistemas de comunicación se ha incrementado exponencialmente. La razón principal de esta necesidad es el aumento de dispositivos portátiles. Con la difusión de internet y las redes sociales en estos

dispositivos, la demanda de transmisión de datos instantánea ha aumentado. Por esta razón, los sistemas de comunicación se han desarrollado de manera adecuada para la transmisión rápida de datos y para soportar redes móviles. (Joshi & Saini, 2010)

Con el desarrollo de la tecnología, la calidad de las transmisiones de video y audio ha aumentado, y la necesidad de transmisión de datos se ha multiplicado con la difusión de entornos y aplicaciones de intercambio social que hacen que la transmisión de datos sea instantánea. La banda de frecuencia, que es el requisito más importante para proporcionar esta infraestructura de transmisión, es un recurso limitado. Recientemente, la técnica de multiplexación por división de frecuencia ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*) con alta eficiencia de banda ha ganado popularidad en los sistemas de comunicación.

OFDM es una técnica altamente eficiente en términos de eficiencia de ancho de banda en comparación con los sistemas de múltiples portadoras para satisfacer las crecientes necesidades de transmisión de datos. Actualmente se encuentra en la infraestructura de sistemas de comunicación tales como transmisión de audio digital (*Digital Audio Broadcasting, DAB*), transmisión de video digital (*Digital Video Broadcasting, DVB*), línea de abonado digital asíncrona (*Asynchronous Digital Subscriber Line, ADSL*), redes inalámbricas de área local (*Wireless Local Area Networks, WLAN*) del estándar IEEE 802.11, y redes inalámbricas de área metropolitana (*Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN*) del estándar IEEE 802.16 y LTE.

La principal diferencia básica entre otros esquemas de modulación y la técnica OFDM es el uso de frecuencias ortogonales para mejorar la eficiencia espectral. Un pulso rectangular en el dominio de tiempo es una función sinc (seno cardinal) en el dominio de la frecuencia. Las frecuencias ortogonales se forman colocando el pico de un pulso sinc sobre los 0's de las funciones sinc adyacentes. Esto no produce una mezcla de componentes de interferencia desde una frecuencia ortogonal centrada en el pico de una función sinc hacia otra frecuencia. Esta estructura compacta da lugar a una eficiencia espectral

mejorada. Esta organización del pico de un seno sobre el cero del otro para formar frecuencias ortogonales se muestra en la figura 2.3. Entonces, cada frecuencia se puede modular independientemente con un símbolo entrante para la transmisión.

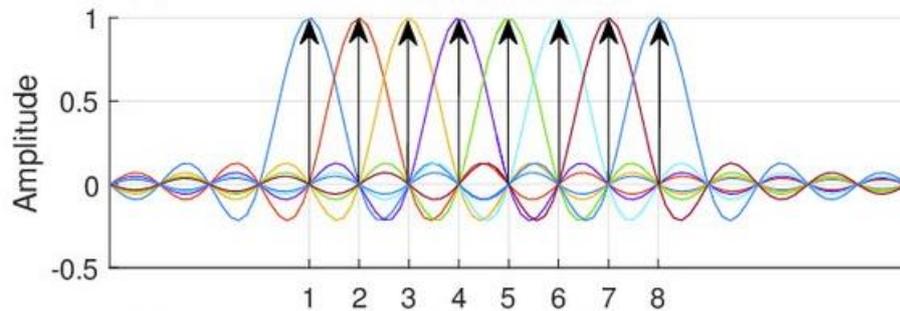


Figura 2. 3: Presentación de subportadora en el dominio de la frecuencia para OFDM.

Fuente: (Doğan et al., 2018)

2.3.1. Principio de funcionamiento de OFDM

El sistema de modulación OFDM está compuesto por un transmisor y un receptor como en otros sistemas de modulación. Este sistema consta básicamente de cuatro etapas principales. Estas etapas son:

- a. Dividir el flujo de datos en muchos flujos de datos paralelos,
- b. Generación de símbolos,
- c. Convertir los datos en el dominio del tiempo y
- d. Convertir los flujos de datos en paralelo nuevamente en una señal digital de dominio del tiempo en serie para entregarlos. al sistema de transmisión Estas etapas se explican a continuación.

2.3.2. Ortogonalidad utilizando la transformada discreta de Fourier.

La modulación por transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform, DFT*) espacia implícitamente las subportadoras de tal manera que, en cada frecuencia, donde se evalúa la señal recibida, todas las demás señales a diferentes frecuencias son cero. El principio de ortogonalidad es esencial para que la señal OFDM elimine la interferencia entre portadoras (ICI). En el sistema OFDM, la señal de dominio de frecuencia se refiere al flujo de datos en paralelo antes de la operación de la transformada inversa discreta de Fourier (*Inverse DFT, IDFT*). (Liu & Zheng, 2017)

Ahora, se puede considerar un sistema de modulación multiportadora (*MultiCarrier Modulation, MCM*) con subportadoras N_f , es decir, el sistema transmite un flujo de datos paralelo N_f simultáneamente. Las señales de transmisión compuestas multiportadora $s(t)$ en el instante de tiempo t están dadas por,

$$s(t) = \sum_{m=1}^{N_f} b_m e^{i2\pi(m-1)Bt/N_f}$$

Donde, b_m es el dominio de frecuencia de m -ésimo de los datos complejos que se transmitirán, $\Delta f = \frac{B}{N_f}$ denota la separación de la subportadora y $m(\Delta f)$ es la frecuencia central utilizada para modular los datos. La ecuación $s(t)$ muestra que cada señal modulada de baja velocidad de datos $\frac{1}{N_f T_s}$ se suma a una transmisión de alta velocidad de datos $\frac{1}{T_s}$. La figura 2.4 muestra la salida de la señal de 4 subportadoras OFDM en el dominio de tiempo y frecuencia durante un período completo.

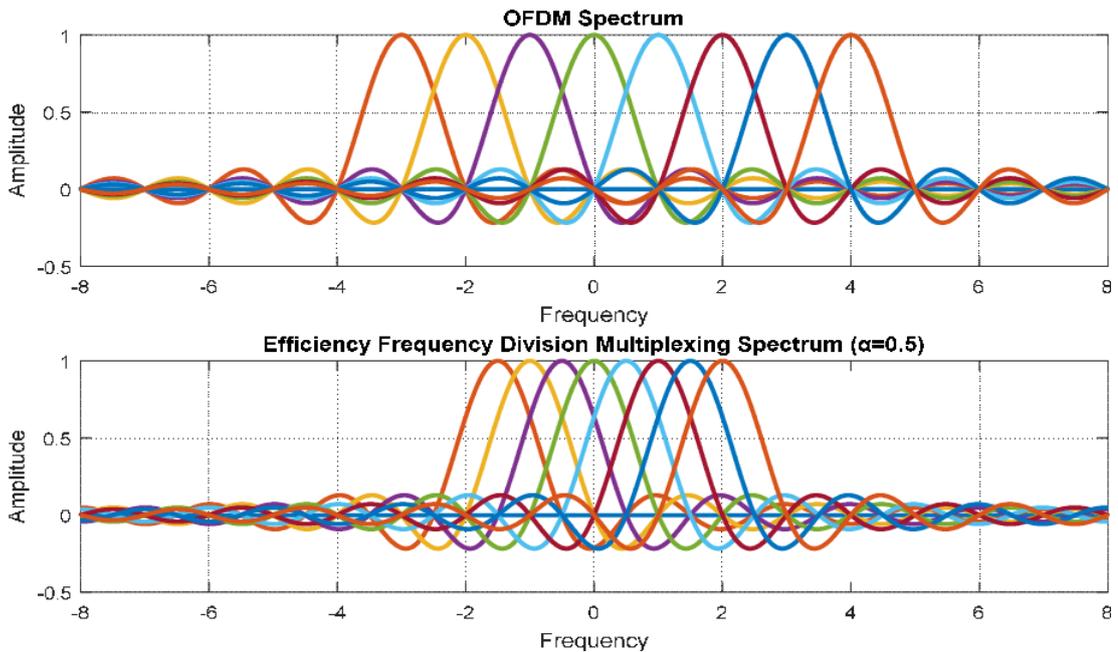


Figura 2. 4: Análisis de dominio de tiempo y frecuencia de la señal OFDM.
Fuente: (Jia et al., 2017)

Dado que este análisis se realiza durante un cierto período, el espectro de señales sinusoidales corresponde a la función seno cardinal (sinc). Cada uno de estos signos se llama armónicos de una señal sinusoidal de 1 Hz. Por

esta razón, cada subportadora se define como los armónicos entre sí porque se produce a frecuencias que son exactamente las otras subportadoras. El beneficio de esta característica se ve en el análisis del símbolo OFDM generado en el dominio de frecuencia. A la frecuencia a la que cada subportadora alcanza la amplitud máxima en el dominio de la frecuencia, la amplitud de las otras subportadoras es teóricamente cero.

Por lo tanto, la información transportada en cada una de las subportadoras producidas no es interferida con otras subportadoras. Este es un retorno del resultado teórico, pero la pérdida de la condición ortogonal de las subportadoras de hecho causa la información de la subportadora muestreada en los momentos de muestreo. Este problema se llama interferencia de subportadora (ICI).

La figura 2.5 muestra que las amplitudes máximas de las subportadoras en los momentos de muestreo y que las subportadoras vecinas tienen amplitudes cero en los momentos de muestreo.

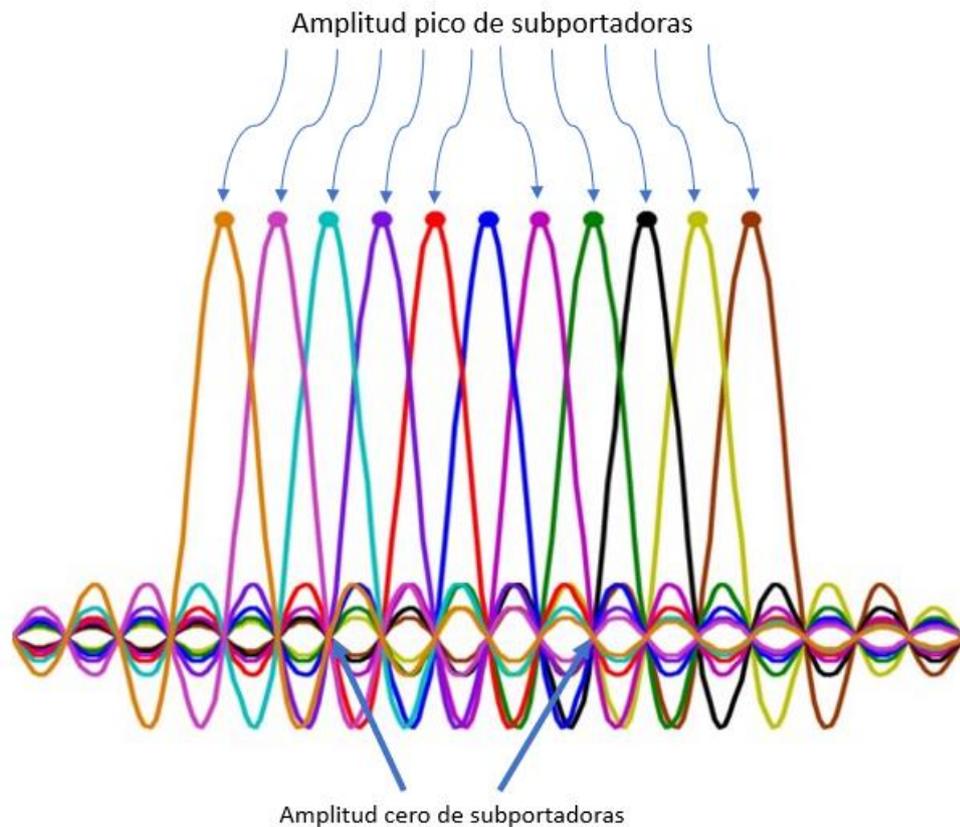


Figura 2. 5: Amplitudes de subportadora de señal OFDM en tiempos de muestreo.
Fuente: (Taluja, 2011)

2.3.3. Prefijo cíclico – CP.

El prefijo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*) en el sistema OFDM es una técnica para aumentar la duración del símbolo OFDM para mitigar el ISI resultante de la dispersión temporal causada por la propagación por trayectos múltiples. El prefijo cíclico también conocido como intervalo de guarda funciona sobre la base de la propiedad DFT junto con el teorema de convolución. La convolución circular entre dos funciones en el dominio del tiempo es equivalente a la multiplicación de sus respectivas DFT.

En el entorno inalámbrico real, la señal OFDM transmitida convoluciona linealmente con la respuesta al impulso del canal en el dominio del tiempo. Después de la extensión CP del símbolo OFDM, la convolución lineal entre el símbolo transmitido y la respuesta al impulso del canal produce el mismo resultado que la convolución circular. En la figura 2.6 (a) se muestran las tramas de la señal de transmisión, la figura 2.6 (b) las tramas de las señales recibidas, y la figura 2.6 (c) muestra la reconstrucción del CP.

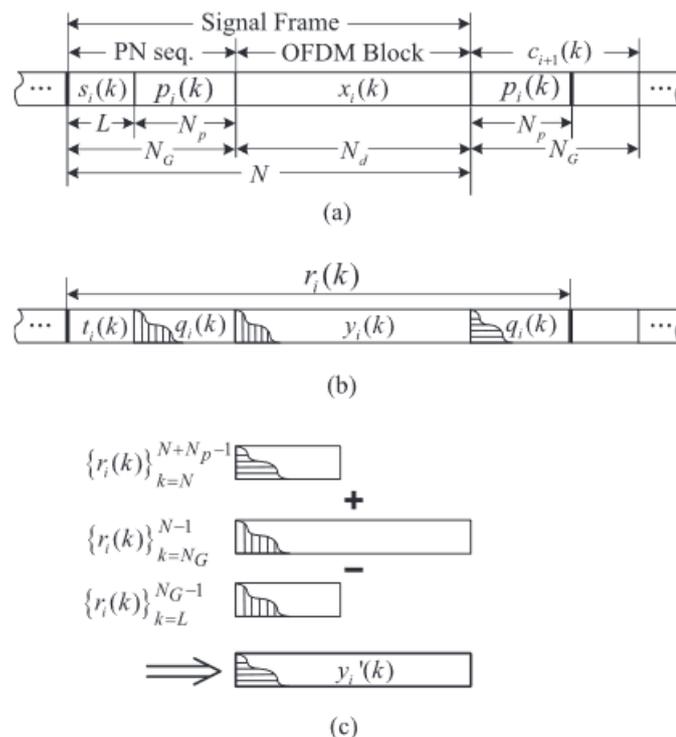


Figura 2. 6: Reconstrucción del prefijo cíclico en el sistema OFDM.

Fuente: (Dai et al., 2010)

Esto ayuda a desacoplar el canal en el dominio de la frecuencia de manera que la respuesta de frecuencia del canal para cada subportadora sea

independiente, lo que equivale a convertir el canal selectivo de frecuencia de banda ancha en un grupo N_F paralelo de canales de desvanecimiento plano de banda estrecha. En general, el desacoplamiento por subportadora de la señal recibida en el dominio de frecuencia en el sistema OFDM se puede representar como,

$$\tilde{r}_k = \lambda_k b_k + \tilde{n}_k \quad k = 1, 2, \dots, N_F,$$

La concatenación del símbolo OFDM real con el CP aumenta la duración del símbolo del símbolo OFDM efectivo y también mantiene la periodicidad del símbolo OFDM en el dominio del tiempo. Por lo tanto, los beneficios de CP en el símbolo OFDM son los siguientes:

1. CP actúa como un intervalo de guarda entre dos símbolos adyacentes al evitar la llegada de un símbolo al receptor hasta que hayan llegado todos los componentes de trayectos múltiples del símbolo anterior. El aumento de la duración del símbolo asegura que el componente retrasado del símbolo anterior no interfiera con el símbolo actual. Por tanto, ningún símbolo adyacente se superpone durante la ventana de símbolo OFDM real de longitud N_F .
2. La periodicidad lograda por CP evita el impacto de la discontinuidad de fase durante la superposición de sus componentes multitrayecto. La periodicidad conserva la propiedad cíclica de DFT al limitar la distorsión de la señal que se produce fuera del símbolo OFDM real. Por lo tanto, no se produce ninguna transición de fase en el lado de la ventana OFDM real y la señal dentro de esta ventana de observación se forma mediante la superposición de sinusoides puras con desfase. Los componentes del dominio de la frecuencia en el símbolo OFDM real contendrán un número entero de ciclos correspondiente a su frecuencia de subportadora. Esto es importante para que DFT identifique con precisión cada componente de frecuencia individual en la señal recibida en el dominio del tiempo. La posibilidad de una identificación precisa de cada componente de frecuencia en la señal recibida permite el desacoplamiento del canal en el dominio de la frecuencia. El símbolo OFDM transmitido a veces

se sobre muestrea mediante la introducción de relleno de cero para aumentar la precisión de DFT. Aunque la superposición entre múltiples copias del mismo símbolo da como resultado un cambio de fase, eliminando ISI y se mantendrá la ortogonalidad entre las subportadoras.

Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.

El presente capítulo se realiza el diseño y simulación de la red WiMAX, y de los resultados que se obtienen.

3.1. Diseño del transmisor de la capa física de WiMAX,

Los parámetros del sistema en el estándar WiMAX móvil se pueden seleccionar dinámicamente de acuerdo con la calidad de transmisión del canal y los límites de ancho de banda. Gracias a esta estructura dinámica, aumenta la adaptación a las condiciones ambientales y se intenta maximizar la transmisión total de datos. El transmisor de capa física móvil WiMAX basado en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) fue diseñado e implementado dentro del alcance del presente trabajo de titulación.

Se ha realizado el diseño de radio digital definido por software para implementar la capa física dinámica en WiMAX móvil. Las radios definidas por software son estructuras en las que la estructura de comunicación puede definirse dinámicamente utilizando únicamente software. Los parámetros se pueden seleccionar dinámicamente en función de las normativas locales, como el ancho de banda, la longitud de la transformada rápida de Fourier (FFT), el número de símbolos en la trama WiMAX, la longitud de la trama WiMAX, el grado de modulación, la selección de la banda de protección, la selección de frecuencia de comunicación y el estado del canal.

Si bien el cambio en la estructura de comunicación de las estructuras de radio definidas por hardware solo es posible a través de intervenciones de hardware, el software puede cambiar el hardware en radios definidas por software. En consecuencia, con esto los costos de producción y mantenimiento se han reducido con el uso de radios definidas por software.

Los requisitos de hardware varían según el diseño de las radios definidas por software. En el mercado de hardware electrónico, los circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), los procesadores de señal digital (DSP) y las matrices de puertas programables de campo (FPGA) están disponibles para

crear esta estructura dinámica. Aunque DSP y ASIC ofrecen algunos núcleos especiales, tales como la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) y decodificador de Viterbi (Decoder Viterbi) y bibliotecas de software en términos de diseño de OFDM, lo que limita la dependencia de la empresa.

La universalidad de los códigos utilizados para el diseño de software puede perderse incluso en diferentes procesadores, este código tiene una gran desventaja en términos de portabilidad. Aunque los DSP's y los ASIC's proporcionan un desarrollo rápido y sencillo del diseño con las unidades periféricas que ofrecen, un número limitado de unidades periféricas no está abierto a un mayor desarrollo en el diseño. A la luz de estas razones, se utiliza una FPGA en el diseño de radio digital definido por software.

Si bien las FPGA's pierden tiempo al diseñar muchas interfaces periféricas para la velocidad de desarrollo de su software, su portabilidad es alta. Por lo tanto, las interfaces ambientales se pueden diseñar de acuerdo con las necesidades de diseño. Además, estas unidades pueden funcionar en paralelo, secuencial o retardado. A diferencia de DSP y ASIC, la lógica de operación paralela permite que los subbloques en el diseño trabajen simultáneamente con el mismo pulso de reloj sin esperar el uno al otro. De esta manera, las operaciones como FFT y correlación se pueden completar en un tiempo más corto. En FPGA, a diferencia de DSP y ASIC, las operaciones aritméticas no tienen que realizarse con números de 32 o 16 bits.

El primer paso en la realización del presente trabajo complejo fue determinar los parámetros del sistema de acuerdo con el estándar IEEE 802.16-2012. Los parámetros de implementación se seleccionan como 1.25 MHz en función del ancho de banda mínimo especificado en la tabla 3.1. El objetivo principal es realizar el diseño que cubre todos los bloques de capa física con un ancho de banda mínimo compatible con el estándar.

Se tomó una decisión básica para la optimización de recursos del diseño que se realizará en la FPGA con una selección mínima de parámetros del sistema. Después de la determinación de los parámetros, se recopilan los

pasos de implementación del trabajo de examen complejo en tres pasos básicos, tal como se muestra en la figura 3.1.

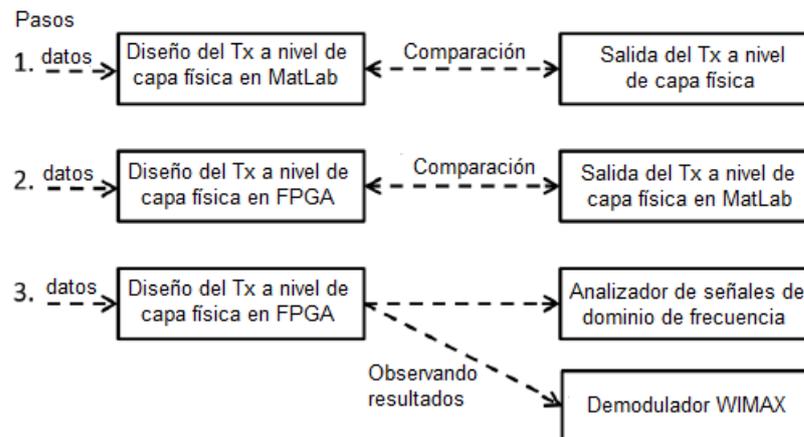


Figura 3. 1: Pasos de implementación del sistema definido por software.

Elaborado por: Autor.

En el primer paso, la simulación de la capa física se preparó en el entorno MatLab/Simulink de acuerdo con la información de diseño de la capa física de WIMAX móvil. Los resultados de los subbloques de esta simulación se verificaron comparándolos con los datos de prueba contenidos en el estándar 802.16-2012. El diseño actual del transmisor se implementó en el programa de simulación Quartus II de Altera y FPGA.

La salida del diseño FPGA después de cada bloque también se verificó con la simulación del transmisor en MatLab/Simulink. El transmisor diseñado en el último paso se instaló en el hardware FPGA para producir la señal de banda base. La señal de banda base producida se envió a la tarjeta de radiofrecuencia (RF) y las salidas se analizaron en el dominio de frecuencia. Después de analizar la señal de RF generada en el dominio de la frecuencia, se observó que las tramas de símbolos enviadas al receptor WIMAX fueron capturadas correctamente.

3.2. Diseño de capa física WIMAX en MatLab/Simulink.

En esta sección se diseña la capa física de WiMAX, la figura 3.2 muestra el diseño de bloques de la capa física de WiMAX móvil. El contenido de cada bloque de diseño se explicará en detalle.

3.2.2. Caracterización del bloque de la codificación de canales.

Las salidas aleatorias generadas se envían al bloque de codificación de canal, que es el primer miembro del bloque de corrección de errores en la transmisión. En este bloque, se pueden utilizar los códigos plegados, los códigos turbo en bloque, los códigos turbo plegados y los códigos de control de paridad de baja densidad. Dentro del alcance del presente trabajo de titulación, se utilizó una codificación de $\frac{1}{2}$ veces. La longitud límite de la estructura reticular que se utilizará para generar el código de superposición se determina en 7 bits. Los bits de salida a producir se definen mediante la estructura de jaula "1111001" y "1011011", y la lógica de formar esta estructura se muestra en la figura 3.4.

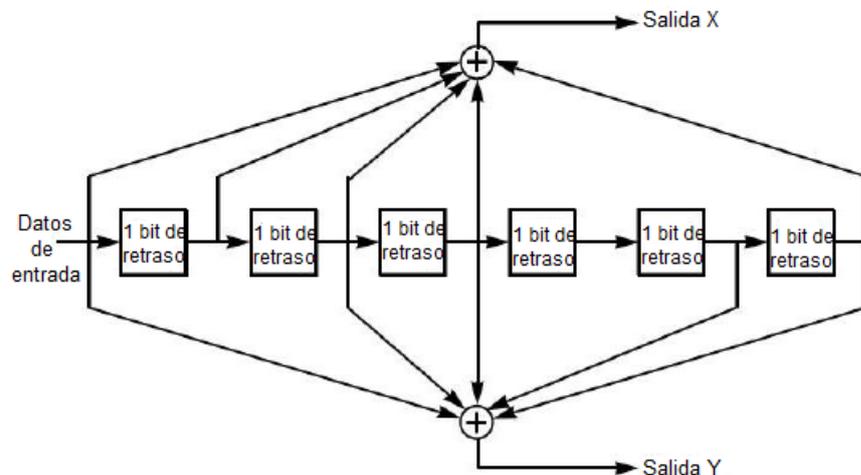


Figura 3. 4: Estructura del codificador superpuesto.
Elaborado por: Autor.

Las salidas X e Y se producen con la estructura reticular dada, que genera una salida de 2 bits para cada bit de información. La técnica de codificación convolucional produce salidas secuenciales para la entrada de información secuencial ya que no hay codificación de bloque. Por lo tanto, la secuencia de bits en la memoria afecta la salida del código que se generará. Se ha utilizado el método de seguimiento para obtener la información generada en la codificación de superposición en el bloque transmisor correctamente en el decodificador en el receptor.

Los últimos 6 bits de la información a transmitir se agregan al comienzo de la secuencia de bits y se ingresan en el codificador de superposición. Por

ejemplo, para transmitir 96 bits, se obtiene una secuencia de 102 bits de longitud y debe ingresar esta secuencia en el codificador de superposición. Dado que el diseño de FPGA está dirigido al consumo mínimo de recursos, se ha establecido una estructura secuencial para permitir que el sistema produzca la salida más rápida posible.

3.2.3. Caracterización del bloque de intercalado o entrelazado.

En este caso OFDM divide la información en subportadoras, ya que uno de los beneficios de esto es que hace que el sistema sea resistente a la amortiguación que puede ocurrir en el canal. Por este motivo, se utiliza el intercalado para que esta función sea útil. Con sus dos funciones diferentes, actúa como el segundo elemento del bloque de corrección de errores en la transmisión. La información cuya primera función se transmitirá se intercala de acuerdo con una determinada regla, de modo que la información consecutiva se transporta en subportadoras a diferentes frecuencias.

De esta manera, dado que la información secuencial no se ve afectada en los efectos de amortiguación que ocurren en ciertas frecuencias en el canal, la corrección de los bits incorrectos se puede hacer mediante la técnica de codificación de canal. La segunda función es la aplicación de entrelazado entre el símbolo de acuerdo con el grado de modulación de los bits de información codificados adyacentes dentro del símbolo. Los bits se pueden expresar como bits más significativos (MSB) o menos significativo (LSB). El grado de modulación tiene una contribución significativa a 16-QAM y 64-QAM.

La tasa de error de todos los bits en los mapas de símbolos para 16-QAM y 64-QAM no es la misma. Los bits más significativos (MSB) tienen menos probabilidades de error. Por esta razón, los símbolos de información se pueden crear de tal manera que la tasa de error sea menor como resultado del entrelazado.

3.2.4. Caracterización de la modulación de símbolos.

Una de las características más importantes del estándar WiMAX móvil es que permite la creación de símbolos de información de acuerdo con la

necesidad de velocidad de transmisión de datos. Por lo tanto, el grado de modulación se puede determinar de acuerdo con el estado del canal y la velocidad de transmisión de datos requerida. En la figura 3.5 se muestran los mapas de símbolos QPSK, 16-QAM y 64-QAM identificados en sistemas WiMAX.

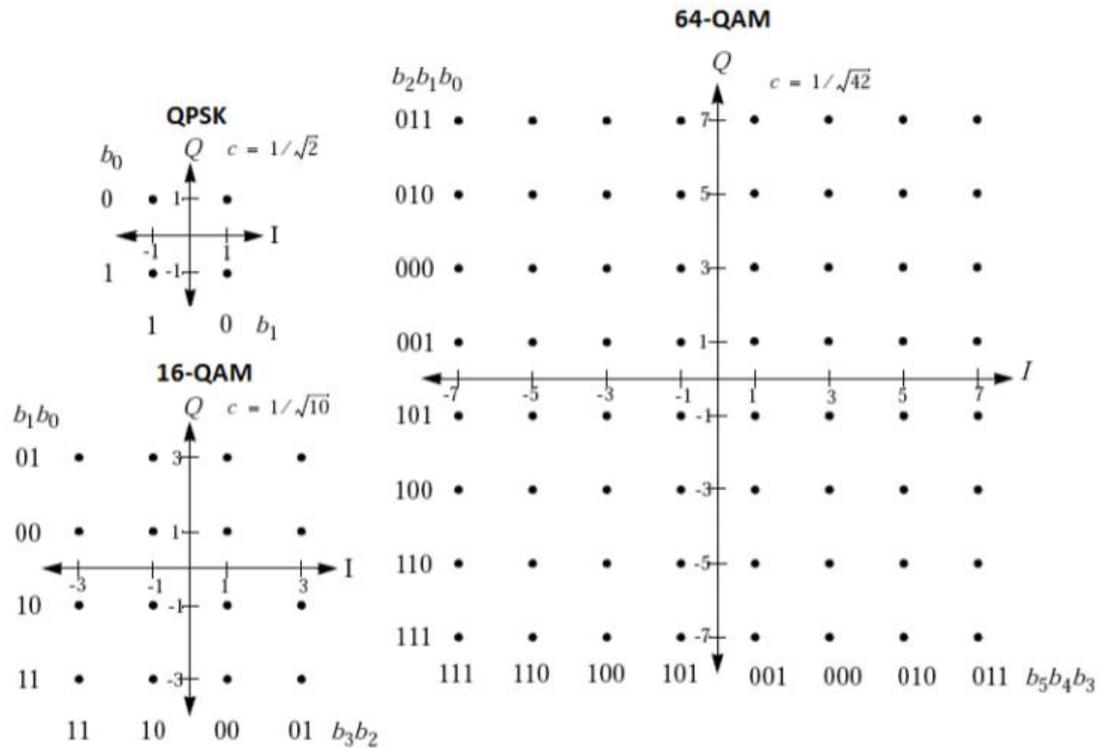


Figura 3. 5: Modulación de símbolos QPSK, 16QAM y 64QAM.
Fuente: (Quilumbango H. & Álvarez R., 2012)

En el diseño del transmisor dentro del alcance de la tesis, se utilizó 16-QAM como modulación de símbolos de bits de información. Como se prefiere la modulación 16-QAM utiliza 4 bits para generar cada símbolo QAM. Cada 4 bits se transfieren al plano complejo de acuerdo con el mapa de símbolos anterior. Aunque, también se puede utilizar la codificación Gray que se utiliza para crear símbolos de información. Por ejemplo, cuando la notación del símbolo formado por los bits "1101" se codifica como $b_3 b_2 b_1 b_0$, la parte real del símbolo complejo se convierte en -3 y la parte virtual es +3.

Cada símbolo creado se multiplica por un coeficiente c diferente según el grado de modulación. Esto se hace para equilibrar la potencia promedio de los símbolos. Además de las modulaciones mencionadas anteriormente, la

modulación binaria por desplazamiento de fase (BPSK) también se utiliza en la producción del inserto de arranque y en la producción de señales piloto.

3.2.5. Caracterización de la combinación de piloto y datos.

En los sistemas de comunicación inalámbrica, la información transmitida desde el transmisor está sujeta a efectos perturbadores en el canal. En la técnica OFDM, las señales piloto se utilizan para la estimación del canal. La información no se transporta en cada subportadora. En algunas subportadoras, se transmiten señales piloto, comúnmente conocidas como transmisor y receptor. Como se sabe cuáles deberían ser estas señales en el receptor, el efecto de canal que actúa sobre las señales de información se puede calcular de esta manera. Este método se denomina estimación de canal con la ayuda de una señal piloto. Como se mencionó anteriormente, los símbolos de las subportadoras piloto se generan mediante la modulación BPSK.

Al igual que la creación de señales de datos, las señales piloto se multiplican por un factor c . Este valor se define $4/3$ para señales piloto. Los datos piloto generados por la modulación BPSK toman los valores $\{1, -1\}$, y sin componentes complejos. Este diseño dispone a piloto determinado dentro del alcance del presente proyecto, se utilizó la relación $4/3$ para obtener la información en el receptor. Se tiene 128 subportadoras, ya que se reciben 128 puntos FFT de acuerdo con el ancho de banda seleccionado, aunque no todas son utilizadas para transmitir señales de datos y piloto.

Las bandas de protección se liberan para evitar que la señal OFDM generada dañe otras bandas en el dominio de la frecuencia. Estos valores se crean dejando 22 y 21 subportadoras vacías a la izquierda y vacías a la derecha, respectivamente, tal como se especifica en el estándar. Además, no se transmite datos en la subportadora DC. Por lo tanto, se tiene un total de 44 subportadoras no utilizadas. Se tienen 84 subportadoras para transmitir señales de datos y piloto de un total de 128 subportadoras. Cada una de estas 14 subportadoras se denominan clústeres. En el diseño se ha seleccionado un ancho de banda (BW) de 1.25 MHz y un total de 6 clústeres. La

subportadora DC es simétrico con 3 a la izquierda de la portadora inferior y 3 a la derecha. La figura 3.6 muestra simbólicamente las ubicaciones de las subportadoras piloto y de datos (información) en el dominio de la frecuencia.

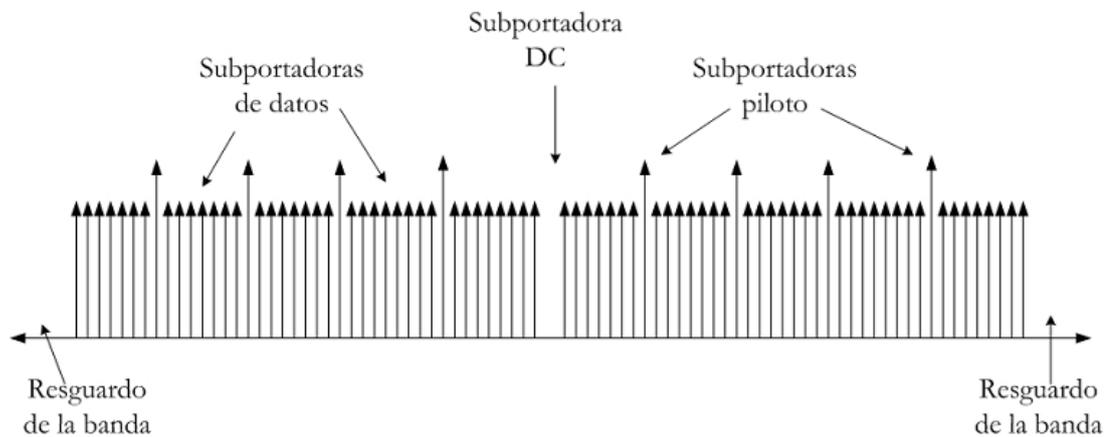


Figura 3. 6: Información, colocación de piloto y subportadoras vacías.

Fuente: (Quilumbango H. & Álvarez R., 2012)

Además, la figura 3.6 muestra que la potencia de las subportadoras piloto es mayor que las de datos. Esta diferencia resulta de la multiplicación de las señales de datos y piloto por diferentes coeficientes después de la modulación. Dado que las señales piloto se utilizan para la estimación de canales, su potencia de transmisión aumenta el rendimiento de la estimación.

3.2.6. Caracterización de la aleatorización de pilotos.

Este paso permite que las señales piloto generadas sean moduladas mediante BPSK a 1 o -1, que son generadas por PRBS estándar. La figura 3.8 muestra la función de generación PRBS, después de obtener secuencias pseudoaleatorias con el generador PRBS, se generan señales piloto mediante modulación BPSK. La primera secuencia inicial de PRBS se especifica en el estándar como "0000011111". Las señales resultantes se asignan a las subportadoras identificadas en el paso anterior.

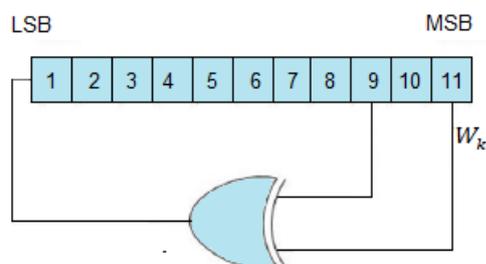


Figura 3. 7: Modulación de señales piloto.

Elaborado por: Autor.

3.2.7. Caracterización del preámbulo de inserción.

El estándar WiMAX contiene estructuras de mensajes que contienen un cierto número de símbolos OFDM. Estos se denominan tramas de mensajes WiMAX. Las longitudes de trama en el estándar WiMAX se pueden especificar entre 2.5 y 20 ms. Para el diseño, este valor se selecciona como 5 ms. El número máximo de símbolos OFDM que pueden tener lugar dentro de la longitud de trama de 5 ms especificada es 48. Recibir cada trama con la sincronización correcta en el receptor del estándar WiMAX es un problema importante de sincronización.

El indicador del inicio de la trama es un símbolo OFDM especial, designado "Preámbulo". La razón por la que es especial es enviada fuertemente por el símbolo OFDM normal. Tanto el transmisor como el receptor tienen 114 accesos de inicio designados. El primer símbolo OFDM de cada trama WiMAX se envía como un archivo adjunto de inicio. El receptor determina desde qué transmisor y en qué momento se recibe la información, después de decodificar correctamente este arrancador. Los símbolos que se colocarán en las subportadoras de inserción están codificados por la modulación BPSK. En el diseño, esta constante ha sido elegida el sufijo inicial 100.

El símbolo OFDM con el sufijo de inicio también está disponible como señales piloto. Estas señales piloto se generan multiplicando el coeficiente $2\sqrt{2}$, a diferencia de los pilotos en otros símbolos OFDM. Las señales de datos de los 114 inicios también se determinan como estándar. Las inserciones iniciales están diseñadas de tal manera que sus interrelaciones mutuas en el estándar sean mínimas.

El receptor aprovecha esta función para iniciar las tramas. El número de subportadoras vacías en la zona de protección de inserción inicial es 20. En la figura 3.8 se muestra la región de frecuencia pre-IFF de la trama WiMAX de 5 símbolos creada para facilitar el análisis. Como se entiende por el análisis, las subportadoras cero del sufijo de inicio son menores y tienen mayor potencia que los símbolos normales.

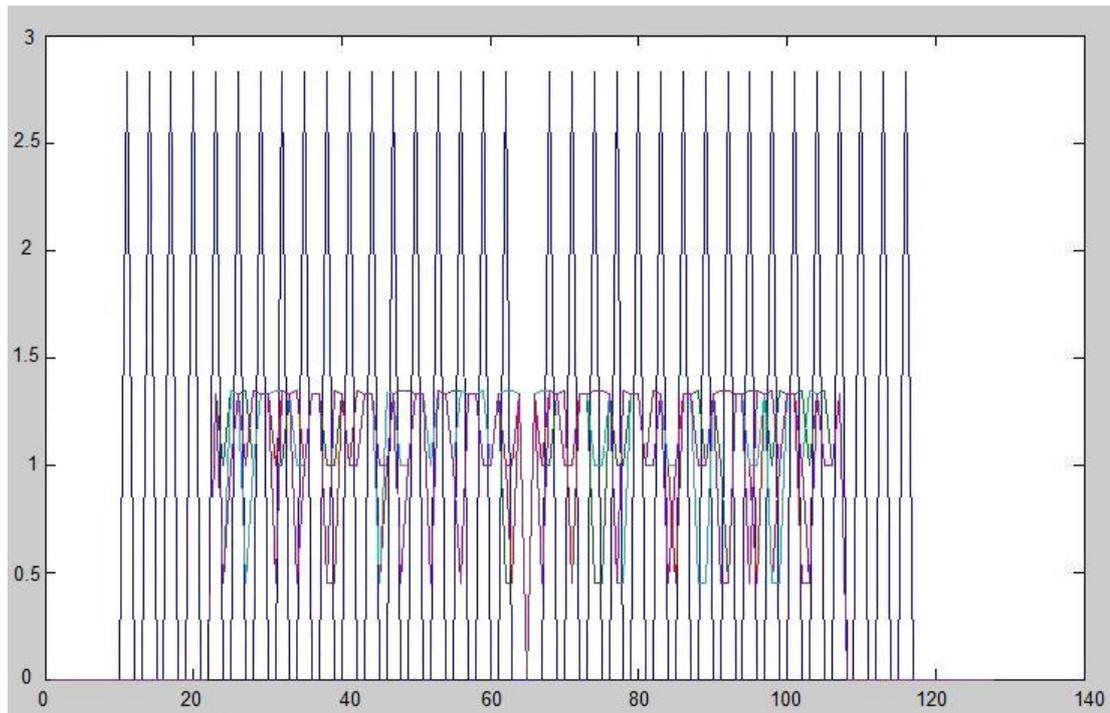


Figura 3. 8: Espectro de la trama WiMAX generada en el software MatLab/Simulink.
Elaborado por: Autor.

3.2.8. Caracterización de la operación IFFT y adición de prefijo cíclico.

En esta parte los datos o información que se cargará en las subportadoras incluye un total de 128 números complejos. En algunas subportadoras, se establece en cero porque la información no se moverá. Cada número complejo obtenido se somete a la operación FFT y se multiplica por subportadoras. El proceso FFT coloca los símbolos de información en las subportadoras perpendiculares entre sí.

En los 128 símbolos complejos obtenidos como resultado de la operación FFT, se agrega un prefijo cíclico para evitar la interferencia entre símbolos causada por la interferencia multitrayecto. La relación de prefijo cíclico se puede seleccionar como 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32. En este diseño, el valor se selecciona como 1/8. Por esta razón, los últimos 16 de los 128 símbolos complejos obtenidos después de la operación FFT se copian y se agregan al comienzo del símbolo. Por lo tanto, se prepara el símbolo OFDM que contiene 144 símbolos complejos. Después de aplicar esta operación a cada símbolo OFDM, se prepara una trama WiMAX de 5 ms en sucesión.

La figura 3.9 muestra la trama de WiMAX implementado en el software MatLab/Simulink. El número de símbolos OFDM paramétricos definidos para este diseño se determinó como 4 para facilitar el análisis. La longitud de la trama es 5 símbolos OFDM con el sufijo de inicio. Como cada símbolo tiene una longitud de 144, es un dibujo con 720 muestras. Las primeras 144 muestras manifiestan la inserción inicial en el dominio del tiempo. Como se esperaba, la potencia promedio es más alta que otros símbolos.

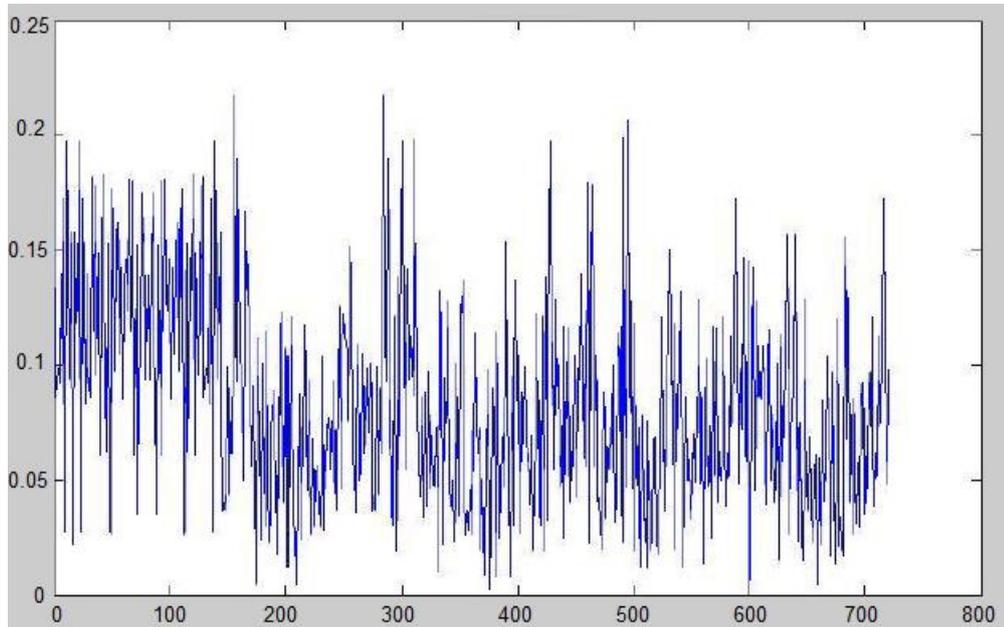


Figura 3. 9: Trama de WiMAX generada en el software MatLab/Simulink.
Elaborado por: Autor.

3.3. Diseño e implementación de capa física WiMAX en FPGA

El transmisor de banda base creado en el software de simulación MatLab/Simulink se verificó con las salidas de prueba en el estándar y luego se implementa en una FPGA. La FPGA utilizada para la realización del presente trabajo de titulación es la XC3S500E de la familia Spartan-3E de la compañía Xilinx. Para realizar el diseño del transmisor de banda base se utilizó el software de simulación ISE (ISIM), mientras que para la implementación en la FPGA fue necesario el programa ISE.

En el caso del software de simulación ISIM, se trata de un analizador lógico que proporciona FPGA para el entorno de pruebas o testeo. Cada sub-bloque en el diseño FPGA se cargó en el hardware después de la comparación con los datos de prueba en MatLab y del estándar. El diseño

circuito integrado del convertidor superior. 144 de los datos I están contenidos en un símbolo OFDM, mientras que el componente I de datos Q se transmiten en el flanco ascendente de la señal de 1.4 MHz y el componente Q en el flanco descendente. La señal de entrada requerida para el IC convertidor elevador se especifica de esta manera. La señal "DATA_OUT_RDY" indica que los datos de salida están listos y estos son utilizados con fines de control.

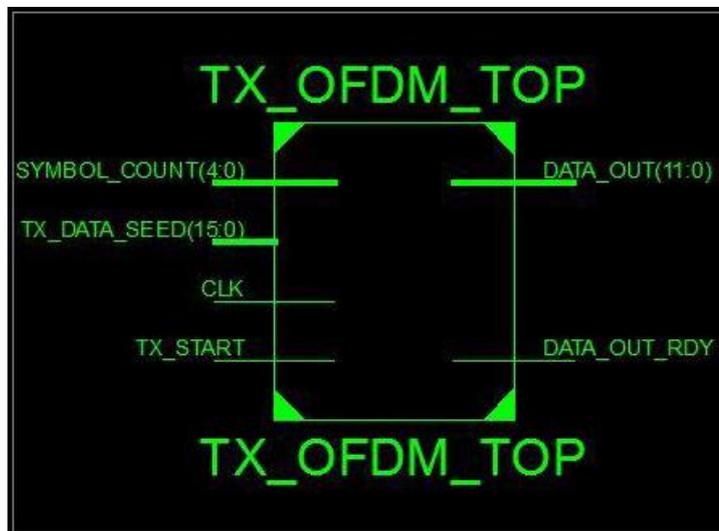


Figura 3. 11: Esquema RTL para la multiplexación por división de frecuencias ortogonales.

Elaborado por: Autor.

Todos los subbloques utilizados para el diseño tienen señales de entrada de habilitación "ENABLE". Mediante esta señal de control, se determina cuándo se abrirán y cerrarán todos los bloques. Un momento crítico es cuánto tiempo permanecerán abiertos todos los bloques. Cada bloque debe cerrarse después de generar los últimos datos para el diseño secuencial. El módulo superior de la figura 3.11 controla este tiempo.

En la figura 3.12 se muestra cuánto tiempo los subbloques han completado sus operaciones. Los datos en algunos bloques, como "RAM" en los subbloques, cambian en cada símbolo OFDM. Por esta razón, la señal "CLR_EN" se utiliza para inicializar todos los subbloques a sus condiciones iniciales.

Después de que se inicializa el contenido de los subbloques utilizados en el diseño, se activa la señal "PREAMBLE_EN" para generar el primer

símbolo OFDM. Dado que el primer símbolo de la trama WiMAX es preámbulo, este bloque solo funciona en la trama de inicio. Los datos de prueba que se utilizaron para el diseño se basan del estándar IEEE 802.16. Los datos de prueba especificados en el estándar se dan como "0xACBCD2114DAE1577C6DBF4C9" en la base hexadecimal. La información de prueba producida se pasó primero a través del bloque "Aleatorizador".

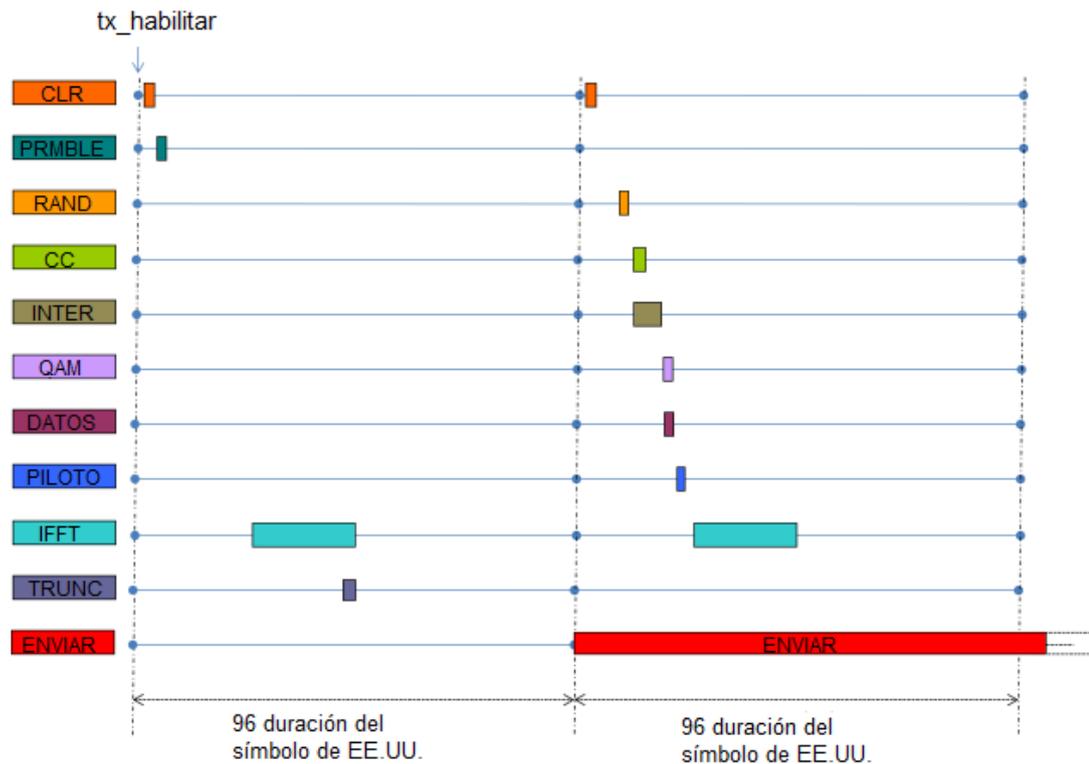


Figura 3. 12: Gráfico de tiempos de submódulos en diseño FPGA.
Elaborado por: Autor.

También, se agregan bloques de memoria RAM con la finalidad de observar los resultados más fácilmente en el diseño FPGA. Con los bloques de memoria RAM, es posible comparar las salidas de ciertos bloques con MatLab/Simulink. Mientras que para "Encoder_ram" ubicado en la salida del bloque aleatorizador indica la entrada del codificador de canal de 96 bits, tal como se muestra en la figura 3.13. La compatibilidad del bloque "Aleatorizador" con los datos de prueba en el estándar viene dada por la salida del analizador lógico ISIM.

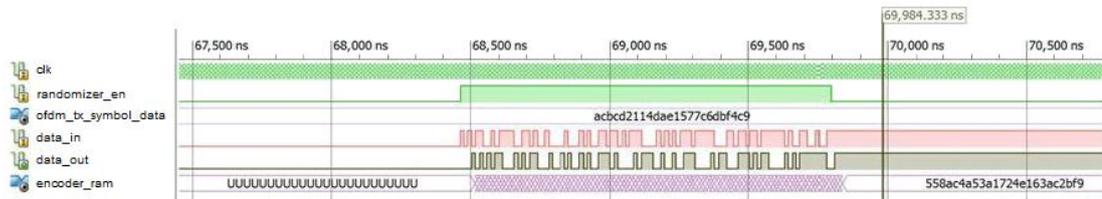


Figura 3. 13: Verificación de bloque bloqueador aleatorio en diseño FPGA.
Elaborado por: Autor.

La señal de pulso de reloj “clk” (véase la figura 3.13), la señal “randomizer_en” es requerida para que funciones el bloque aleatorizador (randomizer), la cadena “tx_ofdm_symbol_data” contiene 96 bits de datos para ser transmitidos en el símbolo OFDM, la señal “DATA_IN” recibe 1 bit de datos en cada pulso del reloj del bloque, y el contenido del bloque de memoria RAM guarda la secuencia de bits generada de salida del bloque antes de enviarse al codificador superpuesto, y viene dado por "encoder_ram". El diagrama RTL que proporciona las entradas y salidas del bloque aleatorio se muestra en la figura 3.14.

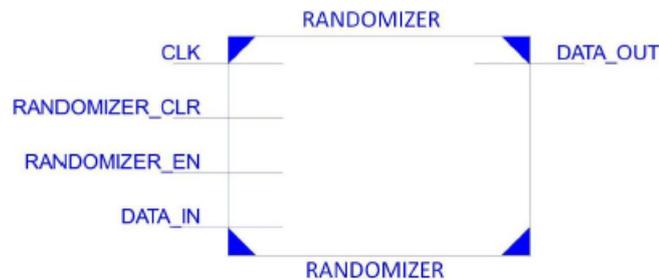


Figura 3. 14: Esquemático RTL para el bloque randomizer.
Elaborado por: Autor.

La codificación del canal está hecha para que sea resistente a errores y se lleva a cabo para hacer que los bits de información generados en la salida del bloque de distribución aleatorio. Esta es una decisión importante en términos de optimización de recursos del diseño del transmisor. Las estructuras de codificación de canal especificadas en el estándar de WiMAX y que diferentes investigaciones como por ejemplo, Ilijev et al., (2010) se proporcionan como codificador convolucional (*Convolutional Code, CC*), código turbo de bloque (*Block Turbo Code, BTC*), código turbo convolucional (*Convolutional Turbo Code, CTC*) y códigos de control de paridad de baja densidad (*Low-Density Parity-check Code, LDPC*).

Para seleccionar el codificador de canal en el diseño del transmisor, se examinaron los usos de origen de los diseños de codificador de canal realizados en la FPGA. Los códigos turbo son prácticamente los más cercanos a la capacidad del canal de Shannon, y el rendimiento del error es bastante alto, pero debido a la complejidad del decodificador, el uso de recursos es alto. El rendimiento de error de los códigos LDPC es tan alto como el de los códigos turbo, y los algoritmos de decodificación iterativa en el decodificador son más simples que los códigos turbo.

La tabla 2.1 muestra la eficiencia del codificador de canal creado en el alcance del diseño en comparación con otros sistemas.

Tabla 3. 1: Algoritmos de codificación de canales y uso de recursos.

Codificador de canal	Uso de recursos	FPGA
LDPC	901 Slices, 907 FF, 1279 LUT	Virtex-II XC2V2000
BTC	901 Slices, 907 FF, 1279 LUT	Virtex-II XC2V2000
CTC	741 LUT-FF	Virtex-5
CC y Viterbi	316 Slices, 295 FF, 510 LUT	Virtex-II XC2V2000
CC	36 Slices, 51 FF, 53 LUT	Spartan-3 XC3S1000

Elaborado por: Autor.

Los datos en la salida del aleatorizador provienen del bloque "encoder_ram" a la entrada del bloque codificador del canal convolucional. Cuando el bloque codificador convolucional es impulsado por la entrada continua de información, genera datos codificados según la estructura reticular diseñada y de acuerdo con el estado de los bits en su memoria.

En el diseño, se obtuvo una secuencia de bits codificada de 192 bits con una entrada de 96 bits de acuerdo con la relación de codificación 1/2 seleccionada. El codificador de bloque plegado, debido a su estructura, es un

bloque que se utiliza con la memoria y la entrada continua de datos. Sin embargo, no es deseable que los símbolos OFDM generen una salida continua durante la generación.

Después de que se generan los 192 bits requeridos para el símbolo OFDM actualmente transmitido, se detiene hasta que se genera el otro símbolo. Por esta razón, se utiliza un método conocido como "mordisco". En este método, los últimos 6 bits de los datos de 96 bits a codificar se copian al principio y los datos de 102 bits se envían a la entrada del codificador convolucional.

Por lo tanto, la memoria del codificador de canal se configura como si se enviaran los mismos datos en el símbolo anterior. Los últimos 96 de los símbolos codificados de 2 bits se toman y transfieren al bloque "Intercalador" en forma de 192 bits. Este bloque intercala la información que se colocará en las subportadoras contra errores que pueden ocurrir en el canal de transmisión de acuerdo con una determinada regla. Esto reduce la posibilidad de pérdida consecutiva de información en el canal.

Los símbolos de información se generan de acuerdo con el grado de modulación determinado en el diseño con 192 bits de datos intercalados. Según la modulación de símbolos 16-QAM, cada 4 bits de información se codifican con codificación Gray y se transmiten al plano de números complejos. Cada símbolo está codificado para ser 10 bits para canal I, y 10 bits para el canal Q.

El uso de números de coma flotante en operaciones aritméticas no es una solución óptima en términos de uso de recursos. Por esta razón, los valores necesarios para la creación de símbolos son utilizando secuencias de bits enteras. Por ejemplo, los símbolos de la modulación 16-QAM pueden tomar valores de $\{-3, -1, 1, 3\}$. Las amplitudes de estos valores se multiplican por el coeficiente c para compensar la potencia promedio en los símbolos generados. Este valor se indica como $\frac{1}{\sqrt{10}}$ en los símbolos de información. Por

lo tanto, si se utiliza el valor de 3 tanto para I o Q, entonces el valor se triplica $\left(3 * \frac{1}{\sqrt{10}}\right)$ y es igual a 0.948.

Como el diseño de coma flotante no se utilizará, el primer bit del valor I y Q de 10 bits está diseñado para indicar el bit de signo, los siguientes 2 bits indican el valor entero y los últimos 7 bits indican los dígitos después de la coma. Por lo tanto, se utiliza la biblioteca VHDL de coma flotante y se proporciona la optimización de recursos. El valor 0.948 corresponde al valor "0001111001". En la figura 3.15 se muestra el mapa de constelaciones de la modulación 16-QAM y la codificación Gray de acuerdo con la especificación del estándar.

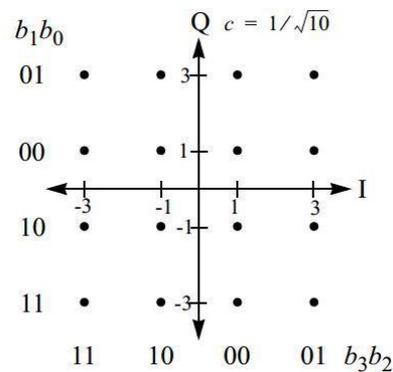


Figura 3. 15: Mapa de constelaciones para la modulación 16-QAM.
Elaborado por: Autor.

Si el valor de bit para la entrada del módulo es "1101", se codifica como $b_3 = 1, b_2 = 1, b_1 = 0, b_0 = 1$. Este valor de símbolo se establece en $(I, Q) = \{-3, 3\}$. Como la matriz de 10 bits que se utilizó para generar este símbolo es " - 121" y "121", la matriz de bits que se obtiene se determina como I=1110000111 y Q=0001111001. Los símbolos generados se transfieren al bloque de memoria RAM de 128x20 bits.

Aunque la resolución es desventajosa, la longitud de bits resultante de la operación IFFT será de 10 bits para I, Q dado que será 18 bits para el símbolo I, Q (se explicará en detalle más adelante), dependiendo de la resolución de 12 bits del circuito integrado de conversión analógico/digital (DAC) que se utilizará en los siguientes pasos. De esta forma, se ha logrado la optimización de recursos.

Después de la generación de los símbolos de datos, los símbolos piloto también deben generarse y transferirse al bloque de memoria RAM de 128x20 bits antes de IFFT. Las señales piloto son señales complejas con modulación BPSK y dado que el componente Q es cero, solo el componente I está presente. El coeficiente c especificado en el estándar es $4/3$. Utilizando la misma lógica que la generación de símbolos de datos, se utiliza una longitud entera de 10 bits. Los valores obtenidos $\{1, -1\}$ corresponde al valor "171" y "-171", respectivamente.

Después de preparar el símbolo OFDM, que forma los símbolos de información, se debe crear el primer símbolo de la trama de transmisión WiMAX. Este es el símbolo OFDM especificado como preámbulo. Enviado como el primer símbolo de cada trama. La representación de la trama de WiMAX en el dominio del tiempo y frecuencia se muestra en la figura 3.16. §

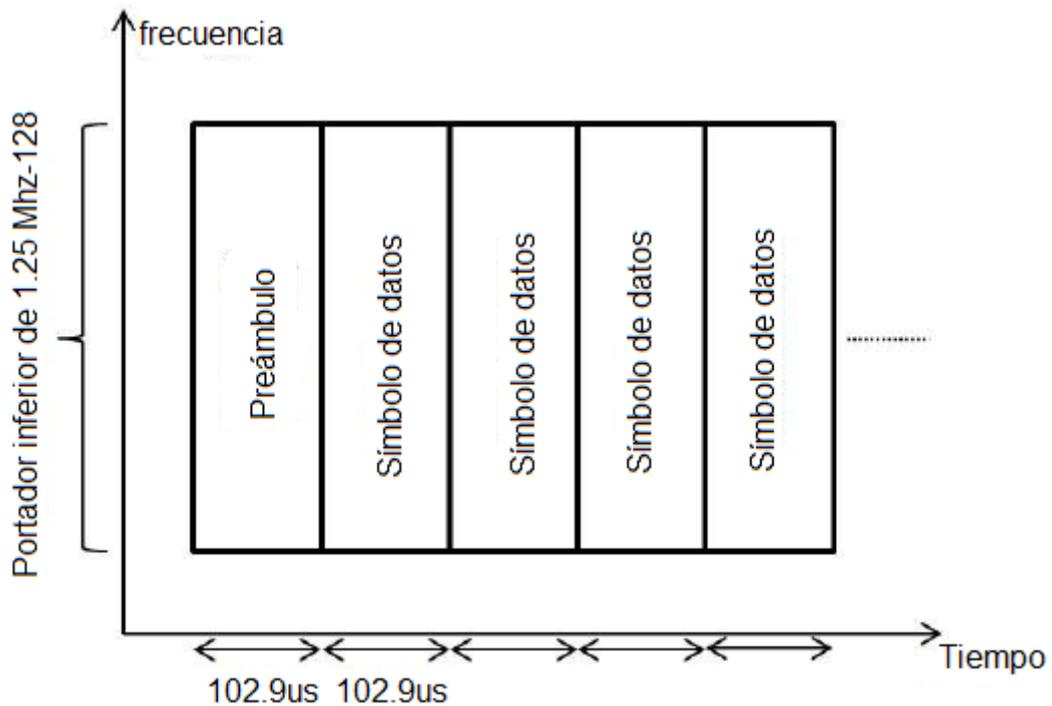


Figura 3. 16: Trama de WiMAX.

Elaborado por: Autor.

El preámbulo se envía con mayor potencia que los símbolos normales. Esto se debe a que, en el receptor, no es posible recuperar otros símbolos de datos primero si no se puede obtener el inicio de la trama. Por lo tanto, uno de los principales problemas de sincronización en el receptor se conoce como

sincronización de zona horaria o sincronización de trama. En el sistema de comunicación celular, cada estación base envía sus propios símbolos de datos a los usuarios dentro del alcance utilizando un archivo adjunto de inicio diferente.

Los receptores extraen la sincronización de tiempo de la trama WiMAX que recibe mediante la correlación cruzada del prefijo de inicio con el sufijo de inicio conocido anteriormente. La correlación del preámbulo de la trama WiMAX de otras estaciones base con el preámbulo conocido es menor que la de la estación base a la que pertenece. Esto se sincroniza con la trama WiMAX de la estación base dentro del alcance. La figura 3.17 muestra la modulación de los datos, los símbolos de piloto y de inicio y el nivel de amplitud de 10 bits en el diseño.

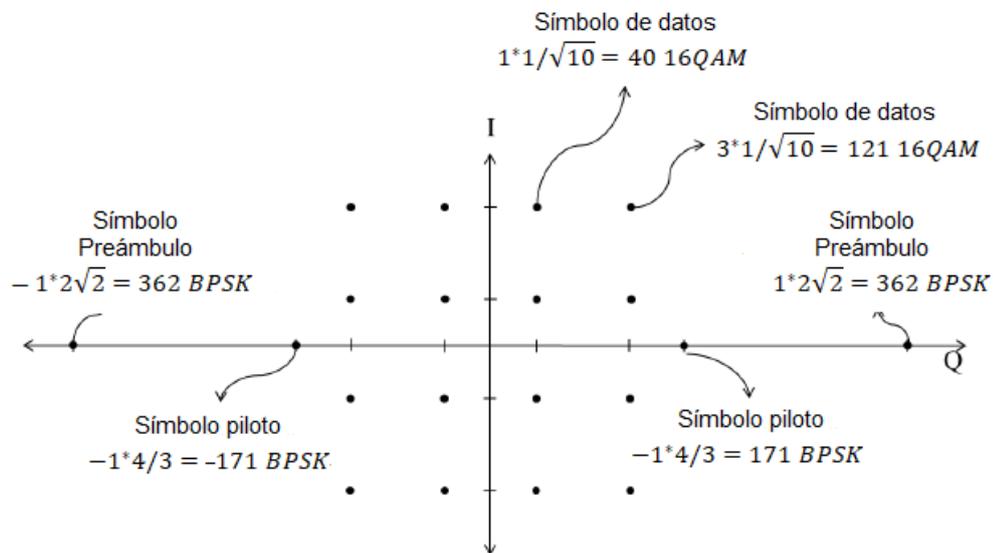


Figura 3. 17: Modulación de símbolos de datos, piloto y símbolos de preámbulo.
Elaborado por: Autor.

Después de la creación de los símbolos OFDM, la inserción de los símbolos en las subportadoras se realiza con el bloque IFFT. La operación de IFFT es una de las estructuras más intensivas en recursos en los sistemas de comunicación digital basados en OFDM. Por lo tanto, el diseño debe hacerse teniendo en cuenta la velocidad óptima y el uso de recursos de acuerdo con el ancho de banda seleccionado.

3.4. Implementación del sistema WiMAX en la tarjeta FPGA

Después de verificar el diseño FPGA en el entorno ISE con lenguaje VHDL y simularlo en el programa ISIM, este se cargó en la tarjeta de hardware y fue examinado. El diseño realizado se ha cargado en la tarjeta FPGA Spartan 3 E (véase la figura 3.18). La placa tiene un generador de señal de reloj de 50 MHz, pulsadores, interruptores, LCD y pines de entrada y salida.



Figura 3. 18: Tarjeta FPGA Spartan 3 E de Xilinx.
Elaborado por: Autor.

La señal WiMAX generada se transfirió a la tarjeta RF utilizando los pines de entrada y salida (2 ranuras para pines en la parte superior y 1 ranura para pines en la derecha). La señal se colocó primero desde el nivel de banda base hasta el nivel de 21.4 MHz utilizando el circuito integrado del convertidor AD9856 y luego se multiplicó por sintetizadores de señal de RF y se colocó a una frecuencia portadora de 300 MHz. En la figura 3.19, se dan las etapas de implementación.

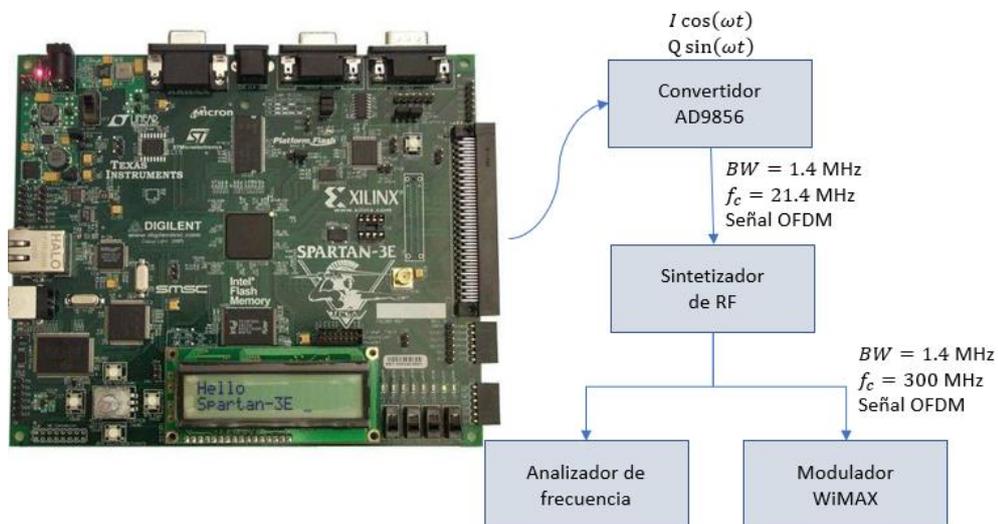


Figura 3. 19: Etapas de implementación.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.20 muestra la salida de la señal de frecuencia de portadora de 21.4 MHz de la señal OFDM con ancho de banda igual a 1.4MHz a la frecuencia intermedia en el analizador de espectros de señales. El rango de la ventana visualizada es de 10 MHz, y el rango de frecuencia de cada compartimento es de 1 MHz en la pantalla para 10 divisiones. En la esquina inferior izquierda, la frecuencia de portadora o central es de 21.4 MHz.

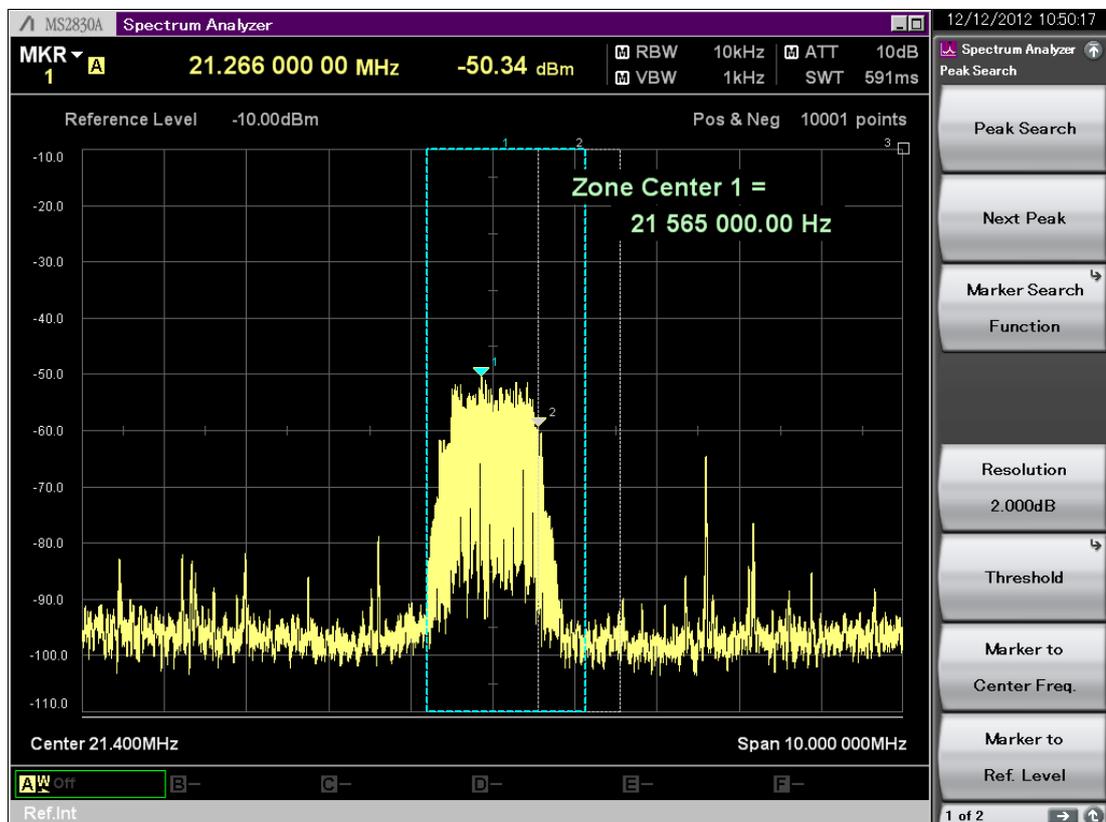


Figura 3. 20: Espectro de señal OFDM con frecuencia central de 21,4 MHz.
Elaborado por: Autor.

La señal amplificada a la frecuencia intermedia fue modulada a la frecuencia central de 300 MHz por sintetizadores de RF. El rango de ventana examinado en el espectro de frecuencia dado en la figura 3.21 es de 3 MHz. Como el rango de cada segmento es de 300 KHz, el ancho de banda aproximado de la señal se muestra como 1.4 MHz. La potencia media de la señal transmitida es -70 dBm.

Como la señal transmitida es una trama WiMAX, el primer símbolo es el preámbulo y los siguientes 4 símbolos son los símbolos de datos. Dado que los símbolos de datos generalmente se muestran en la salida del analizador,

la potencia correspondiente cuando la salida es la potencia de los símbolos de datos, y la potencia inicial es aproximadamente 10 dBm más alta.

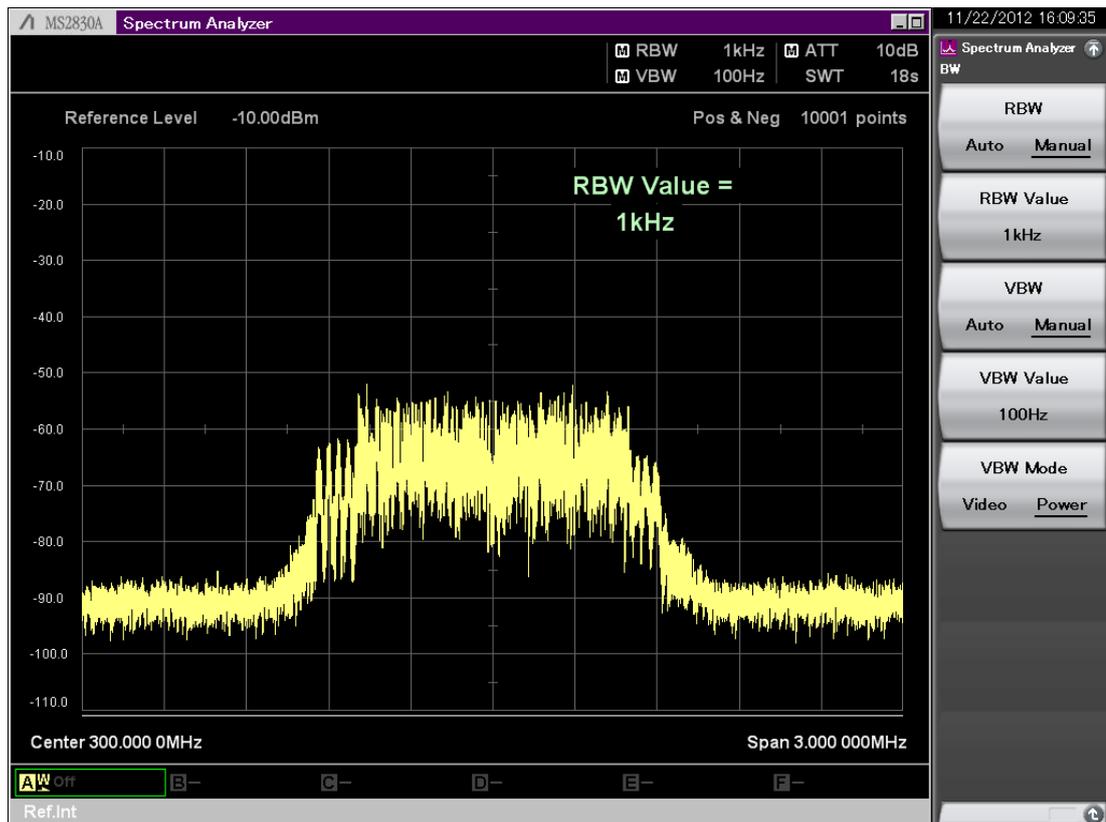


Figura 3. 21: Espectro de la señal OFDM de frecuencia central de 300 MHz.
Elaborado por: Autor.

Después de examinar el espectro de la trama WiMAX en el analizador de frecuencia, se observó que la trama enviada se capturó correctamente en el demodulador WiMAX. La salida del demodulador de la señal enviada se muestra en la figura 3.22.

Mientras que las muestras I y Q en la zona horaria de la trama WiMAX transmitida se muestran en la esquina inferior izquierda, la potencia promedio de los símbolos de preámbulo y datos es -60.06 dBm y -69.12 dBm. La potencia media calculada corresponde al análisis de la trama WiMAX en el dominio de frecuencia. El análisis de la señal en el dominio del tiempo y la potencia promedio fueron maximizadas (zoom), tal como se muestra en la figura 3.23.

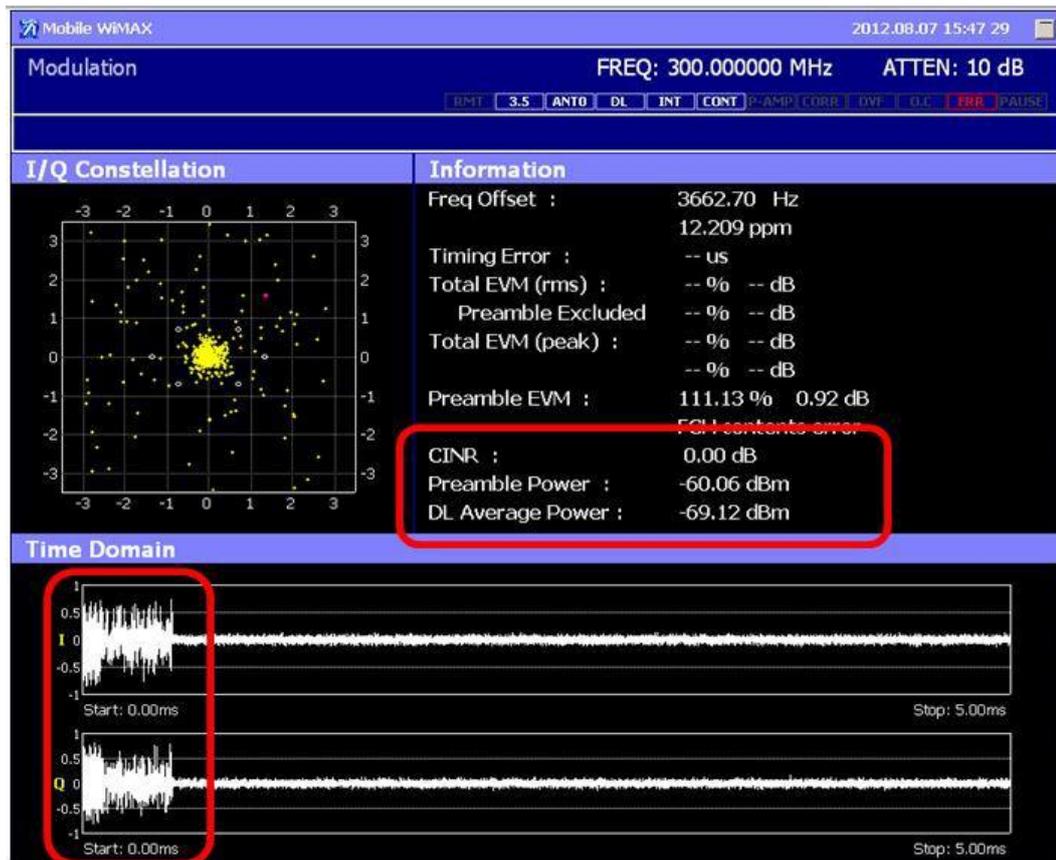


Figura 3. 22: Salida del demodulador del marco WIMAX en el Arnitsu 2830A.
 Elaborado por: Autor.

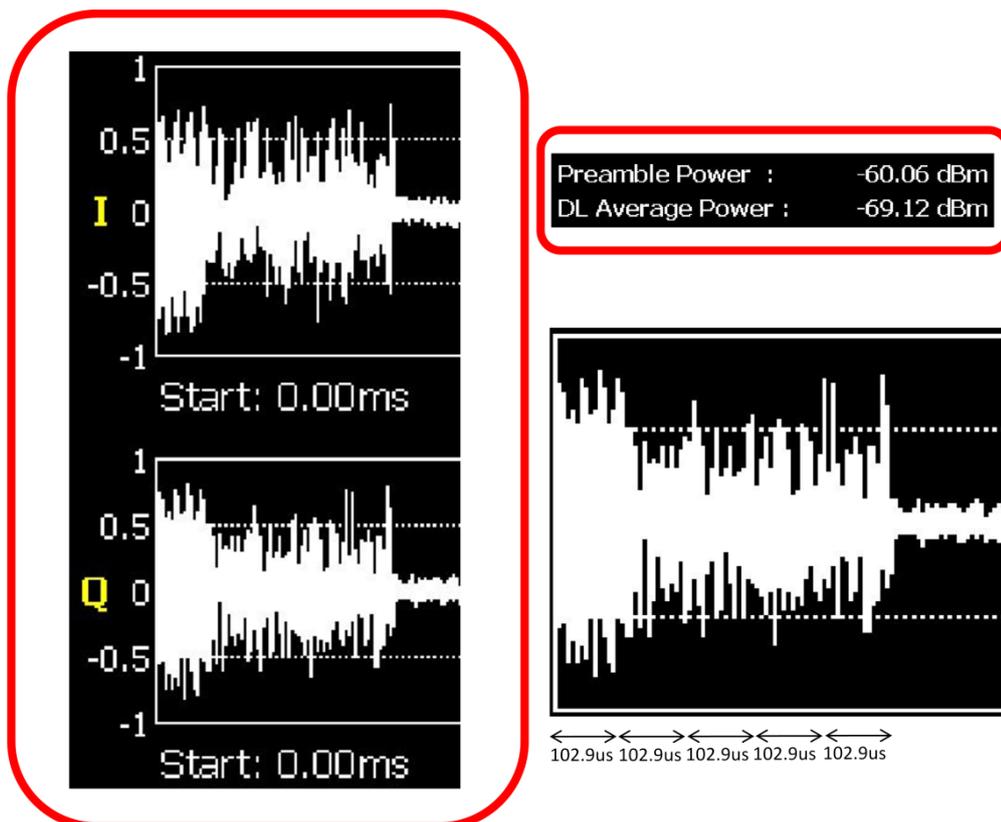


Figura 3. 23: Análisis de salida del demodulador del marco WIMAX.
 Elaborado por: Autor.

Conclusiones

1. La fundamentación teórica del sistema de comunicación inalámbrico móvil WiMAX fue descrito en base a una investigación exhaustiva, así como la modulación multiportadora (MCM) OFDM y que contribuyó al propósito principal del presente trabajo.
2. En esta tesis, el transmisor de capa física WIMAX de banda base basado en OFDM se implementó considerando la optimización de recursos en FPGA. Los resultados obtenidos también nos llevaron a una mejor comprensión de la dinámica y evolución de la modulación de multiportadora OFDM. El sistema estaba relacionado con la BER del sistema WiMAX. La modulación OFDM, concerniente al estándar WiMAX, no afecta los resultados. Esto es normal para un canal AWGN.
3. Debido a la flexibilidad de los parámetros del sistema en la capa física WiMAX, el diseño se realizó utilizando una radio definida por software. Para el establecimiento de esta estructura se utilizó FPGA en lugar de circuitos integrados DSP y ASIC, considerando la dirección y desarrollo del sistema. Dado que los recursos de hardware en los circuitos integrados FPGA son circuitos que se pueden programar con el lenguaje VHDL, ya que este proporciona flexibilidad en la creación de interfaces periféricas que se necesitan en el futuro.

Recomendaciones

1. Motivar a los estudiantes de la maestría en realizar propuestas de implementación a nivel de Software y Hardware. Los entornos de simulación sugeridos son MatLab/Simulink, LabVIEW, NS-3, Riverbed Modeler, entre otros. A nivel de hardware como FPGA, los más utilizados son Altera y Xilinx.
2. Realizar un análisis comparativo del sistema WiMAX y LTE usando programación VHDL.

Bibliografia

- Aldmour, I. (2013). LTE and WiMAX: Comparison and Future Perspective. *Communications and Network*, 05(04), 360–368. <https://doi.org/10.4236/cn.2013.54045>
- Alzaabi, M., Ranjeeth, K., Alukaidey, T., & Salman, K. (2013). Security Algorithms for WIMAX. *International Journal of Network Security & Its Applications*, 5(3), 31–44. <https://doi.org/10.5121/ijnsa.2013.5304>
- Ba, P. N., Rodrigues, J., Korotaev, V., Al-Muhtadi, J., Ouya, S., & Maiga, A. S. (2019). Performance evaluation of Wi-Fi and WiMAX over OFDM physical layer. *International Journal of Communication Systems*, 32(3), e3871. <https://doi.org/10.1002/dac.3871>
- Cameron, K. (2013). *Reverse Engineering: WiMAX and IEEE 802.16e* [Tesis de Maestría].
- Dai, L., Fu, J., Peng, K., Wang, J., Alaniz, A., & Yang, Z. (2010). A Novel CPR-TDS-OFDM System for High-Speed Mobile Reception. *IEICE Transactions on Communications*, E93-B(3), 788–791. <https://doi.org/10.1587/transcom.E93.B.788>
- Doğan, S., Tusha, A., & Arslan, H. (2018). OFDM with Index Modulation for Asynchronous mMTC Networks. *Sensors*, 18(4), 1280. <https://doi.org/10.3390/s18041280>

- Ergen, M. (2009). WiMAX Network Layer. En M. Ergen, *Mobile Broadband* (pp. 341–378). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68192-4_10
- Gao, Z., Gao, F., Zhang, B., & Wu, Z. (2012). *WiMAX Core Network, Digital communication* (C. Palanisamy, Ed.). InTech.
- Hueso González, A., & Cascant i Sempere, M. J. (2012). *Metodología y técnicas cuantitativas de investigación*. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/17004>
- Iliev, T. B., Hristov, G. V., Zahariev, P. Z., & Iliev, M. P. (2010). Performance of the Duo-Binary Turbo Codes in WiMAX Systems. En T. Sobh, K. Elleithy, & A. Mahmood (Eds.), *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking* (pp. 161–165). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3662-9_27
- Jia, M., Wu, Z., Guo, Q., Gu, X., & Zhang, N. (2017). Peak to average power ratio suppression method joint orthogonal and non-orthogonal scheme. *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 869–873. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMM.2017.8116490>
- Joshi, A., & Saini, D. S. (2010). Performance Analysis of Coded OFDM for Various Modulation Schemes in 802.11a Based Digital Broadcast Applications. En V. V. Das, R. Vijayakumar, N. C. Debnath, J. Stephen, N. Meghanathan, S. Sankaranarayanan, P. M. Thankachan, F. L. Gaol, & N. Thankachan (Eds.), *Information Processing and Management*

(Vol. 70, pp. 60–64). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12214-9_11

Kamali, B., Bennett, R. A., & Cox, D. C. (2012). Understanding WiMAX: An IEEE-802.16 Standard-Based Wireless Technology. *IEEE Potentials*, 31(5), 23–27. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2012.2195220>

Khadim, S., Makki, S., & Mahmood, M. (2018). LTE Performance over Wimax in Term of Network Applications: An implementation on E-Administration System. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 20(6), 75–84.

Liu, R., & Zheng, E. (2017). Research on the Intelligent Signal Channel Sensing Based ICI Elimination Algorithm of the OFDM System. *Mobile Networks and Applications*, 22(2), 255–266. <https://doi.org/10.1007/s11036-016-0792-7>

Patil, P., & Kokare, S. (2014). IPTV in VANET's with WiMAX Access Network. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(12), 14023–14028.

Quilumbango H., O. D., & Álvarez R., R. (2012). Material didáctico para el análisis y simulación del desempeño de la capa física de WIMAX/IEEE 802.16, usando la interfaz gráfica de Matlab (GUI). *Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE)*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4908>

- Rajpoot, A., Gadani, N., Patel, A., & Pansinia, P. (2016). A Review Paper on WiMAX Technology. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, 5(6), 1921–1923.
- Srikanth, S., Murugesu Pandian, P., & Fernando, X. (2012). Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: A comparison. *IEEE Communications Magazine*, 50(9), 153–161. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6295726>
- Taluja, P. S. (2011). *Information-Theoretic Limits on Broadband Multi-Antenna Systems in the Presence of Mutual Coupling* [Tesis Doctoral]. Universidad Estatal de Carolina del Norte.
- Tanenbaum, Feamster, & Wetherall. (2020). *Computer Networks* (6ta ed.). Pearson.

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto** con C.C: # 091606453-8 autor del trabajo de titulación: **Diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA**, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 2 de septiembre de 2020



Nombre: **Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto**

C.C: 091606453-8

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño y simulación de la técnica OFDM para redes inalámbricas móviles sobre Simulink y tarjeta FPGA		
AUTOR(ES)	Chicaiza Quinaloa, Carlos Alberto		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; MSc. Quezada Calle, Edgar / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 2 de septiembre de 2020	No. DE PÁGINAS:	62
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Programación Avanzada		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Comunicaciones, Multiplexación, Ortogonalidad, Frecuencia, Modulación, WiMAX		
RESUMEN/ABSTRACT: En el presente trabajo de examen complejo consiste en el diseño y simulación de la técnica de modulación de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) para redes inalámbricas móviles como WiMAX. En el capítulo 1, se describe brevemente la introducción de WiMAX y su relación con OFDM. También se describen, los antecedentes de la investigación, la definición del problema, la justificación y los objetivos del proyecto de titulación. En el capítulo 2, se presenta los fundamentos teóricos del sistema de comunicaciones WiMAX y de la técnica de modulación OFDM. Finalmente, en el capítulo 3, se presenta el diseño y simulación del trabajo propuesto. Para la implementación fue necesario utilizar el entorno de software (simulación) y hardware (matriz de compuerta programable, FPGA). A nivel de simulación se utilizaron dos entornos de programación robustos, como lo son el software MatLab/Simulink y el software ISIM de Xilinx. MatLab/Simulink también emplea librerías de FPGA's. Mientras que en el software ISIM se realiza la programación de registro de nivel de transferencia (RTL).			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0990123200	E-mail: carlos.chicaiza@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			