

Tercera practica transmisión de datos en radiofrecuencia empleando dispositivos de radio definida por software: Transmisión y recepción OFDM.

Autores

Cristian David Hurtado Rodriguez
Luis David Villada Coca



Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electrónica
Bogotá D.C
2023

1. Objetivos

Objetivo General

Generar un acercamiento real a las transmisiones de tipo OFDM a partir de la implementación de un transmisor y receptor usando dispositivos de radio definida por software.

Objetivos específicos

- Contextualizar al lector acerca del funcionamiento y los principios de la técnica de transmisión a través de multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM.
- Afianzar los conocimientos necesarios para entender el funcionamiento de un transmisor y receptor OFDM real a partir de una simulación en el software académico MATLAB.
- Corroborar el correcto funcionamiento de una transmisión OFDM utilizando los dispositivos SDR Hack RF One y Nuand Blade RF con su respectiva interfaz en la aplicación GNU RADIO.

2. Materiales e insumos

Componentes y dispositivos

- SDR Nuand bladerf 2.0 micro xa9
- SDR Hack RF One
- Dos ordenadores (Tx y Rx) con sistema operativo Windows o Linux
- Dos antenas compatibles con SDR
- Dispositivo de entrada de audio (Microfono)
- Dispositivo de salida de audio (Parlante o audifonos)

Software

- GNU Radio (versión superior a 3.10)
- MATLAB

3. Marco Teórico

OFDM.

OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) se puede entender como una transmisión multiportadora, con la gran ventaja de poder transmitir cientos de subportadoras a través del mismo radioenlace, donde cada subportadora tendrá una separación de varios cientos de kHz dados en función de la selectividad de frecuencia del canal de radio y la tasa máxima esperada de variaciones de canal.

El orden apropiado está dado en primer lugar por la selección del espacio entre subportadoras y con un valor entregado de ancho de banda, proceder con el cálculo del número de subportadoras. Ahora se puede afirmar que para LTE estándar 3GPP el espaciado básico es de 15kHz y si el

espectro asignado fuera de 10 MHz tendríamos 600 subportadoras. Cabe señalar que el término “Ortogonal” de las siglas OFDM se debe a que todas las subportadoras son ortogonales entre sí (Erik Dahman, 2012).

Para entender mejor una transmisión OFDM podemos imaginarla como una cuadrícula en el tiempo y frecuencia donde cada columna es un símbolo y cada fila una subportadora

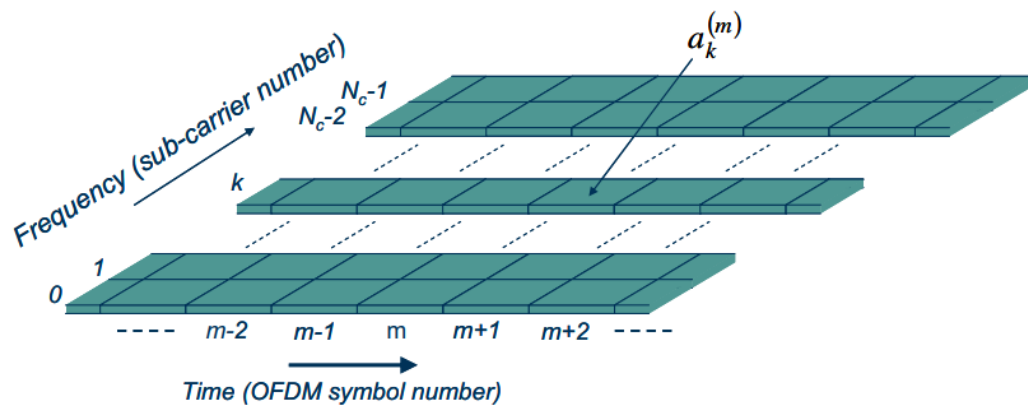


Figura 1. Cuadrícula de tiempo-frecuencia OFDM. Fuente: 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband.

Posterior a conseguir una señal OFDM el principio básico de modulación consiste en bancos de moduladores correladores, donde cada uno se asigna a una subportadora única, esto debido a la característica de la existencia de ortogonalidad entre subportadoras y un espacio entre las mismas. Cabe resaltar que si existe una interferencia en la subportadora puede generar la pérdida de ortogonalidad provocando una interferencia entre todas las subportadoras, esto se puede evitar con la inserción de un prefijo cíclico, el cual para un medio dispersivo en el tiempo en el que existe el problema de pérdida de ortogonalidad entre subportadoras, se realiza la inserción de la última parte del símbolo OFDM al principio del siguiente.

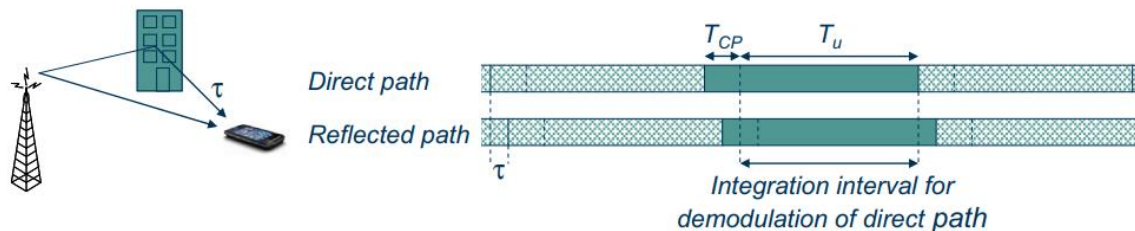


Figura 2. Inserción de prefijo. Fuente: 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband

El aumento de la longitud del símbolo produce una reducción de la tasa de símbolos, pero preserva la ortogonalidad de la subportadora siempre y cuando el tiempo de dispersión sea más corto que la longitud del prefijo. Otro beneficio de OFDM se da por la posible utilización de este como

acceso múltiple o como multiplexación de usuarios, lo cual implica que para cada intervalo de símbolo OFDM se utiliza un subconjunto de subportadoras para transmitir a diferentes terminales.

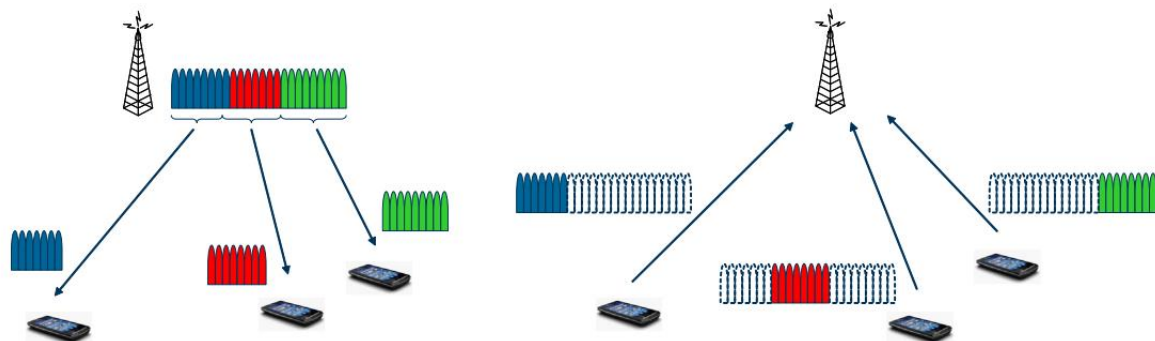


Figura 3. OFDM como esquema de acceso múltiple/multiplexación de usuarios enlace descendente y enlace ascendente. Fuente: 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband

En un sistema OFDM, el transmisor modula la secuencia de bits de mensaje en símbolos PSK/QAM, realiza IFFT en los símbolos para convertirlos en señales en el dominio del tiempo y los envía a través de un canal (inalámbrico). La señal recibida suele estar distorsionada por las características del canal. Para recuperar los bits transmitidos, el efecto del canal debe ser estimado y compensado en el receptor. Cada subportadora puede considerarse un canal independiente, siempre que no ocurra ICI (interferencia entre portadoras) y, por lo tanto, se preserva la ortogonalidad entre subportadoras. La ortogonalidad permite que cada componente de subportadora de la señal recibida se exprese como el producto de la señal transmitida y la respuesta en frecuencia del canal en la subportadora. Por lo tanto, la señal transmitida puede ser recuperada estimando la respuesta del canal solo en cada subportadora. En general, el canal puede ser estimado utilizando un preámbulo o símbolos piloto conocidos por el transmisor y el receptor, que emplean diversas técnicas de interpolación para estimar la respuesta del canal de las subportadoras entre tonos piloto. En general, tanto la señal de datos como la señal de entrenamiento, o ambas, pueden utilizarse para la estimación del canal. Para elegir la técnica de estimación de canal para el sistema OFDM considerado, se deben tener en cuenta muchos aspectos diferentes de las implementaciones, incluyendo el rendimiento requerido, la complejidad computacional y la variación temporal del canal.

Estructura de la trama de datos IEEE 802.11a.

La tecnología de OFDM en la norma 802.11a utiliza canales con un ancho de banda espectral (BW) de 20, 10 o 5 MHz. Cada canal está compuesto por 48 subportadoras moduladas para transmitir datos, a las cuales se agregan 4 subportadoras piloto moduladas con valores fijos en posiciones específicas, como lo especifica el estándar. Para completar el espectro se agregan símbolos de valor 0 para alcanzar un tamaño de muestra de 64 y aplicar el algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT). La tabla 7 proporciona los parámetros que caracterizan cada paquete de la capa física de la norma 802.11a para cada ancho de canal. (Chau, 2021)

Parámetro \ BW	20 MHz	10 MHz	5 MHz
Espaciamiento entre subportadoras [MHz]: Δ_F	0,3125	0,15625	0,078125
Período de FFT [μ s]: $T_{FFT} = 1/\Delta_F$	3,2	6,4	12,8
Prefijo cíclico [μ s]: $T_{GI} = T_{FFT}/4$	0,8	1,6	3,2
Símbolo OFDM [μ s]: $T_{SYM} = T_{GI} + T_{FFT}$	4	8	16
Símbolos cortos (10) [μ s]: $T_{SHORT} = 10 \cdot T_{FFT}/4$	8	16	32
Prefijo cíclico de los símbolos largos [μ s]: T_{GI2}	1,6	3,2	6,4
Símbolos largos [μ s]: $T_{LONG} = T_{GI2} + 2 \cdot T_{FFT}$	8	16	32
Preámbulo completo [μ s]: $T_{PREAMBLE}$	16	32	64

Tabla 1. Parámetros de señal en función del ancho de banda

La Figura 4 presenta un esquema de la estructura de los paquetes OFDM en la norma IEEE 802.11a para comprender mejor los diferentes parámetros.

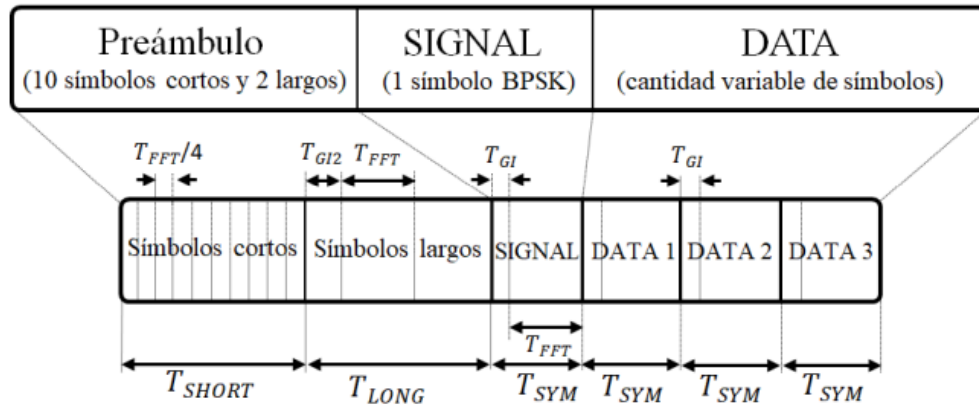


Figura 4 Estructura general de un paquete OFDM

Cada paquete OFDM comienza con una estructura denominada Preámbulo, que consiste en una secuencia de 10 símbolos cortos y 2 símbolos largos. Esta estructura es igual para todas las tramas que tienen el mismo ancho de banda (BW). A continuación del Preámbulo, se encuentra el símbolo SIGNAL, el cual contiene información sobre la configuración de la transmisión. En particular, indica qué tipo de modulación y codificación se usan en los símbolos correspondientes al siguiente campo (lo que determina una tasa para cada ancho de canal posible) y cuántos bits de información se transmiten en el paquete, lo que define su longitud. El campo DATA sigue al símbolo SIGNAL y está compuesto por una cantidad variable de símbolos, cuyas características quedan registradas en la información del símbolo SIGNAL. Para la sección de símbolos largos del Preámbulo, los símbolos SIGNAL y cada uno de los símbolos DATA, se agrega un prefijo cíclico que repite la última parte de la señal al inicio de cada uno (Chau, 2021).

Estimación de Canal

En un sistema OFDM, el proceso de transmisión implica la modulación de la secuencia de bits de mensaje en símbolos PSK/QAM, la realización de IFFT para transformar los símbolos en señales

en el dominio del tiempo, y su envío a través de un canal (inalámbrico). Debido a las características del canal, la señal recibida suele estar distorsionada, lo que requiere que el efecto del canal sea estimado y compensado en el receptor para recuperar los bits transmitidos. Cada subportadora se considera un canal independiente, siempre que se preserve la ortogonalidad entre subportadoras y no ocurra ICI. Esto permite la recuperación de la señal transmitida mediante la estimación de la respuesta del canal en cada subportadora. La estimación del canal se realiza utilizando símbolos piloto conocidos por ambos extremos del canal, que emplean técnicas de interpolación para estimar la respuesta del canal en las subportadoras entre los tonos piloto. La elección de la técnica de estimación de canal para un sistema OFDM depende de varios factores, como el rendimiento requerido, la complejidad computacional y la variación temporal del canal (Yoong Soo Cho, 2010).

Dependiendo de la disposición de pilotos, se consideran tres tipos diferentes de estructura.

Tipo de bloque.

En el tipo de bloque, se envían símbolos piloto OFDM en todas las subportadoras de manera periódica para estimar el canal. Estos pilotos se usan para interpolar y estimar el canal en el tiempo. Los símbolos piloto deben ser colocados con la misma frecuencia que el tiempo de coherencia para rastrear las características cambiantes del canal. En resumen, se utilizan símbolos piloto OFDM para estimar y rastrear el canal de manera efectiva. La siguiente figura representa la disposición piloto tipo bloque.

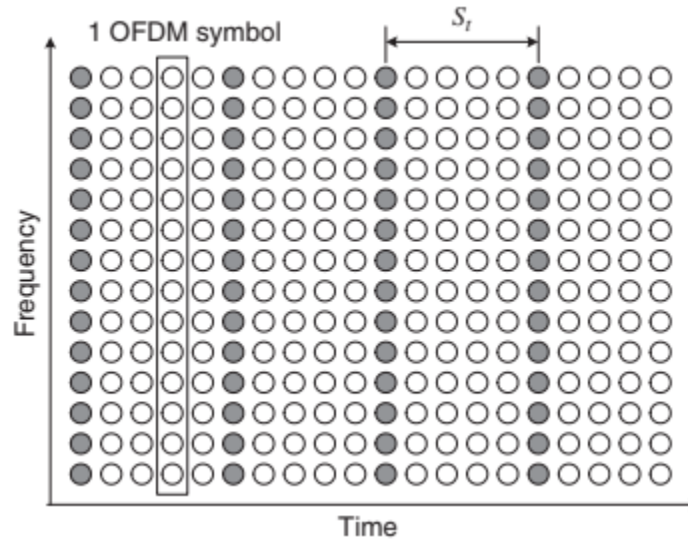


Figura 5. Disposición piloto tipo bloque. Fuente: MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB.

Como el tiempo de coherencia viene dado de forma inversa a la frecuencia Doppler en el canal, el periodo del símbolo piloto debe satisfacer la siguiente desigualdad:

$$S_t \leq \frac{1}{f_{Doppler}} \quad (20)$$

Debido a que los tonos piloto se insertan en todas las subportadoras de los símbolos piloto en un período de tiempo específico, la disposición de los pilotos en bloque es adecuada para canales selectivos de frecuencia. Sin embargo, para canales con desvanecimiento rápido, esto podría generar demasiada carga para rastrear la variación del canal al reducir el período del símbolo piloto.

Tipo de peine.

El piloto tipo peine utiliza tonos piloto en subportadoras para estimar el canal en el dominio de la frecuencia. Los símbolos piloto deben colocarse a intervalos de S_f en la frecuencia para realizar un seguimiento efectivo del canal selectivo en frecuencia. Es importante colocar los símbolos piloto con la misma frecuencia que el ancho de banda coherente. La disposición del piloto tipo peine se muestra en la siguiente figura.

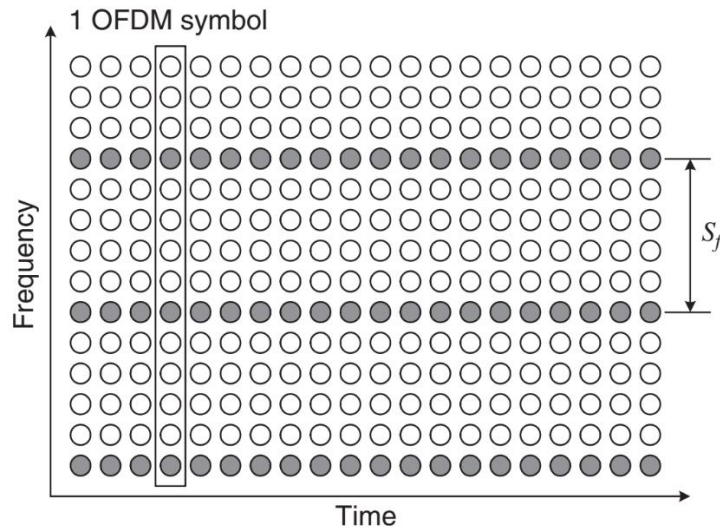


Figura 6. Disposición piloto tipo peine. Fuente: MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB.

Como el ancho de banda de coherencia está determinado por la inversa de la dispersión máxima del retardo σ_{max} , el período del símbolo piloto debe satisfacer la siguiente desigualdad:

$$S_f \leq \frac{1}{\sigma_{max}} \quad (21)$$

A diferencia de la disposición tipo bloque, la disposición tipo peine es adecuada para canales de desvanecimiento rápido, pero no para canales selectivos de frecuencia.

Tipo de celosía.

Este tipo de piloto se caracteriza por tener tonos piloto que se insertan de manera periódica en los ejes de tiempo y frecuencia. Estos tonos piloto permiten realizar interpolaciones en el dominio de tiempo y frecuencia para estimar los canales. Los periodos de los símbolos piloto en tiempo y

frecuencia se denotan como S_t y S_f , respectivamente. La disposición de tipo celosía debe satisfacer las dos ecuaciones de anteriores tipos de piloto listadas a continuación.

$$S_t \leq \frac{1}{f_{Doppler}} \text{ y } S_f \leq \frac{1}{\sigma_{max}} \quad (22)$$

La disposición tipo celosía se muestra en la siguiente figura.

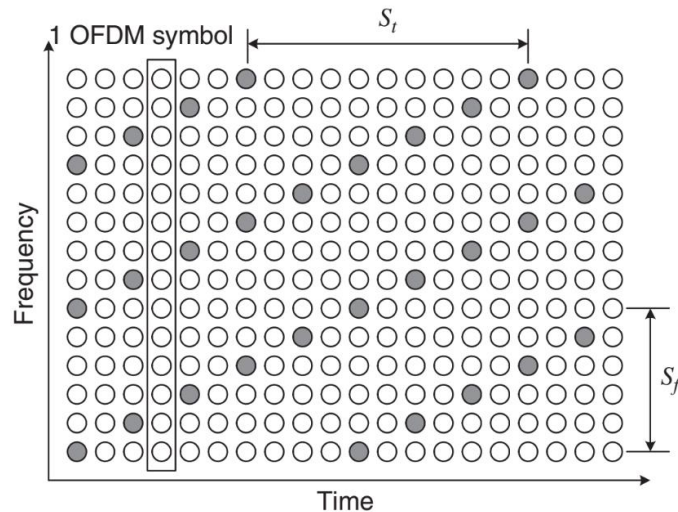


Figura 7. Disposición piloto tipo celosía. Fuente: MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB.

4. Procedimiento

a. Simulación

Utilizando el código “CalculosTotales.m” en la sección Cálculos de portadoras grafique símbolos OFDM con:

- FFT de 64, 128 y 256.
- Bandas de guarda con porcentajes de 10%, 15% y 20%
- Pilotos de 4, 8 y 16
- Prefijo cíclico FFT/4

Justifique:

- ¿Cuántas portadoras están disponibles para datos?
- Muestre los símbolos obtenidos.

Utilizando la simulación “SimOFDM_Total_Func_RS_116.slx” realice las variaciones en los bloques justificados a continuación:

Modulador

- Cambie el texto de entrada a uno que usted desee utilizando el código “CalculosTotales.m” en la sección “Codificación” y en la simulación en el bloque de entrada String.
- Modifique los parámetros N y K de la codificación Reed-Solomon según los calculados por el código.
- Entendiendo que la codificación Reed-Solomon está en bits ajuste el rango de elementos de Random-Enterliever tal que el numero sea divisor entero del número de bits utilizados en la modulación QAM. Por ejemplo, si usted tiene 380 bits de salida en el bloque Random Interliever y usa modulación 16QAM (4 bits por símbolo) los símbolos de salida serán $380/4$ es decir 95.
- Dado que es probable que Reed-Solomon tenga un tamaño de salida diferente al que necesita, utilice el MUX para añadir bits que cumplan la anterior condición. Por ejemplo, si una codificación Reed-Solomon nos arroja 378 bits, añadiremos 2 para cumplir la anterior condición.
- Si tenemos 95 símbolos de salida del modulador QAM y cada símbolo se encuentra sobre una portadora, se necesitarán 95 portadoras de datos. Suponiendo que no se hacen cambios en los pilotos, ni en banda de guarda, muestre el espectro de salida que consigue como resultado.

Demodulador

Realice los cambios complementarios explicados en el modulador de tal manera que la simulación funcione, verifique:

- El texto de salida es igual al texto de entrada.
- El espectro
- La constelación.

Compare los resultados con la simulación original y explique los cambios generados en los resultados.

b. Transmisión y recepción de audio

Ubique los archivos “OFDM_AUDIO_RX.grc” y “OFDM_HACKRF_TX_AUDIO.grc”, ejecútelos y muestre los resultados tanto en espectro como en tiempo.

Realice las siguientes modificaciones:

- Cambie la fuente por una pista de audio distinta. (Tenga en cuenta que debe ser un archivo WAV a 16kHz con 8 bits).
- Cambie la frecuencia central buscando una sección disponible en el espectro (Se sugiere una frecuencia menor a 800MHz).
- Verifique la integridad del audio transmitido en el receptor

Teniendo en cuenta la practica FM, integre una entrada de audio a través de micrófono y consigne los resultados en tiempo y frecuencia.

c. Transmisión y recepción de data

Utilizando el archivo “TramaTX_RX.m” y los archivos en GNU Radio “OFDMTramaIEEE_RX.grc” y “OFDM_TRAMAIEEE_TX.grc” siga los siguientes pasos.

1. Ejecute el archivo MATLAB hasta el punto donde cree un archivo titulado “archivooriginal.txt”.
2. Del lado del receptor cargue el archivo obtenido en el bloque “File Source”.
3. Ejecuté transmisor y receptor de tal manera que tenga el tiempo suficiente para transmitir el archivo (tenga en cuenta que el archivo se repite de manera cíclica, es decir el tamaño del archivo original y del receptor no es el mismo).
4. Use el archivo “Ber_GnuRadio.m” del lado del receptor ubicando el archivo original y el archivo recuperado con el fin de estimar el delay de bits que existe.
5. Del lado del receptor ejecute el archivo “TramaTX_RX.m” desde la sección “Leer archivo” (tenga en cuenta que debe cambiar el delay en base al dato “I”.
6. Corra el resto del archivo y verifique:
 - a. Que el BER sea igual a cero.
 - b. Que TextTx tenga el mismo valor que TextRx.
7. Adjunte las imágenes del espectro obtenido y la señal en el tiempo.

Para extender el conocimiento realice cambios en

- Rate
- Service
- TextRx (texto que se envía como data)
- Adjunte los nuevos resultados obtenidos. Tener en cuenta que si la longitud de la trama cambia es necesario cambiar los valores correspondientes en el código para Ber_GnuRadio.m y TramaTX_RX.m (bits, FRAMEIEEE80211aRX)

5. Preguntas teóricas

A partir del marco teórico y el conocimiento adquirido en las clases de teoría, responda las siguientes preguntas.

1. ¿Qué es OFDM?
2. Explique la importancia de la ortogonalidad en las portadoras en OFDM.
3. ¿Cuáles son los componentes esenciales de un transmisor y de un receptor OFDM?
4. Liste los tipos de modulaciones utilizados en OFDM.
5. Explique el símbolo OFDM.

6. ¿Para qué se hace uso de un prefijo cíclico? Explique su funcionamiento.
7. Según la disposición de pilotos, explique sus distintos tipos de estructura.
- 8.Cuál es la utilidad de las bandas de guarda en OFDM. Explique su funcionamiento.
- 9.Cuál es la utilidad de los símbolos pilotos en OFDM. Explique su funcionamiento.
10. Describa el estándar IEEE 802.11^a.

6. Referencias

- [1] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang y C.-G. Kang, MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB, WILEY, 2010.
- [2] D. Milanes Chau, «DEMODULACIÓN Y SÍNTESIS DE SEÑALES OFDM, IEEE 802.11,» Bariloche, 2021.
- [3] C. D. Hurtado Rodriguez y L. D. Villada Coca, «Practicas de transmisión en radiofrecuencia utilizando radio definida por software.,» Bogotá, 2023.