

ANEXO B. APLICACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES¹ A LA SIMULACIÓN DE UWB (ULTRA WIDE BAND) A NIVEL FÍSICO CON MATLAB

INTRODUCCIÓN

El presente anexo muestra la aplicación de la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones para la obtención de un modelo conceptual y un modelo de simulación de un enlace de transmisión unidireccional transmisor - receptor de UWB a nivel físico. La implementación del modelo de simulación resultante se hará en el ambiente de simulación Simulink de Matlab®, por lo tanto el análisis y los resultados obtenidos se enfocarán hacia este objetivo.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS

1.1 ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

A continuación se da respuesta a una serie de preguntas con el objetivo de recolectar información acerca del funcionamiento general del sistema.

1.1.1 Subsistema: Generador aleatorio de datos binarios

- ¿Qué tipo de señales va a tratar el subsistema?

Este subsistema no recibe ningún tipo de señal, se encarga de la generación aleatoria de datos de tipo binario que representan la información del usuario que será transmitida y procesada por el sistema.

¹ MUÑOZ, Carlos. MUÑOZ, José. Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones. Tesis FIET. Popayán, 1995.

- ¿Qué pasos sigue el subsistema para el tratamiento de las señales en cuestión?

En el generador aleatorio se fijan parámetros de periodo de bit y la cantidad de bits por trama que serán generados de acuerdo a la tasa de transferencia de datos con la que se este trabajando y de la perforación² que será utilizada al momento de codificar los bits.

- ¿Qué factores serán evaluados durante la simulación?

Con la simulación del generador aleatorio de datos se evaluarán:

- La dimensión de los datos resultantes del proceso de generación aleatorio.

- Se tomará una muestra de esta señal y se mostrará para efectos de comparación visual con la señal recibida y procesada por el subsistema de recepción.

- La muestra de esta señal, también será comparada con la señal recibida en el subsistema receptor, por un elemento especializado para calcular parámetros como la Tasa de Error de Bit (BER, Bit Error Rate) y el conteo de los bits erróneos recibidos.

1.1.2 Subsistema: Transmisor de UWB

- ¿Qué tipo de señales va a tratar el subsistema?

El transmisor UWB recibirá un flujo de bits aleatorios generado por el subsistema generador aleatorio de datos binarios y los procesará

² La perforación es un proceso mediante el cual se insertan o extraen bits de un flujo binario de acuerdo a un patrón de perforación determinado por la tasa de transferencia de datos.

internamente hasta entregar un flujo de bits filtrado y repetido 6 veces para su posterior inyección al canal de transmisión.

- ¿Qué pasos sigue el subsistema para el tratamiento de las señales en cuestión?

En el transmisor se siguen los siguientes pasos para el procesamiento de la señal de entrada hasta convertirla en un flujo apto para la transmisión por el canal:

- Codificación de la señal de entrada: A la señal de entrada se le aplican una serie de procesos internos para convertirla en un flujo de datos codificado e intercalado listo para la modulación QPSK. Los procesos ejecutados internamente en su orden son: codificación convolucional, perforación, intercalado etapa 1, intercalado etapa 2 e intercalado etapa 3.
- Modulación: La señal codificada, perforada e intercalada de entrada se modula mediante un modulador QPSK
- Multiplexación OFDM: este proceso se encarga de tomar la señal modulada y generar a partir de esta una serie de subportadoras ortogonales en donde se insertará el flujo de información que luego será transmitida. Los procesos internos ejecutados, en su orden, son los siguientes: adecuación de los datos, asignación de los datos a las subportadoras de datos, inserción de subportadoras piloto y de guarda, inserción de la secuencia de estimación del canal, aplicación de la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform) para llevar los datos del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, inserción de las secuencias de sincronización de paquetes y sincronización de tramas y por último la inserción de las bandas de guarda y del relleno. A la salida de este proceso se

tiene una serie de símbolos OFDM con 165 subportadoras de datos cada uno.

- Filtrado y repetición de la señal para su transmisión: los símbolos OFDM de entrada son repetidos 6 veces de acuerdo a un Código de Tiempo Frecuencia (TFC, Time Frequency Code) y son posteriormente filtrados de acuerdo al ancho de banda del pulso que será transmitido (correspondiente a 528 MHz) y por último serán inyectados al canal de transmisión.

▪ ¿Qué factores serán evaluados durante la simulación?

Con la simulación del transmisor se podrán observar los siguientes factores:

- Se verificará la obtención de la cantidad de bits que conforman cada trama de datos de acuerdo a la tasa de transmisión de datos después del proceso de codificación y perforación. Esto se hará mediante la magnitud de los datos a la salida del proceso de codificación, perforación e intercalamiento.
- Se visualizará gráficamente el resultado del proceso de modulación QPSK de los datos. Se comprobará la generación de la constelación correspondiente a QPSK.
- Se verificará la correcta conformación de los símbolos OFDM mediante la visualización de la cantidad de subportadoras (que deberán ser 165) en cada símbolo OFDM.
- Se visualizará gráficamente el espectro de los datos que serán entregados al canal de transmisión para observar el ancho de banda y la magnitud de la potencia de la señal.

1.1.3 Subsistema: Canal de transmisión

- ¿Qué tipo de señales va a tratar el subsistema?

Al canal de transmisión ingresarán los símbolos OFDM filtrados y repetidos 6 veces, estos serán atenuados por efectos de multitrayectoria propios de los canales de transmisión y les será añadido ruido blanco del tipo gaussiano. A la salida del canal se obtendrán símbolos OFDM filtrados y repetidos cuya magnitud habrá variado respecto a la magnitud original.

- ¿Qué pasos sigue el subsistema para el tratamiento de las señales en cuestión?

El canal de transmisión ejecuta los siguientes procesos internos para entregar unos símbolos OFDM atenuados por desvanecimiento y afectados por el ruido:

- Adición de ruido blanco del tipo gaussiano: los símbolos de entrada serán afectados por el ruido blanco del tipo gaussiano para obtener una señal compuesta de símbolos OFDM y de ruido.
- Desvanecimiento de la señal por efecto de la multitrayectoria: los símbolos OFDM y el ruido añadido son sometidos a trayectos de propagación diversos que implican retardos de transmisión diferentes y desvanecimiento. La señal obtenida se compone de símbolos OFDM atenuados y de ruido.

- ¿Qué factores serán evaluados durante la simulación?

Con la simulación del canal de transmisión se visualizarán el espectro de la señal a la salida de este y se comparará este espectro con el de la señal de entrada del canal para observar los cambios en la magnitud y forma de ésta.

1.1.4 Subsistema: Receptor de UWB

- ¿Qué tipo de señales va a tratar el subsistema?

El receptor de UWB recibirá una serie de símbolos OFDM repetidos, atenuados y con ruido añadido y entregará una señal aleatoria de datos de tipo binario que corresponden a los datos generados por el generador aleatorio de datos binarios.

- ¿Qué pasos sigue el subsistema para el tratamiento de las señales en cuestión?

Para la recuperación de la señal aleatoria de datos binarios el receptor ejecuta, en su orden, los procesos que se describen a continuación:

- Recepción y filtrado de datos: los símbolos OFDM atenuados y el ruido añadido se reciben, luego se remueven los símbolos repetidos, posteriormente los símbolos OFDM son filtrados y el retardo de transmisión es compensado. Una vez realizado lo anterior se obtienen símbolos OFDM listos para la demultiplexación.
- Demultiplexación OFDM: A los símbolos OFDM de entrada se les remueve el periodo de guarda, el prefijo cíclico y las secuencias de sincronización de paquetes y de sincronización de tramas, luego los símbolos se llevan del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform), posteriormente se utiliza la secuencia de estimación del canal para la estimación y compensación del canal y por último las subportadoras son removidas y el flujo de datos es reconstruido.

- Demodulación QPSK: el flujo de datos es demodulado por el demodulador QPSK, el resultado es una señal codificada que debe ser desintercalada y decodificada.
- Desintercalamiento y decodificación: la señal ingresa a las etapas 1, 2 y 3 del proceso de desintercalamiento, luego se remueven las perforaciones mediante la inserción de ceros en los lugares donde los bits fueron omitidos y por ultimo el flujo es decodificado por un decodificador de Viterbi. A la salida de esta etapa ya se han recuperado los datos binarios aleatorios que fueron generados por el primer subsistema y que fueron procesados, transmitidos y luego recibidos y reprocesados para ser recuperados.

▪ ¿Qué factores serán evaluados durante la simulación?

Con la simulación del receptor se visualizará y analizará lo siguiente:

- Se verificará la recuperación del símbolo OFDM con sus 165 subportadoras de datos mediante la visualización de la magnitud de este.
- Se visualizará gráficamente el espectro de los símbolos OFDM recibidos antes de ser filtrados y antes de que sean eliminados los símbolos repetidos. Los espectros tanto de los símbolos transmitidos como de los recibidos después de su propagación por el canal, serán comparados y se analizarán las diferencias en la magnitud y ancho de banda.
- Se visualizará gráficamente el diagrama de constelación de los datos modulados en QPSK y se analizará el comportamiento de los mismos en su fase y magnitud.

- Se visualizarán gráficamente los datos decodificados y se comparará a estos con los datos de origen del generador aleatorio.
- Se calcularán parámetros como la tasa de error de bit y los bits erróneos mediante la comparación del flujo de datos recibido y del flujo de datos generado por el primer subsistema.

1.2. FINES DE LA SIMULACIÓN

El propósito de esta simulación es mostrar los diferentes procesos que se llevan a cabo desde la generación de un flujo de datos, la adecuación y transmisión de los mismos y la recepción y procesamiento de estos para recuperar los datos de origen. Se mostrarán los diversos procesos de codificación, perforación, intercalamiento, modulación, multiplexación y filtrado que se llevan a cabo en el transmisor, así como los procesos de degradación de la señal que ocurren en el canal de transmisión y los procesos de recepción, filtrado, demultiplexación, demodulación, desintercalamiento, decodificación y comparación que se llevan a cabo en el receptor.

Se obtendrá un modelo de simulación de un enlace de transmisión de datos unidireccional entre un transmisor y un receptor en la capa física de UWB mediante la aplicación de esta metodología de simulación.

1.3 FORMULACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN

- Implementar y documentar los procesos que se llevan a cabo dentro de un transmisor y de un receptor UWB para un flujo de datos aleatorio que representa los datos de usuario.

- Visualizar secuencialmente los procesos implementados para corroborar que los resultados de estos se ajusten a lo que indica el borrador de la norma IEEE 802.15.3a y que son los apropiados para el proceso que se ha llevado a cabo sobre el flujo de datos.
- Determinar si el modelo implementado representa adecuadamente al sistema por medio de la verificación y visualización de algunos parámetros relevantes como señales de entrada y salida, magnitud de estas, vectores I-Q y la tasa de errores de bit.

2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para cumplir con el objetivo de identificar los elementos y propiedades del sistema a simular se recurre a la información disponible en el borrador de la norma IEEE 802.15.3a de la alianza de MultiBandas OFDM (MBOA, MultiBand OFDM Aliance) de septiembre de 2004³, este borrador especifica todas las características del nivel físico del sistema UWB. Debido a que el sistema a simular es complejo se realizan los siguientes pasos por cada uno de los subsistemas mencionados anteriormente:

- Identificación de clases y objetos
- Identificación de estructuras
- Identificación de sujetos
- Definición de atributos
- Definición de servicios o métodos

2.1 GENERADOR ALEATORIO DE DATOS BINARIOS

2.1.1 Identificación de clases y objetos

El subsistema generador aleatorio de datos binarios consta de un generador aleatorio de datos binarios. Este elemento corresponde al objeto del subsistema.

2.1.2 Identificación de estructuras

De acuerdo a las características y a la conformación del subsistema generador aleatorio de datos binarios se utiliza la estructura tipo *Whole-Part* ó estructura de

³ Hasta la fecha este borrador es la referencia más actualizada que se encuentra disponible para el público, dado que existen dos propuestas en competencia para UWB en el grupo de trabajo TG3a del IEEE. No se espera que sea lanzado un estándar definitivo de la norma en el corto plazo.

ensamblaje, cuya notación utiliza a la cabeza de la estructura un objeto del cual se desprenden las partes del objeto. Se muestra en la figura 1.

2.1.2.1 Generador aleatorio de datos binarios

El generador aleatorio de datos binarios no tiene una subdivisión interna en componentes.

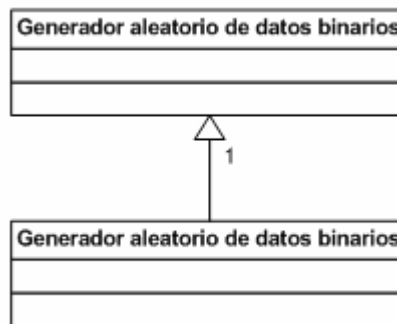


Figura 1 Estructura *Whole-Part* del generador aleatorio de datos binarios

2.1.3 Identificación de sujetos

Se identificó un único sujeto en este subsistema, el generador aleatorio de datos binarios, al cual se le realiza una estructura.

2.1.4 Definición de atributos

A continuación se muestran los atributos del generador aleatorio de datos binarios.

- Nombre: Tipo de dato de salida
Descripción: aquí se indica que los datos que se desean generar son del tipo binario 0, 1.

- Nombre: Periodo
Descripción: este atributo determina el periodo de duración de cada dato generado por el Generador Aleatorio de Datos Binarios (GADB).

- Nombre: Probabilidad
Descripción: este atributo indica la probabilidad de generación de un tipo u otro de dato (0 ó 1 en este caso), es muy importante fijar una probabilidad de $\frac{1}{2}$ para obtener similar cantidad datos de los dos tipos y no un tren de ceros o un tren de unos.

- Nombre: Datos por trama
Descripción: este atributo especificará la cantidad de datos que serán generados por el GADB para cada trama de datos.

2.1.5 Definición de servicios

- Nombre: Generar aleatoriamente datos binarios
Descripción: genera datos binarios 0 y 1 con un periodo de duración definido y en una cantidad determinada.

2.2 TRANSMISOR DE UWB

2.2.1 Identificación de clases y objetos

El subsistema transmisor de UWB consta de las siguientes partes básicas: codificador, modulador QPSK, multiplexor OFDM y módulo de filtrado y repetición. Estos elementos corresponden a los objetos del subsistema.

2.2.2 Identificación de estructuras

De acuerdo a las características y a la conformación del subsistema transmisor de UWB, se pueden identificar las siguientes estructuras a las que se les realiza su estructura tipo *Whole-Part*.

2.2.2.1 Codificador

El codificador se divide en los siguientes componentes: codificador convolucional, perforación e intercalador de bits. A su vez, el intercalador se divide en 3 etapas: etapa 1: intercalamiento de símbolos a través de los símbolos OFDM, etapa 2: intercalamiento de tono intersimbólico y etapa 3: cambios cíclicos intersimbólicos. La estructura *Whole-Part* se muestra en la figura 2:

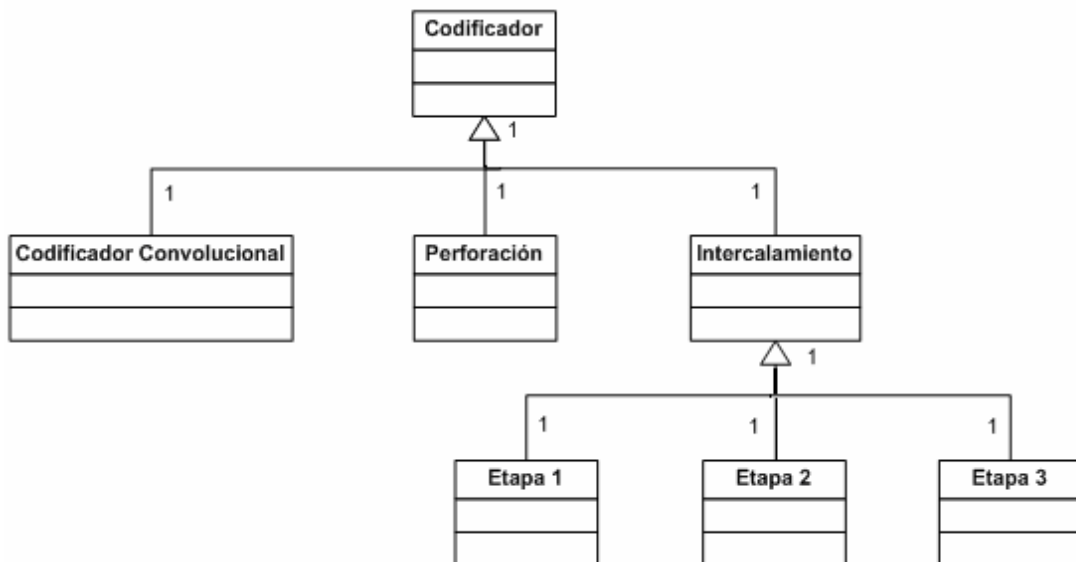


Figura 2 Estructura *Whole-Part* del codificador

2.2.2.2 Modulador QPSK

El bloque de modulador QPSK se implementa por medio del bloque modulador QPSK, la estructura *Whole-Part* de este se muestra en la figura 3.

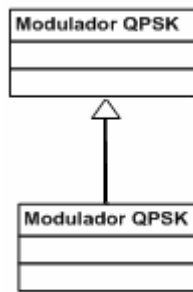


Figura 3 Estructura *Whole-Part* del bloque modulador QPSK

2.2.2.3 Multiplexor OFDM

El multiplexor OFDM se compone de los siguientes elementos: módulo de adecuación de datos, modulo de asignación de datos a las subportadoras de datos, módulo de inserción de subportadoras piloto y de guarda, módulo de inserción de la secuencia de estimación del canal (CE, Channel Estimation Sequence), módulo de IFFT, módulo de inserción de las secuencias de sincronización de paquetes (PS, Packet Synchronization Sequence) y Sincronización de Tramas (FS, Frame Synchronization Sequence) y por último el módulo de inserción de las bandas de guarda y del relleno. En la figura 4 se muestra la estructura *Whole-Part* de este subsistema.

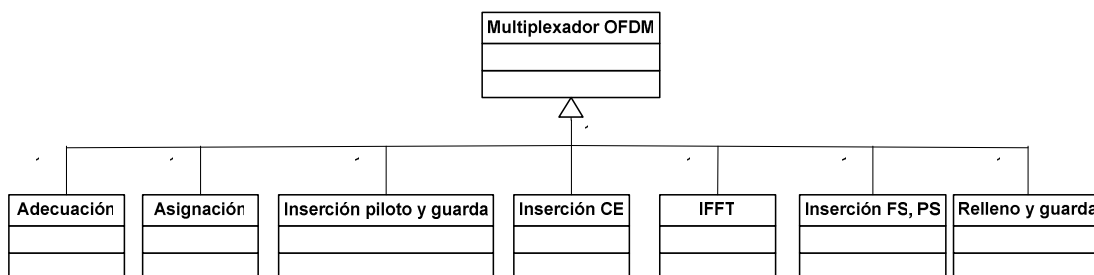


Figura 4 Estructura *Whole-part* del multiplexor OFDM

2.2.2.4 Filtrado y repetición

Se compone de los siguientes elementos: repetidor de símbolos OFDM y el filtro digital pasabajas. La estructura *Whole-Parte* se muestra en la figura 5.

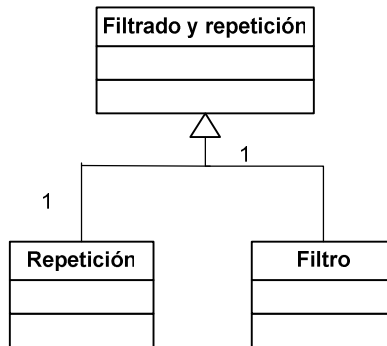


Figura 5 Estructura *Whole-part* del subsistema de filtrado y repetición

2.2.3 Identificación de sujetos

Este subsistema se compone de los siguientes sujetos: codificador, modulador QPSK, multiplexor OFDM, módulo de filtrado y repetición. La estructura de cada uno de estos sujetos se detalla a continuación.

2.2.4 Definición de atributos

2.2.4.1 Atributos del codificador

- Nombre: Estructura Trellis
Descripción: este atributo determina las transiciones internas del codificador para la codificación convolucional y la longitud de la restricción de longitud.
- Nombre: Vector de perforación
Descripción: este atributo determina el patrón de perforación que será empleado de acuerdo a la tasa de transferencia de datos.

- Nombre: Número de filas y columnas
Descripción: este atributo determina las dimensiones de las matrices que resultarán en el proceso de intercalamiento en cada una de las tres etapas descritas anteriormente.

2.2.4.2 Atributos del modulador QPSK

- Nombre: Ordenamiento de la constelación
Descripción: este atributo determina la forma en que son mapeados los bits en símbolos de la constelación QPSK.
- Nombre: Tipo de entrada
Descripción: este atributo determina el tipo de dato de entrada que será modulado en QPSK, se utilizará para indicar que los datos son de tipo binario.

2.2.4.3 Atributos del multiplexor OFDM

- Nombre: Dimensiones de entrada
Descripción: este atributo indica el tamaño de los datos de la entrada de los elementos que se encargan de diversas funciones en este subsistema, esto con el fin de asegurarse que las dimensiones coincidan y que pueda procesarse el flujo de datos.
- Nombre: Dimensiones de salida
Descripción: este atributo indica el tamaño de los datos de la salida de los elementos que se encargan de diversas funciones como la adecuación y la asignación de datos a las subportadoras, inserción de subportadoras de guarda y de relleno, etc.

- Nombre: índices de subportadora
Descripción: este atributo indica el valor de los índices que distinguen el tipo de subportadora: datos, guarda, piloto, DC, relleno.
- Nombre: Subportadoras piloto y subportadora DC
Descripción: este atributo indica el valor de los elementos que componen las 12 subportadoras piloto. Así como el valor de la subportadora DC.
- Nombre: Secuencia de estimación del canal (CE)
Descripción: este atributo indica el valor de secuencia CE que será añadida a cada símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia.
- Nombre: Secuencia de sincronización de paquete (PS)
Descripción: este atributo indica el valor de secuencia PS que será añadida a cada símbolo OFDM en el dominio del tiempo.
- Nombre: Secuencia de sincronización de trama (FS)
Descripción: este atributo indica el valor de secuencia FS que será añadida a cada símbolo OFDM en el dominio del tiempo.
- Nombre: Bandas de relleno y guarda
Descripción: este atributo indica el valor de las 10 bandas de guarda y las bandas de relleno que se insertan a cada símbolo OFDM en el dominio del tiempo para completar las 165 subportadoras requeridas.

2.2.4.4 Atributos del filtrado y repetición

- Nombre: Cantidad de repeticiones
Descripción: este atributo indica la cantidad de veces que el símbolo OFDM será repetido de acuerdo al TFC.

- Nombre: Frecuencia de corte
Descripción: este atributo indica el valor de la frecuencia de corte del filtro pasabajas que filtrará los símbolos OFDM antes de que estos sean transmitidos por el canal.
- Nombre: Frecuencia de muestreo
Descripción: este atributo indica el valor de la frecuencia de muestreo utilizada en el filtro pasabajas.

2.2.5 Definición de servicios

2.2.5.1 Servicios del codificador

- Nombre: Codificar convolucionalmente
Descripción: realiza la codificación convolucional del flujo aleatorio de datos binarios de acuerdo con el valor del atributo: estructura trellis.
- Nombre: Perforar
Descripción: realiza el proceso de perforación (extracción de bits) de los datos codificados de acuerdo al atributo: vector de perforación.
- Nombre: Intercalar
Descripción: realiza el intercalamiento de los datos codificados y perforados en 3 etapas de acuerdo con el valor del atributo: número de filas y de columnas. Este proceso se encarga de reordenar los datos para protegerlos de efectos nocivos como ráfagas de errores.

2.2.5.2 Servicios del modulador QPSK

- Nombre: Modular los datos en QPSK

Descripción: realiza la modulación del flujo de bits de entrada en QPSK mapeándolos en cada uno de los puntos de la constelación determinados por el valor del vector complejo I-Q. La selección de los datos y el mapeo de estos en la constelación se realizan de acuerdo con el valor de los atributos: tipo de entrada y ordenamiento de la constelación.

2.2.5.3 Servicios del multiplexor OFDM

- Nombre: Adaptar y asignar los datos a las subportadoras

Descripción: se encarga de asignar y adaptar los datos del flujo a las diferentes subportadoras de datos, de acuerdo con los valores de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida y de índices de subportadora.

- Nombre: Insertar subportadoras piloto y DC.

Descripción: se encarga de insertar a los símbolos OFDM las subportadoras piloto y la subportadora DC, de acuerdo con los valores de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida y de índices de subportadora.

- Nombre: Insertar la secuencia CE

Descripción: se encarga de insertar los datos de la secuencia CE a los símbolos OFDM, de acuerdo con los valores de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida y de secuencia de estimación del canal.

- Nombre: Realizar la IFFT
 Descripción: se encarga de la realización de la IFFT para llevar los símbolos OFDM del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. Lo más importante para la realización de la IFFT es que el símbolo este compuesto de 128 puntos o subportadoras en este caso.

- Nombre: Insertar las secuencias FS y PS
 Descripción: se encarga de insertar los datos de las secuencias FS y PS en los símbolos OFDM, de acuerdo con los valores de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida, de secuencia de sincronización de trama (FS) y de secuencia de sincronización de paquete (PS).

- Nombre: Insertar las bandas de guarda y de relleno
 Descripción: se encarga de insertar las bandas de guarda a los extremos del símbolo OFDM y de insertar las bandas de relleno, de acuerdo con los valores de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida, índices de subportadora y de bandas de relleno y guarda.

2.2.5.4 Servicios del filtrado y repetición

- Nombre: repetir los símbolos OFDM
 Descripción: se encarga de repetir 6 veces los símbolos OFDM de acuerdo al TFC, cuyo valor se almacena en el atributo: cantidad de repeticiones.

- Nombre: Filtrar
 Descripción: se encarga de aplicar un filtro pasabajas a los símbolos OFDM antes de inyectarlos al canal de transmisión de acuerdo con los valores de atributos: frecuencia de corte y frecuencia de muestreo.

2.3 CANAL DE TRANSMISIÓN

2.3.1 Identificación de clases y objetos

El subsistema de canal de transmisión se compone de los siguientes elementos: ruido blanco aditivo del tipo gaussiano y desvanecimiento tipo Rayleigh por multitrayectoria. Estos dos elementos corresponden a los objetos del subsistema.

2.3.2 Identificación de estructuras

De acuerdo a las características y a la conformación del subsistema canal de transmisión, se pueden identificar las siguientes estructuras a las que se les realiza su estructura tipo *Whole-Part*.

2.3.2.1 Ruido blanco aditivo gaussiano

Se compone de un único elemento que se encarga de adicionar el ruido blanco gaussiano a la señal recibida. Su estructura *Whole-Part* se muestra en la figura 6.

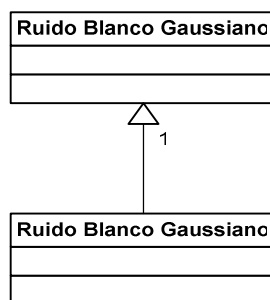


Figura 6 Estructura *Whole-Part* del ruido blanco aditivo gaussiano

2.3.2.2 Desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria

El desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria se compone de un único elemento de desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria. Su estructura *Whole-Part* se muestra en la figura 7.

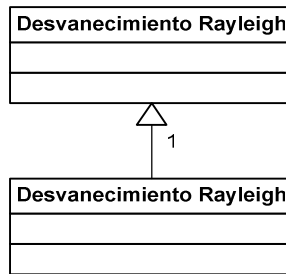


Figura 7 Estructura *Whole-Part* del desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria

2.3.3 Identificación de sujetos

En este subsistema se compone de los siguientes sujetos: ruido blanco aditivo gaussiano y desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria. La estructura de cada uno de estos sujetos se detalla a continuación.

2.3.4 Definición de atributos

2.3.4.1 Atributos del ruido blanco aditivo gaussiano

- Nombre: Energía de símbolo (E_s/N_0)
Descripción: este atributo indica al modulo de adición de ruido blanco gaussiano el valor de la relación de la energía de energía de símbolo a la densidad de potencia de ruido del símbolo OFDM que se recibe.

2.3.4.2 Atributos del desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria

- Nombre: Retardo
Descripción: este atributo determina el retardo de cada trayectoria que se introducirá a los símbolos OFDM por efectos de multitrayectoria.

- Nombre: Ganancia o pérdida
Descripción: este atributo indica la ganancia o pérdida relativas en dB de la señal de un trayecto determinado con respecto a la señal de otro trayecto.

2.3.5 Definición de servicios

2.3.5.1 Servicios del ruido blanco aditivo gaussiano

- Nombre: Adición de ruido blanco del tipo gaussiano
Descripción: se encarga de añadir ruido blanco del tipo gaussiano al símbolo OFDM recibido de acuerdo al valor del atributo: energía de símbolo (E_b/N_0).

2.3.5.2 Servicios del desvanecimiento Rayleigh por multitrayectoria

- Nombre: Desvanecimiento de la señal
Descripción: se encarga de atenuar los símbolos OFDM con ruido añadido de acuerdo al valor de los atributos: Relación retardo y ganancia o pérdida.

2.4 RECEPTOR DE UWB

2.4.1 Identificación de clases y objetos

El subsistema receptor de UWB consta de los siguientes elementos: módulo de filtrado y remoción de la repetición, demultiplexor OFDM, demodulador QPSK y el decodificador. Estos elementos corresponden a los objetos del subsistema.

2.4.2 Identificación de estructuras

De acuerdo a las características y a la conformación del subsistema receptor de UWB, se pueden identificar las siguientes estructuras a las que se les realiza su estructura tipo *Whole-Part*.

2.4.2.1 Filtrado y remoción de repetición

Se compone de los siguientes elementos: filtro digital pasabalas, el elemento de remoción de la repetición y compensador de retardo. La estructura *Whole-Parte* se muestra en la figura 8.

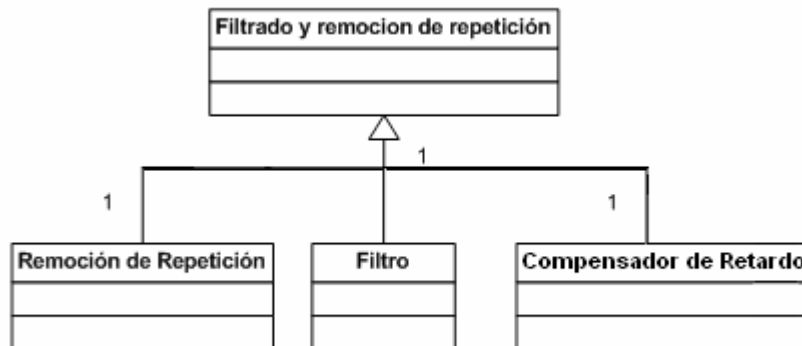


Figura 8 Estructura *Whole-part* del módulo de filtrado y remoción de repetición

2.4.2.2 Demultiplexor OFDM

El demultiplexor OFDM se compone de los siguientes elementos: módulo de remoción del prefijo cíclico, bandas de guarda, relleno y secuencias FS y PS, módulo de FFT, módulo de estimación y compensación del canal y el módulo de remoción de las subportadoras piloto. En la figura 9 se muestra la estructura *Whole-Part* de este subsistema.

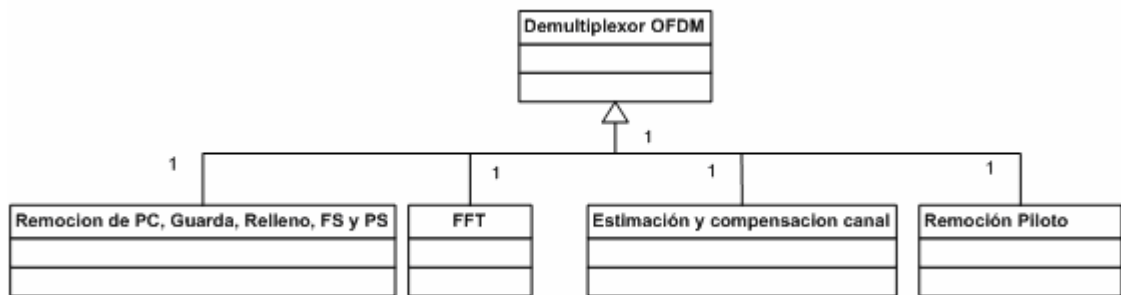


Figura 9 Estructura *Whole-part* del demultiplexor OFDM

2.4.2.3 Demodulador QPSK

El bloque demodulador QPSK se implementa por medio de los bloques demodulador QPSK y retardador, la estructura *Whole-Part* de este subsistema se muestra en la figura 10.

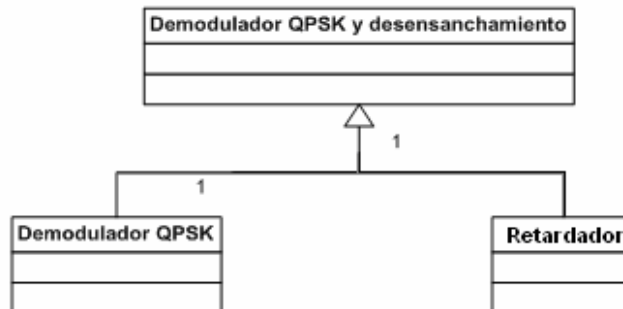


Figura 10 Estructura *Whole-Part* del bloque demodulador QPSK

2.4.2.4 Decodificador

El decodificador se divide en los siguientes componentes: compensador de retardo, desintercalador de 3 etapas, inserción de bits (para remover la perforación) y decodificador de Viterbi. La estructura *Whole-Part* se muestra en la figura 11.

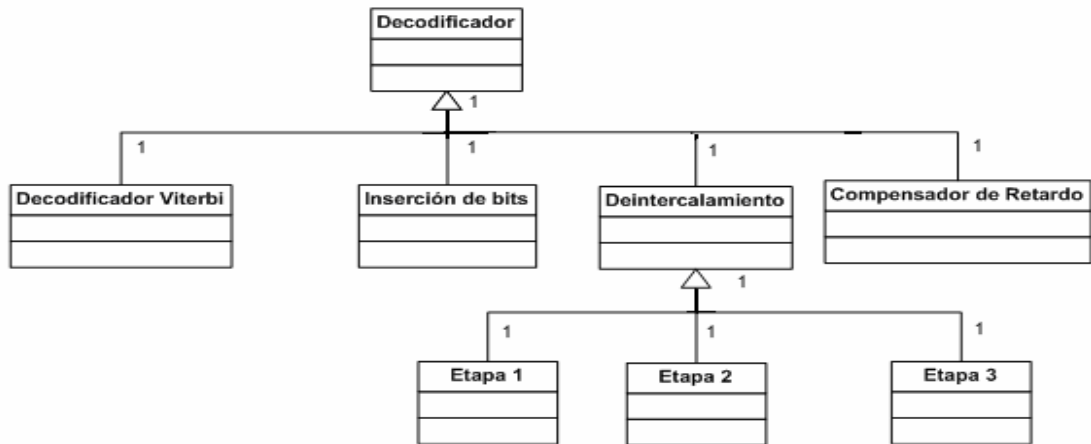


Figura 11 Estructura *Whole-Part* del decodificador

2.4.3 Identificación de sujetos

Este subsistema se compone de los siguientes sujetos: filtrado y remoción de repetición, demultiplexor OFDM, demodulador QPSK y decodificador. La estructura de cada uno de estos sujetos se detalla a continuación.

2.4.4 Definición de atributos

2.4.4.1 Atributos del módulo de filtrado y remoción de la repetición

- Nombre: Cantidad de repeticiones
Descripción: este atributo indica la cantidad de veces que el símbolo OFDM fue repetido de acuerdo al TFC.

- Nombre: Frecuencia de corte
Descripción: este atributo indica el valor de la frecuencia de corte del filtro pasabajas que filtrará los símbolos OFDM recibidos del canal.

- Nombre: Frecuencia de muestreo
Descripción: este atributo indica el valor de la frecuencia de muestreo utilizada en el filtro pasabajas.

- Nombre: Retardo
Descripción: este atributo indica la cantidad de símbolos OFDM que deben ser recibidos y mantenidos antes de ser enviados a la siguiente etapa, para compensar retardos por procesamiento, filtrado y propagación.

2.4.4.2 Atributos del demultiplexor OFDM

- Nombre: Dimensiones de entrada
Descripción: este atributo indica el tamaño de los datos de la entrada de los elementos que se encargan de diversas funciones en este subsistema, esto con el fin de asegurarse que las dimensiones coincidan y que pueda procesarse el flujo de datos.

- Nombre: Dimensiones de salida
Descripción: este atributo indica el tamaño de los datos de la salida de los elementos que se encargan de diversas funciones como la remoción de subportadoras piloto, remoción de subportadoras de guarda y de relleno, etc.

- Nombre: índices de subportadora
Descripción: este atributo indica el valor de los índices que distinguen el tipo de subportadora, datos, guarda, piloto, DC, relleno.

- Nombre: Subportadoras piloto y subportadora DC
 Descripción: este atributo indica el valor de los elementos que componen las 12 subportadoras piloto y 10 subportadoras de relleno. Así como el valor de la subportadora DC.

- Nombre: Secuencia de estimación del canal (CE)
 Descripción: este atributo indica el valor de secuencia CE que será removida de cada símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia.

- Nombre: Secuencia de sincronización de paquete (PS)
 Descripción: este atributo indica el valor de secuencia PS que será removida de cada símbolo OFDM en el dominio del tiempo.

- Nombre: Secuencia de sincronización de trama (FS)
 Descripción: este atributo indica el valor de secuencia FS que será removida de cada símbolo OFDM en el dominio del tiempo.

- Nombre: Bandas de relleno y guarda
 Descripción: este atributo indica el valor de las 10 bandas de guarda y las bandas de relleno que se removerán de cada símbolo OFDM en el dominio del tiempo.

2.4.4.3 Atributos del demodulador QPSK

- Nombre: Ordenamiento de la constelación
 Descripción: este atributo determina la forma en que los símbolos de la constelación QPSK son mapeados en bits de datos.

- Nombre: Tipo de salida
Descripción: este atributo determina el tipo de dato de salida al que serán demodulados los símbolos QPSK, se utilizará para indicar que los datos son de tipo binario.
- Nombre: Retardo
Descripción: este atributo indica la cantidad de datos que deben ser recibidos y mantenidos antes de enviar los símbolos a la siguiente etapa para compensar efectos de retardos por procesamiento.

2.4.4.4 Atributos del decodificador

- Nombre: Estructura Trellis
Descripción: este atributo determina las transiciones internas del decodificador para el decodificador Viterbi y la longitud de la restricción de longitud.
- Nombre: Vector de inserción
Descripción: este atributo determina el patrón de inserción de bits que será utilizado para remover la perforación realizada en el codificador
- Nombre: Número de filas y columnas
Descripción: este atributo determina las dimensiones de las matrices que se procesarán en cada una de las 3 etapas del proceso de desintercalamiento.
- Nombre: Retardo
Descripción: este atributo indica la cantidad de datos que deben ser recibidos y mantenidos antes de enviar los datos a la siguiente etapa, para compensar retardos por procesamiento.

2.4.5 Definición de servicios

2.4.5.1 Servicios del módulo de filtrado y remoción de repetición

- Nombre: Remover los símbolos OFDM repetidos
Descripción: se encarga de remover los símbolos OFDM repetidos de acuerdo al TFC, cuyo valor se almacena en el atributo: cantidad de repeticiones.

- Nombre: Filtrar
Descripción: se encarga de aplicar un filtro pasabajas a los símbolos OFDM recibidos del canal de transmisión de acuerdo al valor de los atributos: frecuencia de corte y frecuencia de muestreo.

- Nombre: Compensar el retardo
Descripción: se encarga de recibir y almacenar una cantidad de símbolos OFDM dada por el valor del atributo: retardo. Luego estos símbolos se envían a la etapa siguiente.

2.4.5.2 Servicios del demultiplexor OFDM

- Nombre: Remoción de las bandas de guarda, prefijo cíclico, secuencia FS y secuencia PS.
Descripción: como su nombre lo indica, se encarga de remover cada uno de estos elementos, de acuerdo con el valor de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida y de índices de subportadora, secuencia de sincronización FS y de secuencia de PS.

- Nombre: Realizar la FFT
 Descripción: se encarga de la realización de la FFT para llevar los símbolos OFDM del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

- Nombre: Realizar la estimación y compensación del canal.
 Descripción: se encarga de utilizar la secuencia CE, los atributos de dimensiones de entrada, dimensiones de salida y de índices de subportadora para estimar y compensar efectos nocivos para los símbolos OFDM derivados del canal de transmisión, remueve también la subportadora de DC.

- Nombre: Remover las subportadoras piloto
 Descripción: se encarga de remover las subportadoras piloto de acuerdo con los valores de atributos como dimensiones de entrada, dimensiones de salida y de los índices de subportadora.

2.4.5.3 Servicios del demodulador QPSK

- Nombre: Compensar el retardo de procesamiento
 Descripción: se encarga de compensar el retardo de procesamiento recibiendo y almacenando una cantidad de datos modulados en QPSK dada por el valor del atributo: retardo. Luego estos símbolos se envían al demodulador QPSK

- Nombre: Demodular los símbolos QPSK en bits.
 Descripción: realiza la demodulación de los símbolos QPSK en parejas de bits de datos. La operación se realiza de acuerdo con el valor de los atributos: tipo de salida y ordenamiento de la constelación.

2.2.5.4 Servicios del decodificador

- Nombre: Compensar el retardo del intercalador
Descripción: se encarga de compensar el retardo del intercalador recibiendo y almacenando una cantidad de datos determinada por con los valores de atributos: retardo, los cuales luego serán enviados al desintercalador

- Nombre: Desintercalar los datos
Descripción: se encarga del proceso de desintercalamiento de los datos en 3 etapas inversas a las definidas para el intercalador, lo cual permite recuperar el orden original de los datos. La operación se realiza de acuerdo con los valores de atributos: número de filas y de columnas.

- Nombre: Inserción de bits
Descripción: se encarga de insertar bits de acuerdo al valor del atributo: vector de inserción, para revertir el efecto de la remoción de bits que se llevo a cabo en el proceso de perforación.

- Nombre: Decodificar los datos
Descripción: se encarga de la decodificación de los datos previamente codificados por el codificador convolucional, haciendo uso del decodificador de Viterbi y del valor del atributo: estructura trellis.

3. FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Después de un estudio exhaustivo del borrador de la norma IEEE 802.15.3a y de acuerdo a los fines y objetivos planteados en esta metodología de simulación, se procede a plantear un modelo de simulación y el modelo conceptual en el que se consideran únicamente los aspectos de mayor interés y utilidad para la consecución de estos objetivos, se descartan aquellos aspectos menos relevantes bajo el enfoque propuesto. La abstracción permitirá reducir la complejidad del sistema, mostrar con mayor claridad los procesos que son objeto de estudio y trasladar con facilidad el modelo hacia su implementación en la herramienta de simulación Simulink de Matlab®. Debido a la complejidad del sistema a simular, el análisis del comportamiento del mismo y la recolección de datos y resultados se realizó dividiendo al sistema total en varios subsistemas. Estos subsistemas en su orden son:

- Subsistema generador de datos aleatorios.
- Subsistema transmisor UWB.
- Subsistema canal de transmisión.
- Subsistema receptor UWB.

La estructura general del sistema, basada en los subsistemas planteados se muestra en la figura 12.

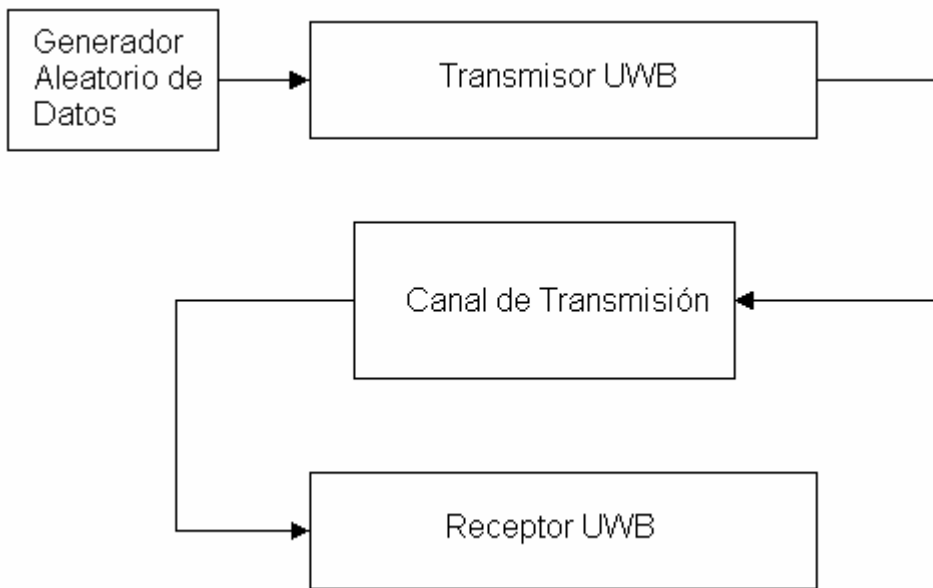


Figura 12 Estructura general del sistema

3.1 MODELO DE SIMULACIÓN: SUBSISTEMA GENERADOR ALEATORIO DE DATOS BINARIOS

En la figura 13 se muestra la estructura más general del subsistema generador aleatorio de datos binarios.



Figura 13 Estructura del subsistema generador aleatorio de datos binarios

Teniendo en cuenta el objeto mostrado en la figura 13, a continuación se realiza la caracterización de este.

3.1.1 Generador aleatorio de datos binario

Señales de entrada: Ninguna.

Variables de entrada:

Tipo de dato de salida: binario

Periodo: de acuerdo a la tasa de transferencia

Probabilidad: 0,5

Datos por trama: de acuerdo a la tasa de transferencia

Señales de salida: datos aleatorios binarios

Variables de salida:

Bits: 125 por trama

Señales propias de procesos internos: ninguna

3.2 MODELO DE SIMULACIÓN: SUBSISTEMA TRANSMISOR DE UWB

La implementación del transmisor UWB en su nivel más general se muestra en la figura 14.



Figura 14 Estructura interna del subsistema transmisor UWB

De acuerdo al análisis realizado en la sección anterior, existen 4 sujetos con una estructura interna definida, cada una se detalla a continuación.

3.2.1 Estructura interna del codificador

La estructura interna del codificador se muestra en la figura 15.

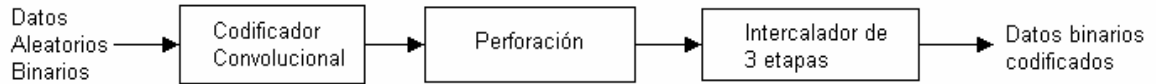


Figura 15 Estructura interna del codificador

3.2.2 Estructura interna del modulador QPSK

La estructura interna del modulador QPSK se muestra en la figura 16.

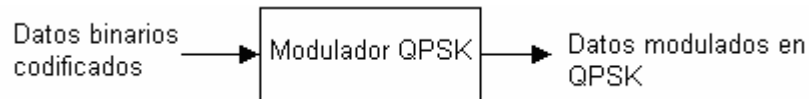


Figura 16 Estructura interna del modulador QPSK

3.2.3 Estructura interna del multiplexor OFDM

La estructura interna del multiplexor OFDM se muestra en la figura 17.



Figura 17 Estructura interna del multiplexor OFDM

3.2.4 Estructura interna del módulo de filtrado y repetición

La estructura interna del módulo de filtrado y repetición se muestra en la figura 18.

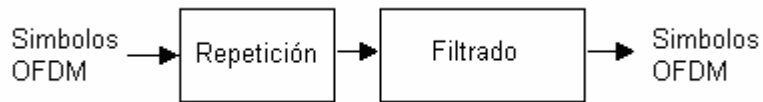


Figura 18 Estructura interna del módulo de filtrado y repetición

De acuerdo con los objetos mostrados en la figura 14, la caracterización para cada una de las partes del subsistema transmisor UWB es la siguiente:

3.2.1.1 Codificador

- Señales de entrada: Señal aleatoria binaria que corresponde a la información del usuario.
- Variables de entrada:
 - Bits por trama 125 bits
- Señales de salida: Señal binaria codificada.
- Variables de salida:
 - 200 Bits por trama
- Señales propias de procesos internos:

El bloque codificador, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 3 componentes internos cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se muestran a continuación:

3.2.1.1.1 Codificador convolucional

- Señales de entrada: Señal binaria 125 bits por trama.
- Variables de entrada:
 - Estructura trellis
- Señales de salida: Señal binaria codificada convolucionalmente
- Variables de salida:
 - Bits por trama: 375, correspondientes a la tasa 1/3

- Descripción:

La codificación convolucional es una codificación continua de largas cadenas de bits sin necesidad de agruparlos en bloques, en este tipo de codificación la secuencia de bits codificados depende de los bits previos. La codificación depende de un código convolucional especificado por tres parámetros (n , k , K):

- n es el número de bits de la palabra codificada.
- k es el número de bits de la palabra de datos.
- K es la memoria del código o longitud restringida

La relación de codificación se define en la ecuación 1.

$$R = \frac{k}{n} \tag{1}$$

Un codificador convolucional puede representarse por medio de un diagrama de estados de transición (máquina de estados) ya que tiene

memoria finita. Una manera de representar las distintas transiciones y los caminos que éstas maquinas de estado describen es mediante un diagrama de Trellis. Una descripción de Trellis de un codificador convolucional muestra cómo cada posible entrada al codificador influye en ambas salidas y a la transición de estado del codificador. Un código de longitud K tiene un diagrama de Trellis con 2^{K-1} estados en cada intervalo t_i .

La codificación convolucional que será llevada a cabo se especifica de acuerdo a la sección 1.4.9 del anexo A de este trabajo de grado, obteniéndose los siguientes parámetros.

- Tasa: 1/3
- Generadores polinómicos, $g_0 = 133_8$, $g_1 = 165_8$ y $g_2 = 171_8$
- Longitud restringida: $K=7$

3.2.1.1.2 Perforación

- Señales de entrada: datos binarios de 375 bits.
- Variables de entrada:
 - Patrón de perforación. [1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0]
- Señales de salida: Señal binaria 200 bits por trama
- Variables de salida:
 - 200 bits por trama.
- Descripción:

Este bloque adapta las tasas de bits cuando se utilizan tasas de datos variables utilizando un patrón de perforación, que se repite para todos los símbolos, en el que un '1' significa que el bit se conserva y un '0' significa

que el bit es removido. El patrón de perforación especificado esta especificado en la sección 1.4.9 del anexo A de este trabajo de grado, se define que para una tasa de transmisión de 400 Mbps corresponde a: [1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0] que convierte la tasa de codificación de 1/3 a 5/8.

3.2.1.1.3 Intercalador

- Señales de entrada: Señal binaria 200 bits por trama
- Variables de entrada:
 - Dimensiones (filas y columnas)
- Señales de salida: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama.
- Variables de salida:
 - Bits por trama: 200
- Descripción:

El intercalamiento de bits consiste en una reorganización de los bits de acuerdo a las necesidades de la Tasa de Error de Bits (BER, Bit Error Rate) de una forma determinística y única. El entrelazado se utiliza para evitar las ráfagas de errores y para reducir el efecto de estas en los bits de información. Las funciones de intercalamiento para cada una de las tres etapas se especifican en el anexo A de este trabajo de grado, en la sección 1.4.10.

3.2.2.1 Modulador QPSK

- Señales de entrada: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama

- Variables de entrada:
Bits por trama: 200
- Señales de salida: Símbolos modulados en QPSK
- Variables de salida:
100 símbolos QPSK
- Señales propias de procesos internos:

El subsistema modulador QPSK, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 1 componente interno con sus respectivas señales y variables. Estas se muestran a continuación:

3.2.2.1.1 Modulador QPSK

- Señales de entrada: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama
- Variables de entrada:
Tipo de Entrada: bit
Ordenamiento de la constelación: gray
- Señales de salida: Símbolos modulados en QPSK de 100 bits
- Variables de salida:
100 símbolos QPSK
- Descripción:
La Manipulación por Corrimiento de Fase Cuaternaria (QPSK, Quaternary Phase Shift Keying) es un esquema de modulación digital que representa los datos mediante el cambio de la fase de una señal portadora de

referencia. En el caso de QPSK los datos se representan en un diagrama de constelación en donde los ejes representan las componentes real (en fase) e imaginaria (en cuadratura) desfasadas 90 grados, por medio de 4 puntos separados una misma distancia dentro de un circulo de 360 grados, cada punto esta conformado por 2 bits y la separación de sus fases es de 45 grados.

Los bits pares (ó los impares) se utilizan para modular la componente en fase de la portadora, mientras que los bits impares (ó pares) se utilizan para modular la componente en cuadratura de la portadora. La forma de generar símbolos QPSK esta dada por las ecuaciones 2 a la 4:

Los símbolos $S_i(t)$ serán generados haciendo uso de la ecuación 2.

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + (2i - 1) \frac{\pi}{4}\right) \quad i = 1,2,3,4 \quad (2)$$

Donde las 4 fases posibles son, en su orden: $\frac{\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{4}$, $\frac{5\pi}{4}$ y $\frac{7\pi}{4}$

De la ecuación 2 se obtiene la ecuación 3 para la componente en fase y la ecuación 4 para la componente en cuadratura.

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad (3)$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (4)$$

3.2.3.1 Multiplexor OFDM

- Señales de entrada: Símbolos QPSK de 100 bits.

- Variables de entrada:
100 símbolos QPSK
- Señales de salida: Símbolos OFDM
- Variables de salida:
Subportadoras por símbolo: 165
- Señales propias de procesos internos:
El módulo de Multiplexor OFDM, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 7 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estos se mencionan a continuación.

3.2.3.1.1 Adecuación de Datos

- Señales de entrada: Símbolos QPSK de 100 bits.
- Variables de entrada:
100 símbolos QPSK
- Señales de salida: Flujo almacenado de 3600 Símbolos QPSK.
- Variables de salida:
Vector de 3600 posiciones en las cuales se almacenan los símbolos QPSK.
- Descripción:
En el módulo de Adecuación de Datos, se almacenan la cantidad de Símbolos QPSK necesarios para realizar adecuadamente el proceso de Asignación a Subportadoras, que será descrito a continuación.

3.2.3.1.2 Asignación a Subportadoras

- Señales de entrada: Flujo almacenado de 3600 Símbolos QPSK.

- Variables de entrada:
 - Vector de 3600 posiciones en las cuales se almacenan los símbolos QPSK.

- Señales de salida: 36 Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia cada uno formado por 100 subportadoras de datos.

- Variables de salida:
 - Símbolos OFDM: 36

- Descripción:

El módulo asignación a subportadoras, se encarga de realizar una conversión serial a paralelo de la señal de entrada, generando una matriz de 100x36 que representa los primeros símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia, cada uno formado por 100 Subportadoras de Datos.

3.2.3.1.3 Inserción de Subportadoras Piloto y de Guarda

- Señales de entrada: 36 Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia cada uno formado por 100 subportadoras de datos.

- Variables de entrada:
 - Símbolos OFDM: 36

- Señales de salida: Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia a los cuales han sido insertadas las subportadoras piloto, subportadoras de guarda y subportadora DC.
- Variables de salida:
 Símbolos OFDM con subportadoras (Piloto, Guarda y DC): 36
- Descripción:
 El módulo inserción de subportadoras piloto y de guarda se encarga de ensamblar los símbolos OFDM, reorganizando las subportadoras de datos e insertando 12 subportadoras piloto, 10 subportadoras de guarda y 1 subportadora DC según la norma IEEE 802.15.3a.

3.2.3.1.4 Inserción CE

- Señales de entrada: Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia a los cuales han sido insertadas las Subportadoras Piloto, Subportadoras de Guarda y Subportadora DC.
- Variables de entrada:
 Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda y DC): 36
- Señales de salida: Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia a los cuales se inserta la Secuencia de Estimación del Canal (CE).
- Variables de salida:
 Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda y DC) y CE: 42

- Descripción:
El módulo Inserción de CE se encarga de agregar los 6 Símbolos de Prueba OFDM en el dominio de la frecuencia que conforman la Secuencia de Estimación del Canal del Preámbulo PLCP. Formando así, un bloque de 42 Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia constituidos por 123 Subportadoras.

3.2.3.1.5 IFFT

- Señales de entrada: Símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia a los cuales se inserta la Secuencia de Estimación del Canal (CE).
- Variables de entrada:
Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda y DC) y CE: 42
- Señales de salida: Símbolos OFDM en el dominio del tiempo a los cuales se han agregado 5 Subportadoras de relleno.
- Variables de salida:
Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda, DC y relleno) y CE: 42
- Descripción:
El módulo IFFT se encarga de realizar la conversión del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo de los Símbolos OFDM, agregando antes 5 subportadoras de relleno según la norma IEEE 802.15.3a.

3.2.3.1.6 Inserción de PS y FS

- Señales de entrada: Símbolos OFDM en el dominio del tiempo a los cuales se han agregado 5 Subportadoras de relleno.
- Variables de entrada:
Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda y DC) y CE: 42
- Señales de salida: Símbolos OFDM en el dominio del tiempo a los cuales se han agregado la Secuencia de Sincronización de Paquetes (PS) y la Secuencia de Sincronización de Tramas(FS).
- Variables de salida:
Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda, DC y relleno), CE, PS y FS: 51.
- Descripción:
El módulo Inserción de PS y FS se encarga agregar 3 Símbolos OFDM que corresponden a PS y 6 Símbolos OFDM que corresponden a FS para completar los componentes del preámbulo PLCP según la norma IEEE 802.15.3a.

3.2.3.1.6 Inserción de Bandas de Guarda y de Relleno

- Señales de entrada: Símbolos OFDM en el dominio del tiempo a los cuales se han agregado la Secuencia de Sincronización de Paquetes (PS) y la Secuencia de Sincronización de Tramas(FS).

- Variables de entrada:
Símbolos OFDM con Subportadoras (Piloto, Guarda, DC y relleno), CE, PS y FS: 51.
- Señales de salida: Símbolos OFDM
- Variables de salida:
Subportadoras por símbolo: 165
- Descripción:
El módulo Inserción de Bandas de Guarda y de Relleno, se encarga de insertar 32 subportadoras de relleno correspondientes al prefijo cíclico y 5 Subportadoras como bandas de guarda según la norma IEEE 802.15.3a. Además, descompone el bloque de Símbolos OFDM entregándolos uno por uno al módulo de filtrado y repetición.

3.2.4.1 Módulo de filtrado y repetición

- Señales de entrada: Símbolos OFDM
- Variables de entrada:
Subportadoras por símbolo: 165
- Señales de salida: Símbolos OFDM repetidos y filtrados
- Variables de salida:
Subportadoras por símbolo: 165

- Señales propias de procesos internos:
El módulo de filtrado y repetición, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 2 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se mencionan a continuación

3.2.4.1.1 Repetidor

- Señales de entrada: Símbolos OFDM
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Cantidad de repeticiones: 6

Señales de salida: Símbolos OFDM repetidos 6 veces
- Descripción:
Según la norma IEEE 802.15.3a los símbolos OFDM deben ser transmitidos por duplicado en cada una de las 3 subbandas del modo 1, a la vez, estos son intercalados entre estas subbandas de acuerdo al valor del TFC que ha sido definido para la operación de cada picored.

3.2.4.1.2 Filtro

- Señales de entrada: Símbolos OFDM repetidos 6 veces
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Frecuencia de corte: 528MHz/2
 - Frecuencia de muestreo: 528MHz*6

- Señales de salida: Símbolos OFDM repetidos 6 veces y filtrados para su transmisión.
- Variables de salida:
 - Subportadoras por símbolo: 165

Descripción:

Un filtro es un sistema que, dependiendo de algunos parámetros, realiza un proceso de discriminación de una señal de entrada obteniendo variaciones en su salida. Los filtros digitales tienen como entrada una señal analógica o digital y a su salida tienen otra señal analógica o digital, pudiendo haber cambiado en amplitud, frecuencia y/o fase dependiendo de las características del filtro.

El filtrado digital es parte del procesamiento digital de señales. Se le da la denominación de digital más por su funcionamiento interno que por su dependencia del tipo de señal a filtrar, así podríamos llamar filtro digital tanto a un filtro que realiza el procesado de señales digitales como a otro que lo haga de señales analógicas.

El filtrado digital consiste en la realización interna de un procesado de datos de entrada. El valor de la muestra de la entrada actual y algunas muestras anteriores (que previamente habían sido almacenadas) son multiplicadas por unos coeficientes definidos. También podría tomar valores de la salida en instantes pasados y multiplicarlos por otros coeficientes. Finalmente todos los resultados de todas estas multiplicaciones son sumados, dando una salida para el instante actual.

En el caso de un filtro pasabajas las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte podrán atravesar el dispositivo casi sin cambios en su magnitud o

fase, mientras que las frecuencias por encima de la frecuencia de corte difícilmente podrán atravesar el dispositivo pues son altamente atenuadas en su magnitud.

3.3 MODELO DE SIMULACIÓN: SUBSISTEMA CANAL DE TRANSMISIÓN

La implementación del canal de transmisión en su nivel más general se muestra en la figura 19.

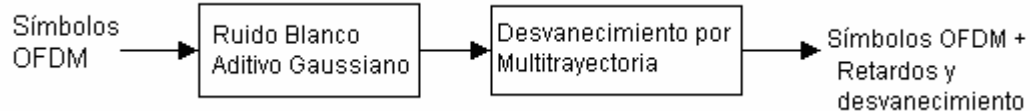


Figura 19 Estructura interna del subsistema canal de transmisión

De acuerdo con el análisis realizado en la sección anterior, existe un sujeto que se detalla a continuación:

3.3.1 Canal de transmisión

- Señales de entrada: Símbolos OFDM repetidos y filtrados
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
- Señales de salida: Símbolos OFDM con ruido y atenuación añadidos
- Variables de salida:
 - Subportadoras por símbolo: 165

- Señales propias de procesos internos:
El canal de transmisión, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 2 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se mencionan a continuación:

3.3.1.1 Ruido blanco aditivo gaussiano

- Señales de entrada: Símbolos OFDM repetidos y filtrados
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Relación energía de símbolo densidad espectral de ruido Es/No:
Variable
- Señales de salida: Símbolos OFDM con ruido añadido
- Variables de salida:
 - Subportadoras por símbolo: 165
- Descripción:

El ruido blanco se define como una señal aleatoria con una densidad espectral de potencia constante o plana debido a que tiene igual potencia en cualquier banda, frecuencia central o ancho de banda. El ruido blanco posee toda la gama de frecuencias de un ancho de banda dado, es por esto que recibe el nombre de ruido blanco o ruido de banda ancha.

El canal con ruido blanco aditivo gaussiano se encarga de añadir linealmente ruido de banda ancha o blanco con una densidad espectral de potencia constante y una distribución gaussiana de amplitud.

Este tipo de ruido es producido por muchas fuentes naturales, como vibraciones térmicas de los átomos en equipos y antenas, radiación de cuerpo negro de la tierra y de cuerpos celestes como el sol, entre otros.

3.3.1.2 Desvanecimiento Rayleigh por Multitrayectoria

- Señales de entrada: Símbolos OFDM con ruido añadido

- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Retardo: depende del periodo de bit
 - Ganancia o pérdida: dada en dB, depende del trayecto.

- Señales de salida: Símbolos OFDM con ruido y desvanecimiento

- Variables de salida:
 - Subportadoras por símbolo: 165

- Descripción:

Multitrayectoria es un fenómeno de propagación que resulta en la recepción de la señales de radio por la antena receptora por dos o más caminos o trayectorias. La multitrayectoria es causada por fenómenos como la reflexión y la refracción atmosférica y la reflexión en objetos terrestres como edificios y montañas.

Los efectos de la multitrayectoria incluyen la interferencia constructiva y destructiva, así como cambios en la fase de la señal. Esto a su vez causa desvanecimiento Rayleigh. La función de densidad de probabilidad de Rayleigh esta dada por la ecuación 5.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) & x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Donde σ^2 se conoce como la envolvente de desvanecimiento de la distribución Rayleigh.

En comunicaciones digitales, la multitrayectoria puede causar errores en los datos recibidos debido a Interferencias Intersimbólicas (ISI, Intersymbolic Interference). Para corregir el ISI se utilizan ecualizadores y como alternativa pueden utilizarse técnicas como OFDM y receptores RAKE.

3.4 MODELO DE SIMULACIÓN: SUBSISTEMA RECEPTOR DE UWB

La implementación del transmisor UWB en su nivel más general se muestra en la figura 20



Figura 20 Estructura interna del subsistema receptor de UWB

De acuerdo con el análisis realizado en la sección anterior, existen 4 sujetos con una estructura interna definida, cada una se detalla a continuación:

3.3.1 Estructura interna del módulo de filtrado y remoción de la repetición

La estructura interna del módulo de filtrado y remoción de la repetición se muestra en la figura 21.

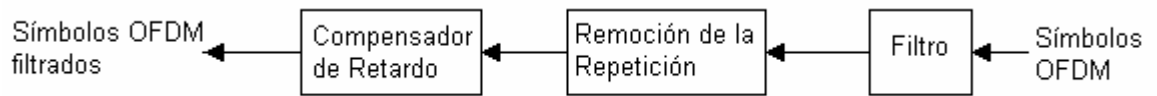


Figura 21 Estructura interna del módulo de filtrado y remoción de la repetición

Por lo tanto, de acuerdo a los objetos mostrados en la figura 21, a continuación se muestra la estructura interna de cada uno de estos objetos:

3.3.2 Estructura interna del demultiplexor OFDM

La estructura interna del demultiplexor OFDM se muestra en la figura 22.

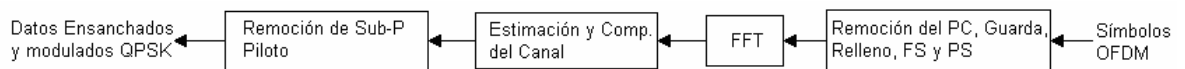


Figura 22 Estructura interna del demultiplexor OFDM

3.3.3 Estructura interna del demodulador QPSK

La estructura interna del demodulador QPSK se muestra en la figura 23.

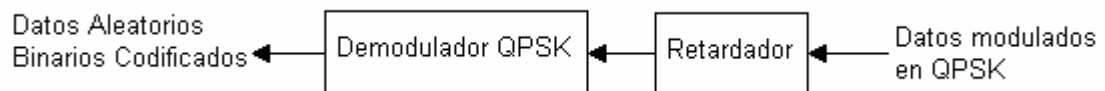


Figura 23 Estructura interna del demodulador QPSK

3.3.4 Estructura interna del decodificador

La estructura interna del decodificador se muestra en la figura 24.

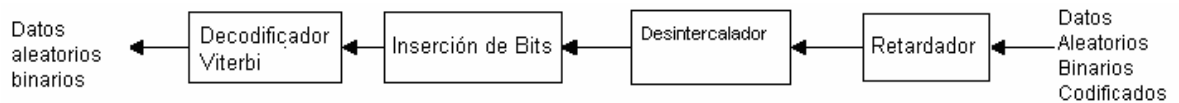


Figura 24 Estructura interna del decodificador

De acuerdo a los objetos mostrados en la figura 24, la caracterización para cada una de las partes del subsistema receptor UWB es la siguiente:

3.3.1.1 Módulo de filtrado y remoción de la repetición

- Señales de entrada: Símbolos OFDM repetidos y filtrados con ruido y atenuación añadidos
- Variables de entrada:
Subportadoras por símbolo: 165
- Señales de salida: Símbolos OFDM.
- Variables de salida:
Subportadoras por símbolo: 165
- Señales propias de procesos internos:
El módulo de filtrado y recepción, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 3 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se mencionan a continuación:

3.3.1.1.1 Filtro

- Señales de entrada: Símbolos OFDM repetidos y filtrados a los que se les ha añadido ruido y atenuación.
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Frecuencia de corte: 528MHz/2
 - Frecuencia de muestreo: 528MHz*6
- Señales de salida: Símbolos OFDM repetidos
- Variables de salida:
 - Subportadoras por símbolo: 165
- Descripción:
Ver la sección 3.2.4.1.2

3.1.1.1.2 Removedor de la repetición

- Señales de entrada: Símbolos OFDM repetidos
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Cantidad de repeticiones: 6
- Señales de salida: Símbolos OFDM
- Descripción:
Ver la sección 3.2.4.1.1

3.3.1.1.3 Retardador

- Señales de entrada: Símbolos OFDM
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
 - Retardo: 8415 (total de símbolos*total de subportadoras)
- Señales de salida: Símbolos OFDM
- Variables de salida:
 - Subportadoras por símbolo: 165
- Descripción:

Actúa como una memoria o buffer en donde se almacenan y se retienen una determinada cantidad de símbolos. Cuando se tiene almacenada la cantidad deseada se permite su paso al siguiente bloque.

3.3.2.1 Demultiplexor OFDM

- Señales de entrada: Símbolos OFDM.
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
- Señales de salida: Símbolos modulados QPSK
- Variables de salida:
 - Bits por trama: 100

- Señales propias de procesos internos:

El módulo Demultiplexor OFDM, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 4 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se muestran a continuación.

3.3.2.1.1 Remoción del Prefijo Cíclico (PC), Guarda, Relleno, FS y PS

- Señales de entrada: Símbolos OFDM.
- Variables de entrada:
 - Subportadoras por símbolo: 165
- Señales de salida: Bloque de Símbolos OFDM en paralelo del cual se ha removido el Periodo de Guarda, el Prefijo Cíclico de Relleno, el FS y el PS.
- Variables de salida:
 - Símbolos OFDM formados por 128 Subportadoras: 42
- Descripción:

En el módulo de Remoción del Prefijo Cíclico (PC), Guarda, Relleno, FS y PS, se remueven 5 y 32 subportadoras que corresponden al Periodo de Guarda y al Prefijo Cíclico de relleno respectivamente, de cada Símbolo OFDM. Luego, se reconstruye el bloque de 42 Símbolos OFDM en paralelo, para finalmente remover el FS y el PS.

3.3.2.1.2 FFT

- Señales de entrada: Bloque de Símbolos OFDM en paralelo del cual se ha removido el Periodo de Guarda, el Prefijo Cíclico de Relleno, el FS y el PS.
- Variables de entrada:
 - Símbolos OFDM formados por 128 Subportadoras: 42
- Señales de salida: 42 Símbolos OFDM en el dominio del tiempo formado cada uno por 128 subportadoras.
- Variables de salida:
 - Símbolos OFDM formados por 128 Subportadoras en el dominio de la frecuencia: 42
- Descripción:

El Modulo FFT se encarga de realizar la conversión del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia de los símbolos OFDM.

3.3.2.1.3 Estimación y Compensación del Canal

- Señales de entrada: 42 Símbolos OFDM en el dominio del tiempo formado cada uno por 128 subportadoras.
- Variables de entrada:
 - Símbolos OFDM formados por 128 Subportadoras en el dominio de la frecuencia: 42

- Señales de salida: Bloque de Símbolos OFDM en paralelo del cual se han removido la Secuencia de Estimación del Canal (CE), 5 subportadoras de relleno y Subportadora DC.

- Variables de salida:
 - Símbolos OFDM formados por 122 Subportadoras: 36

- Descripción:

En el módulo de Estimación y Compensación del Canal, se remueven los 6 Símbolos OFDM correspondientes a la CE, las 5 subportadoras de relleno insertadas en el proceso de IFFT y la Subportadora DC. Además, se realiza una comparación entre el CE removido del Bloque de Símbolos OFDM de llegada y el CE generado en el multiplexor OFDM.

3.2.3.1.4 Remoción de Subportadoras Piloto

- Señales de entrada: Bloque de Símbolos OFDM en paralelo del cual se han removido la Secuencia de Estimación del Canal (CE), 5 subportadoras de relleno y Subportadora DC.

- Variables de entrada:
 - Símbolos OFDM formados por 122 Subportadoras: 36

- Señales de salida: Símbolos modulados QPSK

- Variables de salida:
 - Bits por trama: 100.

- Descripción:
El módulo Remoción de Subportadoras Piloto se encarga de remover las Subportadoras Piloto insertadas en el módulo Inserción de Subportadoras Piloto y de Guarda. Además, extrae las subportadoras de datos y las entrega como Símbolos modulados QPSK.

3.3.3.1 Demodulador QPSK

- Señales de entrada: Símbolos modulados QPSK
- Variables de entrada:
Símbolos QPSK: 100
- Señales de salida: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama.
- Variables de salida:
Bits por trama: 200
- Señales propias de procesos internos:
El subsistema demodulador QPSK, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 2 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se indican a continuación:

3.3.3.1.1 Retardador

- Señales de entrada: Símbolos QPSK
- Variables de entrada:
Retardo: 8415 (total de símbolos*total de subportadoras)

- Señales de salida: Símbolos QPSK
- Variables de salida:
 Símbolos QPSK: 100
- Descripción:
 Actúa como una memoria o buffer en donde se almacenan y se retienen una determinada cantidad de símbolos, cuando se tiene almacenada la cantidad deseada se permite su paso al siguiente bloque.

3.3.3.1.2 Demodulador QPSK

- Señales de entrada: Símbolos QPSK
- Variables de entrada:
 Tipo de salida: bit
 Ordenamiento de la constelación: gray
- Señales de salida: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama
- Variables de salida:
 Bits por trama: 200
- Descripción matemática:
 Ver la sección 3.2.2.1.1

3.3.4.1 Decodificador

- Señales de entrada: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama

- Variables de entrada:
Bits por trama: 200

- Señales de salida: Señal aleatoria binaria.

- Variables de salida:
Bits: 125

- Señales propias de procesos internos:
El subsistema decodificador, identificado como sujeto en el análisis y recolección de información, tiene 4 componentes internos, cada uno con sus respectivas señales y variables. Estas se mencionan a continuación:

3.3.4.1.1 Compensador de retardo

- Señales de entrada: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama

- Variables de entrada:
Retardo: 100

- Señales de salida: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama

- Variables de salida:
Bits por trama: 200

- Descripción:
Actúa como una memoria o buffer en donde se almacenan y retienen una determinada cantidad de símbolos, cuando se tiene almacenada la cantidad deseada se permite su paso al siguiente bloque.

3.3.4.1.2 Desintercalador

- Señales de entrada: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama
- Variables de entrada:
Dimensiones (filas y columnas)
- Señales de salida: Señal binaria intercalada de 200 bits por trama
- Variables de salida:
Bits por trama: 200
- Descripción:
Realiza un proceso inverso al descrito en la sección 3.2.1.1.3, pero el principio de funcionamiento es el mismo.

3.3.4.1.3 Inserción de bits

- Señales de entrada: Señal binaria de 200 bits por trama
- Variables de entrada:
Vector de inserción: [1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0]
- Señales de salida: Señal binaria de 375 bits por trama
- Variables de salida:
Bits por trama: 375

- Descripción:
Este bloque se encarga del proceso inverso a la perforación, mediante un vector de inserción que corresponde al vector de perforación, se encarga de insertar bits 0 por cada valor 0 en el vector y de conservar el bit existente por cada valor 1 del vector. Más detalles en la sección 3.2.1.1.2.

3.3.4.1.4 Decodificador Viterbi

- Señales de entrada: Señal binaria de 375 bits por trama
- Variables de entrada:
 - Estructura trellis
 - Bits por trama: 375
- Señales de salida: Señal aleatoria binaria de 125 bits por trama
- Variables de salida:
 - Bits por trama: 125
- Descripción matemática:
Este bloque recupera la información codificada convolucionalmente por medio de la aplicación del algoritmo de Viterbi. El proceso consiste en desechar algunos de todos los caminos posibles del diagrama de Trellis, lo que se consigue aplicando este método es reducir el número de cálculos. Según el algoritmo de Viterbi, para reducir el número de cálculos, cada vez que dos trayectos se junten en un estado en el diagrama de Trellis, el de mayor métrica acumulada se desecha en la búsqueda del trayecto óptimo. Esto se debe a que el estado actual resume la historia de todos los estados anteriores en cuanto a su influencia en los estados posteriores. Esto se hace en los 2^{k-1} estados, se pasa al intervalo t_{i+1} y se repite el proceso.

4. EVALUACIÓN DEL MODELO

4.1 CHEQUEO DE VARIABLES

Después de analizar cada uno de los objetos, y teniendo en cuenta el borrador de la norma IEEE 802.15.3a, se puede concluir que el tipo y número de variables que se han definido para cada bloque satisfacen los requisitos para la representación de la información de entrada y salida de cada uno de los subsistemas del sistema general.

4.2 COMPLEJIDAD RESULTANTE DE CADA OBJETO

El sistema que se simulará presenta una alta complejidad, sin embargo el análisis realizado está enfocado hacia subsistemas que facilitan la descripción y definición de los atributos y servicios de cada bloque u objeto, lo cual permite visualizar claramente los comportamientos y procesos de interés definidos en los objetivos y fines de esta simulación, manejar un alto nivel de abstracción que lleva a una consecuente disminución de objetos, comprobar y visualizar las variables y las señales a lo largo de todo el sistema.

4.3 EVALUACIÓN DE OBJETIVOS

De acuerdo al modelo planteado y a los objetivos definidos, se puede concluir que este modelo permite evaluar y observar el comportamiento de los diferentes procesos que actúan sobre la señal de entrada a cada subsistema,

- El modelo por medio de los objetos y variables de cada subsistema permite la visualización y análisis de los procesos de codificación, perforación,

intercalamiento, modulación, multiplexación y filtrado que se llevan a cabo en el transmisor, así como de los procesos de recepción, filtrado, demultiplexación, demodulación, desintercalamiento, decodificación y comparación que se llevan a cabo en el receptor.

- Como consecuencia de la correcta definición de variables y de la adecuada subdivisión del sistema se puede decir que el modelo implementado representa adecuadamente al sistema y permite observar sus principales características por medio del análisis de los datos obtenidos.

4.4 COMPLEJIDAD DEL PROYECTO

Se llevará a cabo la simulación de un enlace unidireccional entre un transmisor y un receptor de UWB, la tasa de transferencia que se manejará para este enlace es de 400 Mbps debido a que se constituye en el modo obligatorio de mayor velocidad de funcionamiento de los sistemas de este tipo que se verán en el futuro. Se han omitido algunos aspectos que se nombran a continuación debido a la muy alta complejidad que presentan y debido a las limitaciones propias de los equipos de cómputo utilizados para suplir las necesidades de la herramienta para la simulación de los mismos:

- No se realizaron los procesos de conversión hacia arriba (*Upconversion*) y de conversión hacia abajo (*Downconversion*) para la transmisión y recepción en RF.
- Los datos de usuario se generaron por medio de un “Generador Aleatorio de Datos” y no se realizó el proceso de “*Scrambling*”
- Se utilizó un tamaño fijo de símbolos OFDM por paquete

- No se simularon elementos de la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, Medium Access Control) y elementos como el *TXVECTOR*, *RXVECTOR* y el *HFS/FCS* (descritos en el anexo A de este trabajo de grado)
- No se modelaron los 4 tipos de canales propuestos por el TG3a para dispositivos UWB⁴
- No se trabajo con el modo ráfaga (*burst mode*)
- No se trabajaron los Modos 2 y 3 de transmisión.
- No se utilizaron bits de relleno para la trama PLCP

⁴ Mayor información se encuentra en el documento: “*Channel Modeling Sub-committee Report Final*”, de diciembre 3 de 2002, referenciado en la bibliografía.