

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TÉCNICA OFDM SOBRE CANALES DISPERSIVOS

Calderón V. Pablo Sebastián
Ing. León V. Rubén D. M.Sc.
Ing. Silva Rodrigo

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

Resumen

Este artículo realiza un análisis del desempeño de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal sobre el canal dispersivo utilizando un simulador implementado en Simulink de MATLAB. Para esto se presenta un estudio preliminar de los dos elementos mencionados cuya interacción será evaluada: el canal dispersivo y la técnica OFDM. Para el caso del canal dispersivo se definirán los parámetros que lo caracterizan y se mostrará el modelo elegido para ser utilizado como base para la implementación del medio de transmisión en el simulador. Posteriormente se presentarán los componentes que definen el desempeño de la técnica OFDM y la tecnología escogida para dar valores a estos componentes. Una vez hecho esto se expondrá el detalle de la implementación del canal dispersivo y el transmisor y receptor OFDM. Para finalizar se presentarán los resultados obtenidos y las conclusiones resultantes de la realización de este estudio.

1. Introducción

En la actualidad los sistemas de comunicaciones inalámbricas van cobrando mayor importancia debido principalmente a las facilidades en su implementación y al considerable aumento en su tasa de transmisión. Todo esto ha sido posible debido a que las nuevas tecnologías inalámbricas emergentes están soportadas por técnicas que les permiten enfrentar los mecanismos de degradación producidos por el medio de comunicación sobre el cual se despliegan este tipo de sistemas. Una de las técnicas que más ha influido en la popularización de las transmisiones inalámbricas es justamente la técnica de modulación OFDM, la cual permite implementar sistemas de comunicaciones robustos pero que se puedan adaptar al nivel de degradación producido por el medio de transmisión. De ahí la

importancia de tener sistemas de simulación de la técnica OFDM que permitan entender sus características principales para poder avanzar en el desarrollo de nuevas aplicaciones que aprovechen las ventajas inherentes de la técnica al utilizarla sobre canales inalámbricos dispersivos.

2. Canales dispersivos

Las señales de información transmitidas a través del medio de comunicación inalámbrico se deterioran debido principalmente a un mecanismo de degradación propio del canal inalámbrico conocido como desvanecimiento. En [7] se realiza una clasificación de estos mecanismos de desvanecimiento. Un resumen de esta clasificación se presenta en la **Figura. 1**. En esta Figura se pueden apreciar los dos grandes grupos en los cuales se clasifican los mecanismos de desvanecimiento los cuales son desvanecimiento de escala grande y desvanecimiento de escala pequeña. El primero es producido por movimientos del receptor sobre grandes áreas mientras que el segundo se da debido a pequeños cambios en la posición. Dentro de los mecanismos de desvanecimiento de escala pequeña existen dos subdivisiones, una relacionada con la variación de la señal que se está transmitiendo y la otra con la variación del canal de transmisión. Ambos subgrupos pueden ser analizados tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Con respecto al desvanecimiento relacionado con el esparcimiento de la señal, este se divide en desvanecimiento selectivo en frecuencia y desvanecimiento no selectivo en frecuencia o plano, siendo el primero el que resulta en degradación de la señal que atraviesa el medio inalámbrico. De igual manera, el desvanecimiento relacionado con la variación del canal se subdivide en desvanecimiento rápido y desvanecimiento lento. Al igual que el desvanecimiento

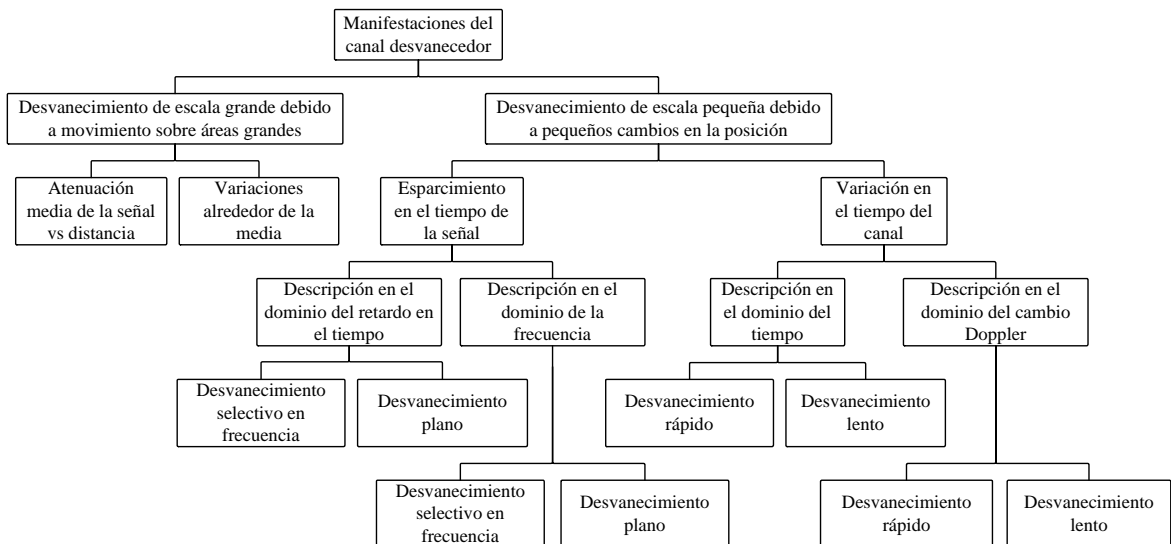


Figura. 1. Clasificación de los mecanismos de desvanecimiento

selectivo en frecuencia, el desvanecimiento rápido produce degradación en la señal transmitida. Es importante señalar que tanto el esparcimiento de la señal como la variación del canal son mecanismos independientes, por lo cual pueden ser estudiados y analizados de manera separada [7].

Todo esto conlleva a poder definir el canal dispersivo, el cual es un tipo de canal que además de introducir ruido blanco Gaussiano aditivo también altera a la señal con los efectos de desvanecimiento selectivo en frecuencia debido al multitrayecto [2]. Lo expuesto acerca del canal dispersivo hace que se lo asocie con un desvanecimiento de escala pequeña por lo que los efectos del desvanecimiento de escala grande permanecen constantes. De igual manera, se asume que el canal dispersivo tiene relación con el esparcimiento de la señal, por lo que la variación del canal permanece constante o, en otras palabras, el canal dispersivo sufre de un desvanecimiento lento que no influye en la degradación de la señal transmitida.

Debido a que el canal dispersivo está caracterizado por el multitrayecto, para poder implementar una simulación de este tipo de canal se necesita de un modelo que defina los valores asociados al mismo. La Universidad de Stanford propone un modelo de canal que define para tres señales reflejadas los parámetros de atenuación y retardo dependiendo de la densidad de obstrucción entre el transmisor y el receptor. Estos valores están definidos para determinado escenario de

comunicación. En las **Tablas. 1. a 3.** se muestran los valores de atenuación y retardo propuestos por la Universidad de Stanford en sus canales SUI (Stanford University Interim) para el siguiente escenario de comunicación:

- Tamaño de celda: 7 Km
- Altura de la antena BTS: 30 m
- Altura de la antena CPE: 6 m
- Ancho del rayo de la antena BTS: 120°
- Ancho del rayo de la antena CPE: 360°
- Polarización: vertical

Los tres tipos de terreno para los cuales están dados estos valores de atenuación y retardo son los siguientes:

- Terreno tipo A: Colinas pequeñas con moderada-alta densidad de árboles
- Terreno tipo B: Colinas grandes con baja densidad de árboles, o plano con moderada-alta densidad de árboles.
- Terreno tipo C: Plano con baja densidad de árboles

Tabla. 1. Canales SUI-1 y SUI-2

	SUI – 1			SUI – 2		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo[us]	0	0.2	0.4	0	0.3	0.6
Potencia[dB]	0	-3	-10	0	-3	-8
Terreno	Tipo C			Tipo C		

Tabla 2. Canales SUI-3 y SUI-4

	SUI – 3			SUI – 4		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo[us]	0	0.5	1	0	2	4
Potencia[dB]	0	-5	-10	0	-4	-8
Terreno	Tipo B			Tipo B		

Tabla 3. Canales SUI-5 y SUI-6

	SUI – 5			SUI – 6		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo[us]	0	4	11	0	14	20
Potencia[dB]	0	-3	-5	0	-10	-12
Terreno	Tipo A			Tipo A		

3. OFDM

En la década de los 60, cuando se comenzaron a realizar las primeras aplicaciones utilizando la técnica OFDM, esta técnica, a pesar de su robustez conceptual, no llegó a ser muy acogida entre la comunidad de desarrolladores de sistemas de comunicación. Esto principalmente debido a las dificultades que estaban presentes en la implementación de un sistema OFDM, la cual era sumamente compleja si se la compara con la implementación de un sistema serial convencional. Esta complejidad en la implementación se redujo al utilizar el concepto de la Transformada de Fourier, la cual facilita la obtención de las señales portadoras e incrementa el rendimiento en el uso del ancho de banda disponible debido a sus características de ortogonalidad. Esto ha permitido que la técnica OFDM se posicionara como la técnica por defecto empleada en las comunicaciones inalámbricas emergentes.

La **Figura. 2.** muestra un diagrama de bloques de un sistema OFDM simple basado en un modelo de comunicaciones OFDM presentado en [6]. Como se puede apreciar en la figura, cuando una señal entra en un sistema OFDM, esta es inmediatamente modulada mediante un sistema de modulación cualquiera. Una vez que el flujo de datos seriales de la señal ha sido modulado, este es dividido en N flujos paralelos. En el siguiente bloque del transmisor OFDM se toma

simultáneamente la transformada rápida de Fourier inversa de los N flujos paralelos. A continuación se añade un prefijo cíclico de longitud L , para lo cual se añade al inicio de la señal los últimos L datos del símbolo OFDM. Finalmente se convierte la señal paralela en un flujo serial de datos. Este flujo serial de datos pasa por un canal de transmisión. El canal de transmisión con el que se trabajará para la implementación en el simulador será un canal dispersivo. Al finalizar su paso por el medio de transmisión, la señal ingresa al receptor OFDM, el mismo que realiza procesos inversos a aquellos asociados al transmisor OFDM. Después de que la señal ha pasado por el receptor OFDM, esta debería ser semejante a la señal original. Esto dependerá principalmente de las características del canal de transmisión y de los valores asociados a los parámetros de trabajo de la técnica OFDM.

Los parámetros que caracterizan el desempeño de la técnica OFDM, como la longitud del prefijo cíclico y la dimensión de los N canales paralelos, definen el rendimiento de esta técnica ante los mecanismos de degradación producidos por el canal dispersivo.

Como ya se mencionó, el canal dispersivo es un medio de transmisión que además de introducir AWGN altera la señal con desvanecimiento selectivo en frecuencia debido al multitrayecto. Con respecto al AWGN introducido por el canal dispersivo, debido a que AWGN en el canal en el dominio del tiempo corresponde a AWGN de la misma potencia promedio en el dominio de la frecuencia, el rendimiento de un módem OFDM en un canal AWGN es idéntico al de un módem serial. De manera análoga a un sistema serial, las características de la tasa de error de bit (BER) versus la relación señal a ruido (SNR) son determinadas por el esquema de modulación usado. En lo referente al desvanecimiento selectivo en frecuencia, como consecuencia del multitrayecto el receptor OFDM recibe múltiples copias de la señal original con diferentes valores de atenuación y retardo en el tiempo. Los sistemas OFDM manejan esta degradación debida al multitrayecto añadiendo una extensión periódica o cíclica al símbolo OFDM básico. Este prefijo cíclico luce como el resto del símbolo OFDM pero no transporta nueva información. Debido a que la extensión cíclica no añade nueva

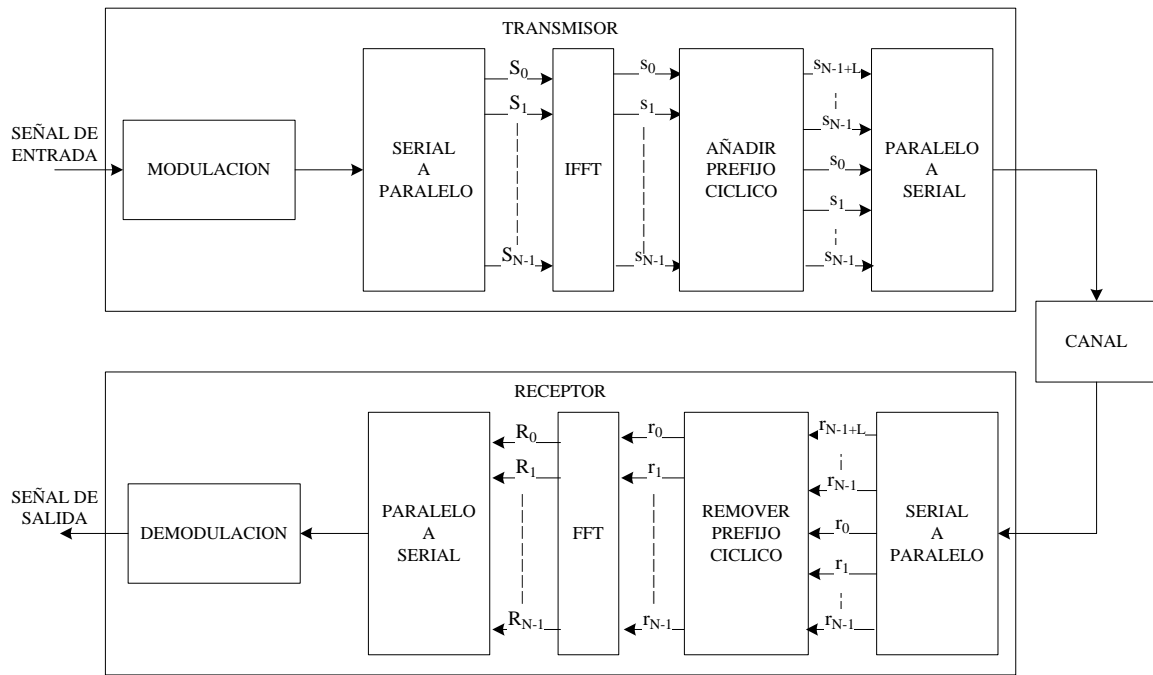


Figura. 2. Diagrama de bloques de un sistema OFDM simple

información, el receptor puede ignorar este intervalo de guarda. Cuando el intervalo de guarda es diseñado para ser mayor que cualquier efecto del canal multitrayecto, el receptor es capaz de eliminar la distorsión al descartar la extensión cíclica. Con esto se puede decir que la interferencia es removida prácticamente sin añadir complejidad al receptor.

4. Implementación del simulador

El simulador implementado en Simulink recrea el diagrama de bloques propuesto en la Figura. 2. El diagrama de bloques de esta implementación se muestra en la Figura. 3. Como se puede apreciar, la implementación en Simulink recrea todos los pasos que se necesitan para completar el proceso de transmisión y recepción OFDM. Además simula el medio de transmisión con una implementación del canal dispersivo.

En el bloque denominado SEÑAL DE ENTRADA, el simulador maneja el tipo de señal con la cual se va a trabajar. Existen tres tipos de señales de entrada: binarios aleatorios, imagen y sonido. Previo a poder trabajar con cualquiera de estos tipos de señal se debe ejecutar un programa .m desde el workspace de MATLAB el cual realizará la digitalización de la información en el caso de la imagen y sonido como señal de entrada y dará un determinado formato para poder trabajar con este tipo de información.

De manera análoga, una vez que la simulación ha terminado se debe correr otro programa desde el workspace de MATLAB, el cual permitirá visualizar los resultados obtenidos. Existe un programa de inicialización y de finalización por cada uno de los tipos de señal que pueden ser manejados como entrada del simulador.

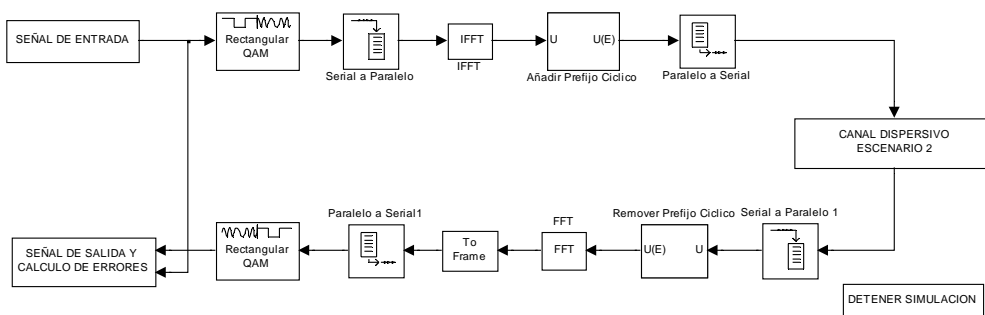


Figura. 3. Diagrama de bloques del sistema OFDM implementado en Simulink

Dentro del bloque canal dispersivo se encuentra un conjunto de sub-bloques que permiten trabajar con cada uno de los seis tipos de canal SUI. Cada uno de los bloques asociados a los seis tipos de canal SUI se encuentran configurados con los parámetros de atenuación y retardo correspondientes.

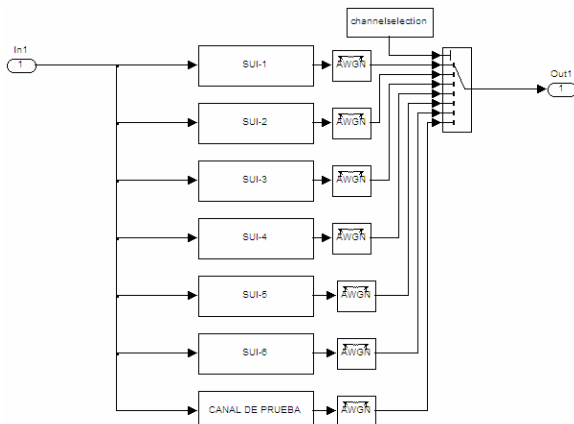


Figura. 4. Bloque que simula el Canal Dispersivo

En el interior de cada uno de los sub-bloques que simulan los canales SUI se encuentra una estructura que permite configurar los parámetros de retardo y atenuación característicos de cada uno de los canales SUI.

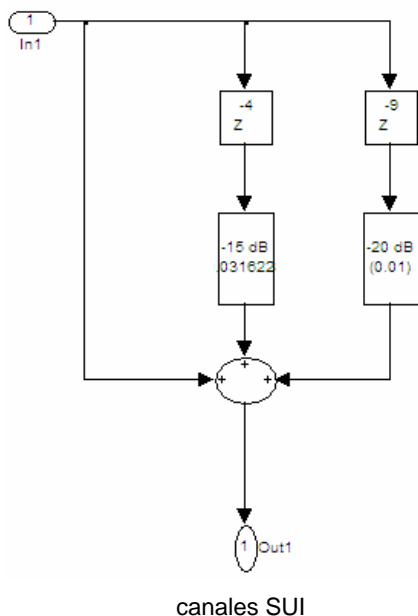


Figura. 5. Estructura implementada en cada uno de los sub-bloques que simulan los canales SUI

Con respecto a los valores con los cuales trabajará el simulador, estos estarán asociados a aquellos utilizados por la tecnología WiMAX. Los valores de los

parámetros con los cuales trabajará el simulador se muestran a continuación:

- Tasa de transmisión: 8 Mbps
- Tipo de modulación: BPSK
- Dimensión de la conversión serial a paralelo – paralelo a serial: 256
- Dimensión de la transformada rápida de Fourier: 256
- Longitud del prefijo cíclico: 64

5. Resultados de las pruebas

Los resultados de las pruebas al trabajar con binarios aleatorios como señal de entrada son los siguientes:

Tabla. 4. Valores de BER ante la variación de SNR en canales SUI del 1 al 3 para binarios como señal de entrada

SNR [dB]	SUI - 1 BER	SUI - 2 BER	SUI - 3 BER
0	0,150900	0,152800	0,183200
5	0,033080	0,034370	0,062560
10	0,000570	0,000680	0,006829
15	0,000000	0,000000	0,000059
20	0,000000	0,000000	0,000000

Tabla. 5. Valores de BER ante la variación de SNR en canales SUI del 4 al 6 para binarios como señal de entrada

SNR [dB]	SUI - 4 BER	SUI - 5 BER	SUI - 6 BER
0	0,149700	0,202900	0,165700
5	0,046440	0,077290	0,042680
10	0,005784	0,010700	0,001373
15	0,000102	0,000153	0,000000
20	0,000000	0,000000	0,000000

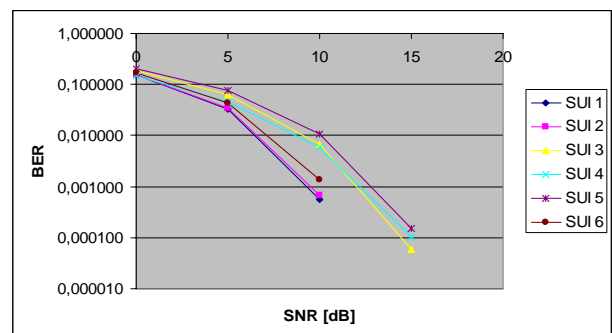


Figura. 6. Resultados de las pruebas al trabajar con binarios como señal de entrada

En los resultados obtenidos cuando se trabajó con una imagen como señal de entrada se puede apreciar como la

degradación del SNR afecta a la imagen transmitida.

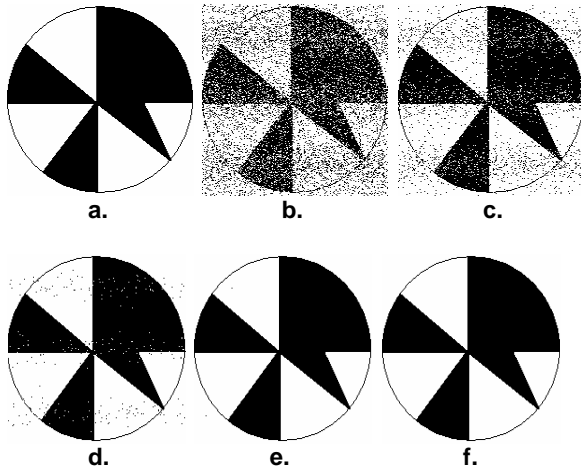


Figura 7. a. Imagen de entrada original
Imagen al pasar por SUI-3 con: b.SNR=0dB
c.SNR=5dB d. SNR=10dB e. SNR=15dB
f. SNR=20dB

Los resultados cuando se trabajó con sonido como señal de entrada fueron los siguientes:

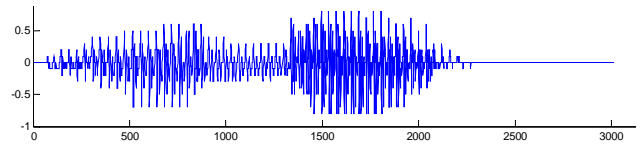
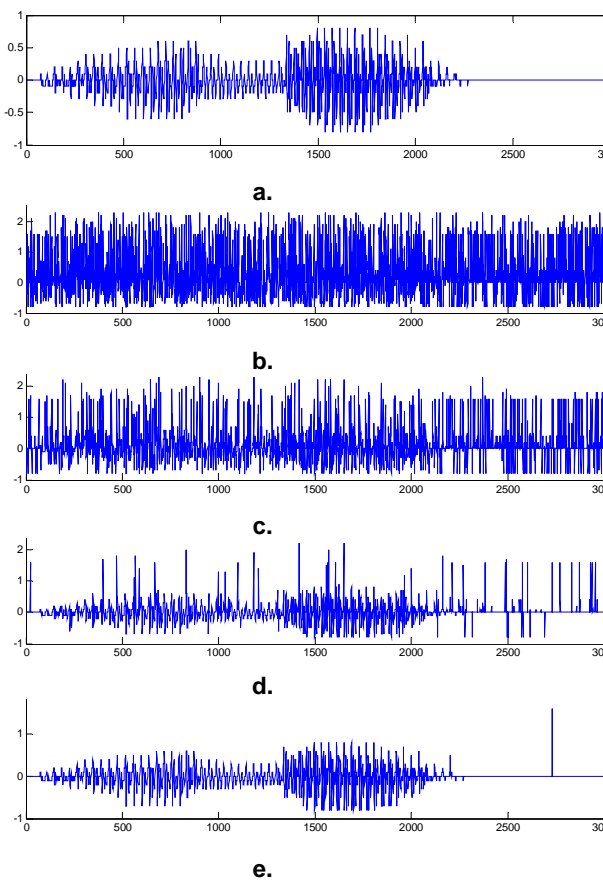


Figura 8. a. Señal de entrada original
Señal de audio al pasar por SUI-5 con:
b.SNR=0 dB c.SNR=5dB d.SNR=10dB
e.SNR=15dB f.SNR=20dB

6. Conclusiones

La continua necesidad de poseer mecanismos de comunicaciones eficientes y funcionales ha llevado al desarrollo de tecnologías sustentadas por técnicas conceptualmente robustas. Tal es el caso del uso de la técnica OFDM por las tecnologías de acceso inalámbrico WiMAX y Wi-Fi.

El canal de transmisión utilizado en los sistemas inalámbricos es un medio que supone varios desafíos al momento de establecer una comunicación debido en primer lugar a que es un medio de acceso público, razón por la cual se da la necesidad de la existencia de organismos reguladores que controlen el buen uso del espectro inalámbrico, y en segundo lugar a que la degradación sufrida por la señal transmitida debido a interferencias físicas presentes en el medio es sumamente difícil de controlar, por lo cual se requiere de técnicas especializadas en los mecanismos de degradación del medio inalámbrico tales como OFDM.

La base conceptual de OFDM hizo que esta técnica se presentase como un sistema de modulación que permitiría a los sistemas de comunicación contrarrestar las degradaciones producidas por el medio inalámbrico. Sin embargo, no fue hasta que la implementación de los módems OFDM fue facilitada al emplear el concepto de la transformada de Fourier para obtener el conjunto de portadoras ortogonales cuando la técnica OFDM dejó de ser una solución elegante explicada en papel para convertirse en una implementación robusta que en la actualidad es utilizada por los sistemas emergentes de comunicación inalámbrica más populares.

A pesar de todas las características que hacen que la técnica OFDM sea ideal para ser utilizada en las comunicaciones inalámbricas, la multiplexación por división

de frecuencia ortogonal presenta grandes desafíos al momento de su implementación. Entre los problemas inherentes a OFDM se encuentran el *offset* de frecuencia, el ruido de fase y el gran rango dinámico de potencia que debe abarcar. Sin embargo, todos los problemas mencionados anteriormente pueden llegar a ser superados si se tiene mucho cuidado al momento de elegir los valores con los que funcionará esta técnica de modulación tomando en cuenta el tipo de aplicación a la cual va a servir, lo que forma parte de un proceso de diseño eficiente.

La simulación de canales dispersivos ha sido uno de los puntos que más desafíos ha presentado en el estudio de las comunicaciones inalámbricas, esto principalmente a que la característica de multitrayecto de los canales dispersivos depende mucho del lugar físico sobre el cual se va a desplegar el sistema de comunicación, lo que hace que sea muy difícil crear un modelo de canal inalámbrico estándar que simule exactamente las condiciones que se presentarán al momento de implementar un sistema OFDM en cualquier locación. Sin embargo, modelos de canales inalámbricos como aquellos propuestos por la Universidad de Stanford facilitan el estudio de las comunicaciones inalámbricas al establecer los valores de atenuación y retardo para determinado escenario de comunicación.

De los parámetros definidos por el modelo de canal dispersivo de la Universidad de Stanford (canales SUI) se puede apreciar la relación entre los parámetros de atenuación y retardo, los cuales definen este medio de transmisión inalámbrico, y la densidad de obstrucción, la cual está dada por la cantidad de elementos físicos que se encuentran entre el transmisor y el receptor. De esta relación se puede concluir que mientras más alta la densidad de obstrucción entre el transmisor y el receptor, los valores de atenuación y retardo toman valores más elevados.

La relación de la tasa de error de bit (BER) al variar la relación señal a ruido (SNR) ofrece una visión del rendimiento de un sistema de comunicaciones. Para el caso del sistema OFDM configurado con parámetros de la tecnología WiMAX que se simuló en el presente proyecto, en las gráficas de BER vs SNR se puede evaluar el rendimiento del sistema de

comunicaciones OFDM al exponerlo a los varios tipos de canales dispersivos SUI. De los resultados que se obtuvieron de las pruebas realizadas en el simulador que fue implementado se aprecia la influencia de los diferentes valores de atenuación y retardo de cada uno de los seis tipos de canales SUI sobre el proceso de comunicación entre el transmisor y receptor OFDM. De la gráfica de BER vs SNR se puede concluir que mientras más elevados son los valores de atenuación y retardo debido a las interferencias físicas entre el transmisor y el receptor, mayor es la tasa de error de bit a un determinado valor de relación señal a ruido. La validez de estos resultados fueron corroborados con resultados de estudios similares que han sido realizados acerca del rendimiento de la técnica OFDM en WiMAX al exponerla a canales dispersivos SUI, como aquel expuesto en [1].

Referencias bibliográficas

- [1] Azizul, Mohammad, Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer
- [2] Dispersive Channel, <http://www.javvin.com/wireless/DispersiveChannel.html>
- [3] Goldsmith, Andrea, *Wireless Communications*, Primera Edición, Cambridge University Press, Estados Unidos 2005
- [4] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications, <http://ieee802.org/16>
- [5] L. Hanzo, M. Münster, B.J. Choi, T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, Primera Edición, John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra 2003
- [6] Litwin, Louis, "An introduction to multicarrier modulation", IEEE Potentials, 2000
- [7] Sklar, Bernard, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Segunda Edición, Prentice Hall, Estados Unidos 2001

Biografías



Calderón Valarezo Pablo Sebastián

Nació en Quito el 18 de Abril de 1983. En el 2001 culminó sus estudios en el Colegio Cardenal Spellman en la especialidad Físico Matemático. En el 2006 egresó de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica del Ejército.



León Vásquez Rubén Darío

Nació el 30 de Abril de 1962 y obtuvo su título de Ing. Electrónico en la ESPE en 1985, su grado de Magíster en Ciencias en Brasil en 1992 y sus áreas de interés son el Procesamiento Digital de Señales, Análisis Espectral Digital y su aplicación en los Sistemas de Telecomunicaciones.



Silva Tapia Rodrigo

Nació en Riobamba el 26 de Junio de 1969. Obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la ESPE en 1995 y el de Especialista en Gestión de Telecomunicaciones en la UASB en el 2006. Sus áreas de interés son la regulación y el control de redes y servicios de telecomunicaciones