

Diseño de un Transceptor MIMO-OFDM de RF con Modulación BPSK Emulado en FPGA

Fernando Evier-López Pérez^a, J. Apolinar Reynoso Hernández^b, Yuma Sandoval Ibarra^c, José Cruz-Núñez Pérez^a

^a Instituto Politécnico Nacional, IPN-CITEDI, flopezp@citedi.mx, nunez@citedi.mx, Tijuana, Baja California, México.

^b Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, apolinar@cicese.mx, Ensenada, Baja California, México.

^c Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, TecNM-ITT, yuma.sandoval@tectijuana.edu.mx, Tijuana, Baja California, México.

Resumen

El desarrollo de transceptores digitales de radiofrecuencia tiene una gran importancia en la actualidad ya que han demostrado ser capaces de satisfacer las necesidades crecientes de calidad de servicio e inmunidad a errores por propagación o desvanecimiento en las comunicaciones inalámbricas además de su alta flexibilidad y adaptabilidad a las diferentes tecnologías y estándares disponibles. En este trabajo se presenta el diseño y la emulación de un transceptor de radiofrecuencia digital basado en tecnologías OFDM y MIMO, utilizando modulación BPSK. Con el fin de evaluar la viabilidad y el desempeño de este tipo de transceptores en un entorno digital para su futura implementación en FPGA. El desarrollo del sistema se llevó a cabo en dos fases: primero, se diseñó y emuló un transceptor OFDM en Matlab/Simulink utilizando la herramienta de diseño *System Generator for DSP* para validar su desempeño; posteriormente, se agregó la funcionalidad MIMO aplicando el esquema Alamouti. Se detallan las etapas de modulación BPSK, la multiplexación OFDM y el uso de la codificación Alamouti. Se validó la funcionalidad del sistema implementado detectando errores con valores de BER y EVM de cero en un ambiente sin canal.

Palabras clave— Transceptores de RF, OFDM, MIMO, FPGA, System Generator for DSP.

Abstract

The development of digital radio frequency transceivers is of great importance today, as they have proven capable of meeting the growing demands for Quality of Service and high immunity to propagation or fading errors in wireless communications, in addition to their high flexibility and adaptability to different technologies and available standards. This work presents the design and emulation of a digital radio frequency transceiver based on OFDM and MIMO technologies, using BPSK modulation, to evaluate the feasibility and performance of such transceivers in a digital environment for future FPGA implementation. The system development was carried out in two phases: first, an OFDM transceiver was designed and emulated in Matlab/Simulink using System Generator for DSP design tool to validate its performance; later, MIMO functionality was added by applying the Alamouti scheme. The stages of BPSK modulation, OFDM multiplexing, and Alamouti coding scheme. The implemented system was validated by detecting

errors, obtaining BER and EVM values of zero in a channel-free environment.

Keywords— FPGA, MIMO, OFDM, RF transceivers, System Generator for DSP.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una tendencia por la digitalización de los sistemas de comunicaciones derivado de su flexibilidad, la facilidad con la que se generan las señales digitales en comparación con las analógicas y su robustez ante la distorsión e interferencias [1]. Existe una gran demanda por sistemas de comunicación con altas tasas de transferencia, buena calidad de servicio y buena compatibilidad con las diversas tecnologías o estándares disponibles [2]. El uso de tecnologías como la modulación digital, multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, por sus siglas en inglés) y el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción por medio de la tecnología de múltiples entradas-múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en inglés) han demostrado ser soluciones eficientes para mejorar la velocidad de transmisión y la confiabilidad del enlace.

El desarrollo de transceptores de radiofrecuencia digitales es de gran importancia para lograr cumplir con las crecientes demandas de los sistemas de comunicación actuales debido al incremento de usuarios y dispositivos que se presenta hoy en día en los enlaces de redes inalámbricas. Esto provoca una necesidad mayor de sistemas con buena calidad de servicio con una alta robustez para evitar errores y que no sean tan susceptibles a problemas como lo son las señales de multi-trayectoria y el desvanecimiento debido a interferencias en el medio ya sean físicas o por otras señales [3-4].

En este trabajo se propone el desarrollo de un sistema de un transceptor digital de radiofrecuencia implementado en conjunto con las tecnologías MIMO y OFDM aplicando modulaciones digitales, en este caso BPSK, para su emulación en FPGA por medio del entorno de Matlab/Simulink utilizando *System Generator for DSP*.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Modulación por Desplazamiento de Fase Binario (BPSK)

La modulación consiste en modificar las propiedades fundamentales de una señal de radiofrecuencia que es utilizada como medio para transmitir información en base a otra señal de datos que llega a ser o no de formato digital. La señal a la cual se le aplican las modificaciones se denomina portadora y aquella que contiene la información con la cual se modifica la señal portadora se conoce como moduladora.

Existen diversos tipos de modulación y generalmente se clasifican por el tipo de propiedad por medio de la cual se transmite la información, en total son 3 las propiedades fundamentales de una señal amplitud, frecuencia y fase.

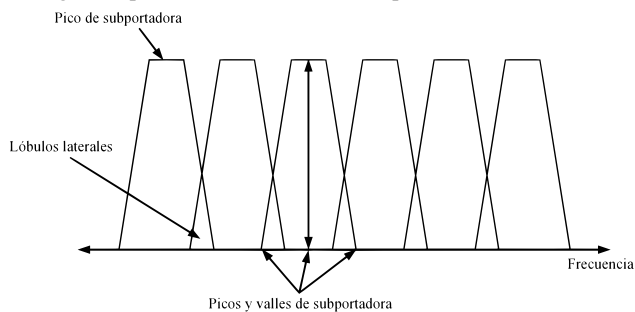
La modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK, por sus siglas en inglés) se construye a partir de las variaciones de una señal portadora de forma senoidal y una señal moduladora en forma digital, es decir, una cadena de bits. Se considera una modulación binaria debido a que existen dos posibles señales de salida, estas suelen ser una señal senoidal y una señal senoidal desfasada 180°, de tal forma que se expresa esta modulación por medio de la ecuación (1).

$$Y(t) = \begin{cases} A\sin(2\pi ft), & \text{para 1 binario} \\ A\sin(2\pi ft + 180^\circ), & \text{para 0 binario} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales consiste en dividir una secuencia de datos de alta velocidad en un conjunto de canales de menor velocidad y ortogonales entre sí que posteriormente son transmitidos de forma paralela [5]. La banda de frecuencia se divide en múltiples bandas de frecuencia ortogonales entre sí en donde cada una es modulada de forma independiente y transmitida en paralelo [6], la Fig. 1 presenta el espectro en frecuencia para esta técnica, cada subportadora se encuentra traslapada con sus adyacentes, sin embargo, dado que las frecuencias que las conforman son ortogonales entre sí al medir el valor pico de cada subportadora no se presenta interferencia ya que sus vecinas toman un valor nulo justo en ese punto.

Fig. 1. Espectro en frecuencia de subportadoras en OFDM.

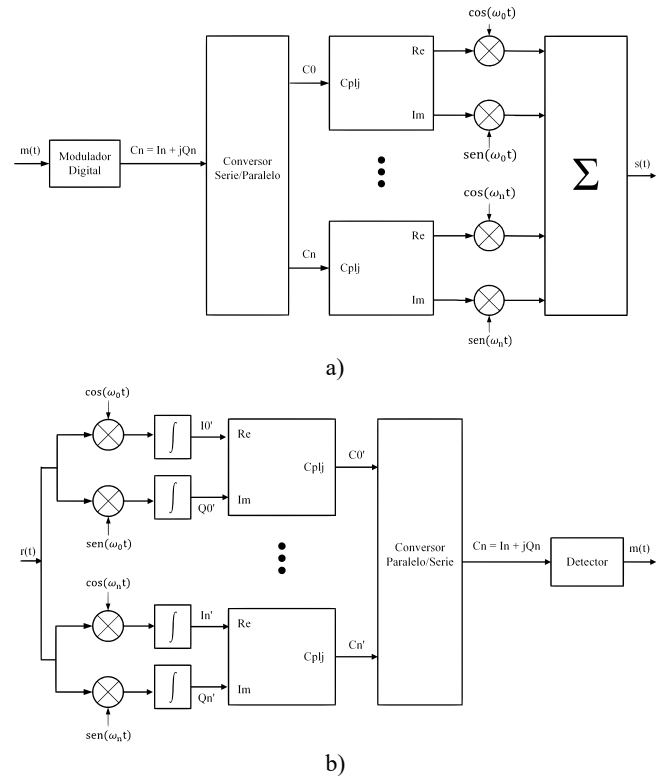


Fuente: elaboración propia a partir de [6].

La Fig. 2a presenta el diagrama de bloques para la aplicación de OFDM, se tienen un flujo de datos el cual presenta una modulación digital IQ generando símbolos complejos. Posteriormente ser dividido en flujos independientes por medio de un conversor serie a paralelo seguido de una multiplicación de cada símbolo por señales cosenoidales con frecuencias ortogonales entre sí las cuales finalmente son sumadas entre sí para obtener una única señal [7].

La ecuación (2) presenta la representación matemática de la señal $s(t)$ obtenida de forma analógica en donde ω_n corresponde a la frecuencia angular de la señal, I_n al dato real y Q_n al dato imaginario.

Fig. 2. Diagrama de bloques para a) aplicación de OFDM, b) detección de símbolos OFDM.



Fuente: elaboración propia a partir de [8].

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [I_n \cos(\omega_n t) + Q_n \sin(\omega_n t)]. \quad (2)$$

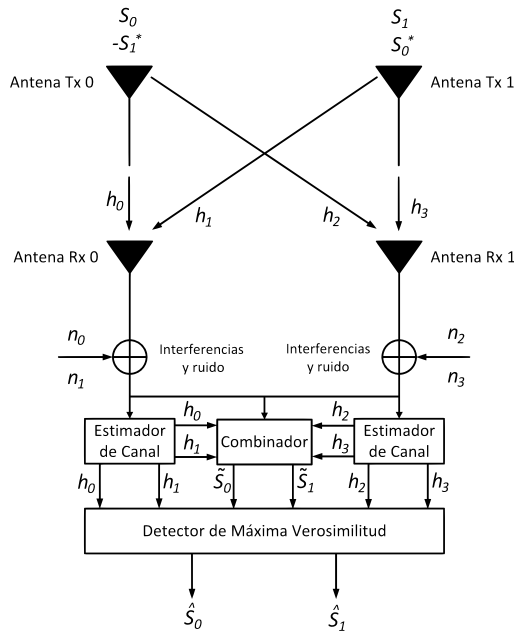
Para la demodulación de la señal $s(t)$ en la etapa de recepción se deberá multiplicar la señal $s(t)$ por cada una de las señales con frecuencias correspondientes a cada una de las subportadoras para posteriormente por medio de un integrador extraer el nivel de energía de cada señal y haciendo uso de un detector asignar cada símbolo para su posterior demodulación, dicho proceso se observa en la Fig. 2b.

2.3 Múltiples Entradas – Múltiples Salidas (MIMO).

Un sistema de Múltiples Entradas – Múltiples Salidas (MIMO) se define como un sistema de comunicaciones inalámbrico en donde la etapa de transmisión y recepción cuentan con más de una antena, esto con el fin de obtener ya sea una mayor tasa de transmisión de datos o mejor calidad del enlace [9]. Una de las principales cualidades de la tecnología MIMO es que toma una de las deficiencias de las comunicaciones inalámbricas en la forma de la propagación de multi-trayectoria y se aprovecha de esta para darle un beneficio al usuario [10]. La Fig. 3 presenta un sistema MIMO desarrollado a partir del esquema Alamouti para un sistema 2x2, es decir 2 antenas en transmisión y 2 antenas en recepción, enfocado en mejorar la calidad de servicio al aprovechar las antenas del sistema para introducir

redundancia entre los datos transmitidos para evitar la pérdida de información.

Fig. 3. Diagrama de bloques de esquema Alamouti.



Fuente: elaboración propia a partir de [11].

Como se observa en el diagrama de bloques del esquema Alamouti es necesario enviar los datos siguiendo una secuencia específica, dicha secuencia se tiene en la Tabla 1, y se requerirá de 3 bloques para poder hacer la decodificación de los datos, siendo estos un bloque estimador de canal para cada antena, combinador y un detector de máxima verosimilitud o algún otro algoritmo de detección

Tabla 1. Secuencia de envío de datos en esquema Alamouti.

	Antena 0	Antena 1
Tiempo t	S_0	S_1
Tiempo $t + T$	$-S_1^*$	S_0^*

Fuente: elaboración propia a partir de [11].

Siguiendo el diagrama de bloques y la notación presentada en la Tabla 2 se tendrá que la señal recibida r_0, r_1, r_2, r_3 estará dada por la ecuación (3) en donde h_0, h_1, h_2 y h_3 representan los efectos del canal en cada dato de acuerdo con la Tabla 3, y n_0, n_1, n_2 y n_3 representan ruido e interferencias.

Tabla 2. Notación de recepción de datos en esquema Alamouti.

	Antena 0	Antena 1
Tiempo t	r_0	r_2
Tiempo $t + T$	r_1	r_3

Fuente: elaboración propia a partir de [11].

Tabla 3. Notación de canales en esquema Alamouti.

	Antena 0	Antena 1
Tiempo t	h_0	h_2
Tiempo $t + T$	h_1	h_3

Fuente: elaboración propia a partir de [11].

$$\begin{aligned} r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\ r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\ r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\ r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Basado en estas señales recibidas es posible observarlas de forma aislada al multiplicar por el conjugado del canal correspondiente y posteriormente se suman las observaciones de acuerdo con la ecuación (4),

$$\begin{aligned} z_0 &= h_0^* r_0 + h_1^* r_1 = \{|h_0|^2 + |h_1|^2\} s_0, \\ z_1 &= h_2^* r_2 + h_3^* r_3 = \{|h_2|^2 + |h_3|^2\} s_1, \end{aligned} \quad (4)$$

Despejando para la recuperación de los símbolos transmitidos de acuerdo con las ecuaciones (5) y (6),

$$s_0 = \frac{z_0}{|h_0|^2 + |h_1|^2}, \quad (5)$$

$$s_1 = \frac{z_1}{|h_2|^2 + |h_3|^2}. \quad (6)$$

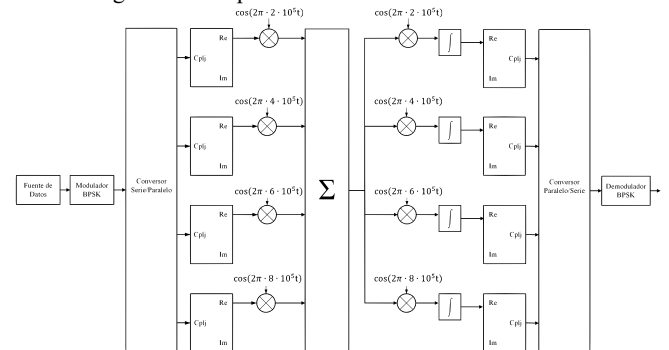
3. DESARROLLO

El desarrollo del sistema comenzó con la construcción de un transceptor OFDM con modulación BPSK para posteriormente añadir la funcionalidad de la tecnología MIMO. El desarrollo de ambos sistemas se dio utilizando la paquetería de *System Generator for DSP* en Matlab/Simulink.

3.1 Transceptor OFDM

Para el desarrollo del transceptor OFDM en *System Generator for DSP* (SysGen), se utilizó como referencia el diagrama de bloques de la Fig. 4, se observa que se contará con 4 subportadoras 200 kHz, 400 kHz, 600 kHz y 800 kHz. Se aplicará una modulación BPSK al flujo de datos de entrada que previamente se divide en los 4 por medio de un conversor serie a paralelo.

Fig. 4. Transceptor OFDM con modulación BPSK.

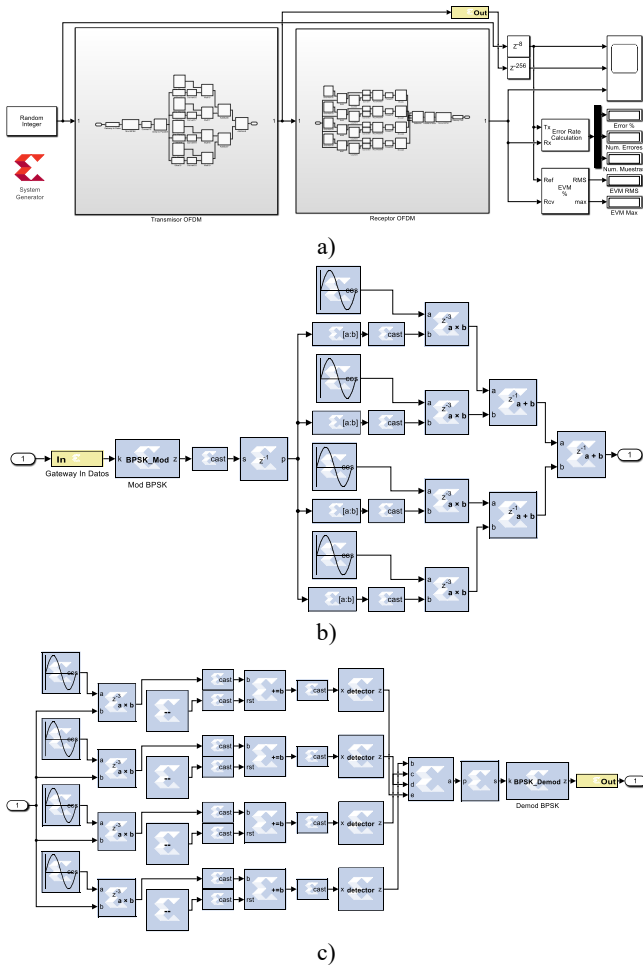


Fuente: elaboración propia.

La Fig. 5a presenta el sistema resultante para el transceptor OFDM en donde se tienen dos módulos principales el de transmisión y el de recepción. El flujo de datos de entrada se obtendrá por medio de un generador de datos binarios

aleatorios, se utiliza un bloque de osciloscopio para visualizar las señales de entrada, la señal OFDM y la señal de salida además de contar con un bloque para medición de la tasa de error de bit (BER) y la magnitud del vector de error (EVM).

Fig. 5. Transceptor OFDM con modulación BPSK desarrollado en *System Generator for DSP* a) Diseño completo, a) etapa de transmisión, b) etapa de recepción.



Fuente: elaboración propia.

La Fig. 5b presenta el contenido del bloque de transmisor OFDM en donde el flujo de datos recibido pasa por un bloque que asigna ya sea “1” o “-1” a modo de modulación BPSK, posteriormente se reduce el tamaño de los datos por medio de un bloque conversor que como salida tendrá una señal de dos bits en modo de complemento a dos, después pasa a un bloque serial a paralelo que agrupará el flujo de datos en grupos de 4 datos para separar cada dato dentro de este grupo para aplicar la multiplicación por los 4 osciladores que finalmente serán sumadas para generar la señal OFDM a transmitir.

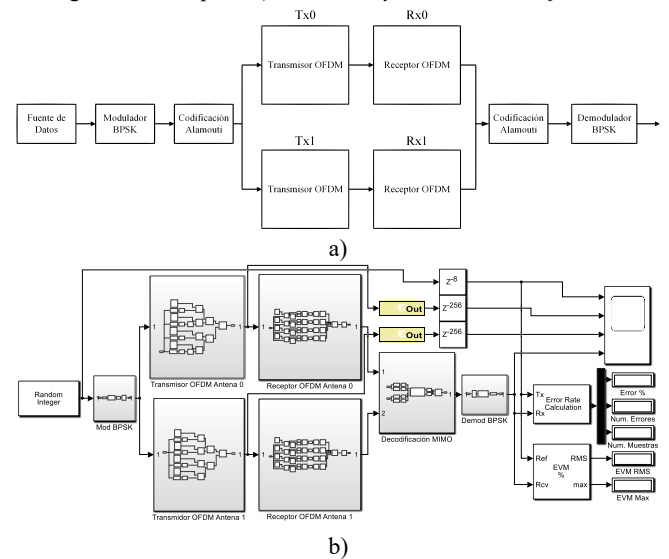
Por otro lado, la Fig. 5c presenta el diagrama de bloques del receptor OFDM, el cual recibirá la señal OFDM y multiplicará por 4 osciladores locales con frecuencias correspondientes a cada subportadora, posteriormente se utilizaron bloques de Simulink para hacer la detección de los datos con el fin de

aplicar la demodulación y se concatenan los flujos obteniendo un único flujo por medio de un bloque paralelo a serial.

3.2 Transceptor MIMO-OFDM

Para la implementación de la tecnología MIMO en un transceptor de radiofrecuencia con OFDM aplicando el esquema Alamouti se tendrá el diagrama de bloques de la Fig. 6a. En donde se tiene una fuente de datos, se aplica una modulación BPSK, seguido de esto se generan las secuencias de datos para aplicar el esquema Alamouti. Posteriormente, se aplica OFDM a cada flujo de datos para su transmisión por medio de dos antenas. En la etapa de recepción se aprecia que se realiza la demodulación OFDM y se aplica la detección de los datos para seguir con la decodificación Alamouti aplicando el proceso descrito anteriormente. Finalmente se aplica la demodulación BPSK.

Fig. 6. Transceptor MIMO-OFDM con modulación BPSK a) diagrama de bloques, b) diseño en *System Generator for DSP*.

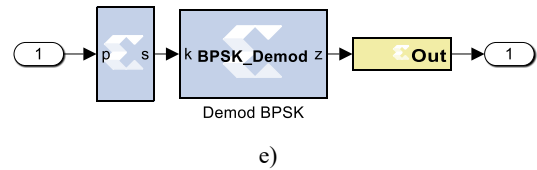
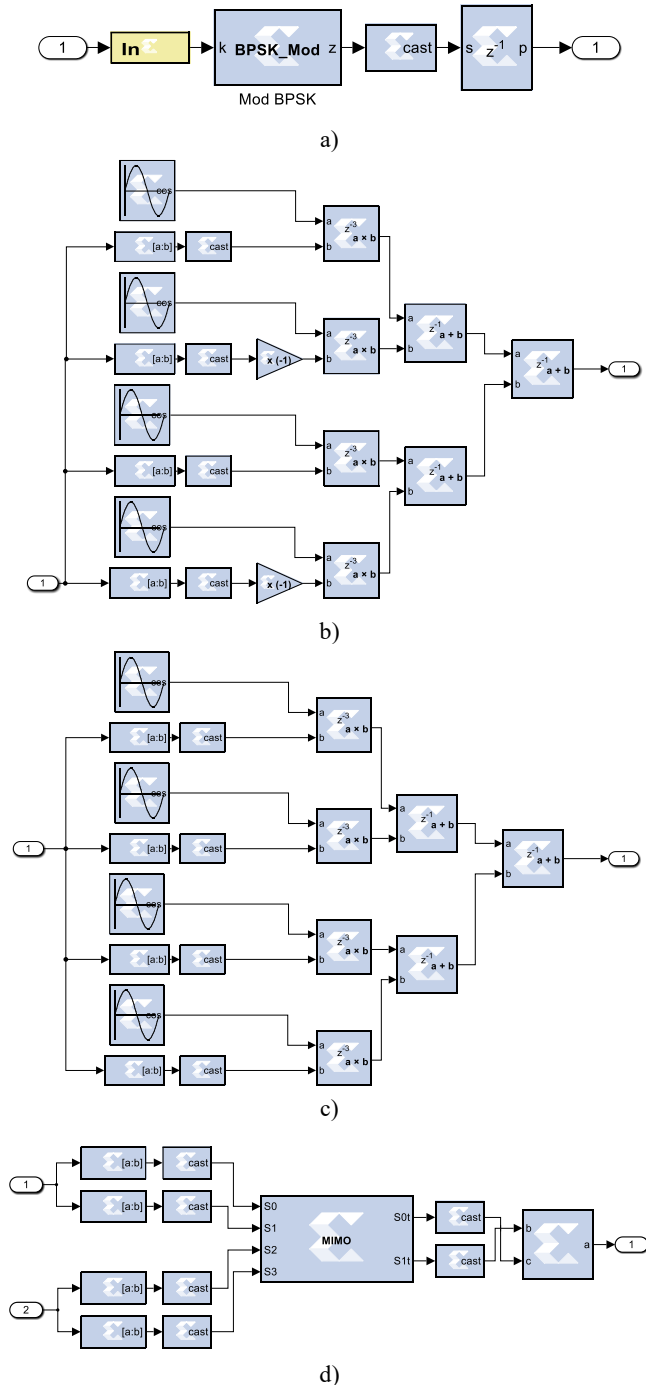


Fuente: elaboración propia.

La Fig. 6b muestra el sistema desarrollado en Matlab-Simulink por medio de bloques del *System Generator for DSP*. En este caso nuevamente se manejan cuatro subportadoras para cada símbolo OFDM y las frecuencias para cada una de estas son de 200 KHz, 400 KHz, 600 KHz y 800 KHz, respectivamente. Se aplica la modulación BPSK por medio de una función de Matlab propia que realiza la asignación de la señal de flujo de datos a “1” y “-1” para valores de “1” y “0”, respectivamente. Se utiliza el bloque de conversión para obtener un flujo de datos de dos bits en complemento a dos. Por medio de un conversor serial a paralelo se agrupan los datos que serán alimentados hacia los transmisores OFDM, los cuales aplicarán la codificación Alamouti de acuerdo con la Tabla 1. En base a los datos codificados se aplica la modulación OFDM para obtener la señal de transmisión de cada antena. Dentro de los receptores OFDM se aplica la demodulación OFDM y se concatenarán

los datos detectados en un solo vector. Seguido de esto entrarán al bloque de decodificación MIMO el cual recibirá los flujos de datos de ambas antenas y aplicará el proceso previamente descrito por medio de las ecuaciones (3) a (6) para recuperar los datos enviados originalmente, seguido de esto se pasa por un conversor paralelo a serial y se aplica la demodulación BPSK. En la Fig. 7a se observan los contenidos del bloque de modulación BPSK.

Fig. 7. Etapas del Transceptor MIMO-OFDM a) modulación BPSK, b) transmisión en antena 0, c) transmisión en antena 1, d) decodificación Alamouti, e) demodulación BPSK.



Fuente: elaboración propia.

En donde se tiene como tal la modulación BPSK asignando los posibles valores de “1” o “-1” según los datos de entrada y aplicando un bloque conversor para limitar los datos a 2 bits en formato complemento a dos seguido de un conversor serie paralelo necesario para extraer los flujos de datos de cada subportadora.

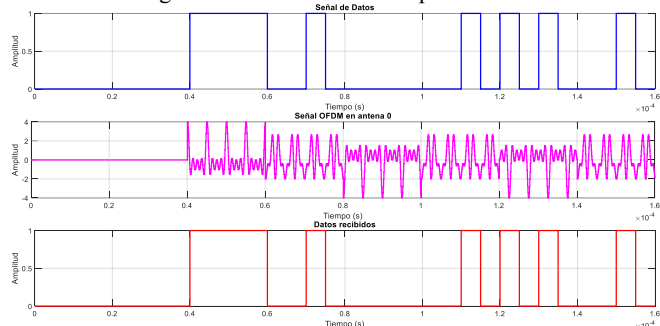
La Fig. 7b presenta el diagrama de bloques del transmisor OFDM de la antena 0, basándonos en la Tabla 1 es posible obtener la secuencia necesaria para transmisión en dicha antena. Dado que solo se tienen componentes reales en la modulación BPSK utilizada no será necesario obtener los conjugados de los datos y la secuencia a enviar tendrá la forma $[-S_4 \ S_3 \ -S_2 \ S_1]$. La Fig. 7c presenta el diagrama de bloques del transmisor OFDM de la antena 1, nuevamente basándose en la Tabla 1 es posible obtener la secuencia necesaria para transmisión en esta antena, la secuencia a enviar tendrá la forma $[S_3 \ S_4 \ S_1 \ S_2]$. Por otro lado, la etapa de recepción del sistema MIMO-OFDM para ambas antenas es idéntica a la Fig. 5c.

La Fig. 7d presenta el bloque de decodificación MIMO, en donde se aplica la decodificación Alamouti descrita previamente para la cual se extraen los datos de cada antena y se aplican las ecuaciones para la decodificación en el bloque MIMO. El resultado de cada símbolo se concatena en un vector. Finalmente, en la Fig. 7e se tiene el bloque de demodulación BPSK en donde primero se tiene un conversor paralelo a serie con el fin de generar un solo flujo de datos de salida al cual se le revierte la modulación BPSK y sale del sistema de *System Generator for DSP*.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los sistemas desarrollados para las modulaciones implementadas en System Generator for DSP por medio de Matlab/Simulink. Es de suma importancia mencionar que las simulaciones presentadas son para sistemas que no han sido sometidos a un canal. La Fig. 8 presenta la simulación correspondiente al sistema mostrado en la Fig. 5a para un transceptor OFDM con modulación BPSK desarrollado con bloques de *System Generator for DSP*. En este caso se realiza una simulación para un total de 32 datos, para una tasa de datos de 12 Mbps, se tiene un tiempo de simulación de 160 μ s.

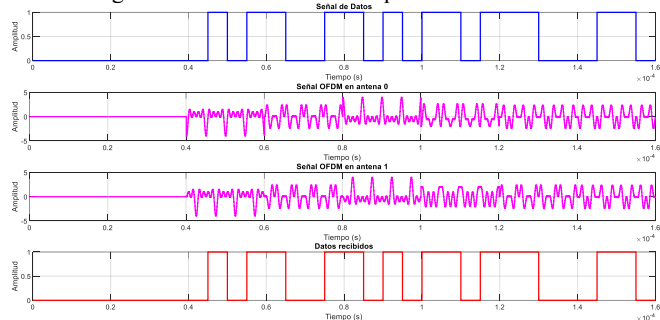
Fig. 8. Simulación de transceptor OFDM



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la Fig. 9 presenta la simulación correspondiente al sistema mostrado en la Fig. 6b para un transceptor MIMO-OFDM con modulación BPSK utilizando 2 antenas de transmisión y 2 antenas de recepción. En este caso se manejaron los mismos parámetros que para la simulación previa para un total de 32 datos (tasa de datos de 12 Mbps) con un tiempo de simulación de 160 μ s.

Fig. 10. Simulación de transceptor MIMO-OFDM.



Fuente: elaboración propia.

Para ambos sistemas se obtuvo un BER y un EVM de 0 para un total de 32 muestras y considerando el retraso introducido al sistema por el procesamiento digital de los datos.

5. CONCLUSIONES

El uso de las tecnologías OFDM y MIMO permite diseñar sistemas con una mejor calidad de servicio ya que OFDM mitiga en gran medida los efectos de distorsión provocados por los retardos de trayectoria en las comunicaciones inalámbricas. Mientras que con MIMO se utilizan también múltiples antenas, en este caso un total de 4 antenas, dos en transmisión y dos en recepción, para aprovechar la propagación de multi-trayectoria, que comúnmente son un punto débil de las comunicaciones inalámbricas. Lo anterior se usa para proveer ya sea una mayor calidad de servicio añadiendo redundancia al sistema o bien aumentar la tasa de transferencia de información de un sistema. Cada uno de los sistemas desarrollados maneja una señal de datos con una frecuencia de 200 KHz lo que resulta en una tasa de datos de 12 Mbps (5 μ s por dato), debido a que se aplica procesamiento digital de los datos se tiene un retraso de 8 datos o 40 μ s entre las señales de entrada y salida de datos. Para trabajos futuros se considera que es posible desarrollar sistemas similares con

modulaciones digitales más complejas como son QPSK y QAM, además de realizar pruebas al sistema considerando los efectos del canal por medio de ruido gaussiano o algún otro modelo más complejo. Además se propone la idea de añadir la tecnología de espectro esparcido por secuencia directa (DSSS) para proveer mayor robustez a interferencias y seguridad antes agentes externos.

6. REFERENCIAS

- [1] B. Sklar, "Digital communications: fundamentals and applications", 2nd, Pearson, 2021
- [2] M. Benbaghdad, T. Sofiane, T. Smail, "Real Time Implementation of Automatic Digital Modulation-Based SNR Estimation Using SDR Platforms" *Wireless Personal Communications*, Vol. 132 (2), pp.1593–1612, 2023.
- [3] M. Barnela and D. S. Kumar, "Digital modulation schemes employed in wireless communication: A literature review," *International Journal of Wired and Wireless Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 15-21, 2014.
- [4] G. A. Mahdiraji and A. F. Abas, "Advanced modulation formats and multiplexing techniques for optical telecommunication systems," *IntechOpen*, 2010.
- [5] R. Akash, R. Kaushik, A. Tiwari, "An overview of MIMO OFDM system for wireless communication", *International Journal of Technical Research & Science* Vol. 6, No. 10, pp. 1-4, 2021
- [6] R. Melki, H. Noura, M. Mansour, A. Chehab, "A survey on OFDM physical layer security." *Physical Communication*, Vol. 32, pp. 1-30, 2019
- [7] H. Taewon, C. Yang, G. Wu, S. Li, G. Ye Li, "OFDM and its wireless applications: A survey." *IEEE transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 4, pp. 1673-1694, 2008.
- [8] C. Vargas, W. Lopez, C. da Rocha, "Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO - OFDM.", *Acta Nova*, Vol. 3, No. 4, pp. 750-760, 2007
- [9] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith, A. Naguib, "From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems." *IEEE Journal on selected areas in Communications*, Vol. 21, No. 3, 281-302, 2003.
- [10] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications." *IEEE Journal on selected areas in communications*, Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, 1998.
- [11] M. S. Aviña, M. A. Estudillo, G. E. Vazquez, A. Calvillo "Emulación en FPGA de un Sistema Transceptor RF Basado en Radio Definido por Software", *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, Vol. 10, No. Especial 4, pp. 181-189, 2022