

Guía de Implementación y Simulación de la PHY-OFDM del Estándar IEEE 802.11 sobre Canales AWGN y Rayleigh en MATLAB

Alexander Aguirre, Sandy Donoso, Israel Montalvo, Cecilia Paredes
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Abstract — Actualmente muchas investigaciones se realizan a nivel de capa física del estándar IEEE 802.11 siendo importante que dicha capa física se encuentre adecuadamente implementada en MATLAB, por lo que este artículo propone una guía para llevar a cabo una simulación de dicha capa con el fin de ser utilizada en futuros trabajos. Este sistema consta de el transmisor y receptor IEEE 802.11 en el nivel de capa física PHY-OFDM conectado a través de un canal AWGN y Rayleigh para obtener resultados de BER vs. SNR.

Index Terms— IEEE 802.11, PHY-OFDM, AWGN, Rayleigh.

I. INTRODUCCIÓN

La culminación del estándar IEEE 802.11, en junio de 1997, marcó un hito importante en las comunicaciones inalámbricas [1]. Sin embargo, se han realizado diferentes variaciones de esta norma con el propósito de incluir modificaciones y mejoras. En la actualidad se maneja el estándar IEEE 802.11-2016; en éste se hallan las especificaciones tanto a nivel físico como a nivel de subcapa *Medium Access Control* (MAC).

La capa física (PHY) está conformada de tres subcapas: *Physical Layer Convergence Protocol* (PLCP), *Physical Medium Dependent* (PMD) y la de administración [2]. La subcapa PLCP crea autonomía de la capa física con las capas superiores gracias a la incorporación de preámbulo, cabecera y cola [2]. Por otra parte, PMD es la encargada de la transmisión y sus diferentes funciones como: codificación del canal, modulación, bloque *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), conversión serie-paralelo, y viceversa. Específicamente, OFDM se ha creado como nueva técnica de transmisión más robusta y con mejor desempeño debido al desarrollo y evolución exponencial de las comunicaciones inalámbricas [3].

La transmisión multiportadora OFDM fragmenta el ancho de banda en diversas subportadoras ortogonales con un mismo ancho de banda. La resistencia a la interferencia subportadora e intersímbolo y al desvanecimiento son las ventajas que tiene esta técnica [4].

Por otra parte, el bloque de codificación de canal implementa códigos convolucionales. Asimismo, el bloque modulación emplea las siguientes técnicas permitidas por el estándar: *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), *16-Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) and 64-QAM [5].

Para la transmisión, el bloque OFDM implementa un símbolo OFDM por medio de *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT). También se debe considerar la adición de *Cyclic Prefix*

(CP) dentro de este bloque [6].

Para conectar el transmisor y receptor se pueden diseñar diferentes canales como *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) y Rayleigh.

El canal AWGN o multitrayecto agrega ruido gaussiano blanco a la señal que pasa a través de él [7]; mientras que el canal Rayleigh introduce desvanecimientos caracterizados por una función de densidad de probabilidad aplicada a las señales que lo atraviesan [8].

Por otro lado, el bloque receptor incluye eliminación CP, modulación OFDM y demodulación.

Actualmente existen esfuerzos en la investigación para mejorar los aspectos de transmisión en la PHY del estándar [9] - [11]. Varios de estos estudios [10], [11] se basan en simulaciones en MATLAB, por lo que es de gran importancia contar con una PHY implementada de forma eficiente para que sirva de base en futuras investigaciones. Por lo que, el objetivo del presente artículo es describir el proceso de implementación de la PHY-OFDM del estándar IEEE 802.11-2016 mediante la herramienta MATLAB.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se aborda los aspectos teóricos la PHY del estándar IEEE 802.11-2016. En la sección III se detalla el diseño en MATLAB. Los resultados de la simulación se discuten en la sección IV. Finalmente, las conclusiones se describen en la sección V

II. CAPA FÍSICA OFDM DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11-2016

El propósito del estándar IEEE 802.11-2016 es precisar los detalles de la subcapa de control de acceso al medio (MAC) y la capa PHY a fin de realizar una conexión inalámbrica entre estaciones (STA) dentro de un área local. En la Fig. 1 se muestra la distribución de la subcapa de PHY del estándar IEEE 802.11-2016 con respecto al modelo ISO/OSI.

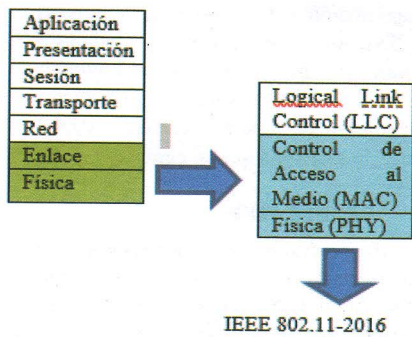


Fig. 1. Distribución de IEEE 802.11-2016 con respecto al modelo ISO/OSI

La PHY es la encargada de los aspectos de transmisión a través del medio inalámbrico y se divide en 3 subcapas:

- PLCP: es la responsable del suministro de una función que converge la transformación de la *protocol data unit* (PDU) MAC hacia la subcapa PMD. Conjuntamente, la subcapa MAC depende de la subcapa PMD.

- PMD: gestiona el envío y recepción de información entre las distintas STAs. Asimismo, logra suministrar una interfaz de transmisión para enviar y recibir datos entre dos o más dispositivos LAN [1].

- PHY Layer Management Entity (PLME): delega funciones de administración junto con MAC Layer Management Entity (MLME) [2].

Por otra parte, la subcapa PMD del estándar IEEE 802.11 se puede considerar que sus principales funciones, se describen a través del diagrama de bloques de la Fig. 2. Cada uno de estos bloques se revisa a continuación.

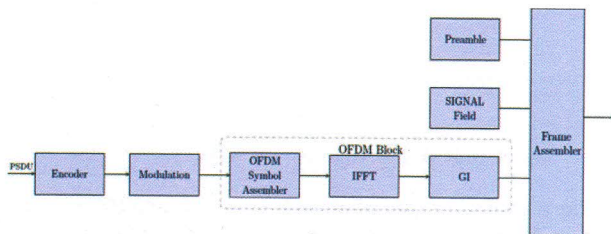


Fig. 2. Diagrama de bloques de la división de la sub capa PMD del estándar IEEE 802.11 [3].

Codificador (*Encoder*), se considera que está formado por el *scrambler*, codificador de canal e *Interleaver*. El *scrambler* tiene como fin eliminar la secuencia de 1 o de 0 de la trama [3]. El codificador de canal se utiliza para poder reducir los efectos que dañan la señal cuando se envía por el canal, añadiendo redundancia a la señal original. En el estándar se usa un codificador convolucional de tasas $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ y $\frac{3}{4}$, cada una de estas tasas de codificación se usan con un tipo de modulación específico como se muestra en la Tabla I [6].

TABLA I
VELOCIDADES DEL ESTÁNDAR

Modulation	Coding Rate (R)	Coded bits per OFDM symbols	Data bits per OFDM symbols	Bit Rate (Mbps)
BPSK	$\frac{1}{2}$	48	24	6
BPSK	$\frac{3}{4}$	48	36	9
QPSK	$\frac{1}{2}$	96	48	12
QPSK	$\frac{3}{4}$	96	72	18
16-QAM	$\frac{1}{2}$	192	96	24
16-QAM	$\frac{3}{4}$	192	144	36
64-QAM	$\frac{2}{3}$	288	192	48
64-QAM	$\frac{3}{4}$	288	216	54

Modulación: la subcapa PHY utiliza diferentes tipos de modulaciones para el transporte de datos como: BPSK, QPSK 16-QAM Y 64-QAM.

OFDM es la técnica de transmisión que divide el ancho de banda en N subcanales paralelos y ortogonales. Se implementa utilizando la IFFT con $N = 64$ puntos (IFFT), donde. De las 64 subportadoras disponibles, $NSD = 48$ se utilizan para la transferencia de datos, $NSP = 4$ son subportadoras piloto, las otras 11 subportadoras son nulas y 1 es la subportadora DC. Conjuntamente, se agrega un prefijo cíclico (CP) de longitud $N/4$ dentro del bloque OFDM. Los símbolos piloto según el estándar son (1 1 1 -1) y se encuentran en las posiciones -21, -7, 7, 21, 7 como se puede observar en la Fig. 4 [3].

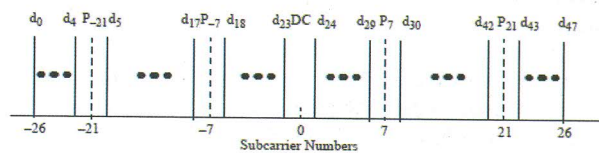


Fig. 4. Posición de las sub-portadoras de frecuencia. [3]

El canal de operación usado para comunicaciones Wi-Fi es de 20 MHz, pero puede haber canales de 10 MHz y 5 MHz para comunicaciones ad-hoc.

III. DISEÑO

Como se indicó inicialmente, el objetivo del presente artículo es presentar una descripción detallada de cómo se puede simular en MATLAB la capa física OFDM del estándar IEEE 802-11. Para ello se optó por desarrollar un script sobre que provea facilidad para introducir los principales parámetros de las simulaciones como tipo de modulación con sus respectivas tasas de codificación y llamar a las funciones que se han implementado para representar cada uno de los bloques descritos en la Fig. 2.

Para la transmisión de datos se crea un arreglo de bits aleatorios (con la función *randi* de MATLAB), dichos bits pasarán por las funciones que correspondan a los bloques de la Fig. 2. Cabe resaltar que la cantidad de bits aleatorios generados dependerá de la tasa de codificación y del tipo de modulación, según se menciona en la Tabla I. Por ejemplo, si la modulación es 16-QAM con tasa $\frac{2}{3}$ se requieren generar 192 bits

codificados, es decir, 128 bits aleatorios.

Para la función *encoder*, se utilizó las funciones del toolbox de comunicaciones de MATLAB. Es así que, la función *poly2trellis* acepta una descripción polinómica de un codificador convolucional y devuelve la descripción de la estructura trellis correspondiente.

Una vez codificados los bits, estos deben ser modulados, para lo cual se diseñó una función *modulador* que permita primero convertir, con la función *bi2de* de MATLAB, de números binarios a decimales y su resultado se envió como parámetro de entrada para las distintas funciones de modulación, una por cada tipo especificado en la Tabla I. Para la función modulador, primero es necesario crear objetos del tipo de modulación y demodulación. Así: para la modulación M-PSK es *object=modem.pskmod('M',B')*; y para la demodulación el objeto es *d_object=modem.pskdemod(object)*. Mientras que, para la modulación M-QAM el objeto es: *obj=modem.qammod('M',B,'SymbolOrder','gray')*; y, para la demodulación el objeto es: *d_object=modem.qamdemod(obj)*. Una vez creado los objetos se puede utilizar las funciones de MATLAB *Data_Mod=modulate(object, Data_Cod)*.

A continuación, el flujo de símbolos modulados deben ingresar al bloque de generación de símbolos OFDM, por lo que se creó una función llamada *ofdm*. Dicha función multiplexó los símbolos en N subportadoras, para lo cual los 48 símbolos de datos, se mapearon en las subportadoras de datos, se insertó el CP, las subportadoras nulas y la subportadora DC, según lo que se indica en la Fig. 4. Una vez construido el símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia, éste pasó por el bloque IFFT, finalmente se agregó un prefijo cíclico de longitud $N/4$ a cada símbolo OFDM.

Para obtener la curva de BER vs SNR se debe definir un vector con los valores de SNR para los cuales se evaluará la BER, en este caso se ha considerado $\text{SNR}=\{0, 2, 4, \dots, 30\}$ [dB].

Para modelar el canal AWGN y Rayleigh se consideró dos funciones. La primera sólo para el canal AWGN; y el segundo para el canal Rayleigh.

Los símbolos listos para transmitir ingresaron a un canal de desvanecimiento Rayleigh y luego a un canal AWGN mediante *raylrnd* y *awgn*, que son funciones propias de MATLAB, y tomaron como parámetro de entrada el arreglo de símbolos y el valor de SNR.

En el receptor, al los símbolos OFDM recibidos del canal Rayleigh y AWGN se le elimina el prefijo cíclico. A continuación, se procedió a demultiplexar los símbolos OFDM con FFT [2]. Se retiran las subportadoras piloto, nulas y DC. Y a las subportadoras de datos (48) se demoduló con las funciones de MATLAB correspondientes. Una vez demodulados, se los transformó de decimal a binario a través de la función *de2bi* para luego obtener el arreglo de bits original.

Para este estudio, fue necesario realizar varios envíos de datos por el canal, tal que éstos sean promediados al final debido a que se generaron variables aleatorias (bits aleatorios a la entrada al codificador). Este método de simulación se conoce como simulaciones Monte Carlo. Por tal razón, es necesario que se simulen al menos 10000 envíos y obtener el valor de BER promedio al final. Es importante mencionar que cada función

de modulación que se implementó estuvo programada con un bucle *for* de los valores SNR antes mencionados y anidado a otro bucle *for* para transmitir los símbolos por el canal Rayleigh y AWGN para obtener el flujo de bits transmitidos. El segundo bucle anidado fue programado para realizar 10000 transmisiones de cada flujo de símbolos que se generó.

IV. RESULTADOS

Los resultados que se mostrarán a continuación son productos de simulaciones realizadas siguiendo el diseño realizado en la sección anterior, donde se evalúa el rendimiento de la capa física OFDM sobre canales AWGN y Rayleigh para los diferentes tipos de modulación y tasas de codificación que permite el estándar. El rendimiento se presentan en términos de BER vs SNR.

Para la simulación se agregaron 10000 símbolos OFDM aleatorios con todas las modulaciones y tasas de codificación.

En la Fig.5 se muestra el diagrama BER vs SNR para las diferentes tasas de codificación, técnicas de modulación y los tipos de canales utilizados para la transmisión y recepción de símbolos OFDM con el estándar IEEE802.11 2016 sobre un canal AWGN.

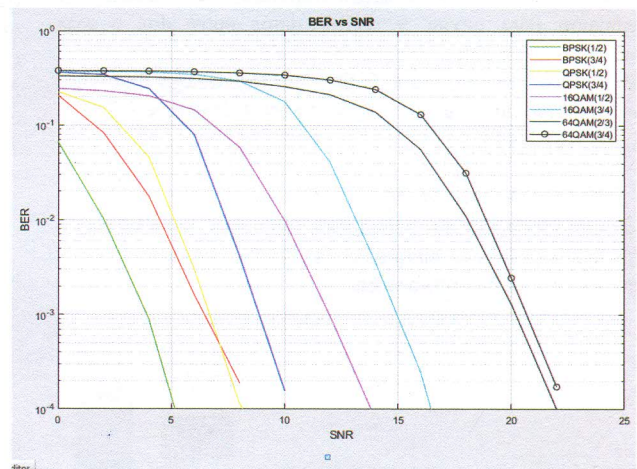


Fig. 5. BER vs SNR en canal un AWGN.

De la Fig. 5 se observa que, empleando la modulación BPSK con una tasa de codificación $\frac{1}{2}$ se obtiene un BER menor que utilizando la misma modulación a una tasa de codificación $\frac{3}{4}$. Mientras que, al emplear la modulación QPSK con una tasa de codificación $\frac{3}{4}$ se obtiene un BER mayor. Ahora, si se utiliza la modulación 16-QAM con una tasa de codificación $\frac{1}{2}$ se reduce el BER con respecto a una tasa de codificación $\frac{3}{4}$. Para el caso de 64-QAM se logró obtener un BER inferior cuando la tasa de codificación fue de $\frac{2}{3}$. Es por ello, que el estándar permite diferentes tasas de transmisión, las cuales están directamente relacionadas con las combinación modulación – tasa de codificación.

En la Fig. 6 se puede observar el rendimiento de la PHY sobre un canal considerando un canal Rayleigh. Se observa cómo se corrigen los efectos del desvanecimiento que se presenta en el canal Rayleigh y como se los puede contrarrestar utilizando la codificación de canal que permite transmitir los

símbolos en una tasa de codificación variable para agregar redundancia a los símbolos [6].

En la Fig. 7 se puede observar que los símbolos transmitidos en el canal Rayleigh tienen una mayor BER que los datos transmitidos en el canal AWGN. Además, se puede visualizar que, para todos los casos, al aumentar la relación señal a ruido SNR el BER disminuye, debido a que, a una mayor potencia de la señal, el receptor puede captar la señal con mayor facilidad y se producen menos errores [6].

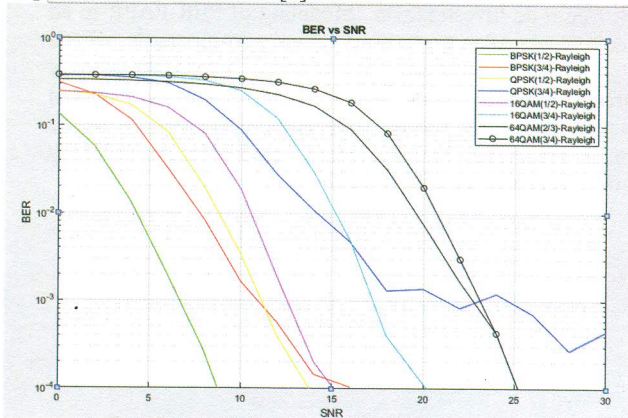


Fig. 6. BER vs SNR en canal un Rayleigh.

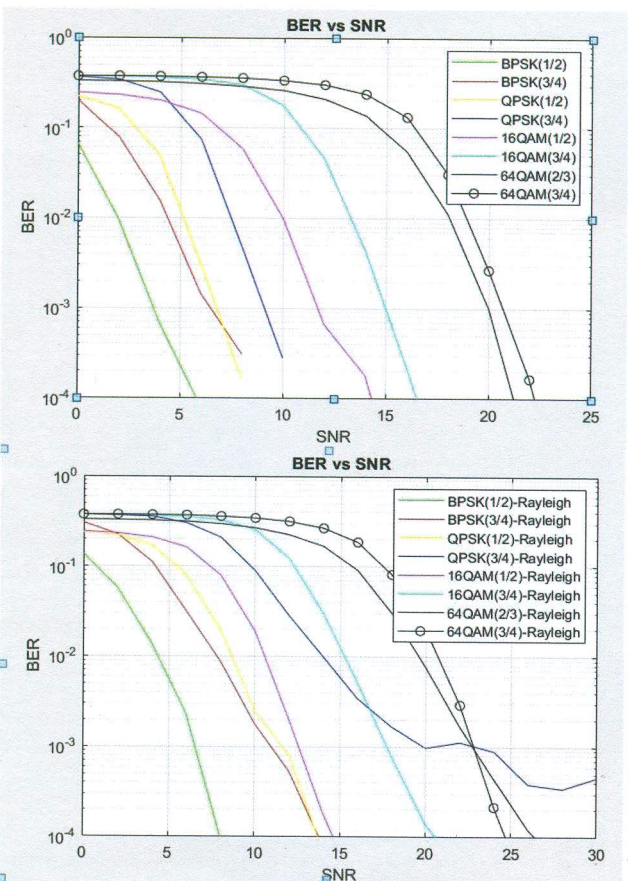


Fig. 7. BER vs SNR en canal un AWGN y en canal un Rayleigh.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra una breve descripción de cómo implementar en MATLAB la capa PHY-OFDM del estándar IEEE 802.11. El diseño fue implementado en MATLAB sobre canales AWGN y Rayleigh. Para presentar los resultados se utilizó simulaciones Monte Carlo. Los resultados del rendimiento de la capa física sobre estos dos canales se presentaron en términos de BER vs SNR para las diferentes combinaciones de modulación – tasa de codificación. Las simulaciones mostraron que, al aplicar codificación de canal se puede contrarrestar los efectos del canal multirrayecto Rayleigh y obtener un comportamiento similar al de un canal AWGN. Al cambiar la modulación, se verificó que el incremento de número de niveles de la señal a una de mayor número de bits por símbolo ocasionó que el BER aumente. Este comportamiento fue más evidente con niveles bajos de SNR, consecuentemente se dificultó la identificación y demodulación correcta de la señal en recepción. Además, con esta breve guía se puede usar de base para futuros estudios a nivel de capa física como el estudio de la ecualización, sincronización, técnicas de reducción de los picos, etc.

VI. REFERENCIAS

- [1] IEEE, 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2016. Capítulo 17
- [2] IEEE, 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2016. Capítulo 17.
- [3] Paredes Paredes, Martha Cecilia; García Fernández-Getino, M. Julia, "Performance of OPS-SAP technique for PAPR reduction in IEEE 802.11p scenarios". *Ad Hoc Networks*, 2016, vol. 52, p. 78-88.
- [4] H. Ochiai and H. Imai, "On the distribution of the peak-to-average power ratio in OFDM signals," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 2, pp. 282-289, Feb 2001.
- [5] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Capacity of Rayleigh fading channels under different adaptive transmission and diversity-combining techniques," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 4, pp. 1165-1181, Jul 1999.
- [6] C. Zhang, Z. Xiao, H. Wu, L. Zeng and D. Jin, "Performance analysis on the OFDM PHY of IEEE 802.11ad standard," *2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, Chengdu, 2011, pp. 708-713.
- [7] A. Kochut, A. Vasan, A. U. Shankar and A. Agrawala, "Sniffing out the correct physical layer capture model in 802.11b," *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols, 2004. ICNP 2004*, Berlin, Germany, 2004, pp. 252-261.
- [8] IEEE, 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2016. Capítulo 17.
- [9] R. van Nee, A. van Zelst and G. Awater, "Maximum likelihood decoding in a space division multiplexing system," *VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No.00CH37026)*, Tokyo, 2000, pp. 6-10, vol.1.

- [10] F. F. Digham, M. Alouini and M. K. Simon, "On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
- [11] K. Bilstrup, E. Uhlemann, E. G. Strom and U. Bilstrup, "Evaluation of the IEEE 802.11p MAC Method for Vehicle-to-Vehicle Communication," *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, Calgary, BC, 2008, pp. 1-5.
- [12] G. Singh and A. Alphones, "OFDM modulation study for a radio-over-fiber system for wireless LAN (IEEE 802.11a)," *Fourth International Conference on Information, Communications and Signal Processing, 2003 and the Fourth Pacific Rim Conference on Multimedia. Proceedings of the 2003 Joint*, Singapore, 2003, pp. 1460-1464 vol.3.



Kleber Alexander Aguirre nació en Quito, provincia de Pichincha, el 27 de junio de 1994. Sus estudios de primaria los realizó en la escuela San José La Salle de la ciudad de Latacunga y la secundaria con el bachillerato los realizó en el Colegio Sagrados Corazones de Rumipamba. Actualmente se encuentra

estudiando en la Escuela Politécnica Nacional, ubicada en Quito, en la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, cursando el 7mo semestre en la carrera de Ingeniería Electrónica y Redes de la Información.



Sandy Carolina Donoso Cañar nació en Quito, provincia de Pichincha, el 08 de febrero de 1995. Sus estudios de primario los realizó en la escuela Alfonso del Hierro la Salle en la ciudad de Quito y sus estudios secundarios los realizó en el colegio Hipatia Cárdenas en la ciudad de Quito.

Actualmente estudia Ingeniería en Electrónica y Redes de Información cursando el 7mo semestre en la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito provincia de Pichincha en Ecuador.



Mario Israel Montalvo Pasquel nació en Atuntaqui, provincia de Imbabura, el 18 de Enero de 1994. Sus estudios de primario los realizó en la escuela 24 de Mayo en la ciudad de Atuntaqui y sus estudios secundarios los realizó en el colegio Abelardo Moncayo en la ciudad de Atuntaqui. Actualmente estudia

Ingeniería en Electrónica y Redes de Información cursando el 7mo semestre en la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito provincia de Pichincha en Ecuador.



Martha Cecilia Paredes Paredes recibió el título de Ingeniería en Electrónica y Redes de Información en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en Quito - Ecuador en 2008, los títulos de Máster y Doctor en Multimedia y Comunicaciones en la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid - España en 2010 y 2014, respectivamente.

Desde 2010 a 2011 trabajó como Profesor Ocasional en la Universidad de las Américas (UDLA), Quito - Ecuador. Actualmente, es Profesora Agregado en el Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información (DETRI) en EPN, donde ha enseñado a varios cursos de grado y postgrado todos relacionadas con las comunicaciones inalámbricas. En cuanto a investigación, ha participado en varios proyectos de investigación nacionales e internacionales sobre comunicaciones inalámbricas. Actualmente es Directora del Proyecto de Investigación "Modeling of PER-PAPR in ad hoc networks". Además, ha sido autora y co-autora de más de diez artículos científicos en revistas internacionales y congresos. Sus principales intereses de investigación incluyen el procesamiento de señales para comunicaciones de banda ancha, transmisiones multiportadora, especialmente OFDM y mejoras en capa física en redes 5G.