DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 12 No. Especial 4 (2024) 70-80

Comparación y selección de moduladores n-QAM para aplicaciones en la 4G
Comparison and selection of n-QAM modulators for 4G applications

Angel E. Torres-Velázquez [a], José R. Cárdenas-Valdez [a*], Angel H. Corral-Domínguez [a], Andrés Calvillo-Téllez [b], Carlos Hurtado-Sánchez [a]

[a] *Instituto Tecnológico de Tijuana, Tecnológico Nacional de México, 22435, Tijuana, Baja California, México.*
[b] *Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Instituto Politécnico Nacional, 22430, Tijuana, Baja California, México.*

Resumen

Actualmente los sistemas de comunicaciones se han desarrollado para ofrecer una mayor rapidez y confiabilidad de transmisión de datos para los usuarios, debido al incremento de la demanda del uso del espectro, el método de transmisión utilizado actualmente es la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), dentro de la multiplexación se utiliza la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) por su eficiencia en este trabajo de investigación para la validación de moduladores n-QAM. Se diseñan dos moduladores de 16-QAM y 32-QAM, su implementación se realiza en una tarjeta transceptora. Se comparan los recursos empleados durante la transmisión de datos con ambos moduladores, después se incluye una etapa de potencia con amplificadores de potencia (PA) y se valida espectralmente mediante una comparación utilizando la relación de potencia de canal adyacente (ACPR) y el valor error cuadrático medio normalizado (NMSE), el sistema propuesto es una validación para el desarrollo de moduladores digitales de orden variable n-QAM.

Palabras Clave: ACPR, Amplificador de potencia, NMSE, 16-QAM, 32-QAM.

Abstract

Currently, communications systems have been developed to offer greater speed and reliability of data transmission for users; due to the increase in demand for the use of the spectrum, the transmission method currently used is orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), within multiplexing, quadrature amplitude modulation (QAM) is used due to its efficiency in this research work for the validation of n-QAM modulators. Two 16-QAM and 32-QAM modulators are designed, their implementation is carried out on a transceiver card. The resources used during data transmission with both modulators are compared, then a power stage with power amplifiers (PA) is included and spectrally validated through a comparison using the adjacent channel power ratio (ACPR) and the normalized mean square error (NMSE), the proposed system is a validation for the development of variable order digital n-QAM modulators.

Keywords: ACPR, NMSE, Power amplifier, 16-QAM, 32-QAM.

1. Introducción

La tecnología inalámbrica ha provocado que los sistemas de comunicaciones sean más fáciles, rápidos y confiables. Por lo que, para satisfacer la demanda de los servicios de mayor calidad, es necesario que el sistema tenga una mayor capacidad y confiabilidad de transmisión de datos. Un método de transmisión de datos es la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), este método se basa en el uso de múltiples portadoras multiplexadas por división de frecuencia y cada señal multiplexada es ortogonal entre sí (Bala et al., 2021). OFDM permite un uso más eficiente del espectro radioeléctrico al permitir la superposición de canales ortogonales y la diversidad multiusuario. Estos canales ortogonales son resistentes a interferencias en canales adyacentes y productos de intermodulación lo que ofrece a los sistemas actuales una alternativa si se utiliza multiplexaciones digitales (Myung, 2007).

En las técnicas actuales de modulación, los datos digitales de banda base se transmiten por diferentes envolventes y fases/frecuencias de una portadora, la modulación mediante esquemas variables n-modulación de amplitud en cuadratura (n-QAM) permite el manejo de altas tasas de transmisión (Shah & Thakur, 2022). Con el exponencial incremento de usuarios, la tasa de transmisión de datos va aumentando para cubrir las necesidades que presentan diversos sectores, es necesario proveer servicios y anchos de banda más grandes y compactar la infraestructura en las redes móviles (Estupiñán Calderón, 2020).

*Autor para la correspondencia: jose.cardenas@tectijuana.edu.mx
Correo electrónico: angel.torres18@tectijuana.edu.mx (Ángel Elías Torres-Velázquez), jose.cardenas@tectijuana.edu.mx (José Ricardo Cárdenas-Valdez), angel.corral@tectijuana.edu.mx (Ángel Humberto Corral-Domínguez), acalvillo@ipn.mx (Andrés Calvillo-Téllez), carlos.hurtado@tectijuana.edu.mx (Carlos Hurtado-Sánchez).

Historial del manuscrito: recibido el 30/06/2024, última versión-revisada recibida el 20/08/2024, aceptado el 13/09/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13330

Los sistemas modernos de transmisión de datos de alta velocidad utilizan órdenes altos de QAM, lo que provoca un aumento en la eficiencia espectral del uso de los canales de comunicación, debido a que cuenta con ventajas como el ancho de banda eficiente y alta velocidad (Andronov et al., 2020; Bilim, 2020). Se define como la técnica de comulación que transmite información cambiando la amplitud y las fases de una onda portadora, de modo que se duplique el ancho de banda efectivo, utilizando dos portadoras las cuales son una señal sinusoidal y coseno respectivamente como dos señales ortogonales, las cuales lleva información de forma independiente. En la modulación QAM existen N puntos posibles en la constelación lo cual le da el orden a la modulación que se está empleando (Estupiñán Calderón, 2020; Shah & Thakur, 2022).

El incremento de usuarios con acceso a tecnologías inalámbricas y una gran variedad de aplicaciones multimedia móviles de rápido crecimiento provocan el crecimiento del tráfico de internet móvil por lo cual las bandas actuales se encuentran al borde de la saturación (Bala et al., 2021; Mei et al., 2022). Con la necesidad de satisfacer a la creciente demanda del uso del espectro, muchos servicios requieren utilizar diferentes bandas de espectro, lo que provoca la demanda de ancho de banda adicional (Sumithra Sofia & Shirly Edward, 2021).

Debido a la saturación del ancho de banda actual, es necesario buscar soluciones por lo cual se opta por distintas tecnologías, una de ellas es OFDM junto con la modulación QAM, para mejorar la eficiencia espectral y reducir el efecto interferencia entre símbolos (ISI) simultáneamente (Bala et al., 2021; Mallick et al., 2021).

En este trabajo de investigación se realiza el diseño de moduladores 16-QAM y 32-QAM, para ser posteriormente ser implementados con la tarjeta de desarrollo DE10 Standard y la tarjeta transceptora RFC ARRadio, la cual opera en la banda de los 2.5 GHz. La señal que se transmite, es una señal periódica generada con programación de lenguaje C, que se envía por medio de la conexión de red a la tarjeta DE10 Standard. Se realiza un análisis espectral de la señal al transmitirla, para observar el rendimiento de los moduladores, mediante el cálculo de su relación de potencia de canal adyacente (ACPR) se valida y garantiza la no invasión de bandas adyacentes. Los datos transmitidos son reconstruidos y graficados mediante código, para observar la señal recuperada y poder realizar el cálculo del error cuadrático medio normalizado (NMSE).

Este trabajo se organiza de la siguiente manera, en la sección 2 se muestra el marco teórico de los moduladores n-QAM, en la sección 3 se muestra el desarrollo e implementación de los moduladores 16-QAM y 32-QAM, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se muestran las conclusiones obtenidas.

2. Marco teórico

2.1. Sistemas de telecomunicaciones

Los sistemas de telecomunicación son aquellos que mediante el empleo de técnicas y dispositivos adecuados realizan el transporte de información entre una fuente y uno o más destinatarios finales. El conjunto de varios elementos de información constituye un símbolo y a su vez el conjunto de varios símbolos constituye un mensaje, por lo cual un mensaje está compuesto por elementos de información y que ésta puede fluir de forma continua o discreta entre el transmisor y el receptor (Pérez Vega et al., 2007).

En los sistemas radioeléctricos se entiende por radio a la transmisión de señales a través del espacio, mediante ondas electromagnéticas, sin que haya una conexión física entre transmisor y receptor. El medio de propagación de las ondas electromagnéticas es, en este caso, el aire o el vacío. En los sistemas radioeléctricos es frecuente emplear el término radiofrecuencia (RF) y por tal se entiende la frecuencia a la que la radiación de energía electromagnética es útil para propósitos de comunicación (Pérez Vega et al., 2007), (Murillo Fuentes, 2007).

2.2. Canal de comunicaciones

El canal de comunicaciones puede definirse en términos generales, como el conjunto de recursos en espectro, espacio, tiempo y equipos, necesarios para realizar una comunicación. En su forma más general, se reduce a un transmisor, un receptor y un medio de transporte de la energía electromagnética como se muestra en la Figura 1, siendo un diagrama de bloques de un canal genérico de comunicaciones (Murillo Fuentes, 2007).

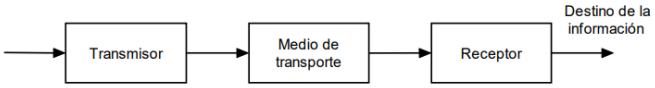


Figura 1: Canal genérico de comunicaciones recuperada de (Pérez Vega et al., 2007).

Transmisor: Es un conjunto de uno o más dispositivos o circuitos electrónicos que convierte la información de la fuente original en una señal que se presta más a su transmisión a través de un medio de comunicación. Su función es acondicionar las señales de información en ancho de banda y potencia para entregarlas al medio de transporte (Pérez Vega et al., 2007; Tomasi, 2003).

Receptor: Es un conjunto de dispositivos y circuitos electrónicos que acepta del medio de transporte las señales transmitidas, con la función de capturar las señales en el medio de transporte, amplificarlas y acondicionarlas a fin de que resulten comprensibles al usuario final. (Pérez Vega et al., 2007; Tomasi, 2003).

Medio de transporte: Puede ser el vacío, el aire, un cable, el agua u otro medio material. La mayoría de las comunicaciones eléctricas emplean como medio de transporte aire, cables metálicos o fibras ópticas (Pérez Vega et al., 2007).

2.3. Modulación QAM

La modulación de n-QAM contiene cambios de amplitud y fase en la fase de la portadora transmitida, de modo que se duplica el ancho de banda efectivo. En la señal QAM, la onda portadora viene directamente en cuadratura, por eso se llama cuadratura. Indica que la diferencia de fase entre dos portadoras es de 90 grados, pero tiene la misma frecuencia. Una señal se llama señal **I** en fase dada por una onda sinusoidal $\sin(wt)$, de manera similar, señal **Q** en cuadratura dada por una onda coseno $\cos(wt)$ (Shah & Thakur, 2022).

En la modulación de amplitud cuadratura, las componentes de fase y cuadratura son independientes (Rodríguez et al., 2007). Debido a que la envolvente y la fase ofrecen dos grados de libertad, dichas técnicas de modulación asignan datos de banda base a cuatro o más señales portadoras posibles (Li, 2008). Una gran ventaja de la modulación QAM es la sencillez en el diseño tanto del transmisor (por la independencia de componentes) como del receptor (porque las decisiones se pueden tomar de forma independiente sobre las señales en fase y cuadratura). Por lo que respecta al número de bits por símbolo, este depende del número de símbolos de la constelación. Así, para un número P de bits por símbolo, se tendría $M = 2^P$ símbolos en la constelación (Rodríguez et al., 2007). Algunas constelaciones para P se representan en la Figura 2, siendo para QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

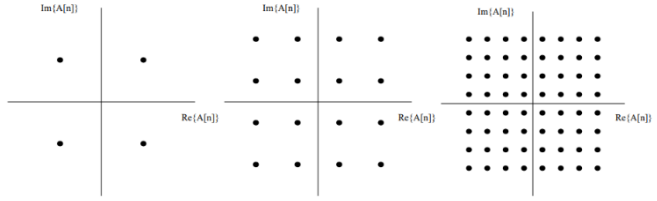


Figura 2: Constelaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM recuperada de (Rodríguez et al., 2007).

2.4. Error cuadrático medio normalizado

Para cuantificar la linealidad de un RF-PA, se envía una señal de evaluación a través de él y cuantificar la distorsión no lineal dentro de la señal de salida. Dado que la distorsión no lineal depende en gran medida del tipo de señal, cada métrica de linealidad debe especificarse con respecto al tipo de señal que se utiliza para su evaluación. Para cuantificar la distorsión no lineal dentro de una señal, distintas métricas siendo como el NMSE (Enzinger, 2018). El objetivo final es minimizar la diferencia entre la señal de salida del sistema y la señal de salida deseada. Se puede escribir como

$$e[n] = y_{measured}[n] - y_{desired}[n], \quad (1)$$

donde $e[n]$ es la señal de error, $y_{measured}[n]$ es la salida medida muestreada del sistema y $y_{desired}[n]$ es la salida muestreada. La métrica más simple para medir qué tan bien se desempeña el transmisor con el conjunto de datos el transmisor con el conjunto de datos en términos de precisión mediante (1) para encontrar el error cuadrático medio (MSE) de la siguiente manera

$$MSE = \sum_n |y_{measured}[n] - y_{desired}[n]|^2. \quad (2)$$

El uso de esta métrica puede no ser adecuado para comparar sistemas con diferentes niveles de potencia y, comúnmente, en la literatura se utiliza el NMSE para estos casos (Isaksson, 2006; Tehrani, 2012). El NMSE se define como

$$NMSE = \frac{\sum_n |y_{measured}[n] - y_{desired}[n]|^2}{\sum_n |y_{measured}[n]|^2}. \quad (3)$$

2.5. Relación de potencia de canal adyacente

La ACPR es una figura de mérito que permite caracterizar la distorsión que tiene lugar en el subsistema y la probabilidad con que dicho sistema pueda causar interferencias en los canales vecinos. En concreto se define como la relación entre la potencia total del canal adyacente (señal generada por regeneración espectral debida a la distorsión no lineal) a la potencia del canal principal (señal útil). Se desea que el valor sea lo más bajo posible, ya que un ACPR alto indica que se ha producido una distorsión significativa (Fernández Díaz, 2020). Para calcular el valor ACPR se calcula de la siguiente manera

$$ACPR = 10 \log_{10}\left(\frac{P_{adj}}{P_{ref}}\right)(dB). \quad (4)$$

3. Desarrollo

Para realizar la implementación y pruebas de los moduladores 16-QAM y 32-QAM se utilizan la tarjeta de desarrollo DE10 Standard y la tarjeta transceptora RFC ARRadio para transmitir y recibir señales. Mediante código de programación en lenguaje C, se generan señales periódicas que van a transmitir, para posteriormente recibirlas con el receptor y reconstruir las señales. Con las señales reconstruidas se realiza el cálculo de los parámetros ACPR y NMSE por medio de código de programación en lenguaje C.

3.1. Puesta en marcha de las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio

Para el funcionamiento en conjunto de las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio, se requiere el sistema operativo compatible con ambas tarjetas en una memoria SD, la cual se conecta en su ranura correspondiente en la tarjeta DE10 Standard, se realiza las conexiones mostradas en la Figura 3, para poder transmitir una señal periódica.

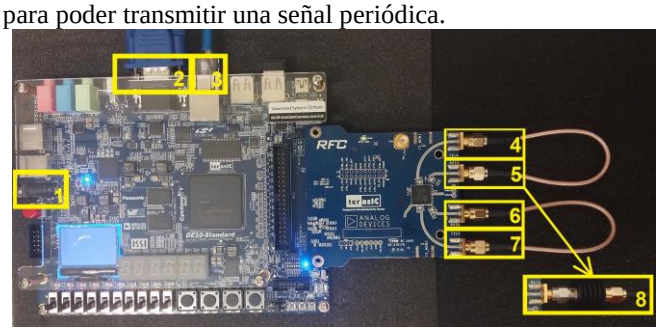


Figura 3: Conexiones de las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio.

La descripción de las conexiones mostradas en la Figura 3 son las siguientes:

1. Conexión AC de la tarjeta DE10 Standard;
2. Puerto VGA de la tarjeta DE10 Standard;
3. Conexión a Ethernet de la tarjeta DE10 Standard, para recibir y enviar datos entre la tarjeta DE10 Standard por medio de la red land;
4. Canal TX1A de la tarjeta RFC ARRadio;
5. Canal RX1A de la tarjeta RFC ARRadio;
6. Canal RX2A de la tarjeta RFC ARRadio;
7. Canal TX2A de la tarjeta RFC ARRadio;
8. Canal TX1A con un atenuador de 10 dB o 20 dB, para realizar distintas pruebas.

3.2. Generación de señales periódicas

Las señales periódicas se generan mediante código de programación en lenguaje C, este tipo de señales permiten observar los cambios que surgen al momento de transmitir las señales y recibirlas con el receptor de la tarjeta RFC ARRadio. El diagrama de flujo de la Figura 4 describe el funcionamiento del código elaborado.

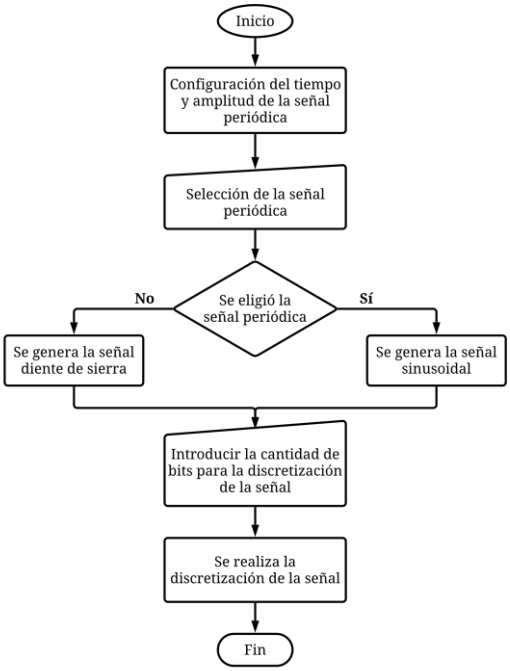


Figura 4: Diagrama de flujo para generar señales periódicas.

En el diagrama de flujo, se configura la amplitud y el tiempo por medio de la cantidad de muestras de la señal periódica generada, se solicita al usuario seleccionar entre el tipo, ya sea una señal sinusoidal o una señal diente de sierra, para después introducir la cantidad de bits, en la que se discretizará la señal basada en el orden n-QAM deseado.

3.3. Modulador 16-QAM

El bloque Tx se encarga de modular la señal previamente creada por programación de lenguaje C, para ser transmitida por las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio. Se transmite la señal solamente con el objetivo de observar si la configuración del modulador si funciona correctamente.

El diagrama de bloques de Tx mostrado en la Figura 5, está compuesto por los bloques *From Workspace* el cual permite utilizar la señal periódica generada en Simulink, los bloques *Rectangular QAM Modulator Baseband* y *Rectangular QAM Demodulator Baseband* que se encuentran configurados para un modulador 16-QAM, se utilizan los filtros *Raised Cosine Transmit Filter* y el *Raised Cosine Receive Filter*, y también el bloque *To Workspace* para almacenar en una variable la señal periódica modulada y demodulada en Simulink sin transmitir, con la finalidad de observar cómo debe ser la señal que se transmite sin que se le presente alguna distorsión al ser trasmitida por las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio.

Se separa la parte real e imaginaria de la señal para amplificarla y enviarla al canal TXA1 de la tarjeta RFC ARRadio, debido a que la tarjeta cuenta con dos transceptores en el segundo canal TXA2 se envía una señal con valor 0 con la cantidad de muestras del canal de entrada de la tarjeta RFC ARRadio AD9361.

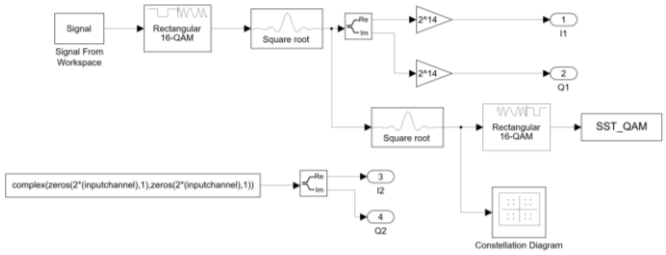


Figura 5: Bloque Tx del modulador 16-QAM para una señal periódica.

El bloque *Raised Cosine Transmit Filter* aplica un filtro de coseno elevado a la señal modulada y el *Raised Cosine Receive Filter* filtra la señal de entrada utilizando un filtro de respuesta de impulso finito (FIR) de coseno elevado. Los parámetros para la configuración utilizados en los bloques previamente mencionados se observan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de los bloques Raised Cosine Transmit Filter y Raised Cosine Receive Filter del modulador 16-QAM.

Raised Cosine Transmit Filter	
Parámetros	Valor
Rolloff	1
Filter span in symbols	40
Output samples per symbol	16
Linear amplitude filter gain	1
Raised Cosine Receive Filter	
Parámetros	Valor
Rolloff	1
Filter span in symbols	40
Input samples per symbol	16
Decimation factor	16

El diagrama de bloques de Rx mostrado en la Figura 6, recibe del canal RXA1 de la tarjeta RFC ARRadio la señal trasmitida, con el bloque *Frame Conversion* establece el modo de muestreo de la señal, el bloque *Automatic Gain Control* se controla la ganancia reduciéndola, permitiendo observar la constelación de la señal transmitida con el bloque *Constellation Diagram* antes de ser demodulada, el filtro *Raised Cosine Receive Filter* se encuentra configura con los parámetros mostrados en la Tabla 1, el bloque *Rectangular QAM Demodulator Baseband* se encuentra configurado para un modulador 16-QAM y el bloque *To Workspace* almacena en una variable la señal transmitida con las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio, para ser reconstruida.

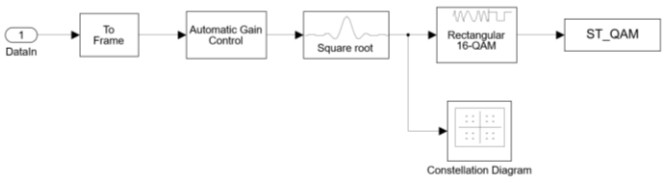


Figura 6: Bloque Rx 16-QAM para modulador 16-QAM.

3.4. Modulador 32-QAM

Para el modulador 32-QAM el diagrama de bloques para Tx es mostrado en la Figura 7, los cambios que se realizan con respecto al diagrama de bloques para Tx de la Figura 5 del modulador 16-QAM son que los bloques *Rectangular QAM Modulator Baseband* y *Rectangular QAM Demodulator Baseband* se configuran para un modulador 32-QAM, además de que la señal con valor de 0 para el canal TX2A de la tarjeta RFC ARRadio se configuran para que correspondan con la cantidad de muestras del canal de entrada para el modulador 32-QAM.

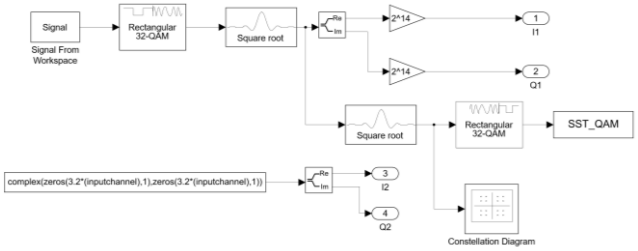


Figura 7: Bloque TX del modulador 32-QAM para una señal periódica.

En el caso de los bloques *Raised Cosine Transmit Filter y Raised Cosine Receive Filter* sus parámetros se muestran en la Tabla 2, los cuales son los valores en los correspondientes para el modulador de 32-QAM.

Tabla 2: Parámetros de los bloques Raised Cosine Transmit Filter y Raised Cosine Receive Filter del modulador 32-QAM.

Raised Cosine Transmit Filter	
Parámetros	Valor
Rolloff	1
Filter span in symbols	80
Output samples per symbol	32
Linear amplitude filter gain	1
Raised Cosine Receive Filter	
Parámetros	Valor
Rolloff	1
Filter span in symbols	80
Input samples per symbol	32
Decimation factor	32

En el caso del diagrama de bloques para Rx de la Figura 8, los cambios realizaron son el cambio de la ganancia del bloque *Automatic Gain Control* para reducir la amplitud de la señal recibida en el canal RX1A de la tarjeta RFC ARRadio, el bloque *Raised Cosine Receive Filter* se configura con los parámetros observados mostrados en Tabla 2 y el bloque *Rectangular QAM Demodulator Baseband* se configura para el modulador 32-QAM.

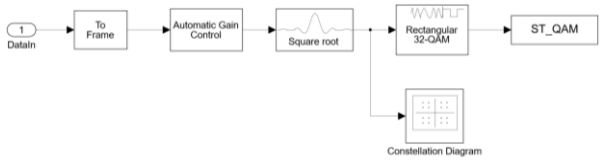


Figura 8: Bloque Rx 16-QAM para modulador 32-QAM.

3.5. Reconstrucción de la señal transmitida

Para reconstruir las señales transmitidas y recibidas durante la implementación con las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio, se realiza mediante la utilización de código de programación en lenguaje C con base al diagrama de flujo de la Figura 9, con la finalidad de compararla las señales recibidas con la señal original, para observar las distorsiones y el ruido provocado durante la transmisión.

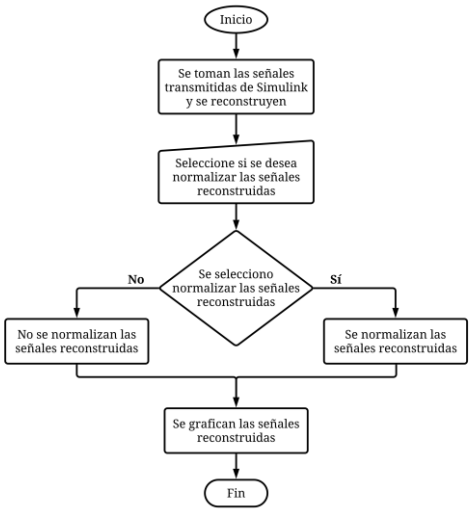


Figura 9: Diagrama de flujo para reconstruir las señales transmitidas.

En el diagrama de flujo, la señal original, la señal transmitida y la señal transmitida por la tarjeta RFC ARRadio se reconstruyen, se utilizan los valores binarios respectando la cantidad de bits que se utilizó para discretizar la señal, para convertirlos en valores numéricos. Se selecciona si se desea normalizar las señales reconstruidas, si se normaliza las señales los valores de voltajes tendrán valores entre 0 a 1, mientras que, si no se requiere normalizar la señal, esta conservara los valores enteros del modulador utilizado. Posteriormente se grafican en una misma figura las señales para observar las distorsiones y los cambios surgidos durante la transmisión.

3.6. Validación espectral de los moduladores n-QAM

Para la implementación de los moduladores con las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio se requiere las conexiones mostradas en la Figura 10, para conectar el canal TX1A a un analizador de espectro y realizar la evaluación espectral del modulador correspondiente.

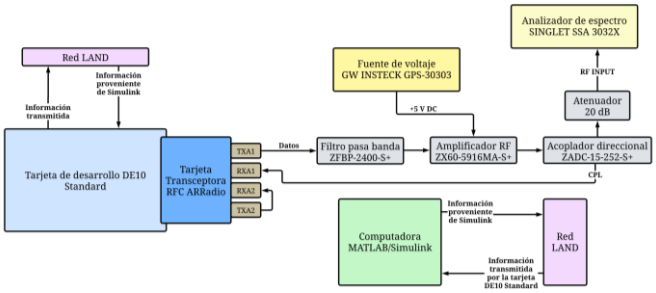


Figura 10: Diagrama de bloques de las conexiones con las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio.

El diagrama de las conexiones de las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio con el analizador de espectro se muestran en la Figura 11.

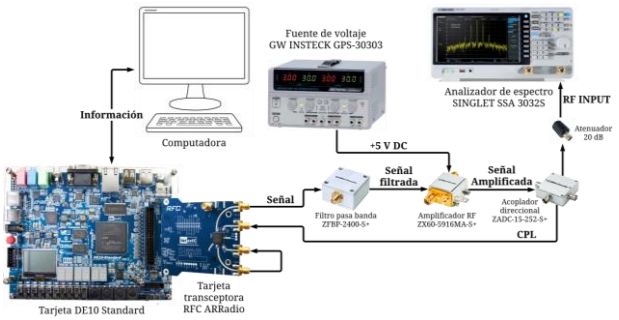


Figura 11: Diagrama de conexiones con las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio con el analizador de espectro.

Las conexiones físicas de las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio con los componentes y el analizador de espectro se presentan en la Figura 12.

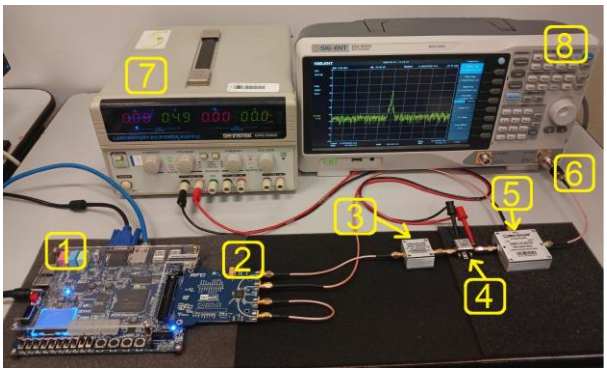


Figura 12: Conexión de las tarjetas DE10 Standard y ARRadio con el analizador de espectro.

Los componentes utilizados son los siguientes:

1. Tarjeta de desarrollo DE10 Standard;
2. Tarjeta RFC ARRadio;
3. Filtro pasa banda ZFBP-2400-S+;
4. Amplificador RF ZX60-5916MA-S+;
5. Acoplador direccional ZADC-15-252-S+;
6. Atenuador de 20 dB;
7. Fuente de voltaje GW INSTEK GPS-3303 con voltaje de 5 V;
8. Analizador de espectro SINGLET SSA 3032X.

La fuente de voltaje alimenta el amplificador con +5 V, en el analizador de espectro se conecta un atenuador de 20 dB en la entrada RF para proteger al equipo de un posible pico de potencia proveniente de las tarjetas y componentes, evitando que se provoque una falla en el equipo.

3.7. Cálculo del valor error cuadrático medio normalizado

Para el calcular el valor error cuadrático medio normalizado también conocido como NMSE, se recolectan los periodos de la señal transmitida con una menor cantidad de errores, mediante código de programación de lenguaje C se recolectan los periodos de la señal transmitida. En la Figura 13 muestra el diagrama de flujo para calcular el valor NMSE, en donde se introduce la cantidad máxima de muestras erróneas que puede tener el periodo recolectado, si presenta una cantidad mayor se descarta el periodo, al recolectar todos los periodos correctamente transmitidos, se toman la misma cantidad de muestras de la señal original, se grafican los periodos recolectados y se calcula el valor NMSE empleando (3).

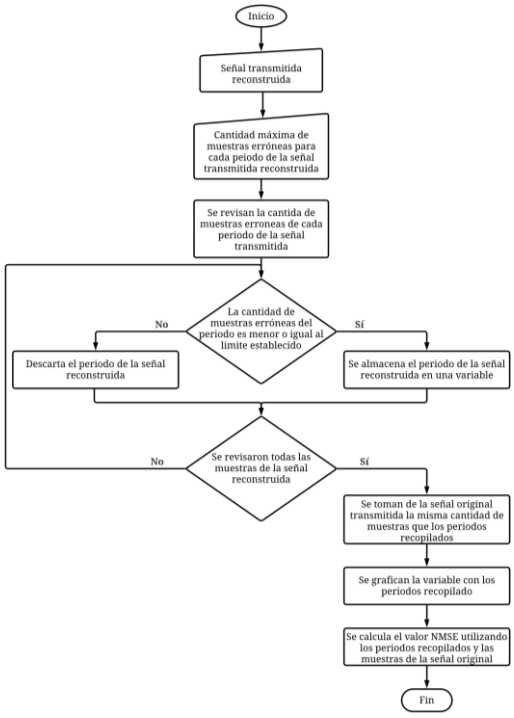


Figura 13: Diagrama de flujo para el cálculo del valor NMSE.

3.8. Cálculo del valor la relación de potencia de canal adyacente

Para calcular el valor de la relación de potencia del canal Adyacente conocido como ACPR de los moduladores 16-QAM y 32-QAM, se recopilan del analizador de espectro al momento de la implementación de los moduladores los datos de la potencia en decibeles (dB) y su frecuencia (Hz) de la evaluación cuando se transmite la señal. El diagrama de flujo de la Figura 14, describe el código en lenguaje de programación en C utilizado para calcular el ACPR, en donde se introducen los valores de la potencia con su frecuencia correspondiente, para separar las potencias de los canales central, derecho e izquierdo, para calcular el valor promedio y los valores ACPR de su respectivo canal empleando (4).

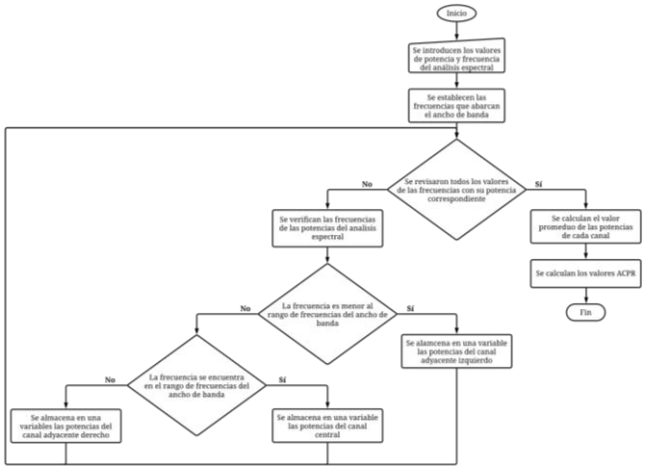


Figura 14: Diagrama de flujo para calcular el valor ACPR de la evaluación espectral con el analizador de espectro.

Resultados

3.9. Implementación del modulador 16-QAM

Se realizo implementación del modulador 16-QAM con las conexiones mostradas en la Figura 4 con las tarjetas DE10 Standard y RFC ARRadio, cuando se transmitía la señal sinusoidal, se realizó una captura de la constelación mostrada en la Figura 15, donde se observan errores de potencia y fase en los símbolos de la constelación durante la transmisión.

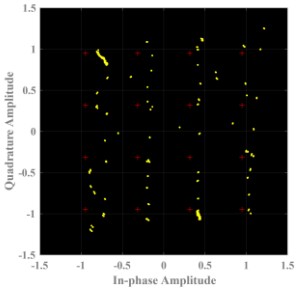


Figura 15: Captura de la constelación de una señal sinusoidal con modulador 16-QAM durante la implementación.

Al concluir la transmisión de la señal sinusoidal con el modulador 16-QAM, se reconstruye las señales transmitidas, las cuales se pueden observar en la Figura 16. La señal transmitida es similar a la señal original mientras que la señal transmitida utilizando la tarjeta RFC ARRadio muestra errores en algunos periodos de la señal. En algunos periodos no se transmitieron completamente o contienen ruido provocado durante la transmisión de la señal.

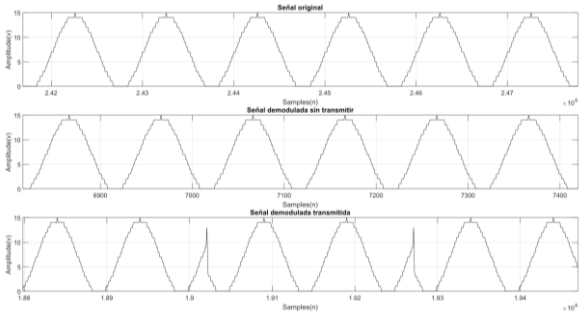


Figura 16: Señales sinusoidales reconstruidas del modulador 16-QAM al implementarse con la tarjeta RFC ARRadio.

En el caso de la señal diente de sierra al transmitirla con el modulador 16-QAM, se tomó la captura de la Figura 17 de la constelación durante la implementación, mostrando errores en la constelación de fase y potencia en los símbolos durante la transmisión de los datos.

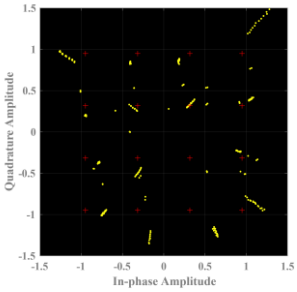


Figura 17: Captura de la constelación de una señal diente de sierra con modulador 16-QAM durante la implementación.

Las señales diente de sierra que se transmitieron con el modulador 16-QAM son reconstruidas y mostradas en la Figura 18, donde se observa que varios periodos se transmitieron de forma correcta, pero en algunos casos algunos periodos de la señal no se transmitieron completamente.

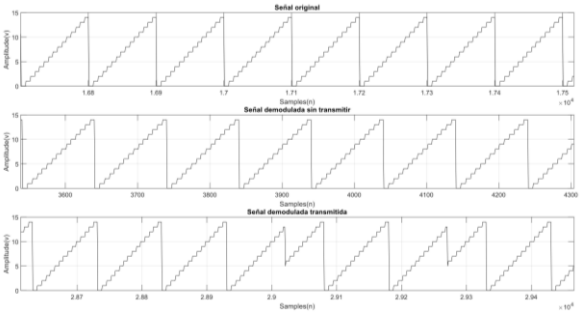


Figura 18: Señales diente de sierra reconstruidas del modulador 16-QAM al implementarse con la tarjeta RFC ARRadio.

3.10. Implementación del modulador 32-QAM

Con el modulador 32-QAM se transmitió la señal sinusoidal, en la Figura 19 se visualiza una captura de la constelación durante la implementación del modulador 32-QAM, en donde se presenta errores de fase y potencia en los símbolos de la constelación al momento de transmitir la señal.

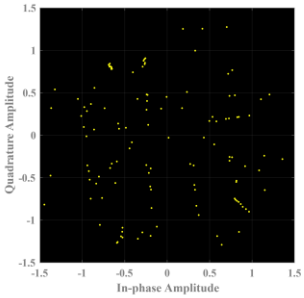


Figura 19: Captura de la constelación de una señal sinusoidal con modulador 32-QAM durante la implementación.

Al finalizar la implementación del modulador 32-QAM con la señal sinusoidal, se reconstruyen las señales sinusoidales transmitidas, las cuales se muestran en la Figura 20, donde al comparar la señal senoidal transmitida utilizando la tarjeta RFC ARRadio con las señales original y la transmitida, esta presenta una mayor cantidad de distorsiones y ruido en los periodos.

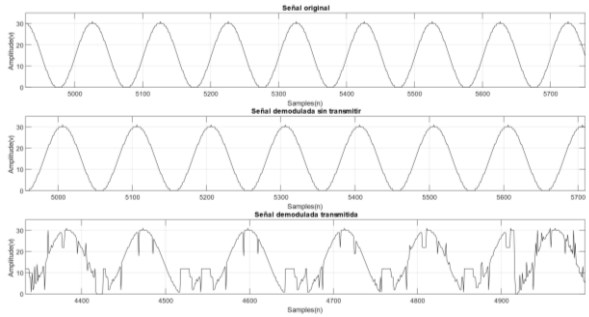


Figura 20: Señales sinusoidales reconstruidas del modulador 32-QAM al implementarse con la tarjeta RFC ARRadio.

En la implementación del modulador 32-QAM con la señal diente de sierra, se tomó la captura de la constelación que se muestra en la Figura 21 durante la transmisión de la señal

diente de sierra, se presentan errores de fase y potencia son más notorios que cuando se transmite la señal en el modulador 16-QAM, debido al orden del modulador empleado.

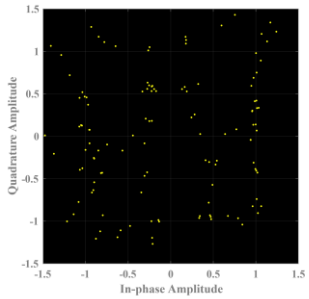


Figura 21: Captura de la constelación de una señal diente de sierra con modulador 32-QAM durante la implementación.

Al concluir la implementación del modulador 32-QAM con la señal diente de sierra, se reconstruyen las señales diente de sierra y se muestran en la Figura 22, la señal transmitida con la tarjeta RFC ARRadio presenta distorsiones y errores de ruido en todos los periodos, a comparación de las señales original y la señal transmitida.

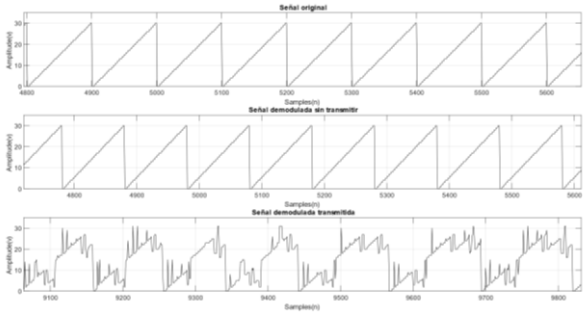


Figura 22: Señales diente de sierra reconstruidas del modulador 32-QAM al implementarse con la tarjeta RFC ARRadio.

Las señales reconstruidas que se transmitieron con el modulador 32-QAM presentan una mayor similitud con las señales periódicas originales sin discretizar a comparación de las señales transmitidas por el modulador 16-QAM, esto es debido a la cantidad de bits que maneja cada modulador y voltajes que manejan los moduladores. Las señales sinusoidales presentan más similitud con la señal original discretizada a comparación de la señal diente de sierra que esta más distorsionada.

3.11. Validación espectral del modulador 16-QAM y el modulador 32-QAM

Mediante una validación espectral con el analizador espectral Singlet SSA 3032X, conectando el canal TX1A de la tarjeta RFC ARRadio a un acoplador direccional siendo el modelo ZADC-15-252+, para conectar el CPL al canal RX1A de la tarjeta RFC ARRadio, mientras que el canal de salida del acoplador direccional se conecta la entrada RF INPUT del analizador de espectro, la cual tiene un atenuador de 20 dB. El analizador de espectro se configura para mostrar un rango de frecuencias en la pantalla de 2.38 GHz a 2.42 GHz.

Al realizar el análisis espectral con el analizador de espectro cuando se transmite la señal sinusoidal con el modulador 16-QAM, se tomó la captura que se presenta en la Figura 23, en el cual se indica que la potencia pico se encuentra en la frecuencia de 2.4 GHz con un valor de -40.8 dBm, pero debido a que se utiliza un atenuador de 20 dB en la entrada RF INPUT del analizador, la potencia pico real es de -20.8 dBm.



Figura 23: Análisis espectral del modulador 16-QAM con la señal sinusoidal.

En el caso de la validación espectral para el modulador 32-QAM cuando se transmite la señal diente de sierra, el análisis espectral de la Figura 24, obtenida con el analizador de espectro, muestra que la potencia pico es de -44.49 dBm, siendo realmente de -24.49 dBm, en la frecuencia de 2.4 GHz.

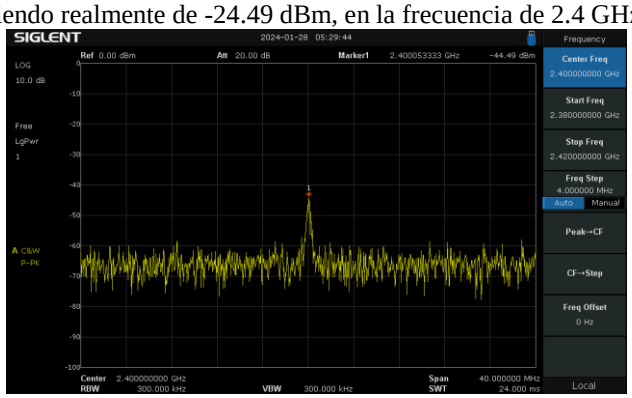


Figura 24: Análisis espectral del modulador 32-QAM de la señal diente de sierra.

Los valores de las potencias picos obtenidas con el análisis espectral realizados a los moduladores con las señales sinusoidal y diente de sierra se muestran en la Tabla 3, todas las potencias se encuentran en la frecuencia de 2.4 GHz.

Tabla 3: Potencias pico de los moduladores al implementarse con el analizador de espectro.

Modulador 16-QAM		
Tipo de señal	Potencia pico medida	Potencia pico real
Sinusoidal	-40.8 dBm	-20.8 dBm
Diente de sierra	-41.3 dBm	-21.3 dBm
Modulador 32-QAM		
Tipo de señal	Potencia pico medida	Potencia pico real
Sinusoidal	-43.33 dBm	-23.33 dBm
Diente de sierra	-44.49 dBm	-24.49 dBm

3.12. Implementación de los moduladores con un amplificador RF y el analizador de espectro

Para realizar la implementación con el amplificador RF se realizaron las conexiones de la Figura 12, en donde el filtro pasa banda ZFBP-2400-S+ que cubre un ancho de banda de

2400 MHz ± 100 MHz y el amplificador RF ZX60-5916MA+ con una potencia de salida de hasta 17 dB.

En la implementación del modulador 16-QAM cuando se transmite la señal diente de sierra, el análisis espectral de la Figura 25, muestra que la potencia pico se encuentra en la frecuencia de 2.4 GHz con un valor de -26.93 dBm, mientras que la potencia pico real proveniente del amplificador tiene un valor de -6.93 dBm, debido al atenuador.

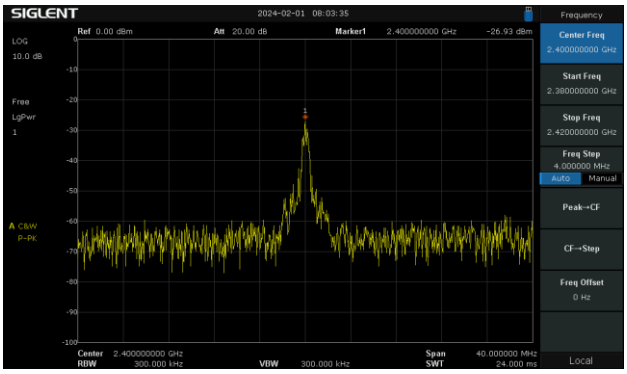


Figura 25: Análisis espectral del modulador 16-QAM con el filtro pasa banda y amplificador con la señal diente de sierra.

La implementación con el modulador 32-QAM con la señal sinusoidal, mostro en el análisis espectral de la Figura 26, que la potencia pico medida es de -28.93 dBm debido a que se está utilizando un atenuador de 20 dB en la entrada del analizador de espectro, pero la potencia real proveniente del amplificador es de -8.93 dBm, en la frecuencia de 2.4 GHz.

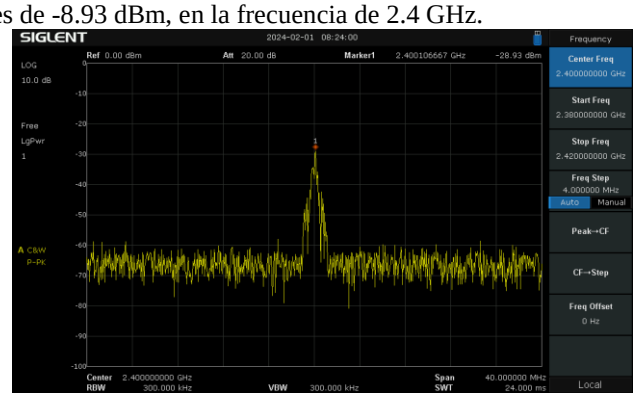


Figura 26: Análisis espectral del modulador 32-QAM con el filtro pasa banda y amplificador con la señal sinusoidal.

Las potencias pico medidas de las implementaciones con el amplificador se muestran en la Tabla 4, además de mostrar la potencia real de cada modulador con su respectiva señal periódica transmitida, también se presenta el valor de la potencia que se amplifico la señal transmitida tomando en consideración los valores mostrados en la Tabla 3.

3.13. Valor NMSE de las señales transmitidas

Con las señales reconstruidas que se transmitieron con el modulador 16-QAM, se calcula el valor NMSE. Para el cálculo NMSE se transmitieron las señales utilizando distintos componentes, se utilizaron dos atenuadores de 10 dB y 20 dB en el canal RXA1, con la finalidad de observar algún cambio en los valores NMSE. La cantidad máxima de muestras erróneas consideras para recolectar los periodos es de 25, cada periodo está compuesto por 100 muestras, las señales reconstruidas tienen un total de 77000 de muestras totales.

Tabla 4: Potencias pico de los moduladores al implementarse con el analizador de espectro con el amplificador.

Modulador 16-QAM			
Tipo de señal	Potencia pico medida	Potencia pico real	Potencia amplificada
Sinusoidal	-24.85 dBm	-4.85 dBm	15.95 dBm
Diente de sierra	-26.93 dBm	-6.93 dBm	14.37 dBm
Modulador 32-QAM			
Tipo de señal	Potencia pico medida	Potencia pico real	Potencia amplificada
Sinusoidal	-28.93 dBm	-8.93 dBm	14.4 dBm
Diente de sierra	-29.3 dBm	-9.3 dBm	15.19 dBm

Los periodos recopilados de la señal sinusoidal sin atenuador se muestran en la Figura 27.

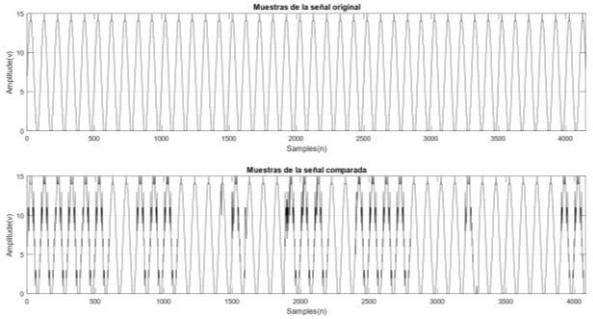


Figura 27: Periodos transmitidos recopilador de la señal sinusoidal para el modulador 16-QAM sin atenuador.

Mientras que en la Figura 28, se muestran los periodos de la señal diente de sierra utilizando el amplificador RF.

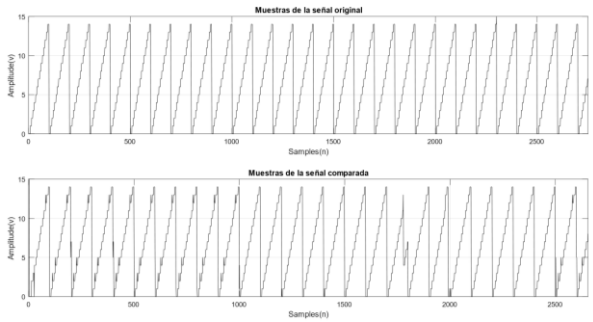


Figura 28: Periodos transmitidos recopilador de la señal diente de sierra para el modulador 16-QAM con amplificador RF.

En la Tabla 5 se muestran los componentes utilizados al momento de transmitir las señales, la cantidad de muestras recopiladas para calcular el valor NMSE y su porcentaje con respecto a la cantidad total de muestras.

3.14. Valor ACPR de las señales transmitidas

Con los datos recopilados del análisis espectral de los moduladores sin el amplificador RF, se calculan los valores ACPR con las potencias en dB y sus respectivas frecuencias. En la Tabla 7 se muestran los valores ACPR de cada canal de los moduladores con su señal transmitida.

En el caso de los datos recopilados del análisis espectral de los moduladores con el amplificador RF, se calculan los valores ACPR de los canales, mostrados en la Tabla 8.

Tabla 5: Cantidad de muestras recopiladas para el valor NMSE por el modulador 16-QAM.

Tipo de señal	Componente utilizado	Muestras	Porcentaje
Sinusoidal	Sin atenuador	12200	15.844 %
Sinusoidal	Atenuador 10 dB	4800	6.233 %
Sinusoidal	Atenuador 20 dB	24400	31.688 %
Sinusoidal	Amplificador	7600	9.87 %
Diente de sierra	Sin atenuador	55100	71.558 %
Diente de sierra	Atenuador 10 dB	53300	69.220 %
Diente de sierra	Atenuador 20 dB	53100	68.961 %
Diente de sierra	Amplificador	54800	71.168 %

Los valores NMSE calculados se muestran en la Tabla 6, donde también se muestran los valores NMSE en decibeles.

4. Conclusiones

El diseño con moduladoras variables de órdenes n-QAM permite transmitir señales no sólo periódicas sino de información mensaje variable, de tipo biomédico, audio, voz, video bajo portadoras en la banda de los 2 GHz.

Tabla 6: Valores NMSE con el modulador 16-QAM.

Tipo de señal	Componente utilizado	Valor NMSE	Valor NMSE (dB)
Sinusoidal	Sin atenuador	$1.08x10^{-2}$	-19.662 dB
Sinusoidal	Atenuador 10 dB	$2.01x10^{-2}$	-16.957 dB
Sinusoidal	Atenuador 20 dB	$5.89x10^{-3}$	-22.291 dB
Sinusoidal	Amplificador	$1.00x10^{-2}$	-19.983 dB
Diente de sierra	Sin atenuador	$3.47x10^{-2}$	-14.594 dB
Diente de sierra	Atenuador 10 dB	$3.56x10^{-2}$	-14.476 dB
Diente de sierra	Atenuador 20 dB	$3.52x10^{-2}$	-14.533 dB
Diente de sierra	Amplificador	$3.62x10^{-2}$	-14.412 dB

Tabla 7: Valores ACPR de los moduladores al transmitir sin el amplificador.

Modulador 16-QAM			
Tipo de señal	Canal izquierdo	Canal central	Canal derecho
Sinusoidal	-22.124 dBm	-22.141 dBm	-22.159 dBm
Diente de sierra	-21.952 dBm	-22.089 dBm	-22.225 dBm
Modulador 32-QAM			
Tipo de señal	Canal izquierdo	Canal central	Canal derecho
Sinusoidal	-18.478 dBm	-18.620 dBm	-18.763 dBm
Diente de sierra	-18.976 dBm	-18.937 dBm	-18.898 dBm

Tabla 8: Valores ACPR de los moduladores al transmitir con el amplificador.

Modulador 16-QAM			
Tipo de señal	Canal izquierdo	Canal central	Canal derecho
Sinusoidal	-34.453 dBm	-34.370 dBm	-34.286 dBm
Diente de sierra	-33.863 dBm	-33.466 dBm	-33.070 dBm
Modulador 32-QAM			
Tipo de señal	Canal izquierdo	Canal central	Canal derecho
Sinusoidal	-32.235 dBm	-32.305 dBm	-32.375 dBm
Diente de sierra	-32.902 dBm	-32.754 dBm	-32.606 dBm

Con los valores ACPR obtenidos, se pudo observar que los moduladores 32-QAM presenta un mayor valor ACPR, a comparación al modulador 16-QAM, teniendo una diferencia entre los moduladores entre -3 a -4 dB, pero al utilizar un amplificador RF esta diferencia se reduce entre -0.5 a -2.5 dB. Por lo cual es más conveniente usar el modulador 16-QAM si se requiere un ACPR menor. La diferencia entre los valores ACPR obtenidos con el amplificador RF y sin él es de entre -9 a -14 dB, por lo cual, el uso del amplificador RF produce que los valores ACPR sean menores.

La precisión obtenida y los niveles de ACPR alcanzados otorgan al sistema una precisión fiable para el manejo de señales, adicionalmente se puede llevar a una etapa de potencia mediante RF-PAs y transmisión inalámbrica.

5. Trabajo a futuro

En un trabajo a futuro se puede realizar los moduladores mediante código de programación en lenguaje C, modificando los parámetros en la transmisión para presentar una menor cantidad de ruido y distorsión al momento de transmitir en los moduladores y que la constelación no presente una gran cantidad de errores de fase y potencia en los símbolos. También se pueden utilizar moduladores de mayor grado para realizar las comparaciones, además de agregar otros parámetros para analizar como lo puede ser el error de magnitud del vector (EVM).

Adicionalmente se puede realizar una etapa de corrección de balance de los canales I-Q, con el fin de corregir defasamiento en la frecuencia portadora de RF y garantizar un defase de 90º entre los canales, esto mejora sustancialmente la calidad espectral de los símbolos n-QAM transmitidos.

Agradecimientos

Los autores agradecemos el apoyo recibido por parte del Instituto Tecnológico de Tijuana y al TECNM por los proyectos financiados 20586.24-P y 20998.24-P.

Referencias

Andronov, V. G., Mukhin, I. E., Babanin, I. G., Sevryukov, A. E., Koptev, D. S., & Chuev, A. A. (2020). Analytical evaluation of equivalent energy loss in causal frequency selection filters in the processing of quadrature

amplitude modulation signals. Journal of Physics: Conference Series, 1679, 032006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/3/032006

Bala, D., Islam, N., Abdullah, I., Hossain, M. A., & Alam, S. (2020). Analysis the Performance of OFDM Using BPSK, QPSK, 64-QAM, 128-QAM & 256-QAM Modulation Techniques. Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science, 7(2), 31-38.

Bilim, M. (2020). Different QAM schemes analyses for ARS fading channels. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. https://doi.org/10.1002/ett.4119

Enzinger, H. (2018). Behavioral modeling and digital predistortion of radio frequency power amplifiers. Ph. D. dissertation.

Estupiñán Calderón, D. A. (2020). Beamforming performance assessment for QAM and OFDM modulation schemes in MIMO wireless systems.

Fernández Díaz, J. A. (2020). Modelado no lineal de comportamiento de un amplificador de potencia basado en el modelo DVR. Universidad de Sevilla.

Isaksson, M., Wisell, D., & Ronnow, D. (2006). A comparative analysis of behavioral models for RF power amplifiers. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 54(1), 348-359.

Li, X. (2008). Simulink-based simulation of quadrature amplitude modulation (QAM) system. In Proceedings of the 2008 IAJC-IJME International Conference.

Mallick, K., Mandal, P., Dutta, B., Kuiri, B., Santra, S., Mukherjee, R., & Patra, A. S. (2021). Bidirectional OFDM-MMWOF transport system based on mixed QAM modulation format using dual mode colorless laser diode and RSOA for next generation 5-G based network. Optical Fiber Technology, 64, 102562. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102562

Mei, L., Gou, J., Cai, Y., Cao, H., & Liu, Y. (2022). Realtime mobile bandwidth and handoff predictions in 4G/5G networks. Computer Networks, 204, 108736. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108736

Murillo Fuentes, J. J. (2007). Fundamentos de radiación y radiocomunicación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros.

Myung, H. G. (2007, September). Introduction to single carrier FDMA. In 2007 15th European signal processing conference (pp. 2144-2148). IEEE.

Pérez Vega, C., Zamanillo Sáinz de la Maza, J. M., & Casanueva López, A. (2007). Sistemas de telecomunicación. Universidad de Cantabria.

Rodríguez, A. A., González, F. P., Sueiro, J. C., Valcarce, R. L., Nartallo, C. M., & Cruz, F. P. (2007). Comunicaciones digitales. Pearson.

Shah, A., & Thakur, A. (2022). Analysis of 64-qam and 128-qam modulation technique in digital communication system using simulink. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 7(2), 381–386.

Sumithra Sofia, D., & Shirly Edward, A. (2021). Overlay dynamic spectrum sharing in cognitive radio for 4G and 5G using FBMC. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.038

Tehrani, A. S. (2012). Behavioral modeling of wireless transmitters for distortion mitigation. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

Tomasi, W. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas (4a ed.). Pearson educación.