



Análisis comparativo de técnicas avanzadas de modulación empleadas en la próxima generación de TDT.

Comparative analysis of advanced modulation techniques used in the next generation of TDT.

MSc. Ing. Yanela Varela Méndez¹, MSc. Ing. Fidel V. Giró Uribazo²

¹Universidad de Oriente, Avenida de las Américas s/n, ²Universidad de Oriente, Avenida de las Américas s/n.
¹e-mail: yvarela@uo.edu.cu

RESUMEN

Para la próxima generación de televisión digital estándar, se desarrollan los sistemas ATSC 3.0 para radiodifusión terrestre y NGH-W para telefonía móvil, los cuales proporcionan mejoras significativas en la eficiencia del espectro. Este aumento de la eficiencia espectral se logra a partir del uso de nuevas técnicas para la capa física, las cuales tienen entre sus novedades la utilización de constelaciones QAM no uniformes. El presente trabajo realiza un estudio de estas constelaciones no uniformes (NUC) y realiza una comparación con las ya existentes constelaciones uniformes (UC), mostrando aspectos de la capa física. Teniendo en cuenta lo mencionado con anterioridad, se simulan los bloques BHC, LDPC e Interleaver, los cuales conforman la parte principal del bloque BICM y luego el modulador que permite obtener las NUC 1D y 2D, con modulación M-QAM, para valores de M igual a 16, 64 y 256. Posteriormente el canal y el receptor, donde se calculan los valores de la tasa de bit erróneo (BER) para un canal con ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN) y un canal con desvanecimiento (Rayleigh), así como la eficiencia espectral y la relación entre la potencia pico y la potencia promedio (PAPR). Además, se implementa una interfaz gráfica para la simulación y posterior evaluación de las constelaciones, a partir de la herramienta de simulación MATLAB. Los resultados obtenidos para los parámetros indicadores de calidad logran establecer la superioridad de las constelaciones no uniformes versus las uniformes.

PALABRAS CLAVES: Televisión Digital, Constelaciones no uniformes, QAM, ATSC 3.0.

ABSTRACT

For the next generation of standard digital television, ATSC 3.0 systems for terrestrial broadcasting and NGH-W for mobile telephony are being developed, which provide significant advances in spectrum efficiency. This increase in spectral efficiency is achieved with the use of new techniques for the physical layer, which have among their novelties the use of non-uniform QAM constellations. The present work studies of these non-uniform constellations (NUC) and makes a comparison with the uniform constellations (UC), showing aspects of the physical layer. Keeping in mind the previously mentioned aspect, are simulated the BHC, LDPC and Interleaver blocks, which form the main part of the BICM block and then the modulator to obtain the NUC 1D and 2D, with M-QAM modulation, for M values equal to 16, 64 and 256. Subsequently the channel and the receiver, where the bit error rate (BER) values are calculated for a channel with additive white gaussian noise (AWGN) and a channel with fading (Rayleigh), as well as the spectral efficiency and the peak to average power ratio (PAPR). In addition, a graphical interface is implemented for the simulation and evaluation of the constellations, using the software, Matlab R2015. The results obtained for the parameters of quality indicators are achieved to establish the superiority of non- uniform constellations versus uniform constellations.

KEY WORDS: Digital Television, Non-Uniform Constellations (NUC), QAM, ATSC 3.0.



1. INTRODUCCIÓN

El despliegue de la Televisión Digital Terrestre (TDT) es un proyecto integral de creación de infraestructura social, con la finalidad de beneficiar y mejorar el nivel de vida de toda la población, introduciendo una tecnología de punta. Entre sus objetivos está anticiparse a la inevitable obsolescencia tecnológica de la televisión analógica y su desarrollo ha revolucionado la industria de servicios interactivos multimedia, incrementando la capacidad del canal, introduciendo movilidad y facilitando la convergencia de transmisión de datos, difusión de televisión y telefonía [1].

La TDT aporta diversas ventajas como la posibilidad de comprimir la señal, lo que implica que esta requiere un ancho de banda menor para su transmisión. Como resultado, se puede efectuar un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Tras proceder a su multiplexación, se pueden emitir más canales en el espacio antes empleado por uno, denominado ahora canal múltiple digital o multiplex. Puesto que en el ancho de banda empleado por un canal analógico ahora se pueden transmitir varios programas digitales, la emisión digital aporta un importante ahorro energético por canal. Ello implica una reducción de costos para los radiodifusores. Otra ventaja aportada por la TDT es una mejora de la calidad de la imagen y el sonido en el momento de la recepción. Puesto que ambos están codificados de manera digital, cuando se produce alguna distorsión en la señal, aquella puede ser corregida por el receptor [2].

Por otro lado, uno de los mayores quebraderos de cabeza en el mundo de las telecomunicaciones es el uso eficiente del espectro radioeléctrico. Actualmente, este recurso se encuentra saturado debido a su uso ineficiente y a la continua aparición de nuevas tecnologías que necesitan ser ubicadas en un rango de frecuencias determinado. El primer gran cambio realizado en las señales de radiodifusión fue la entrada de la televisión digital, la cual permitió introducir varios servicios televisivos en un único canal con el consiguiente ahorro de frecuencias necesarias [3]. En un futuro se pretende seguir la reducción de las frecuencias asignadas a la televisión digital para ubicar otros servicios, por lo que es imprescindible encontrar nuevos métodos y tecnologías que permitan ofrecer servicios televisivos de mayor calidad como UHDTV (*Ultra High Definition Television*) o 3DTV (*Three Dimensions Television*) y, a la vez, hagan uso de menos recursos espectrales. Estos objetivos son los impuestos en los futuros estándares de televisión el NGB-W desarrollándose en China para telefonía móvil y similarmente en América el ATSC 3.0 para radiodifusión terrestre, los cuales pretenden ofrecer servicios de mayor calidad que los actuales ocupando un menor rango de frecuencias, este último apunta a convertirse en la tecnología de radiodifusión terrestre de referencia en todo el mundo, superando los estándares existente [4], [5] y aprovechando las investigaciones recientes de radiodifusión digital [6]-[8]. Además, varios autores han expuesto que las constelaciones QAM uniformes utilizadas hasta ahora en sistemas de radiodifusión terrestres no son las más óptimas en términos de capacidad y que se puede aumentar su eficiencia utilizando constelaciones no uniformes de una y dos dimensiones [9]-[13]. Dos de los principales campos de actuación donde se consigue un aumento de la eficiencia espectral con técnicas cada vez más innovadoras son la planificación de las redes de radiodifusión terrestre y su capa física. Este trabajo centra su estudio en las técnicas de modulación empleadas en las nuevas tecnologías para la capa física que permiten una mejora en la eficiencia espectral de los sistemas de radiodifusión de próxima generación.

2. FUNDAMENTOS DE LAS CONSTELACIONES

Una constelación es la forma en la que se envían los diferentes bits en un sistema de comunicaciones digitales. Estos bits se transportan en símbolos (compuestos de dos componentes, una en fase y otra en cuadratura) de la constelación, y un símbolo puede estar compuesto de uno o más bits (dependiendo el tipo de constelación utilizada). Las constelaciones uniformes se caracterizan por su forma cuadrada y distribución uniforme de los símbolos. Además, se llevan utilizando desde hace mucho tiempo en sistemas de comunicaciones.

Recientemente, se han propuesto constelaciones no uniformes para sistemas de radiodifusión. Se ha demostrado que la capacidad de un sistema de comunicaciones puede incrementarse si todos los puntos de la constelación se adaptan al rango de SNR (relación entre la potencia y el ruido recibido) en el que trabaja el sistema. Esto significa que para cada valor de SNR, hay una única posición para cada símbolo de la constelación que maximiza la capacidad del sistema, es decir, para una misma capacidad del sistema, esta técnica proporciona un valor más alto de SNR que el obtenido con una constelación uniforme [12].



Constelaciones uniformes

La modulación digital de amplitud en cuadratura uniforme (QAM) tiene como entrada un flujo de datos binarios, el cual es dividido en grupos de tantos bits como se requieran para generar M estados de modulación, denominándose M-QAM. En general, cada grupo de n-bits genera $2^n=M$ estados de modulación. Para representar los estados de modulación posibles en los distintos tipos de modulación digital, se utiliza el llamado diagrama de constelación en analogía con la astronomía. Los puntos de la "constelación" están uniformemente dispuestos en una rejilla cuadrada con igual separación vertical y horizontal, aunque son posibles otras configuraciones. Puesto que en las telecomunicaciones digitales los datos son binarios, el número de puntos del diagrama es una potencia de dos [14].

Las formas más comunes son 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM. Al cambiar a una constelación de orden superior, es posible transmitir más bits por símbolo. Sin embargo, si la "energía promedio" de la constelación sigue siendo la misma, los puntos deben estar más cercanos y son por lo tanto más susceptibles al ruido y la distorsión, lo que resulta en una tasa de bits de error más alta y así la QAM de orden superior puede ofrecer más datos, pero menos confiables que la QAM de orden inferior.

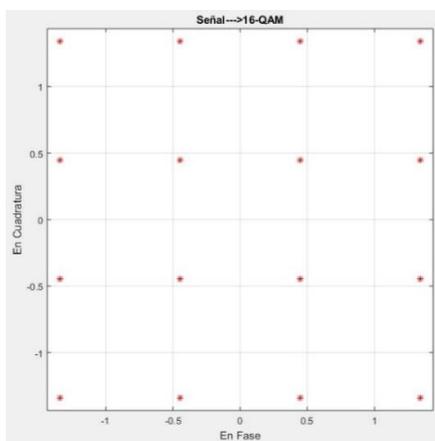


Figura 1: Constelación 16-QAM uniforme

Las modulaciones digitales, utilizan un modulador en cuadratura para generar los símbolos. En concreto, y para una frecuencia portadora (f_c), se puede expresar el pulso de salida del emisor como:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} a_i p(t - iT_s) \cos(2\pi f_c t) + \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} b_i p(t - iT_s) \sin(2\pi f_c t) \tag{2)-(1)}$$

Donde $p(t)$ es el pulso conformador:

$$p(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 < t < T_s \\ 0, & \text{otros valores} \end{cases} \tag{2)-(2)}$$

$$a_i = \mp 1, b_i = \mp 1.$$

Estos valores son transmitidos como un único número complejo y el demodulador decide a partir de este número a que símbolo corresponden dentro de la constelación. Se pueden interpretar estas modulaciones como dos modulaciones de amplitud variable (ASK) independientes transmitidas en paralelo, una en el canal en fase (I) y la otra en el de cuadratura (Q). Visto de este modo, se observa que en recepción se necesitan los valores tanto de I como de Q para una correcta detección del símbolo, ya que la estimación del valor de I no da información sobre el valor de Q y viceversa, y en consecuencia si se produce un error en recepción en alguno de los canales no se puede recuperar el símbolo correctamente [14].

Constelaciones no uniformes

Existen dos tipos de constelaciones no uniformes: Constelaciones no uniformes de una dimensión y constelaciones no uniformes de dos dimensiones.

En las constelaciones no uniformes de una dimensión (figura 2), se optimiza cada símbolo con respecto a un único eje de los dos posibles, lo que simplifica la complejidad de diseño de estas constelaciones. Estas



constelaciones se pueden demapear (obtener los bits recibidos a partir de los símbolos recibidos) con un simple demapeador de una dimensión.

Las desventajas que presentan son, por un lado, el empeoramiento existente para valores de SNR menores de 11 dB y, por otro que, al optimizar las constelaciones respecto a un solo eje, los grados de libertad de búsqueda de constelaciones optimizadas son menores y, por tanto, las constelaciones no son las más óptimas.

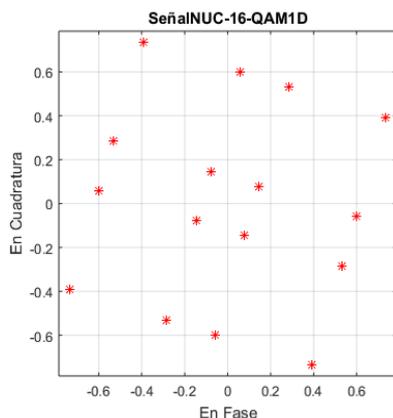


Figura 2: Constelación 16 QAM no uniformes de 1D

Constelaciones no uniformes de dos dimensiones: En este caso, cada símbolo se optimiza con respecto a ambos ejes, resultando constelaciones con una forma circular como se muestra en la figura 3. La ventaja que presentan es el incremento de la capacidad del sistema con respecto a las constelaciones no uniformes de una dimensión y las uniformes. Sin embargo, presentan una serie de desventajas ya que la complejidad de diseño y el procesado en la etapa de recepción (es necesario un demapeador de dos dimensiones) es mayor que en el caso de las constelaciones no uniformes de una dimensión y las uniformes debido al mayor número de variables involucradas [10].

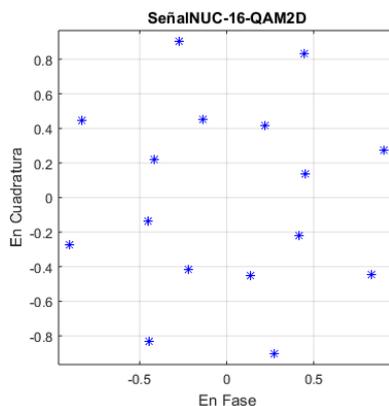


Figura 3: Constelación 16 QAM no uniformes de 2D

Para la obtención de las constelaciones no uniformes, se tiene como primer paso la rotación de la constelación, técnica utilizada en la modulación digital, básicamente en las modulaciones M-QAM, que consigue mejoras en la robustez (disminución del error de símbolo) y la eficiencia de la transmisión a partir de rotar las constelaciones de símbolos originales en un ángulo determinado. La idea básica es que los símbolos puedan reconstruirse a partir del valor de un único eje de la constelación, de forma que, si se pierde el valor del otro eje durante la transmisión, todavía se pueda reconstruir el símbolo enviado [15]. La ganancia que puede presentar una constelación no uniforme en dos dimensiones respecto a una de una dimensión o una uniforme puede ser de varios dB para constelaciones de orden alto (para constelaciones de orden alto, el número de puntos a optimizar es mayor).

Como se ha visto anteriormente, el objetivo es hacer que las transmisiones de los dos canales no sean independientes entre sí, aumentando así la correlación entre estos. Como solución a este problema se ideó la rotación de la constelación. Se observa en la figura 4 que si anteriormente se tenían 4 valores de amplitud

(PAM o *Pulse Amplitude Modulation*) para cada eje, ahora hay 16 para cada eje, de forma que el 16-QAM rotado se parece a un 256-QAM.

Intuitivamente, ya se entiende que, si durante la transmisión se pierde el valor de uno de los ejes, con el valor del otro eje ya se tendría suficiente para poder determinar una posición dentro de la constelación. En este caso, el valor de I sí que brinda la información sobre el valor de Q y viceversa. La figura 5 muestra un ejemplo de cómo obtener esta rotación [15].

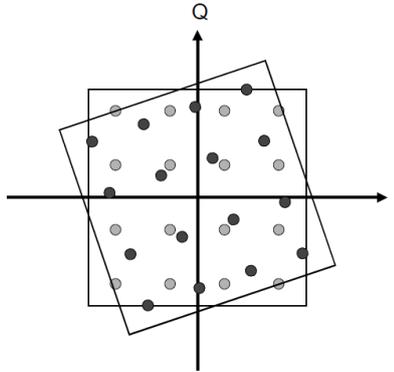


Figura 4: Constelación 16-QAM rotada

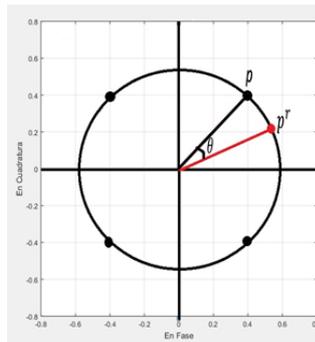


Figura 5: Constelación 4-QAM

Los puntos p^R y p se pueden relacionar de la siguiente forma:

$$[p^R \quad p^Q] = [p^I \quad p^Q] * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2) - (3)$$

Donde θ es el ángulo de rotación y los puntos en cada eje se pueden expresar como:

$$x_i = a_i \cos(\theta) + b_i \sin(\theta) \quad (2) - (4)$$

$$y_i = -(a_i) \sin(\theta) + b_i \cos(\theta) \quad (2) - (5)$$

y, por lo tanto, el nuevo pulso de salida del emisor se expresaría como:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} x_i p(t - iT_s) \cos(2\pi f_c t) + \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} y_i p(t - iT_s) \sin(2\pi f_c t) \quad (2) - (6)$$

Donde el parámetro K corresponde a un retraso temporal en el canal de cuadratura. Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, se determinan los ángulos para la simulación de las constelaciones giradas, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1: Ángulos utilizados en los esquemas de constelación

Modulación	16-QAM	64-QAM	256-QAM
θ (grados)	16.8	8.6	$\text{atan}(1/16)$



Con la rotación de la constelación se logran correlacionar los canales I-Q, lo cual facilita la tarea de decisión de los símbolos en el receptor ya que no necesita la información completa (dígase I y Q) para lograr una decisión acertada. Una vez que se generan los símbolos según la nueva constelación rotada, no tendría sentido enviarlos al mismo tiempo, ya que si una interferencia ocurriese durante la transmisión, afectaría a los dos símbolos por igual y todo este proceso no tendría sentido, en el receptor no podría reconstruir el símbolo. En consecuencia, es vital separar los dos componentes de forma que el ruido les afecte de manera distinta a cada uno y existan mayores posibilidades de recibir al menos una parte del símbolo bien, porque debido a la rotación con esta única información se tiene suficiente [16].

Para conseguir esta separación entre canales se utiliza un entrelazado coordinado que separa de forma distinta los valores según el canal, de forma que siempre el canal (Q) estará desfasado un tiempo de pulso con respecto al canal (I). Dicho de forma sencilla, se introduce un retardo de un tiempo de pulso en el canal de cuadratura, retardo que corresponde al parámetro k de la fórmula 2.6. Es importante resaltar que este paso es vital para el buen funcionamiento del sistema y que toda rotación de la constelación requiere también de un retardo en el canal de cuadratura. Se consigue disminuir la probabilidad de error de símbolo en recepción para una misma relación señal-ruido. Cuanto más grandes son los valores de relación señal-ruido, más eficaz es la rotación de la constelación. Por lo tanto, en un canal ruidoso, la utilización de esta técnica permitirá tener más robustez y en transmisión de señales audiovisuales esta técnica ayuda a poder reducir la SNR (*Signal-Noise Ratio*) al mínimo necesario, hecho que la convierte en una técnica muy valiosa [17].

Otros diseños de esquemas de constelaciones más eficientes se han propuesto a lo largo de los años como [18], [19]. Sin embargo, muchos de los sistemas de comunicación que actualmente se utilizan están basados en la llamada arquitectura BICM. Por lo tanto, para obtener esquemas con constelaciones óptimas que aumenten la eficiencia espectral del sistema, es necesario ver la ecuación de la capacidad del canal BICM, descrita en [20]. Esta ecuación muestra que la capacidad del canal BICM para un canal en particular depende principalmente de dos parámetros: la posición de los puntos de la constelación y la relación señal a ruido (SNR). De hecho, para cada valor de SNR existe un esquema de constelación óptimo.

Esquema en bloques del sistema NUC

El diseño propuesto para realizar la comparación entre las UC y las NUC se muestra en la Fig. 6, donde una cadena de simulación BICM basada en ATSC 3.0 [21] es usado. Como se muestra en la Fig. 7, esta cadena BICM consta de tres bloques principales: el bloque de codificación externa (BCH), codificación interna (LDPC), un intercalador de bits y la modulación NUC. Dos canales diferentes son evaluado: AWGN y el Rayleigh y se emplea un sistema SISO (Single Input, Single Output) con una entrada única para la transmisión y salida única para la recepción, siendo la forma más simple del sistema de comunicación.

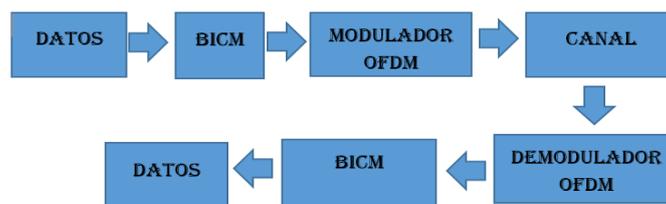


Figura 6: Modelo propuesto para comparar sistemas NUC's



Figura 7: Diagrama de bloques del módulo ATSC 3.0 BICM para SISO.

3. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Para la realización de las simulaciones se usó la herramienta de programación Matlab, en las versiones 2014 y 2015 y su interfaz gráfica. Se simularon primeramente los bloques para obtener las constelaciones QAM uniformes y las constelaciones no uniformes NUC 1D y 2D, para valores de M igual a 16, 64 y 256, y posteriormente el canal y el receptor lo que permitió la obtención de parámetros indicadores de la calidad.



Figura 8: Interfaz Portada

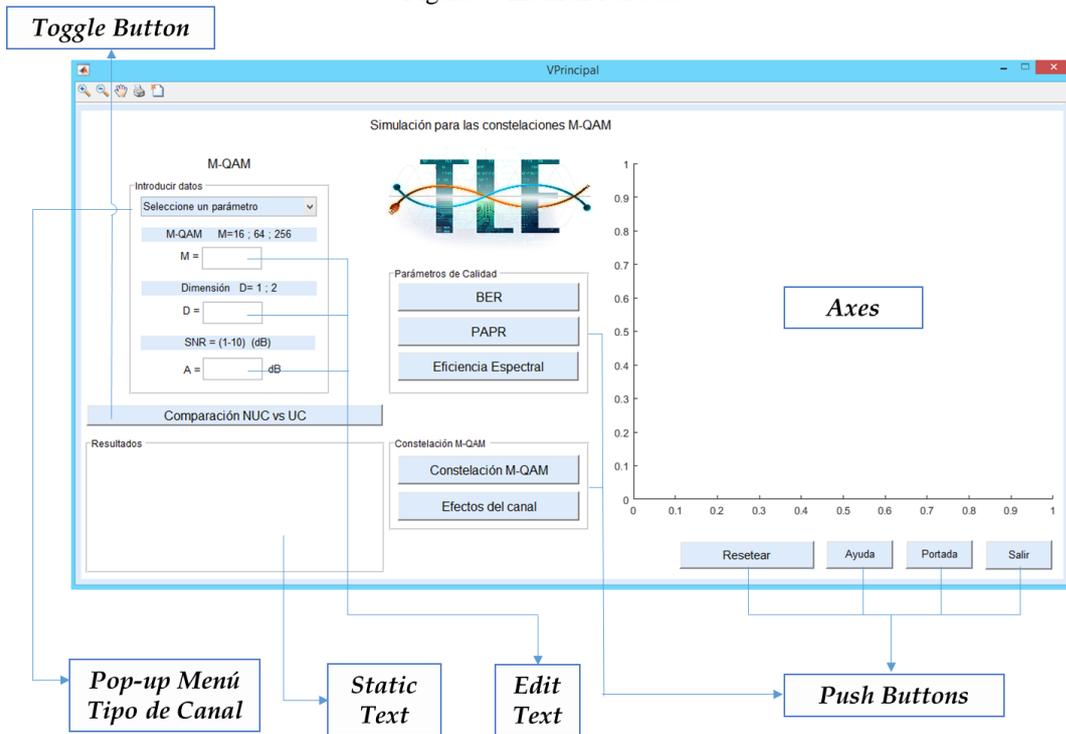


Figura 9: Interfaz Principal

Simulación de las constelaciones M-QAM para 1D-2D NUC

En las constelaciones obtenidas se puede observar (figura 10), en las NUC de una dimensión la optimización de cada símbolo con respecto a un único eje de los dos posibles y aunque todavía presentan una forma cuadrada, disminuye la amplitud con respecto a las constelaciones uniformes. En las NUC de dos dimensiones cada símbolo se optimiza con respecto a ambos ejes, resultando constelaciones con una forma circular, son las más utilizadas en los nuevos estándares por su fortaleza frente a los errores de fase en el receptor.

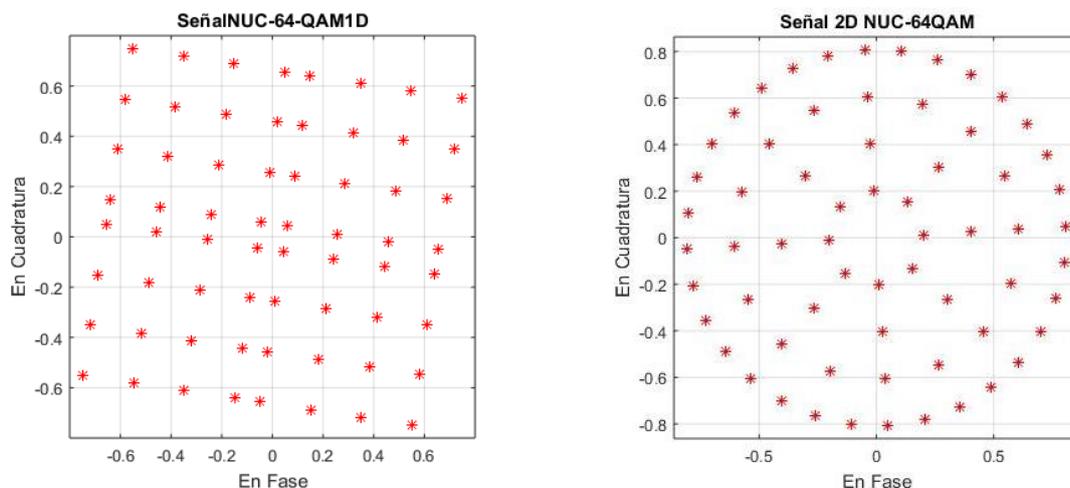


Figura10: Simulación de las constelaciones 64-QAM NUC-1D y 2D

Efectos del canal

Se simulan dos tipos de canal, el primero es un canal con ruido aditivo gaussiano (AWGN) mientras que el segundo es un canal con desvanecimiento (Rayleigh) para una tasa de código (CR) de 12/15.

El canal AWGN agrega ruido blanco gaussiano a la señal de entrada, no existe físicamente pero cuando el ancho de banda de la señal es mucho menor que el del canal, este se puede aproximar a un canal AGWN. El canal Rayleigh es un canal lineal e invariante en el tiempo y selectivo en frecuencia.

En la figura 11 la señal 64-QAM 2D de la izquierda fue transmitida por un canal AGWN con SNR de 3 dB, mientras que la señal de la derecha fue transmitida con SNR de 9 dB, el resultado es una mayor concentración de los puntos en el plano I-Q, para la segunda señal y por tanto es más fácil para el receptor la tarea de demodular.

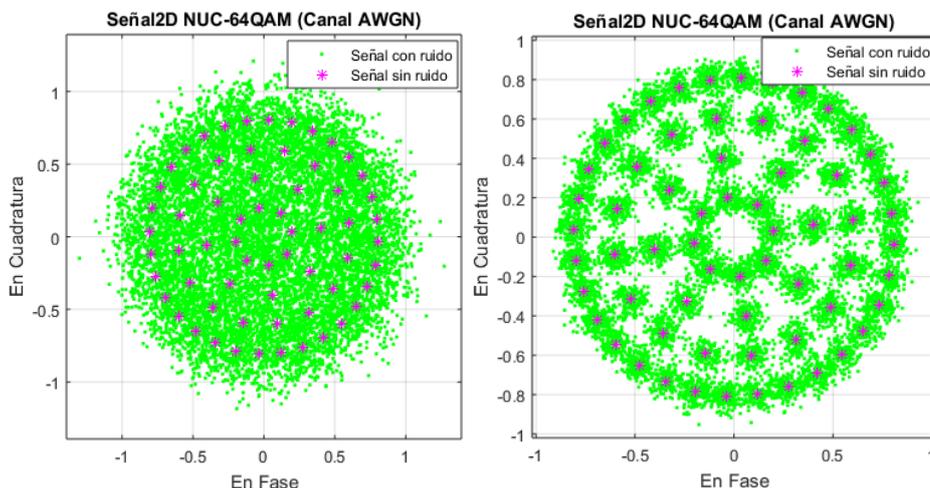


Figura 11: Señales 64-QAM 2D en un canal AGWN para SNR=3dB (izquierda) y SRN=9dB (derecha)

La figura 12 muestra la señal 64-QAM 2D de la izquierda transmitida por un canal Rayleigh con SNR de 9 dB y $\sigma_{\tau}=0.5$, mientras que la señal de la derecha fue transmitida por un canal Rayleigh con SNR de 9 dB y $\sigma_{\tau}=0.1$, el resultado es una mayor concentración de los puntos en el plano I-Q, para la segunda señal y por tanto es más fácil para el receptor la tarea de demodular. Se comprobó que el desvanecimiento en la señal causa una contracción o expansión en la constelación de la señal transmitida. Este fenómeno da como resultado, errores en la recepción, aumentando la cantidad de bits erróneos recibidos y por ende un aumento de la BER. El desvanecimiento al ser un fenómeno selectivo en frecuencia es atenuado utilizando las constelaciones no



uniformes en la modulación OFDM. En el presente trabajo en el transmisor se añaden bloques para la codificación de la señal a transmitir para protegerla frente al ruido.

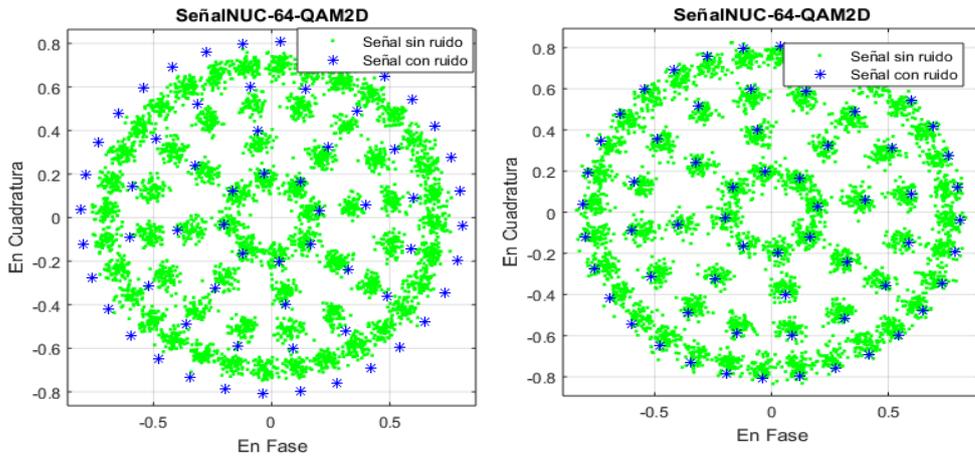


Figura 12: Señales 64-QAM 1D en un canal Rayleigh para $\sigma_{\tau}=0.5$ (izquierda) y $\sigma_{\tau}=0.1$ (derecha)

Análisis de parámetros indicadores de la calidad

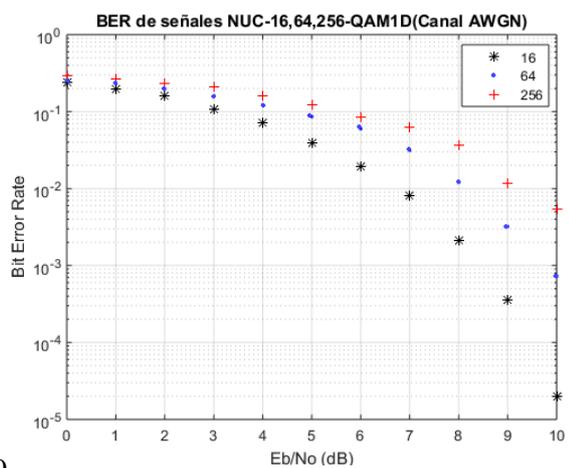
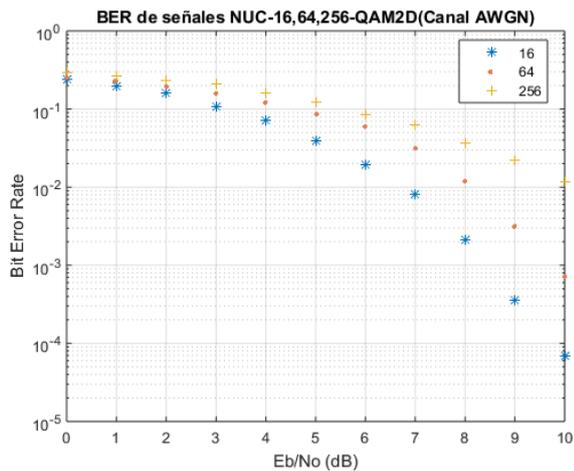
Las simulaciones se han realizado para una tasa de código (CR) de 12/15 y se muestra en la figura 13 el rendimiento de las constelaciones no uniformes tanto para un canal gaussiano con ruido blanco aditivo (AWGN) como para un canal Rayleigh. Se ha representado la BER en función de SNR, para valores de SNR de 0db a 10dB.

En la Tabla 2 y en la figura 13 se puede observar que los valores de la BER disminuyen a medida que aumentan los valores de la relación señal a ruido. Los mismos son mejores en un canal con ruido aditivo gaussiano que en un canal con desvanecimiento. En el caso de las constelaciones no uniformes este parámetro es menor con respecto a los obtenidos de las constelaciones uniformes porque los puntos de la constelación están optimizados para cada valor de SNR.

Tabla 2: Valores de la BER

AGWN	16-QAM			64-QAM			256-QAM		
SNR(dB)	UC	1D	2D	UC	1D	2D	UC	1D	2D
10	0.0018	9e-5	7e-5	0.0265	0.0010	0.0038	0.0786	0.0156	0.0307

Rayleigh	16-QAM			64-QAM			256-QAM		
SNR(dB)	UC	1D	2D	UC	1D	2D	UC	1D	2D
10	0.0027	0.0001	0.0002	0.0289	0.0015	0.0067	0.1242	0.0247	0.0476



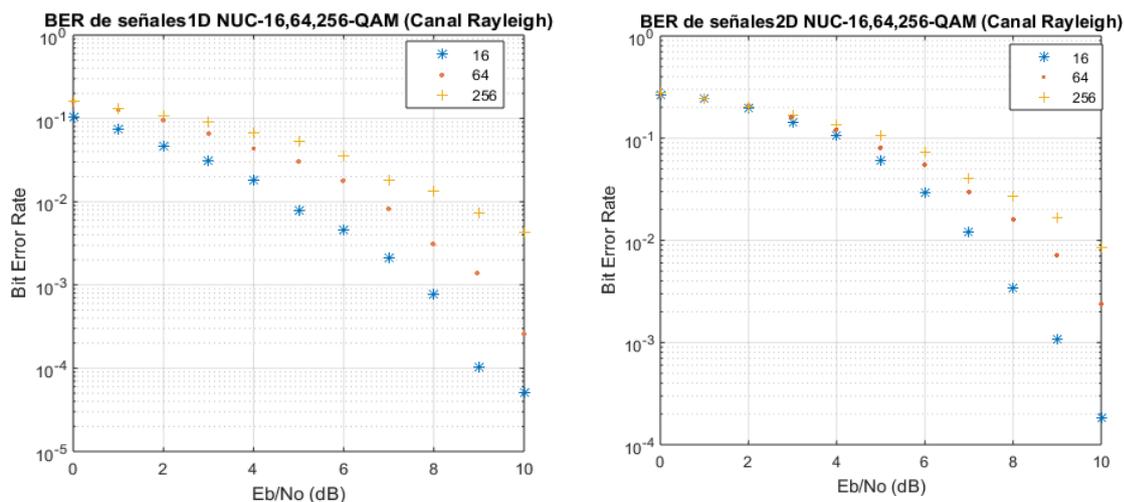


Figura 13: Representación de la BER para constelaciones NUC QAM 1D y 2D en un canal AWGN y Rayleigh

Para el análisis de la relación entre la potencia máxima de una señal y su valor medio (PAPR) se calcularon los valores promedios para valores de M de 16, 64 y 256 QAM.

$$PAPR = \frac{\max[|y[k]|^2]}{E[|y[k]|^2]} \tag{3) -(1)}$$

Tanto en tabla 2 como en la figura 14 se puede observar que los valores de la PAPR de las constelaciones no uniformes son inferiores a los valores de las constelaciones uniformes, esto se debe a que los puntos de la constelación están más cercanos uno de otros y la potencia máxima es menor. De igual manera, a medida que aumenta el orden de la modulación aumenta el valor de la PAPR, debido a que con el aumento del número de portadoras aumenta la probabilidad de que estas se encuentren en fase.

Tabla 3: Valores promedios de la PAPR.

Modulación	UC(dB)	NUC 1D(dB)	NUC 2D(dB)	Ganancia (dB)
16-QAM	9.095448	8.036107	7.806945	1.28
64-QAM	10.626976	9.175798	8.970163	1.63
256-QAM	11.294440	9.683567	9.634040	1.66

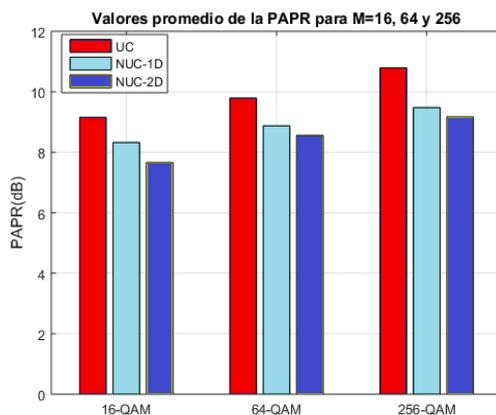


Figura 14: Representación de los valores de la PAPR

La eficiencia espectral mide que tan eficientemente se utiliza un determinado ancho de banda disponible para transmitir por él información y está dada por la relación velocidad de transmisión ancho de banda (Vt/AB), o sea, la eficiencia espectral mide los bps por Hertz que se transmiten.



Los nuevos estándares de TDT, aumentan la cantidad de puntos de la FFT, esto ha hecho que la eficiencia espectral aumente, favoreciendo el rendimiento de los sistemas implementados. En la tabla 4 se puede observar como la eficiencia espectral mejora con el aumento del orden de modulación y con la cantidad de puntos de la FFT. En consecuencia, la ganancia proporcionada por los NUC aumenta con el tamaño de la constelación como se muestra en la figura 15.

Tabla 4: Eficiencia contra orden de modulación para diferentes longitudes de FFT.

Tamaño FFT	$C_B(\text{bit/s/Hz})$ 16 QAM	$C_B(\text{bit/s/Hz})$ 64 QAM	$C_B(\text{bit/s/Hz})$ 256 QAM
4k	5.051500	6.812412	8.061800
8k	5.509075	7.269987	8.519375
16k	5.757311	7.518223	8.767610
32k	5.886960	7.647873	8.897260

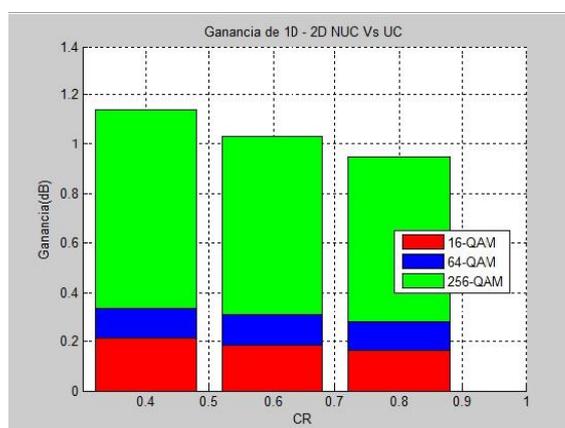


Figura 15: Ganancia de SNR de las NUCs

4. CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación realizada en el campo de los nuevos estándares de los sistemas de TDT, basada en las nuevas tecnologías que los soportan, se simularon 9 constelaciones entre uniformes y no uniformes de 1D y 2D, esto permitió resaltar las ventajas y desventajas de las constelaciones no uniformes versus las uniformes, en relación a los parámetros PAPR, BER y eficiencia espectral.

Se implementó en MATLAB una GUI, utilizando un lenguaje de simulación sencillo a cualquier usuario, el mismo posibilita la comprensión y puesta en práctica de conocimientos teóricos y técnicos acerca de técnicas avanzadas de modulación.

Se realizó la comparación entre las constelaciones no uniformes y las constelaciones uniformes, la cual conforme a los resultados obtenidos, se justifica la generalidad de su utilización.

REFERENCIAS

1. M. Z. C. M. Stella Chie, «Estándares actuales de televisión digital: “Una breve reseña”». *Actualidad Tecnológica*, 2015, vol. 6, núm. 1.
2. N. O. O. Jiménez y O. E. R. Ram: “Comparación entre los estándares de transmisión de segunda generación de televisión digital terrestre: dtmb-a y dvb-t2”. *Revista Telemática*, 2016, vol. 15, nº 3, pp. 39-55.
3. R. A. D. R. A. A. S. C. C. M. N. T. Iván Ramírez Ayala, «Capítulos sobre TVD del Estudio relativo a Nuevas Tecnologías Inalámbricas.» R&M International Consulting Group Ltd, 2015.
4. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame Structure Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2), ETSI EN Standard 302 755 v1.3.1, Apr. 2012.
5. Next Generation Broadcasting System to Handheld, Physical Layer Specification (DVB-NGH), DVB document A160, Digit. Video Broadcast., Geneva, Switzerland, Nov. 2012.



6. I. Eizmendi et al., "DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting system," IEEE Trans. Broadcast., vol. 60, no. 2, pp. 258–271, Jun. 2014.
7. D. Gomez-Barquero, C. Douillard, P. Moss, and V. Mignone, "DVB-NGH: The next generation of digital broadcast services to hand-held devices," IEEE Trans. Broadcast., vol. 60, no. 2, pp. 246–257, Jun. 2014.
8. D. Gomez-Barquero Ed., Next Generation Mobile Broadcasting, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013. M. V. Theodorakopoulos, "Partitioning Quadrature Amplitude Modulation for Mobile video Transmission". 2004.
9. Stott, J H, 2014. Beyond NUQAM & ConQAM – overcoming their limitations, especially at lower SNRs. Report produced under contract to BBC R&D, document JSC/BBC 034. Submitted to DVB as document TM-T0007.
10. J. Zöllner and N. Loghin, "Optimization of high-order non-uniform QAM constellations", IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2013
11. J. Zöllner and N. Loghin, 2014. High order Non-Uniform Constellations. Submitted to DVB as document TM-MIMO0010.
12. J. Barrueco et al., "Combining advanced constellations and SSD techniques for optimal BICM capacity", IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2015.
13. J. Stott, "CM and BICM Limits for Rectangular Constellations", Report produced under contract to BBC R&D, document JSC/BBC 022, August 2012. Submitted to DVB as document TM-MIMO0007.
14. John G. Proakis, Masoud Salehi. *Digital communications-5th ed.* Nueva York: published by McGraw-Hill, Previous editions ©2001 and 1995. 95 pp. ISBN 978–0–07–295716–7.
15. Fuentes, Manuel. "Non-Uniform Constellations for Next-Generation Digital Terrestrial Broadcast Systems". Director: Dr. David Gómez Barquero, Prof. Narcís Cardona Marcet. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Ciudad de Valencia, 2017.
16. L. W. Y. L. W. M. K. H. P. S. A. P. M. J. y. V. M. Zhang, «Channel capacity distribution of Layer-Division-Multiplexing system for next generation digital broadcasting transmission,» 2014.
17. C. B. J. M. J. G. U. A. I. E. I. A. P. y. V. M. Regueiro, «SVC and LDM Techniques for HD/UHD TV Indoor Reception.,» 2015.
18. G.J.Foschini, R.D.Gitlin and S.B. Weinstein, "Optimization of two-dimensional signal constellations in the presence of Gaussian noise." IEEE Tram. Commun., vol. COM-22, pp.28-38, 1974.
19. T. Arafa, W. Sauer-Greff and R. Urbansky, "Non-uniform signal constellation for iteratively decoded bit interleaved coded modulation (BICM-ID) with convolution and LDPC codes , " in Innovations in Information Technology (IIT), Abu Dhabi, April 2011, pp. 23-28
20. G. Caire, G. Taricco, and Ezio Biglieri, "Bit- interleaved coded modulation," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 44, no. 3, pp. 927-946, May 1998.
21. L. Michael and D. Gomez-Barquero, "Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) for ATSC 3.0," IEEE Trans. Broadcast., vol. 62, no. 1, Mar. 2016.

SOBRE LOS AUTORES

MSc. Yanela Varela Méndez. Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad de Oriente, Cuba en el 2008. Profesora Asistente del departamento de Telecomunicaciones. En 2012 se graduó con nota de excelente en la maestría Sistemas de Telecomunicaciones en la Universidad de Oriente, Cuba. En su labor investigativa trabaja en la línea "Tecnologías de la Información y las Comunicaciones" y actualmente se encuentra investigando en la problemática de la PAPR (Proporción potencia de pico a potencia media) en sistemas móviles de 4ta. y 5ta. G.

E-mail: yvarela@uo.edu.cu . Teléfono: +53 22 601193, +53 22 601191

MSc. Fidel V. Giró Uribaz. Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad de Oriente, Cuba en el 2008. En julio del 2017 alcanzó la categorización docente de Profesor Auxiliar en la disciplina de radiocomunicaciones donde se encuentra actualmente impartiendo las asignaturas de Radioelectrónica I, II. En diciembre de ese mismo año se graduó en la maestría Sistemas de Telecomunicaciones en la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente investiga sobre arreglos de antenas microcintas y la tecnología de radio definido por software, RFID y es el responsable del Laboratorio de TV Digital de la Universidad de Oriente.

E-mail: fgiro@uo.edu.cu . Teléfono: +53 22 601190, +53 22 601191