



XVIII SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (SIE-2019)

Técnicas de Constelaciones No Uniformes para DTMB

Non-uniform Constellation Techniques for DTMB

Irina B. Siles Siles¹, Erik Ortiz Guerra¹, Lannhy Cepeda Osuna¹,
Julio C. Pérez García¹ Samuel Montejo Sánchez²

1. Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE), Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba. E-mails: irinass@uclv.edu.cu, erik@uclv.edu.cu, lcepeda@uclv.cu, juliocpg@uclv.cu.
2. Programa Institucional de Fomento a la I+D+i (PIDi), Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM), Chile. E-mail: smontejo@utem.cl

Resumen:

En este artículo se presenta un estudio del desempeño de técnicas avanzadas de modulación basadas en constelaciones no uniformes (NUC, *Non-Uniform Constellations*) en la difusión de multimedia digital terrestre (DTMB, *Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*), con el fin de satisfacer los requerimientos de la televisión digital terrestre (DTT, *Digital Terrestrial Television*) en términos de, eficiencia espectral y robustez de la señal. Generamos constelaciones no uniformes en una y dos dimensiones mediante el algoritmo de Nelder-Mead, orientado a maximizar la capacidad de canal BICM (*Bit Interleaved Coded Modulation*). Los resultados de las simulaciones demuestran que las técnicas NUC superan el desempeño de las tradicionales técnicas basadas en constelaciones uniformes (UC, *Uniform Constellations*), en términos de capacidad de canal y tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) ante la presencia de ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).

Abstract: In this paper it is presented a survey of the advanced modulation techniques based on Non-Uniform Constellations (NUC) performance in Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB), in order to meet the Digital Terrestrial Television (DTT) requirements in terms of, spectral efficiency and robustness of the signal. We generate non-uniform constellations in one and two dimensions using the Nelder-Mead algorithm, which aimed at maximizing the BICM (Bit Interleaved Coded Modulation) channel



capacity. The simulations results show that the NUC techniques outperform the performance of the traditional techniques based on uniform constellations (UC, Uniform Constellations), in terms of channel capacity and Bit Error Rate (BER) in presence of Additive White Gaussian Noise (AWGN).

-

Palabras Clave: BER, BICM, DTMB, NUC

Keywords: *Bit Error Rate (BER), Bit Interleaved Coded Modulation (BICM), Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB), Non Uniform Constellations (NUC)*

1. Introducción

En las últimas décadas, en materia de Telecomunicaciones se ha incidido de manera directa en la eficiencia espectral, la robustez, la confiabilidad y la ganancia de codificación. Como consecuencia, en el ámbito de la televisión digital los estándares han evolucionado a nuevas generaciones (ATSC 3.0, DVB-x2, DVB-NGH, DTMB-A); incrementando así la robustez de la señal, la calidad del servicio, el área de cobertura *indoor/outdoor*, la portabilidad y la movilidad; propiciando así así la aparición de nuevos servicios. Estudios como [1]–[6], demuestran esta tendencia en los últimos años en aras de alcanzar el límite teórico de Shannon sin la necesidad de incrementar la potencia de transmisión o el ancho de banda.

Las constelaciones no uniformes (*Non-Uniform Constellations, NUC*) se vislumbran como una de las técnicas más innovadoras para incrementar la robustez de la señal. En [5], [7]–[11] 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 relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio, SNR*) en el que opera el sistema, para un modelo de canal dado. Esto significa que para cada valor de SNR, hay una única posición para cada símbolo de la constelación que maximiza la capacidad del sistema, y por ende, para una misma capacidad del sistema, esta técnica proporciona un valor más alto de SNR que el obtenido con una constelación uniforme.

Las NUC desde lo planteado por [12], tomando en consideración la geometría de los símbolos como demuestran [13]–[15], la influencia del mapeo [9], [16]–[18] , la



influencia de la rotación [19], el trabajo con constelaciones de alto orden [20] y las características del canal [2], [21] reducen el espacio existente entre las constelaciones uniformes QAM y el límite teórico de Shannon. Con estas constelaciones, los símbolos se optimizan en ambas componentes fase (I) y cuadratura (Q) mediante técnicas geométricas de modelado de la señal, considerando un nivel SNR específico y un modelo de canal específico.

Se constatan dos tipos de NUC, unidimensional (1D-NUC) y bidimensional (2D-NUC). Las 1D-NUC mantienen la forma cuadrada de QAM, pero variando la distribución entre los símbolos de la constelación en una solo componente. Las 2D-NUC, en cambio, sí modifican la disposición de la forma cuadrada, lo que permite optimizar las posiciones de los símbolos en ambas dimensiones, logrando así mayores ganancias de capacidad y menores requisitos de SNR. Sin embargo, el uso de 2D-NUC implica una mayor complejidad [8], [9], [20], [22], [23]. Existen varios métodos patentados [24]–[26] que resultan la base para varias investigaciones, típicamente cada uno de ellos se basa en la obtención de las 1D/2D-NUC tomando en consideración diferentes métodos de optimización, variables a considerar, etc.

En el estudio de [27], el autor proporciona una visión de los beneficios potenciales de las NUC y su impacto en la capacidad del canal BICM (*Bit-Interleaved Coded Modulation*); el enfoque desde [28] es combinar la codificación de canal, las modulaciones digitales y el entrelazado de bit y tomar en consideración el desvanecimiento para elegir la modulación idónea independientemente de la tasa de codificación.

Si bien [11], [18], [29]–[31] han encausado las investigaciones de los últimos años en mejoras para cada uno de los evolutivos de televisión digital (DTV, *Digital Television*) tomando en consideración la inclusión de las NUC pues resulta interesante continuar el estudio de [32] y realizar un análisis para las diferentes configuraciones o modos de trabajo que presenta DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*) [33] combinado con NUC.

La presente investigación obtiene diferentes NUCs basado en su forma geométrica partiendo de las características del estándar DTMB sobre el análisis de la comparación de las mismas (1D/2D-NUC) para analizar las ventajas que estas ofrecen sobre las UC haciendo uso del algoritmo de optimización no lineal de Nelder Mead [8] [34] y cuantizando las mejoras perceptibles.



2. Generalidades y metodología de diseño

2.1 Capacidad de un Sistema BICM

Un sistema BICM consta de manera contigua de codificación, entrelazado y mapeo de los símbolos. La capacidad de un canal con sistema BICM se puede calcular como la suma de las capacidades de cada bit de la constelación mapeada. La siguiente ecuación muestra la capacidad de cada bit asociado a un símbolo de la constelación de acuerdo a lo postulado por [7], [27].

$$C_{b_i} = \iint \frac{p(y|b_i=0)\log_2 p(y|b_i=0) + p(y|b_i=1)\log_2 p(y|b_i=1)}{2} - p(y)\log_2 p(y) dy, \quad (1)$$

donde b_i es uno de los bits de los símbolos de la constelación mapeada y ry e iy son la parte real e imaginaria del símbolo recibido y , respectivamente. Además $p(y|b_i=0)$ es la probabilidad condicional de recibir y dado que el bit transmitido fue un 0 y $p(y|b_i=1)$ es la probabilidad condicional de recibir y dado que el bit transmitido fue un 1. Por lo tanto, la ecuación para calcular la capacidad del canal BICM total es

$$C = \sum_{i=1}^n C_{b_i}, \quad (2)$$

donde $n = \log_2 M$, siendo M el número de símbolos asociados a la transmisión y, por lo tanto, n es la cantidad de bits por cada uno de estos símbolos asociados a la transmisión. Estas probabilidades condicionales anteriormente utilizadas están definidas por la distribución gaussiana

$$p(y|b_i=0) = \frac{2}{n} \sum_{x_i \in C_b^0} \frac{e^{-\frac{(y-x_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma}, \quad (3)$$

y similarmente para $p(y|b_i=1)$. Finalmente $p(y)$ se puede expresar como

$$p(y) = \frac{1}{n} \sum_{x_i \in C} \frac{e^{-\frac{(y-x_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma}, \quad (4)$$

Es importante destacar que los puntos a los que se hace referencia en las ecuaciones anteriores corresponden a la posición en los ejes de coordenadas de la constelación y se analizan según los Grados de Libertad que ofrezca su índice de modulación o número de símbolos de la constelación y en tipo de NUC a implementar.



2.2 Problema de optimización.

Para el proceso de optimización de la función objetivo representada en (1) se constata la presencia de varios máximos locales, por ende se ha de usar un mecanismo de optimización global que deseche los máximos locales hasta determinar el máximo global, en su proceso iterativo recurrente. Aunque en la literatura consultada se observa el trabajo de algoritmos metaheurísticos como el PSO (*Particle Swarm Optimization*) [5] se ha elegido el trabajo con el Algoritmo de Nelder-Mead basado en el estudio de [8] por ser uno de los métodos más utilizados en los procesos de optimización no lineales de aplicaciones ingenieriles.

Para esta investigación los *simplex* utilizados por el algoritmo y la figura inicial de la que se parte (triángulo para 1D-NUC y paralelogramo para 2D-NUC) así como el número de iteraciones serán discutidos. Además, se han tomado en cuenta algunos factores que repercuten directamente en el diseño de las NUC y que se muestran en la Figura 1.



Figura 1: Factores que influyen directamente en el diseño de las NUC.

Los Grados de Libertad (*Degrees of Freedom, DoF*) de los puntos de la constelación determinan la complejidad del diseño y del demapeo y consecuentemente el desempeño del sistema. Según [8] los DoF se calculan de formas diferentes para los 2 tipos de NUC. Para el caso de las 1D-NUC se calculan como $DoF = \lceil \sqrt{M}/2 \rceil - 1$ si se considera la condición de simetría que ofrecen los 4 cuadrantes; es decir se pueden obtener a partir del primer cuadrante los tres restantes y así hacer una reducción de $\sqrt{M} - \lceil \sqrt{M}/2 \rceil - 1$ elementos a optimizar. Para el caso de 2D-NUC y valiéndose nuevamente de la simetría lógicamente el número de DoF aumenta considerablemente, ya que ahora $2M - 1$ constituyen los elementos a optimizar tanto en I y Q. Según [8] se puede hacer una reducción de dichos elementos si se trabaja con sectores (véase Figura 2) y ahora el número de elementos disminuiría a $\lceil 2M/S \rceil + 1$ donde S representa el número de sectores (4, 8, 16).

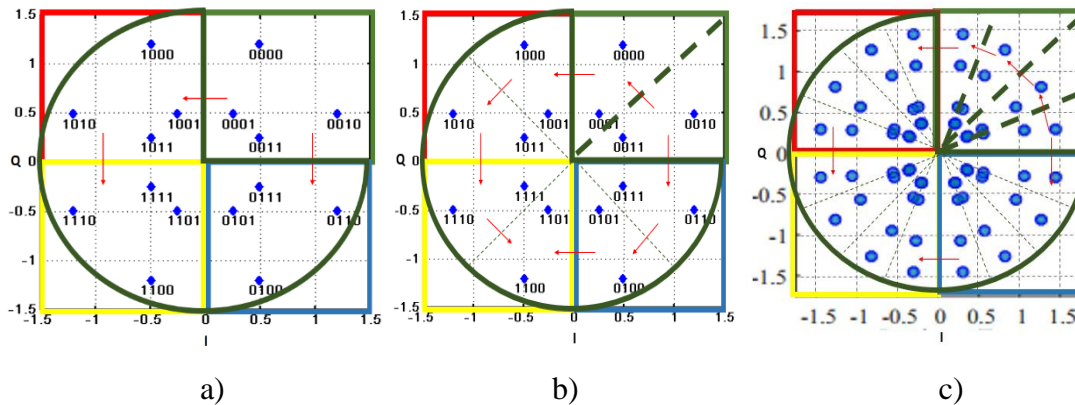


Figura 2: Representación de 4 y 8 sectores para NUC-16QAM (a, b) y 16 sectores para NUC-64QAM (c)

El rango de valores de SNR, según [5] se toma en consideración de acuerdo a la Tabla 1 y constituyen los valores para los cuales el proceso de diseño de las NUC se lleva a cabo. Aunque para las 1D-NUC no resulta tan influyente los niveles bajo, medio y alto de SNR porque la constelación QAM inicial es independiente del valor de SNR, para las 2D-NUC sí, pues podría determinar el hecho de partir de constelaciones subóptimas (1D-NUC previamente optimizada, 2D-NUC optimizada para un valor similar de SNR, QAM)

Tabla 1: Rango de valores de SNR para 2D-NUC.

Rango SNR/ NUC- mQAM	16NUC	64NUC
Bajo	(-inf-1)	(-inf-7)
Medio	[1-10)	[7-15)
Alto	[10-inf)	[15-inf)

La constelación inicial o de partida determina en la convergencia del algoritmo. Las 1D-NUC parten de su mQAM con independencia de SNR; las 2D-NUC para SNR bajos parten de la constelación sub-óptima de menor orden para dicho SNR, para valores medios de SNR se requiere de un proceso iterativo complejo y para las de altos SNR se ha de partir de los propios símbolos de una mQAM.

La asignación de los bits de la constelación primaria media en la eficiencia de la NUC diseñada. A pesar de implementar “mapeo” de tipo Gray existen varias combinaciones que satisfacen dicha condición ya que la capacidad que aportan los MSB es mayor que la de los LSB; por tanto la elección del mapeo idóneo [17] incide directamente en la disminución de la probabilidad de error de bit.

2.3 Discusión del modelo planteado para optimización

El procedimiento de optimización implementado está compuesto por varias etapas como se ilustran en la Figura 3; el mismo se basa en la revisión de [8] y patentes como [35].

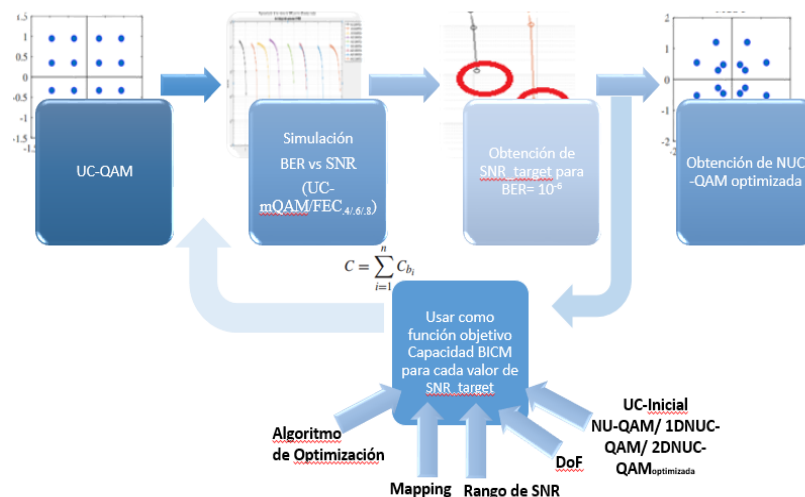


Figura 3: Modelo planteado para la optimización de las NUC.

3. Resultados y discusión

El primer paso es, con total independencia del diseño de una 1D/2D-NUC obtener el SNR target para el cual se hará el diseño. Todas las simulaciones se han realizado para un umbral de BER = 10^{-6} y las razones de códigos ofrecidas por el estándar DTMB para las tres combinaciones de FEC (0.4/0.6/0.8) de acuerdo con GB20600[33]. En la Figura siguiente se relacionan los valores de SNR obtenidos para los FEC definidos, la modulación 16 y 64 QAM.

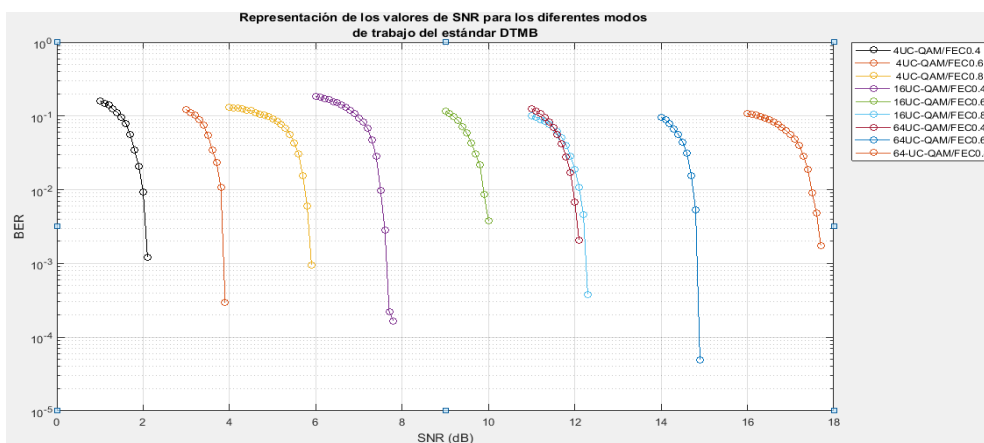


Figura 4: Representación VER vs SNR para diferentes mQAM/FEC del estándar DTMB.



Para el cálculo de la función objetivo (1) y obtención de la NUC óptima se parte del esquema de modulación 4/16/32/64QAM. Note que para 4QAM no tiene sentido la optimización y para 32QAM no se logra pues solamente esta técnica se realiza para las modulaciones cuya cantidad de bits por símbolo es un resultado par del total de símbolos ($\log_2(M)$) en busca de una constelación de forma rectangular y por tanto se implementa en los casos 16 y 64 QAM únicamente.

La obtención de los DoF para las diferentes modulaciones mQAM se observa en la Tabla 2 a partir de las expresiones planteadas en la sección II. Para 1D-NUC la representación de la parte imaginaria resulta sencilla aplicando la simetría, para 2D-NUC tomando en consideración la separación uniforme mínima entre los símbolos mapeados y haciendo uso de la sectorización para minimizar la carga computacional con independencia del índice de las modulaciones se puede representar la posición inherente de cada símbolo para las señales en cuadratura y fase. La figura 5 muestra algunas de las 1D-NUC obtenidas representativas.

Tabla 2. Parámetros de optimización de 1D/2DNUQAM.

Constelación	1DNUQAM		2DNUQAM	
	DoF	Parámetros a optimizar	DoF	Parámetros a optimizar
16 NUC	1	a1	7	a0,1, a1,1, a2,2, a3,3
64 NUC	3	a1, a2, a3	31	a0,1, a1,1, a2,2, ..., a15,15

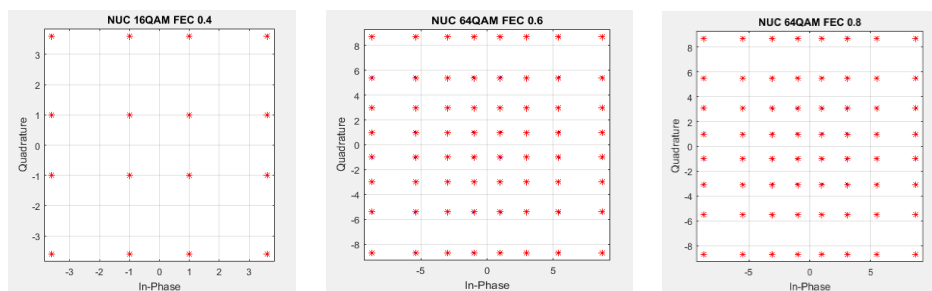


Figura 5. Representación de símbolos para 16QAM y 64QAM de las 1D-NUC diseñadas.

Para la obtención de las 2D-NUC (véase Figura), teniendo en cuenta I y Q el número de puntos que han de ser optimizados aumenta y por tanto la complejidad del diseño. Para varias simulaciones analizadas se muestra que para los puntos más alejados de los ejes existe una mayor dispersión con relación a sus posiciones iniciales. Para aquellos más cerca de los ejes de coordenadas los nuevos posicionamientos colindan con las posiciones iniciales y existe una tendencia a “clusterizarse”.



3.1 Análisis de los resultados

La figura 6 muestra valores de capacidades obtenidas tanto para las UC como las NUC y se ha decidido incluir algunas modulaciones de alto orden que están fuera del presente estudio pero que se usan para mostrar en un diapasón más amplio el efecto que conlleva el uso de modulaciones NUC de alto orden para el acercamiento al límite teórico de Shannon.

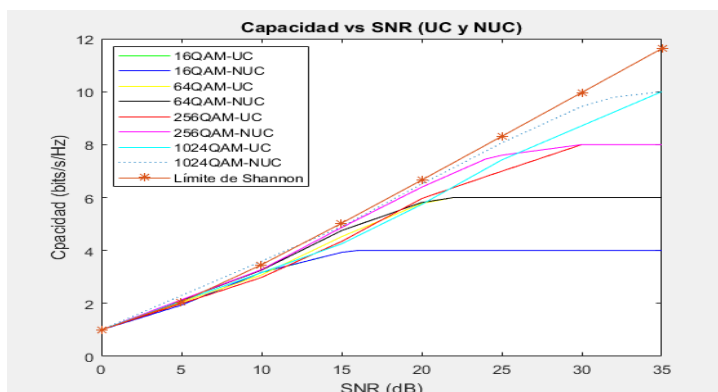


Figura 6. Capacidades de las constelaciones QAM UC y NUC en un canal AWGN.

Es necesario destacar que la implementación del programa para obtener las constelaciones, posee valores de capacidades dadas las respectivas SNR, que el valor obtenido no es un resultado maximizado "fiable", esta limitante está dada por los límites de integración con los que trabaja la función para integrar escogida. No obstante, para validar todos los resultados los valores para las funciones creadas en el código siempre se compararon con el programa *Mathematica* y con los resultados de [27].

Para la representación de acuerdo al estándar DTMB de las capacidades de las NUC optimizadas en función de la SNR, se muestra en la Figura 7 a modo de ejemplo para el caso de 16QAM/FEC. La ganancia que se logró en todos los casos es pequeña. Esto es debido al orden de las constelaciones y los pocos DoF que estas tienen para la optimización. Resultados superiores se pueden obtener o bien en función del aumento del orden de la modulación o la implementación de esquemas 2D NUC.

La Figura 8 muestra más fehacientemente una comparativa del incremento de la ganancia de la capacidad en cada caso. En la Figura se observa el "shortcoming" en bit/s/Hz para un rango de SNR [0-16]. Para el caso de 1D-16NUCs para bajos valores de SNR (1dB según tabla 2) las mayores ganancias son experimentadas y aunque pequeñas se pueden



cuantizar; para valores medio-altos no se aprecian ganancias significativas con relación a la UC.

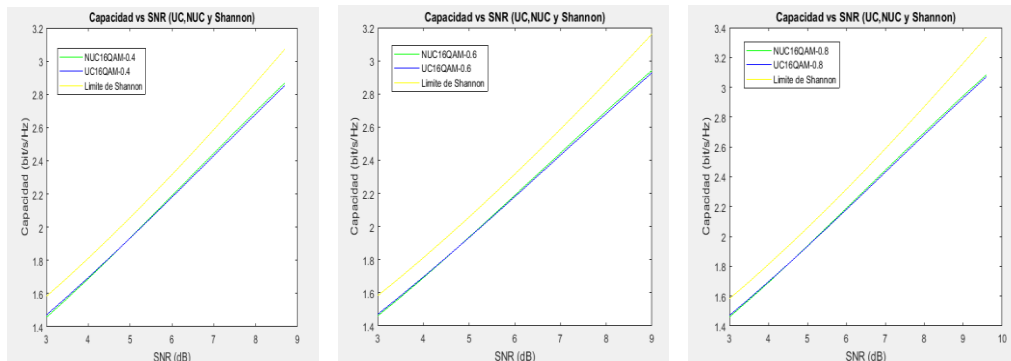


Figura 7. Capacidad de canal BICM de 1D NUC 16QAM.

La forma de la constelación se va tornando desde una semejanza a una QPSK para valores bajos hasta una 16QAM. Para el caso de 2D-16NUC de igual modo experimenta ganancias significativas para valores de SNR < 1dB y SNR > 10dB, para valores medios las ganancias se hacen muy significativas y por tanto la forma de las constelaciones obtenidas resultan muy cambiantes.

Para el caso de 1D-64NUCs la diferencia resulta más notoria para valores bajos de SNR y los símbolos se *clusterizan* para formar una 16NUC. De igual modo que para 2D-16NUC las mejores ganancias son experimentadas en los valores medios de SNR aunque para todos los valores de SNR se experimentan ganancias apreciables con relación al límite de Shannon. Al margen de los resultados discutidos, valores mayores de modulación (256NUC, 1KNUC) ofrecen mejores resultados de manera cuantiosa (bit/s/Hz) consecuencia que resulta no tan notoria de 64NUC vs 16NUC.

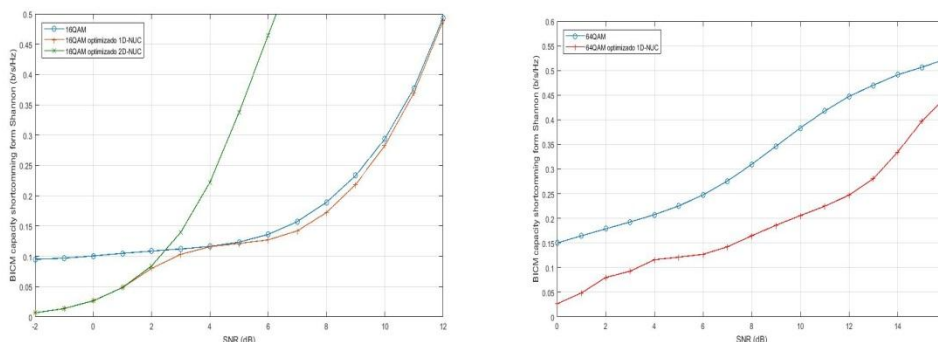


Figura 8: Representación de la diferencia- "shortcoming" de la capacidad BICM en relación al límite de Shannon para 1D/2D NUC.



Las figuras denotan como en función de la ecuación (1) el cálculo de la capacidad del canal BICM para un canal dado y un valor de SNR, los factores que afectan la capacidad BICM dependen de la posición de cada punto de la constelación y del *bit labelling*. Nótese que los símbolos se distribuyen de manera uniforme en el diagrama de la constelación tanto para 1D/2D NUC y que la separación entre ellos está condicionada por la potencia de ruido; altos niveles de ruido muestran mayores distancias entre puntos adyacentes. Además, siguiendo este propósito los cálculos computacionales de la capacidad del canal son reducidos y los resultados de las capacidades como función objetivo se recalculan mientras el resultado obtenido de la función de optimización permanezca inalterable hasta 4 posiciones decimales.

Al igual que [8] se muestra en la Figura 9 la variación en las posiciones óptimas de los símbolos para las 16/64NUC obtenidas cuando la capacidad BICM es optimizada para varios SNR. Las líneas para cada elementos (a1, a2, a3) para valores de 0dB para 64NUC colapsan a QPSK, existe otro nivel de condensación para formar una QAM para valores altos de SNR, sobre los 5dB convergen a una 16NUC para 64NUC y para valores intermedio cada valor de SNR obtiene una 64NUC con mayor o menor grado de condensación.

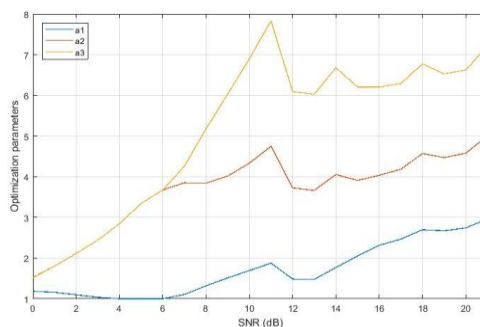


Figura 9: Representación de los parámetros de optimización para 1D 64QAM NUC en función de SNR. Para hacer un análisis de la influencia de la sectorización la Figura 10 ilustra como para bajas SNR forman una QPSK, comportamiento semejante tanto para 1D como 2D donde la mejora de la capacidad BICM es la misma. Sin embargo, para valores medios de SNR la forma gaussiana va cambiando en función del número de sectores del mismo modo que la capacidad y la carga de optimización.

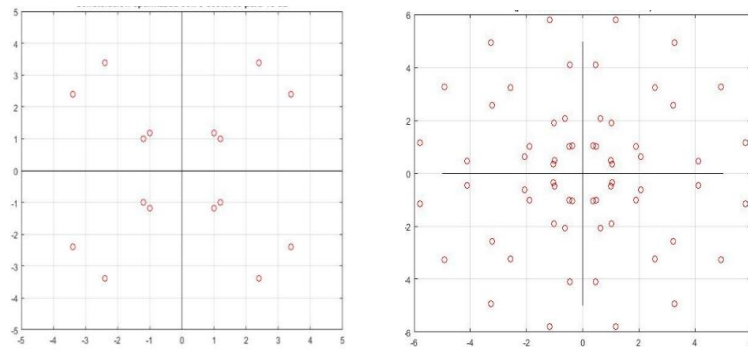


Figura 10 Constelaciones optimizadas para 8 y 16 sectores en 2D 16QAM y 64QAM

Se observa que muchos puntos de las constelaciones tienden a converger para bajos valores de SNR. Este efecto de “condensación/ clusterización” en las NUC hace que la capacidad del bit menos significativo (LSB) sea sacrificada y asignada al bit más significativo (MSB) como consecuencia de valores altos de ruido. En consecuencia se muestra la capacidad de cada bit pero en función del mapeo Gray utilizado.

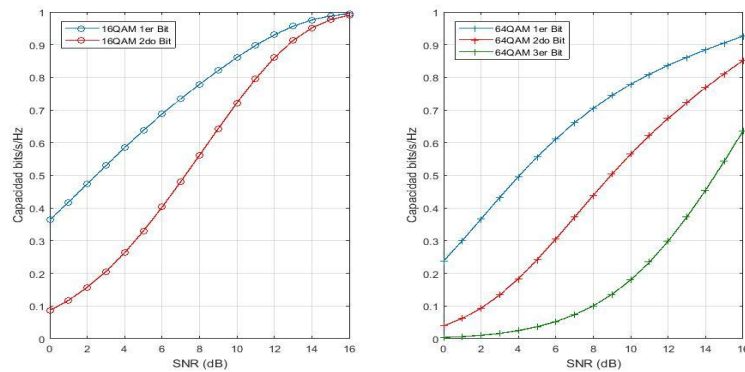


Figura 11: Aporte de cada bit a la capacidad BICM 1D-NUC.

Es válido destacar que el esquema analizado no tiene la configuración exacta que describe un canal BICM pues tras el bloque de codificación que consta de un codificador interno LDPC, uno externo BCH se tiene el de modulación. Los resultados en la Figura 12 muestran los valores de las ganancias de SNR experimentadas en FEC 0.4/.6/.8 para las NUC diseñadas puntualmente para cada caso.

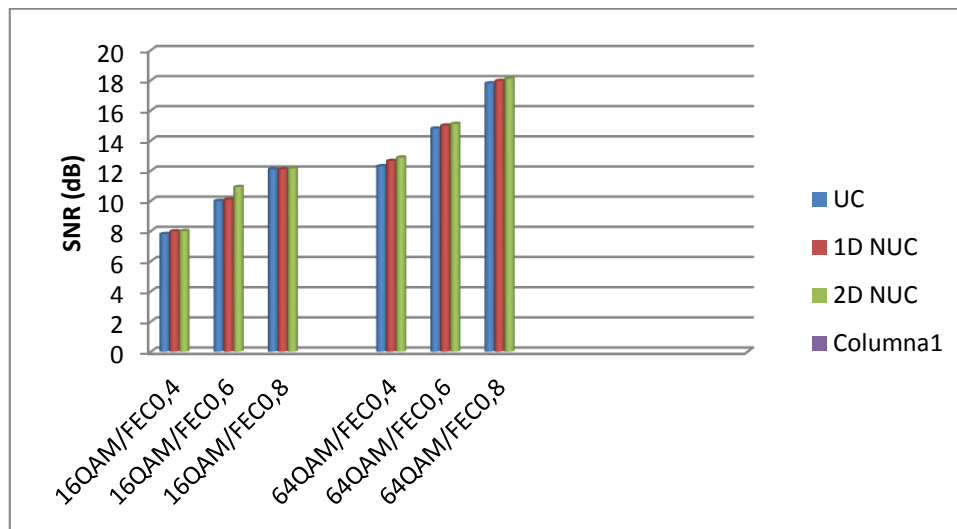


Figura-12: Ganancia de SNR de las NUC sobre las UC para un canal de ruido blanco gaussiano tomando en consideración los diferentes valores de FEC del estándar DTMB.

3. Conclusiones

Las técnicas de modulaciones NUC son basadas en constelaciones cuyas distancias no son uniformes y la ubicación de sus puntos varía dependiendo de la capacidad del canal BICM la cual a su vez obedece a la SNR, el índice y el tipo de modulación, así como la distribución de sus bits en los símbolos.

Para simular el impacto de las 1D/2D NUC en el estándar DTMB se desarrolló un algoritmo basado en el modelo Nelder Mead que permitiera obtener una mejora gradual con relación a las UC.

Los resultados de las simulaciones realizadas muestran una mejora del desempeño del estándar DTMB en cuanto a la capacidad del canal y el SNR mínimo de recepción de los modos optimizados. Este resultado se traduce en un aumento de la cobertura del servicio de TDT si el estándar DTMB utilizara las NUC propuestas.

Referencias bibliográficas

- [1] L. Michael and D. Gómez-Barquero, "Modulation and Coding for ATSC 3.0," in *2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2015, pp. 1–5.
- [2] L. Polak and T. Kratochvil, "Exploring of the DVB-T/T2 performance in advanced mobile TV fading channels," in *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2013, pp. 768–772.



- [3] G. H. M. G. de Oliveira, C. Akamine, and Y. P. Maciel, "Implementation of ISDB-T LDM broadcast system using LDPC codes," in *2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2016, pp. 1–4.
- [4] C. VIDAL MIRALLES, "SISO AND MISO BROADCASTING IN DVB-T2 STANDAR," PhD Thesis, 2015.
- [5] J. B. et al, "Constellation Design for Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM) Systems in Advanced Broadcast Standards," *IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING*, 2017.
- [6] D. Perez-Calderon, V. Baena-Lecuyer, A. C. Oria, P. López, and J. G. Doblado, "Simplified rotated constellation demapper for second generation terrestrial digital video broadcasting," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 59, no. 1, pp. 160–167, 2013.
- [7] J. Barrueco *et al.*, "Condensation methodologies for two-dimensional non-uniform constellations," in *2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2017, pp. 1–5.
- [8] M. F. Muela, "Non-uniform constellations for next-generation digital terrestrial broadcast systems," PhD Thesis, Universitat Politècnica de València, 2017.
- [9] M. Fuentes Muela, J. J. Gimenez Gandia, and D. Gómez Barquero, "Optimization and Performance of Non-Uniform Rotated Constellations With Multi-RF Transmission Technique," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 62, no. 4, pp. 855–863, 2016.
- [10] M. Fuentes, L. Christodoulou, and B. Mouhouche, "Non-Uniform Constellations for Broadcast and Multicast in 5G New Radio," in *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2018, pp. 1–5.
- [11] J. Morgade, D. Anzorregui, B. Mouhouche, H. Jeong, and H. Lee, "Improving the DVB-T2 BICM performance by newly optimized Two-Dimensional Non-Uniform Constellations," in *2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin)*, 2014, pp. 96–100.
- [12] G. D. Forney, R. Gallager, G. Lang, F. Longstaff, and S. Qureshi, "Efficient modulation for band-limited channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 2, no. 5, pp. 632–647, 1984.



- [13] F. Zesong, K. Jingming, and Y. Yu, "Shaping gain by non-uniform QAM constellation with binary turbo coded modulation," in *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003.*, 2003, vol. 2, pp. 1863–1867.
- [14] N. U. Hassan, W. Xu, and A. Kakkavas, "Applying Coded Modulation with Probabilistic and Geometric Shaping for Wireless Backhaul Channel," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018, pp. 1–5.
- [15] F. Steiner and G. Böcherer, "Comparison of geometric and probabilistic shaping with application to ATSC 3.0," in *SCC 2017; 11th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding*, 2017, pp. 1–6.
- [16] K. Yan, K. Peng, F. Yang, and J. Song, "Non-uniform APSK optimization for BICM systems," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 175–181, 2015.
- [17] S.-I. Park, K. Sun-Hyoung, L. I. M. Bo-Mi, J.-Y. Lee, H.-M. Kim, and N.-H. Hur, "Bit interleaver for low-density parity check codeword having length of 16200 and code rate of 3/15 and 16-symbol mapping, and bit interleaving method using same," Mar-2017.
- [18] S. Kwon, S. I. Park, J. Lee, H. M. Kim, N. Hur, and J. Kim, "Simplified non-uniform constellation demapping scheme for the next broadcasting system," in *2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2015, pp. 1–3.
- [19] D. A. Karpuk and C. Hollanti, "Rotating non-uniform and high-dimensional constellations using geodesic flow on lie groups," in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 5884–5889.
- [20] B. Mouhouche, D. Anzorregui, and A. Mourad, "High order non-uniform constellations for broadcasting UHD TV," in *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2014, pp. 600–605.
- [21] B. Mouhouche, M. Al-Imari, and D. Anzorregui, "Multichannel Design of Non uniform Constellations for Broadcast/Multicast Services," in *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016, pp. 1–5.
- [22] J. Barrueco, J. Montalban, P. Angueira, C. A. Nour, and C. Douillard, "Low-Complexity Lattice Reduction Demapper for Massive Order One-Dimensional Non-



- Uniform Constellations,” in *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2018, pp. 1–5.
- [23] J. Barrueco *et al.*, “Low complexity and high order two-dimensional non-uniform constellations for high capacity broadcasting systems,” in *2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2016, pp. 1–5.
- [24] S.-I. Park, K. Sun-Hyoung, L. I. M. Bo-Mi, J.-Y. Lee, H.-M. Kim, and N.-H. Hur, “Bit interleaver for low-density parity check codeword having length of 16200 and code rate of 2/15 and 64-symbol mapping, and bit interleaving method using same,” Oct-2017.
- [25] SONY CORPORATION, “Coding and modulation apparatus using non -uniform constellation,” 2916349.
- [26] Y. Sun, H. Zhang, Y. Zhang, and S. Srinivasa, “Integer non-uniform constellation for high-order QAM,” May-2018.
- [27] J. Stott, “CM and BICM limits for rectangular constellations,” *BBC Res. Dev. WHP* 257, 2012.
- [28] G. Caire, G. Taricco, and E. Biglieri, “Capacity of bit-interleaved channels,” *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 12, pp. 1060–1061, 1996.
- [29] D. Gómez-Barquero, C. Douillard, P. Moss, and V. Mignone, “DVB-NGH: The next generation of digital broadcast services to handheld devices,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 60, no. 2, pp. 246–257, 2014.
- [30] I. Eizmendi, G. Prieto, G. Berjon-Eriz, I. Peña, M. M. Velez, and P. Angueira, “Next generation of broadcast multimedia services to mobile receivers in urban environments,” *Signal Process. Image Commun.*, vol. 27, no. 8, pp. 925–933, 2012.
- [31] H. Jeong *et al.*, “Flexible and robust transmission for physical layer signaling of ATSC 3.0,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 62, no. 1, pp. 204–215, 2016.
- [32] E. Fontes Pupo, R. Díaz Hernández, and Y. Acosta Cintado, “Constelaciones No-Uniformes en 1D para el estándar DTMB,” *Ing. Electrónica Automática Comun.*, vol. 39, no. 1, pp. 62–72, 2018.
- [33] *Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Television Terrestrial Broadcasting System (DTMB)*, vol. GB-20600-2006. 2006.



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

- [34] M. A. Luersen and R. Le Riche, "Globalized Nelder–Mead method for engineering optimization," *Comput. Struct.*, vol. 82, no. 23–26, pp. 2251–2260, 2004.
- [35] Se-ho MYUNG, "TRANSMITTING APPARATUS AND MODULATION METHOD," US 2015/0222471 A1, agosto-2015.