

OFDM Óptimo para las Redes Eléctricas Inteligentes

Washington Fernández R

Depto Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Bio
Bio
Concepción-Chile.
wfernand@ubiobio.cl

José Mahomar J.

Depto Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Bio
Bio
Concepción-Chile
jmahomar@ubiobio.cl

Abstract— En este artículo se encuentra un OFDM óptimo para redes eléctricas inteligentes. El OFDM óptimo consiste de constelaciones bidimensionales rotadas rectangular, circular y hexagonal de cuatro y dieciséis. Los resultados que se obtienen logran disminuir la probabilidad de error de bit en forma significativa por un orden de magnitud de por lo menos 1×10^{-2} cuando se compara con OFDM-QAM

Index Terms—OFDM, constelaciones bidimensionales rotadas, redes eléctricas inteligentes.

I. INTRODUCCIÓN

Redes eléctricas inteligentes es un término que se utiliza para referirse a la próxima generación de redes eléctricas en la cual la distribución y manejo de la electricidad necesita de comunicación bidireccional y capacidad computacional para realizar monitoreo, eficiencia, confiabilidad y seguridad [1]-[4]. La red inteligente se espera que modernice la red eléctrica actual, lo cual implica monitoreo, protección y optimización automática de la operación de los sistemas interconectados a la red eléctrica. Debe ser capaz de interconectar los diferentes sistemas de generación de electricidad (renovables, no renovables) [5]. Una red eléctrica inteligente se caracteriza por la conexión bidireccional de la electricidad y la información fluye para crear una red de transporte automática y distribuida ampliamente [6]. Más específicamente la red eléctrica inteligente se mira como un sistema eléctrico que utiliza información, comunicación bidireccional, tecnologías de seguridad en la comunicación e inteligencia computacional en una integración a través de la generación, transmisión, sub estaciones, distribución y consumo eléctrico para obtener un sistema que sea “limpio”, seguro, realizable, con capacidad de recuperación, eficiente y sustentable. Esta descripción cubre todo el sistema de energía desde la generación hasta el punto final que es el consumo de la energía eléctrica. La Fig. 1 muestra la concepción de una red eléctrica inteligente [4]. Desde una perspectiva técnica la red eléctrica inteligente debe poseer: *una infraestructura inteligente, un sistema de manejo inteligente un sistema de protección inteligente*. La infraestructura inteligente requiere de un sistema de un sistema de comunicación bidireccional, además este sistema debe dar confiabilidad y seguridad de los

datos que se transmiten. Por ejemplo los monitores que se ubiquen en el sistema de distribución deben almacenar y transmitir eventos tales como: la calidad de la energía eléctrica (sag, swell, distorsión de armónicos), estado del transformador (temperatura del enrollado, nivel del liquido, gases), etc.

El modelo de redes eléctricas inteligentes presenta tres tipos de consumidores: Red de Área de Casa (HAN: Home Area Network), Red de Área de Edificio (BAN: Building Area Network) y Red de Área de Industrial (IAN: Industrial Area Network). Dentro de estas áreas se tiene Infraestructura Avanzada de Monitoreo AMI (Advanced Metering Infrastructure) es el despliegue para el monitoreo y flujo de salida y de entrada de datos. La Fig 2 muestra el uso de AMI en las HAN's [4].

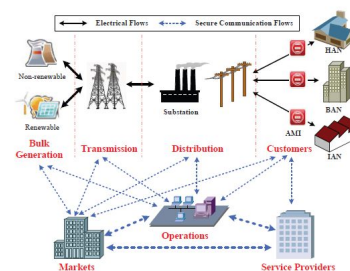


Figura 1 Concepción de una red eléctrica inteligente.

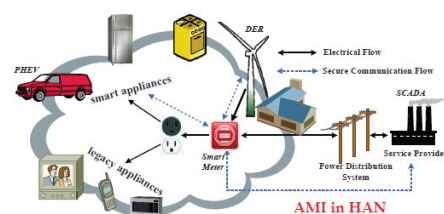


Figura 2 Uso de AMI en las HAN's.

En los sistemas de comunicaciones se requiere tener una muy baja probabilidad de error de bits o de símbolos con una muy baja razón de señal a ruido.

Hace más de treinta años que se realiza investigación y desarrollo relacionado con multiplexación por división de

frecuencias ortogonales (OFDM) [7].

El concepto de usar la transmisión de dato en paralelo por la multiplexación de división de frecuencia se publica en la mitad de los sesenta [8] y [9].

En OFDM cada portadora es ortogonal unas de otras, lo cual no se mantiene en la técnicas con múltiples tonos discretos (DMT) [10].

OFDM se basa en el uso de M-QAM, M-PSK, [11]-[13]. En [14] se introduce el concepto de prefijo cíclico.

Con relación a las constelaciones bidimensionales se tiene el trabajo de [15] que estudia las constelaciones que minimiza la probabilidad de error en un canal con ruido clase A. En [16] se dan las técnicas para generar y optimizar un conjunto de señales hexagonales. En [17] se presenta el ángulo óptimo para modulaciones 8-PSK y 16-QAM, para lograrlo minimiza una función de costo. En [18] se da una expresión analítica para la rotación óptima de ángulos con el criterio de la distancia mínima Euclidiana para cualquier constelación M-PSK.

El canal con ruido clase A es muy adverso para la transmisión de data digital porque está constituido por un ruido blanco de fondo más un ruido impulsivo. Middleton clasifica el ruido en tres clases:

Clase A: Este ruido es típicamente de espectro de banda angosta. Es decir, más angosto que el ancho de banda del receptor.

Clase B: Aquí el ancho de banda del ruido que llega al receptor tiene un mayor ancho de banda que el receptor.

Clase C: Es la suma del ruido clase A y B.

Un modelo de ruido para la línea eléctrica, que equivale al ruido clase A, se sugiere en [19], en el cual se tiene:

$$P_Z(z)_{P+G} \approx e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_m^2}} \quad (1)$$

Donde:

$P_Z(z)_{P+G}$: Función de densidad de probabilidad que considera el ruido impulsivo y ruido Gaussiano

A : Índice impulsivo

m : Número de sub canales.

$$\sigma_m^2 = \frac{c_m^2}{\Omega_{2A}(1+\Gamma)} = \frac{\frac{m}{A} + \Gamma}{1+\Gamma} \quad (2)$$

Γ : Relación entre la potencia Gaussiana e impulsiva

Para el ruido de línea eléctrica:

Para el ruido clase A:

$$\Gamma = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_I^2} \quad (3)$$

Donde:

σ_G^2 : Varianza Gaussiana.

σ_I^2 : Varianza Impulsiva.

Este modelo de ruido corresponde a un proceso aleatorio, discreto, independiente y distribuido idénticamente (iid), el cual tiene características muy diferentes desde la clásica interferencias Gaussiana.

Con respecto al término óptimo esto se refiere a que se usa constelaciones bidimensionales rotadas, cuya rotación permite lograr una menor probabilidad error de símbolos en una canal de línea eléctrica comparado con las constelaciones convencionales.

La organización del trabajo es la siguiente: en la Sección II se analiza el sistema de transmisión/recepción propuesto. La Sección III se dan los resultados encontrados en forma de gráficos y se realiza una discusión de lo resultados. Finalmente, se pueden encontrar las conclusiones en la Sección IV.

II. ANÁLISIS DEL SISTEMA PROPUESTO DE TRANSMISIÓN/RECEPCIÓN

Un sistema de comunicación que se basa en OFDM, transmite múltiples datos simultáneamente y usa sub portadoras ortogonales para ello. Los símbolos de dato $d_{n,k}$ primero se agrupan en un bloque de tamaño N y entonces se modulan con formas de ondas exponenciales complejas $\phi_k(t)$, las cuales se implementan utilizando la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT).

Matemáticamente se expresa como:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{N-1} d_{n,k} \phi_k(t - nT_d) \right] \quad (4)$$

Donde:

$$\phi_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t} & t \in [0, T_d] \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases} \quad (5)$$

Y:

$$f_k = f_o + \frac{k}{T_d} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (6)$$

$d_{n,k}$: Símbolo que se transmite durante el intervalo n -ésimo de tiempo usando la k -ésima sub portadora.

T_d : Duración del símbolo.

N : Número de sub portadoras OFDM.

f_k : Frecuencia de la k -ésima sub portadora.

f_o : Frecuencia más baja.

En el proceso de demodulación se basa en la ortogonalidad de las sub portadoras $\phi_k(t)$, se tiene:

$$\int_{\text{sr}} \phi_k(t) \phi_l(t) dt = T_d \delta(k-l) = \begin{cases} T_o & k=l \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases} \quad (7)$$

Por lo tanto, el demodulador se implementa explotando la ortogonalidad de las sub portadoras digitalmente se implementa con la transformada rápida de Fourier (FFT).

$$d_{n,k} = \frac{1}{T_d} \int_{nT_d}^{(n+1)T_d} x(t) \phi_k(t) dt \quad (8)$$

A continuación se analizan las constelaciones bidimensionales rotadas.

Una constelación con dimensión N es un conjunto finito de N -uplas o puntos en el espacio dimensional N . El tamaño de

la constelación $|C|$ es el número de puntos. En una constelación bidimensional se tiene $|C|=2^b$ puntos, con b número entero.

Sea una constelación en el plano complejo, es decir, de la forma: $q_i = \pm x_i \pm iy_i$, como se muestra en la Fig. 3.

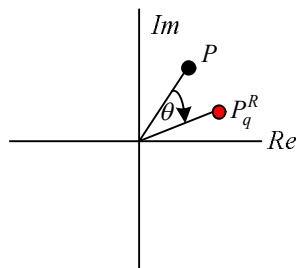


Figura 3 Puntos en el plano complejo.

De acuerdo a la Fig. 3, los puntos P y P_q^R se relacionan con la siguiente transformación:

$$\begin{bmatrix} P_q^{Re} & P_q^{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Re} & P_{Im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta - \text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Si el ángulo se mide en el sentido horario los puntos se escriben como:

$$x_i = a_i \cos\theta - b_i \text{sen}\theta \quad (10)$$

$$y_i = a_i \text{sen}\theta + b_i \cos\theta \quad (11)$$

Donde:

a_i : Punto de la constelación sin rotar, eje real.

b_i : Punto de la constelación sin rotar, eje imaginario.

Para determinar el símbolo que se transmite, el receptor utiliza la métrica:

$$d_i = \sqrt{(r_{\Re(i)} - y_{\Re(i)})^2 + (r_{Im(i)} - y_{Im(i)})^2} \quad (12)$$

Donde:

d_i : Distancia mínima entre los símbolos.

$r_{\Re(i)}, r_{Im(i)}$: Parte real y parte imaginaria de la señal que se recibe en el receptor.

$y_{\Re(i)}, y_{Im(i)}$: Parte real y parte imaginaria del símbolo de la constelación.

El detector escoge a favor del símbolo $\hat{s}_i = (y_{\Re(i)}, y_{Im(i)})$ que minimiza a (12).

De [15], se tiene la métrica:

$$P_e(s_i \rightarrow \hat{s}_i) \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + |x_i - \hat{x}_i|^2} \right) \left(\frac{1}{1 + |y_i - \hat{y}_i|^2} \right) \quad (13)$$

Donde:

P_e : Probabilidad de error de símbolo.

s_i : Símbolo sin rotar.

$s_i = (x_i, y_i)$.

\hat{s}_i : Símbolo rotado.

$\hat{s}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$

Si se utiliza (10), (11) y se reemplaza en (13), se obtiene (14):

$$P_e(s_i \rightarrow \hat{s}_i) \leq G_1 G_2 \quad (14)$$

Donde:

$$G_1 = \left(\frac{1}{1 + |(a_i - \hat{a}_i) \cos\theta + (b_i - \hat{b}_i) \text{sen}\theta|^2} \right) \quad (15)$$

$$G_2 = \left(\frac{1}{1 + |(a_i - \hat{a}_i) \text{sen}\theta + (b_i - \hat{b}_i) \cos\theta|^2} \right) \quad (16)$$

Donde:

\hat{a}_i, \hat{b}_i : Puntos de la constelación rotada.

Cuando no hay rotación:

$$\theta = 0 \quad (17)$$

$$x_i = a_i \quad (18)$$

$$y_i = b_i \quad (19)$$

En este caso G_1 y G_2 son:

$$G_1 = \frac{1}{1 + |(a_i - \hat{a}_i)|^2} \quad (20)$$

$$G_2 = \frac{1}{1 + |(b_i - \hat{b}_i)|^2} \quad (21)$$

Si se compara (15) con (10) y (16) con (21), se observa que la probabilidad de error depende del ángulo de rotación θ , se debe encontrar el valor de θ que minimice la probabilidad de error.

Para minimizar la probabilidad de error es equivalente a minimizar la función de costo:

$$J = \sum_{\hat{s}_i \neq s_i} P_e(s_i \rightarrow \hat{s}_i) \quad (22)$$

La minimización de la función de costo J se realiza numéricamente usando el algoritmo de gradiente dado en:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + u \frac{dJ}{d\theta} \quad (23)$$

Donde:

u : Constante de valor pequeño.

θ : Valor inicial.

La Tabla I da las coordenadas de cuatro símbolos rectangular.

TABLA I
COORDENADAS DE CUATRO SÍMBOLOS RECTANGULAR

N	X	Y
4	1.41	1.41
	1.41	-1.41
	-1.41	1.41
	-1.41	-1.41

Evaluando (22) y (23) en forma exhaustiva se obtienen los ángulos de rotaciones óptimos para cada una de las constelaciones rectangular, hexagonal y circular para cuatro y dieciséis símbolos, los ángulos se indican en la Tabla VII.

N	RECTANGULAR	CIRCULAR	HEXAGONAL
4	10°	38°	25°
16	8°	20°	18°

TABLA II
ÁNGULOS DE ROTACIONES ÓPTIMOS PARA LAS CONSTELACIONES
RECTANGULAR, CIRCULAR Y HEXAGONAL.

La Fig. 4 muestra el sistema de transmisión/recepción que se propone para disminuir la probabilidad de error de bits.

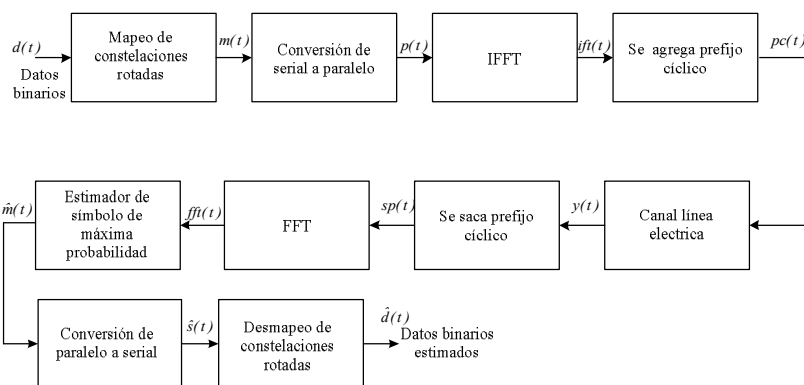


Figura 4 Sistema de transmisión/recepción que se propone para disminuir la probabilidad de error de bits.

De acuerdo a la Fig. 4 se tiene: los datos a transmitir $d(t)$, el mapeo de constelaciones rotadas convierten los datos binarios a símbolos $m(t)$ de la constelación rectangular, circular, hexagonal de cuatro y dieciséis símbolos que se transmite, luego se realiza una conversión de los símbolos serial a paralelo $p(t)$ a continuación para transmitir N sub portadoras se aplica la transformada rápida inversa de Fourier $ifft(t)$, posteriormente se le agrega un prefijo cíclico que consiste en los últimos 6 símbolos que se transmiten $pc(t)$. Luego el canal constituido por la línea eléctrica le suma ruido Gaussiano más ruido impulsivo $y(t)$. En el receptor se sacan los prefijos cíclicos $sp(t)$, se aplica la transformada rápida de Fourier $ffft(t)$, el estimador de símbolo de máxima probabilidad, estima que símbolo se transmite $\hat{m}(t)$, a continuación se realiza la conversión de los símbolos de paralelo a serial $\hat{s}(t)$, para finalmente el desmapeo de

constelaciones rotadas lleva los símbolos a datos binarios de acuerdo a la constelación rectangular, circular, hexagonal de cuatro y dieciséis símbolos que se transmite.

III. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

A. Resultados

Los parámetros del ruido para el canal con línea eléctrica se consideran: $A=0.01$, $\Gamma=0.001$ y $m=3$, con estos valores el ruido es altamente impulsivo. La Fig. 5 muestra las características del ruido.

En las Figs. 6 y 7 se muestran las comparaciones del desempeño 4-QAM-OFDM con OFDM óptimo (constelación rotadas de rectangular, circular y hexagonal de cuatro símbolos) con 64 y 1024 sub portadoras respectivamente.

En las Figs. 8, a la 10 se muestran las comparaciones del desempeño 16-QAM-OFDM con OFDM óptimo (constelación rotadas de rectangular, circular y hexagonal de dieciséis símbolos) con 64, 256 y 1024 sub portadoras respectivamente.

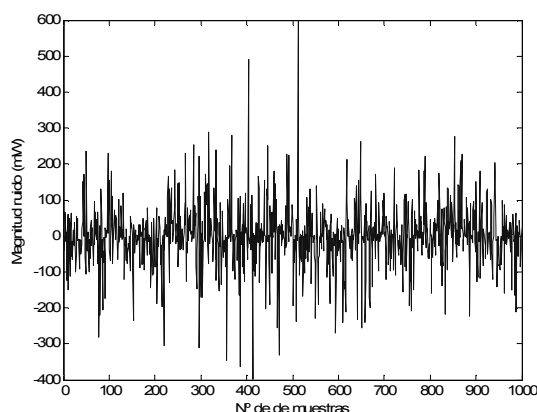


Figura 5 Característica del ruido presente en la línea eléctrica.

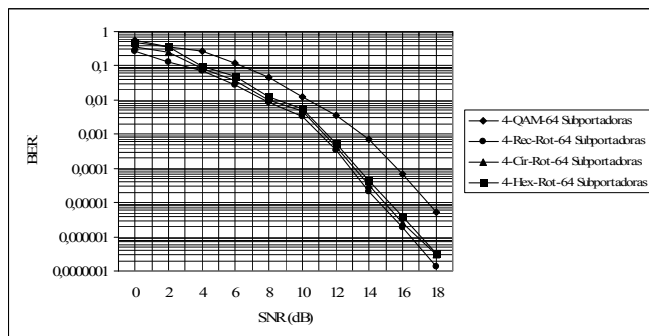


Figura 6 Resultados de SER versus SNR para la constelación rotada rectangular, circular y hexagonal de cuatro símbolos y OFDM 4-QAM con sesenta y cuatro sub portadoras.

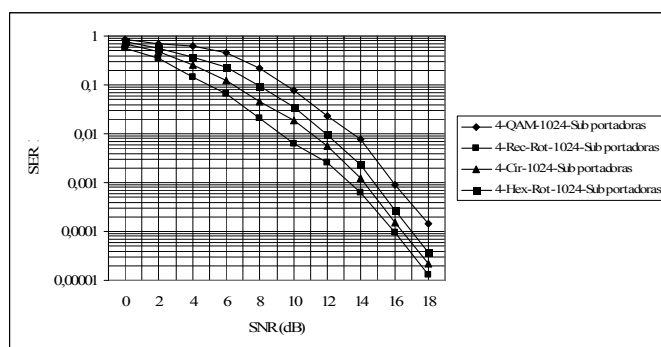


Figura 7 Resultados de SER versus SNR para la constelación rotada rectangular, circular y hexagonal de cuatro símbolos y OFDM 4-QAM con mil veinticuatro sub portadoras.

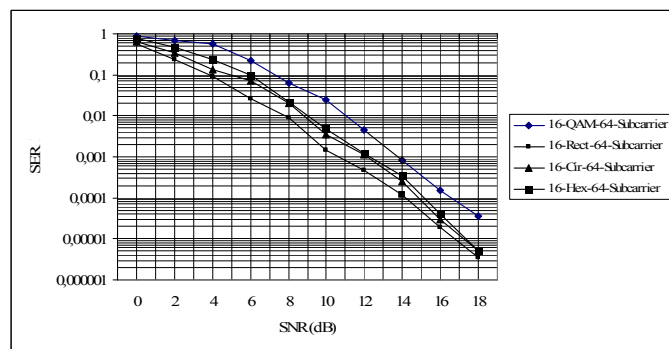


Figura 8 Resultados de SER versus SNR para la constelación rotadas rectangular, circular y hexagonal de dieciséis símbolos y OFDM 16-QAM con sesenta y cuatro sub portadoras.

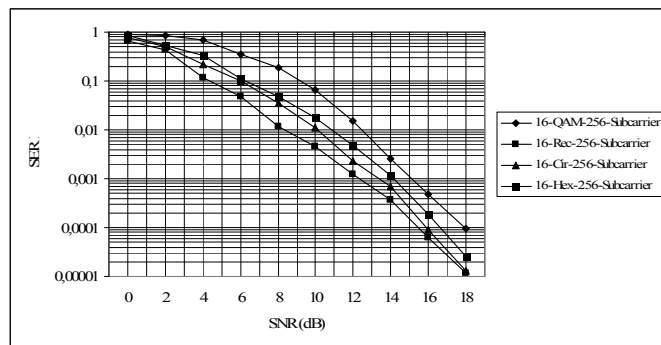


Figura 9 Resultados de SER versus SNR para la constelación rotada rectangular, circular y hexagonal de dieciséis símbolos y OFDM 16-QAM con doscientas cincuenta y seis sub portadoras.

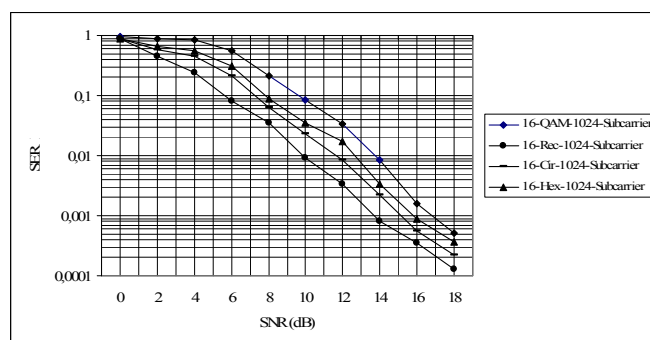


Figura 10 Resultados de SER versus SNR para la constelación rotada rectangular, circular y hexagonal de dieciséis símbolos y OFDM 16-QAM con mil veinticuatro sub portadoras.

B. Discusión de los resultados

La Fig. 5 indica que con los valores de los parámetros que se dan el ruido es altamente impulsivo, el cual es la característica del canal de transmisión con líneas eléctricas. De las Figs. 6 y 7 y de la 8 a la 10 se infiere que la rotación de las constelaciones: rectangular, circular y hexagonal mejoran notablemente el desempeño de OFDM en un canal con ruido Gaussiano de fondo y ruido impulsivo disminuyendo la probabilidad de error de símbolo, la causa de esto es porque el ángulo óptimo de rotación permite que la ubicación en el plano dimensional de los símbolos de las constelaciones aumente la región de decisión entre ellas, lo que provoca que el detector de máxima probabilidad aumente la probabilidad de estimar el símbolo en forma correcta, lo que incide en mejorar el desempeño de la modulación OFDM, esto se ve mejor reflejado con las constelaciones rectangular y hexagonal.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados que se obtienen el OFDM óptimo disminuye en forma muy significativa la probabilidad de error de símbolo en comparación a su contraparte QAM y es un buen candidato para que se implemente en la transmisión de dato para la línea eléctrica inteligente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONICYT-CHILE por financiar este trabajo por medio del proyecto FONDEF IDeA CA13II03318

REFERENCIAS

- [1] Department of energy, The smart grid and introduction, 2010, disponible en: www.energy.gov/SmartGridIntroduction.html
- [2] Y. Kim, H. Thottan and W. Lee, A Secure Decentralized Data Centric Information infrastructure for smart grid, IEEE Communications Magazine, pp. 58-65, June 2010.
- [3] H. Gharavi, R. Ghafurian, Smart Grid the Electric System of Future, Proceedings of IEEE, pp. 917-921, August 2011.
- [4] K. Chen, P. Yeh, H. Hsi and S. Chang, Communication infrastructure of smart grid, 4th International Symposium Control and Signal Processing (ISCCP), pp. 1-5, 2010.
- [5] [Wollman10] D. Wollman, G. Fitzpatrick and P. Boynton, NIST coordination of smart grid interoperability standards, Conference on

- Precision Electromagnetic Measurements, Daejson, Korea, pp. 531-532, 2010.
- [6] [Fan12] Z. Fan, P. et. al., Smart grid communication: overview of research challenge solutions, and standardization activities, IEEE Communications Survey & Tutorial, Vol. 25, N° 1, pp. 21-33, First Quarter 2012.
- [7] J. Bingham, Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come, IEEE Communications Magazine, pp. 5-16, May 1990.
- [8] R. Chang, Synthesis of Band-limited Orthogonal Signals for Multichannel data Transmission, Bell Syst. Tech. J., Vol. 45, pp. 1775-1796, December 1966.
- [9] B. Saltzberg, Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System, IEEE Transactions Communications Technology, Vol. 15, December 1967.
- [10] W. Zou, Y. Wu, COFDM: An Overview, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 41, N° 1, pp. 1-8, March 1995.
- [11] L. Cimini, and G. Li, Orthogonal Frequency Division Multiplexing For Wireless Communications, Tutorial, IEEE Vehicular Technology Conf., (VTC'00), 2000.
- [12] J. Patel, U. Dalal, A Comparative Performance Analysis of OFDM Using MATLAB Simulation with M-PSK and M-QAM Mapping, International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, pp. 406-410, 2007.
- [13] Z. Wang, OFDM or Single Carrier Block Transmission, IEEE Transactions on Communication, Vol. 52, N° 3, pp. 480-494, March 2004.
- [14] A. Pelled and R. Ruiz, Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computational Complexity Algorithms, Proceedings IEEE Int. Conf. On Acoustics, Speech and Signal Processing (ICAAP'80) pp. 964-967, Denver Co, 1980.
- [15] W. Fernández, Estudio del Desempeño de las Constelaciones Hexagonal, Circular y Rectangular con Entrelazador Dorado para Líneas Eléctricas Inteligentes, IEEE Latin America Transactions, Vol. 12, N° 8, pp. 1402-1408, December 2014.
- [16] K. Simon and J. Smith, Hexagonal, Multiple Phase and Amplitude Shift Keyed Signal Set, IEEE Transactions on Communications, Vol. 2, N° 10, pp.1108-1115, October 1973.
- [17] L. Leszek and M. Bacic, Constellations Design for Multiple Transmissions Maximizing the Minimum Squared Euclidean Distance, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol. 2, pp. 1066-1071, March 2005.
- [18] G. Forney Jr, L. F. Wei, Multidimensional Constellations Part I: Introduction, Figures of Merit and Generalized Cross, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 7, N° 6, pp. 877-892, August 1989.
- [19] [Bert11] L. Di Bert, D. Schwingshack, and A. Tonello, On Noise Modeling for Power Line Communications, IEEE International Symposium on Power Line Communications and Applications, 2011, pp. 283-287.