

Constelaciones bidimensionales con rotaciones óptimas para redes eléctricas inteligentes

W. Fernández¹, J. Mahomar²

¹Dpto. Ingeniería Eléctrica, Universidad del Bio Bio, Avenida Collao 1202, Concepción Chile, email: wfernand@ubiobio.cl

²Dpto. Ingeniería Eléctrica, Universidad del Bio Bio, Avenida Collao 1202, Concepción Chile, email: jmahomar@ubiobio.cl

Resumo: En este artículo se analiza las constelaciones rotadas bidimensionales (rectangular, circular, hexagonal de cuatro y dieciséis símbolos) para su aplicación en la red eléctrica inteligente. El desempeño del sistema propuesto se evalúa determinando la razón de error de símbolo versus la razón de señal a ruido. Los resultados muestran que con las constelaciones rotadas se logra un mejor desempeño logrando disminuir la probabilidad de error de símbolos en un orden de magnitud de 1×10^{-2} en comparación a su contraparte sin rotación de ángulo.

Palabras clave: Constelación hexagonal, rectangular y circular, rotación de constelación, red eléctrica inteligente.

Abstract: In this paper, the hexagonal, circular and rectangular rotated constellations are analyzed for their applications in the smart grid. The performance of the proposed system is evaluated by determining the symbol error rate versus the signal to noise rate. The simulation results show that rotated constellations increase the performance of the communication system by reducing the symbol error rate at least 1×10^{-2} in relation to no rotated constellations.

Keywords: Constellation hexagonal, rectangular and circular constellation rotation, smart grid.

1 Introducción

Hoy en Europa, Estados Unidos, Japón, China y algunos países Hispanoamericanos existe la preocupación por la contaminación del ambiente, específicamente se abocan a disminuir la emisión de CO₂ a la atmósfera, para esto se concibe una nueva red eléctrica, la que se denomina red eléctrica inteligente [Energy10], [Kim10] y [Ghavari11]. La red eléctrica inteligente es una combinación de información, aplicaciones de tecnologías de comunicación avanzadas, que enlaza la generación, transmisión, distribución y a los consumidores finales. La diferencia entre la red eléctrica existente y la red eléctrica inteligente está en que la primera es un sistema centralizado donde la potencia fluye en un sentido, desde la fuente de generación a través del sistema de transmisión-distribución hacia los consumidores, incluye un control supervisado y adquisición de dato (SCADA), en cambio la red eléctrica inteligente tiene un flujo bidireccional que requiere agregar un conjunto de opciones a través de la red en los puntos de transferencia de potencia, en las subestaciones de distribución y en los medidores de los consumidores. Los requerimientos de la red eléctrica inteligente se resumen en los siguientes tópicos [Chen10], [Wollman10] y [Fan12]:

Tecnologías de Información y Comunicación: incluye tecnología de comunicación bidireccional para dar conectividad a los diferentes componentes de los sistemas de potencia y cargas. Arquitecturas abiertas para plug and play de aplicaciones de casas, vehículos eléctricos y de micro generación. Comunicación y el software-hardware necesario para dar a los consumidores una mayor información, además que se les permita entregar energía eléctrica cuando tengan un excedente.

Tecnologías de Control y Automatización: considera Dispositivos Electrónicos Inteligentes (DIE), mide, graba fallas y eventos para el sistema de potencia. Sensores integrados, sistemas de control y automatización,

tecnologías de información y comunicación para dar un rápido diagnóstico y tiempo de respuesta para cualquier evento en las diferentes partes del sistema de potencia.

Una red de comunicación de datos para la red eléctrica inteligente debe incluir [Kim11], [Zahurul11]: redes de áreas de casas (HAN: Home Area Network), la red de área de edificio (BAN: Building Area Network) la red de área industrial (IAN Industrial Area Network) y la red de área ancha (WAN: Wide Area Network).

La HAN es una red de comunicación de electrodomésticos y dispositivos que están dentro de las casas o en departamentos. La NAN (Neighborhood Area Network) es un concentrador de los HAN. La WAN es la mayor red de comunicación hacia/desde los centros de datos, las HAN se deben equipar con sensores inteligentes. Las WAN se conectan con el control del sistema de distribución.

La plataforma de comunicación de datos digitales que utiliza la red eléctrica como canal de transmisión se divide en tres arquitecturas: *red de alto voltaje (HV)*, *red de voltaje medio (MV)* y *la red de bajo voltaje (LV)*.

La red de bajo voltaje (*líneas eléctricas de bajo voltaje*, 380 Volt) son las que más se han estudiado y modelado [Xiaoxian08], [Bert11] y [Laguna08]. Las características como medio de transmisión son las siguientes: ruido de fondo, que contiene ruido coloreado, causado por lo equipos electrónico, que tiene una densidad espectral de potencia que disminuye con el aumento de la frecuencia, interferencias de banda angosta cuyas fuentes son las radio A.M, F.M y radios amateurs. El otro ruido es el ruido impulsivo donde se encuentra, ruido impulsivo sincrónico con la frecuencia principal (50 Hz) que son causados por los rectificadores controlados por silicio (SCR), ruido impulsivo asincrónico con la frecuencia principal y se debe a los electrodomésticos, ruido impulsivo aperiódico tienen una naturaleza esporádica

principalmente se deben a los transientes causados por la conexión y desconexión de los dispositivos eléctricos. Aunque el ruido de fondo tiene una naturaleza variante con el tiempo, se puede considerar estacionario porque varía muy lentamente en periodos de segundos y minutos. En cambio, el ruido impulsivo no se puede considerar estacionario, durante la ocurrencia de tales ruidos impulsivos, la potencia es muy alta y causa un significativo incremento en las ocurrencias de errores en la transmisión de dato digital.

La red de bajo voltaje es de 380 Volt y la frecuencia es de 50 Hz en Chile.

Las HAN pueden usar como canal de transmisión la red eléctrica de bajo voltaje aunque este es un medio adverso para transmitir/recibir datos digitales porque no se concibieron para este objetivo, pero con las técnicas modernas de codificación y modulación se baja notablemente la probabilidad de error de bits. Por esta razón es que en este artículo se propone la combinación de constelaciones bidimensionales rotadas para que se utilicen en las HAN.

Se tiene el trabajo de Foschini [Foschini74] que estudia las constelaciones que minimiza la probabilidad de error en un canal con ruido Gaussiano. En Forney [Forney84] se tiene un muy buen tutorial en el estudio de constelaciones para canales de banda limitada, En Simon [Simon73] se dan técnicas para generar y optimizar un conjunto de señales hexagonales. En Conway [Conway83], presenta una codificación rápida para un conjunto de puntos de enrejado para un canal Gaussiano.

En Leszek [Leszek05], se presenta el ángulo óptimo para modulaciones 8-PSK y 16-QAM, para lograrlo minimiza una función de costo. En Aulin [Aulin82], se direcciona el problema de diseño de señales con constelaciones multidimensionales para una eficiente transmisión de símbolo en canales variante en el tiempo. En Forney [Forney89], da una expresión analítica para la rotación óptima de ángulos con el criterio de la distancia Euclidiana para cualquier constelación M-PSK. En Stephane [Stephane05], se estudia el caso cuando cada portadora de transmisión tiene el mismo contenido de información (bits) y se concentra en el diseño de constelaciones que ayuden a aumentar el desempeño del receptor. El desempeño para altos SNR depende de la mínima distancia Euclidiana entre símbolos. Propone un algoritmo que encuentra el mapeo óptimo para constelaciones de tamaño 16 y 32 símbolos.

Para mejorar el desempeño del sistema de transmisión/recepción, se debe tener una muy baja probabilidad de error de símbolo utilizando la menor razón de señal a ruido posible. Para lograr este objetivo, en este artículo, se encuentran los ángulos de las rotaciones de las constelaciones bidimensionales hexagonales, circular y rectangular de cuatro y dieciséis símbolos; con esto se logra maximizar la distancia mínima entre dos puntos cualesquiera de la constelación, para así lograr una muy baja probabilidad de error de símbolo. El parámetro de desempeño es SER (razón de símbolo error) versus SNR (razón de señal a ruido).

El artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2, se analiza y se encuentran los ángulos de rotaciones óptimas de las constelaciones bidimensionales. En la sección 3, se muestra los Resultados en forma de gráficos y se realiza también una discusión de los resultados que se encuentran, y finalmente, en la sección 4 se dan las conclusiones.

2 Análisis del sistema propuesto

El ruido total presente en las líneas eléctricas de bajo voltaje se puede expresar como:

$$n(t) = n_b(t) + n_i(t) \quad (1)$$

Donde:

$n(t)$: Ruido total presente en las líneas eléctricas de bajo voltaje.

$n_b(t)$: Ruido de fondo (Gaussiano).

$n_i(t)$: Ruido impulsivo.

La señal que se recibe en el receptor es:

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (2)$$

Donde:

$y(t)$: Señal que se recibe en el receptor.

$n(t)$: Ruido en las líneas eléctricas de bajo voltaje.

$x(t)$: Señal que se transmite.

El ruido de fondo se modela para el rango de frecuencia de 50 KHz a 200 MHz, como:

$$DSP_{bn}(f) = a + b|f|^c \quad dBm / Hz \quad (3)$$

Donde:

$DSP_{bn}(f)$: Densidad espectral de potencia de ruido.

a, b, c : Parámetros que se derivan de mediciones.

f : Frecuencia en MHz.

De [Bert11] se tiene que para el peor caso $[a, b, c] = [-145, 53.23, -0.337]$ y para el mejor caso $[a, b, c] = [-140, 38.75, -0.72]$.

Para modelar el ruido impulsivo se tiene la función de densidad de probabilidad dado por:

$$P_n(v) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^k}{k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_k^2}} \quad (4)$$

Con:

$$\sigma_k^2 = \left(1 + \frac{1}{\Gamma}\right) \left(\frac{(k/A) + \Gamma}{1 + \Gamma}\right) \sigma_b^2 \quad (5)$$

Y:

$$\sigma_b^2 = 2R_m \int_{f_1}^{f_2} 10^{[DSP_{bn}(f)-30]/10} df \quad (Volt^2) \quad (6)$$

Donde:

R_{in} : Impedancia de entrada al receptor (50 Ohm, típico).

A : Índice impulsivo.

Γ : Razón ruido de fondo a ruido impulsivo.

$k := 3$ y $A = 0.01$ y $\Gamma = 0.001$ da muy buena aproximación para un ruido altamente impulsivo.

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 bi-dimensional se tiene $|C| = 2^b$ puntos, con b número entero.

Un método general para el diseño de constelaciones es escoger un conjunto finito de $|C|$ puntos desde “un enrejado” (Λ) de dimensión N .

La distancia Euclidiana entre dos puntos, está dada por:

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (8)$$

Donde:

(x, y) : Coordenadas rectangulares.

Para encontrar una constelación óptima se debe encontrar el máximo de la mínima distancia de (8), es decir:

$$Max_{i \neq j} d_{mon} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (9)$$

La probabilidad de símbolo error de acuerdo a Foschini [Foschini74] es para canal Gaussiano:

$$P_e \approx e^{-k Min_{i \neq j} \|s_i - s_j\|^2} \quad (10)$$

Donde:

s : Símbolos de la constelación bidimensional.

$\| \cdot \|$: Norma.

k : Cte. Depende del tipo de canal (Gaussiano, $k = \frac{1}{8N_o}$

N_o densidad espectral de ruido).

La (10) indica que la probabilidad de error depende de las distancias de separación de los símbolos de las constelaciones.

Se sigue el procedimiento dado en Foschini [Foschini74] y se encuentran las constelaciones rectangulares de cuatro y dieciséis símbolos. El esquema para cuatro símbolos se muestra en la Figura 1 y en la tabla I se dan las magnitudes de los puntos de la constelación. En la Figura 2 se muestra el esquema de dieciséis símbolos y, en la Tabla 2, se dan las magnitudes de la constelación.

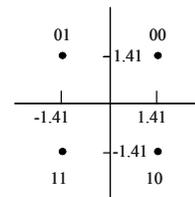


Figura 1 Esquema de la constelación rectangular de cuatro símbolos.

Tabla 1 Magnitudes de la constelación rectangular de cuatro símbolos.

$N = 4$	X	1.41	1.41	-1.41	-1.41
	Y	1.41	-1.41	1.41	-1.41

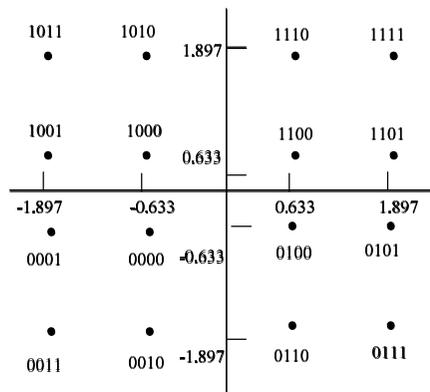


Figura 2 Esquema de la constelación rectangular de dieciséis símbolos.

Tabla 2 Magnitudes de la constelación rectangular de dieciséis símbolos.

$N = 16$	X	Y	X	Y
	0.633	0.633	0.633	1.897
	0.633	-0.633	0.633	-1.897
	-0.633	0.633	-0.633	1.897
	-0.633	-0.633	-0.633	-1.897
	1.897	0.633	1.897	1.897
	1.897	-0.633	1.897	-1.897
	-1.897	0.633	-1.897	1.897
	-1.897	-0.633	-1.897	-1.897

Se sigue el procedimiento dado en Leszek [Leszek05] y se construyen las constelaciones circulares de cuatro y dieciséis símbolos; en la Figura 3, se muestra el esquema de la constelación circular de cuatro símbolos y las magnitudes se dan en la Tabla 3. En la Figura 4, se muestra el esquema de la constelación circular de dieciséis símbolos y las magnitudes se dan en la Tabla 4.

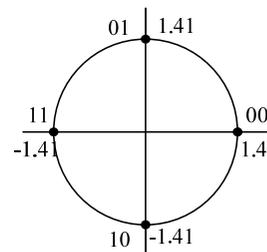


Figura 3 Esquema de la constelación circular de cuatro símbolos.

Tabla 3 Magnitudes de la constelación circular de cuatro símbolos.

N = 4	X	1.41	0	-1.41	0
	Y	0	-1.41	0	1.41

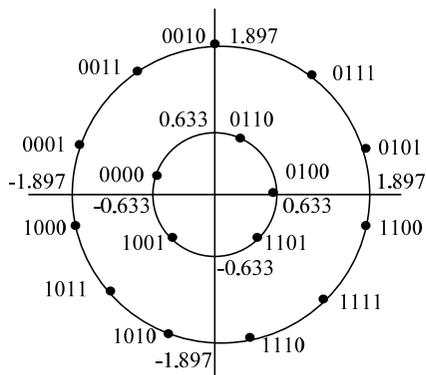


Figura 4 Esquema de la constelación circular de dieciséis símbolos.

Tabla 4 Magnitudes de la constelación circular de dieciséis símbolos.

N = 16	X	Y	X	Y
	0.633	0	-1.2422	1.4336
	0.1924	0.6070	-1.8201	0.5344
	-0.5121	0.3720	-1.8201	-0.5344
	-0.5121	-0.3720	-1.897	0
	0.1956	-0.6020	-1.2422	-1.4336
	1.5958	1.0255	-0.2699	-0.9898
	0.7880	1.725	0.7880	-1.7255
	-0.2699	0.9898	1.5958	-1.0255

Con el procedimiento dado en Simon [Simon73] se encuentran las constelaciones hexagonales de cuatro y dieciséis símbolos, el esquema para cuatro símbolos. Se muestra en la Figura 5 y en la Tabla 5, se dan las magnitudes de los puntos de la constelación. En la Figura 6, se da el esquema de dieciséis símbolos y en la Tabla 6, se dan las magnitudes de la constelación.

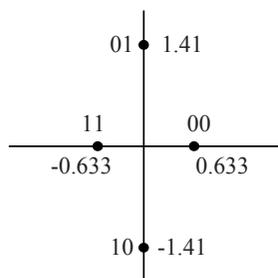


Figura 5 Esquema de la constelación hexagonal de cuatro símbolos.

Tabla 5 Magnitudes de la constelación hexagonal de cuatro símbolos.

N = 4	X	0	0.633	0	-0.633
	Y	1.41	0	-1.41	0

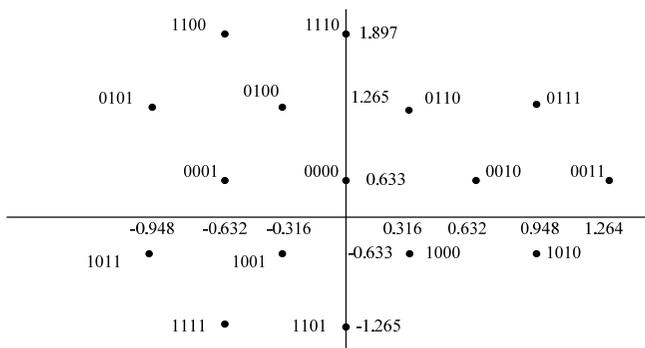


Figura 6 Esquema de la constelación hexagonal de dieciséis símbolos.

Tabla 6 Magnitudes de la constelación hexagonal de dieciséis símbolos.

N = 16	X	Y	X	Y
	0	1.897	0.632	0.633
	-0.632	1.897	1.264	0.633
	-0.948	1.265	-0.948	-0.633
	-0.316	1.265	-0.316	-0.633
	0.316	1.265	.316	-0.633
	0.948	1.265	0.948	-0.633
	0.948	0.633	-0.632	-1.265
	0	0.633	0	-1.265

Sea una constelación en el plano complejo, es decir, de la forma: $q_i = \pm x_i \pm y_i$, como se muestra en la Figura 7.

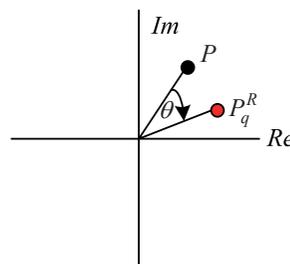


Figura 7 Puntos en el plano complejo.

De acuerdo a la Figura 7, los puntos P y P_q^R se relacionan con la siguiente transformación:

$$\begin{bmatrix} P_q^{Re} & P_q^{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Re} & P_{Im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

$$x_i = a_i \cos \theta - b_i \sin \theta \quad (12)$$

$$y_i = a_i \sin \theta + b_i \cos \theta \quad (13)$$

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:

$$d_i = |R_1 - x_i|^2 + |R_2 - y_i|^2 \quad (14)$$

Donde:

R_1 : Parte real de la señal que se recibe en el receptor.

R_2 : Parte imaginaria de la señal que se recibe en el receptor.

El detector escoge a favor del símbolo $\hat{s}_i = (x_i, y_i)$ que minimiza a (10). Se tiene la métrica [Craig91]:

$$P_e(s_i \rightarrow \hat{s}_i) \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + |x_i - \hat{x}_i|^2} \right) \left(\frac{1}{1 + |y_i - \hat{y}_i|^2} \right) \quad (15)$$

Donde:

P_e : Probabilidad de error de símbolo.

Si se utiliza (12) y (13) y se reemplaza en (15):

$$P_e(s_i \rightarrow \hat{s}_i) \geq G_1 G_2 \quad (16)$$

Donde:

$$G_1 = \frac{1}{1 + |(a_i - \hat{a}_i) \cos \theta + (b_i - \hat{b}_i) \sin \theta|^2} \quad (17)$$

$$G_2 = \frac{1}{1 + |(a_i - \hat{a}_i) \sin \theta + (b_i - \hat{b}_i) \cos \theta|^2} \quad (18)$$

Cuando no hay rotación:

$$\theta = 0 \quad (19)$$

$$x_i = a_i \quad (20)$$

$$y_i = b_i \quad (21)$$

En este caso G_1 y G_2 son:

$$G_1 = \frac{1}{1 + |(a_i - \hat{a}_i)|^2} \quad (22)$$

$$G_2 = \frac{1}{1 + |(b_i - \hat{b}_i)|^2} \quad (23)$$

Si se compara (17) con (22) y (18) con (23), 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 coste [Craig91]:

$$J = \sum_{\hat{s}_i \neq s_i} P_e(s_i \rightarrow \hat{s}_i) \quad (24)$$

La minimización de la función de coste J se realiza numéricamente usando el algoritmo de gradiente dado en [Johnson03]:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + u \frac{dJ}{d\theta} \quad (25)$$

Donde:

u : Constante de valor pequeño.

Evaluando (24) y (25) se obtienen los ángulos de rotaciones óptimos para cada una de las constelaciones rectangular, hexagonal y circular para cuatro y dieciséis símbolos de las Tabla 1 a la Tabla 6, las cuales se indican en la Tabla 8.

Tabla 8 Ángulos de rotación óptimos para las constelaciones rectangular, circular y hexagonal de cuatro y dieciséis símbolos.

	Rectangular	Circular	Hexagonal
$N = 4$	10°	38°	25°
$N = 16$	8°	20°	18°

Para comparar el desempeño de las constelaciones rectangular, circular, hexagonal sin rotación y con rotación, se utiliza el esquema dado en la Figura 8.

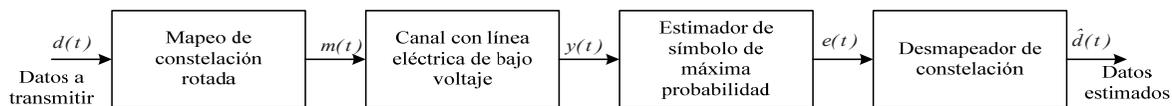


Figura 8 Esquema para comparar el desempeño de las constelaciones rectangular, circular, hexagonal con y sin rotación.

De acuerdo con la Figura 8, se tiene: los datos que se transmiten $d(t)$, el mapeo de constelación que toma m bits y la convierte en un símbolo de los q símbolos de la constelación rectangular, circular o hexagonal sin rotación y con rotación, de cuatro o dieciséis símbolos $m(t)$. El canal de transmisión le suma ruido, a la señal transmitida $y(t)$, el estimador de símbolo de máxima probabilidad $e(t)$, estima el símbolo transmitido a partir de la métrica de la mínima distancia, es decir, escoge el símbolo que de la menor distancia de entre todos los símbolos de la

constelación que se use, el desmapeo de constelación $\hat{d}(t)$, convierte el símbolo en m bits.

3 Resultados y discusión de los resultados

Resultados

La Figura 9 muestra la comparación del desempeño de SER versus SNR de las constelaciones rectangular, circular y hexagonal con rotación y sin rotación de cuatro

símbolos en el canal de transmisión con línea eléctrica de bajo voltaje.

La Figura 10 muestra la comparación del desempeño de SER versus SNR de las constelaciones rectangular,

circular y hexagonal con rotación y sin rotación de dieciséis símbolos en el canal de transmisión con línea eléctrica de bajo voltaje.

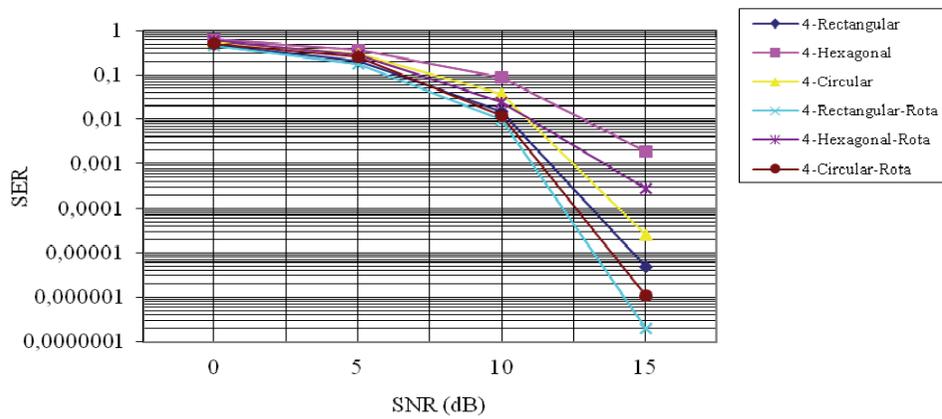


Figura 9 Comparación del desempeño de SER versus SNR de las constelaciones rectangular, circular y hexagonal con rotación y sin rotación de cuatro símbolos en el canal de transmisión con línea eléctrica de bajo voltaje.

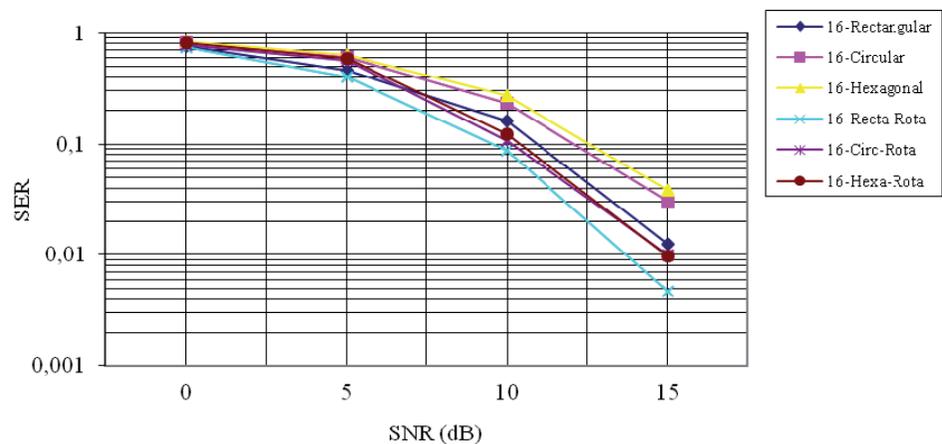


Figura 10 Comparación del desempeño de SER versus SNR de las constelaciones rectangular, circular y hexagonal con rotación y sin rotación de dieciséis símbolos en el canal de transmisión con línea eléctrica de bajo voltaje.

Discusión de los resultados

La Figura 9, donde se comparan las constelaciones con rotación y sin rotación, se infiere que las constelaciones rectangular y circular con rotación tienen mejor desempeño que la rectangular sin rotación y se observa además que las constelaciones con rotación tienen mejor desempeño que su contraparte sin rotación. Por ejemplo, se tiene que la constelación rectangular con rotación tiene una disminución de la probabilidad de error de símbolo del orden de magnitud de 1×10^{-2} con respecto a la constelación rectangular sin rotación. Comparando la constelación circular con rotación con respecto a la constelación circular sin rotación se baja la probabilidad de error en un orden de magnitud de 1×10^{-2} .

La Figura 10, donde se comparan el desempeño de las constelaciones de dieciséis símbolos con rotación y sin rotación, se observa que las constelaciones con rotaciones

tienen mejor desempeño que su contraparte sin rotaciones. La de mejor desempeño es la rectangular, cuantitativamente se tiene que la disminución de la probabilidad de error de símbolo de las constelaciones con rotación y sin rotación es de un orden de magnitud de 1×10^{-2} .

La razón del porqué se obtienen estos resultados es porque de acuerdo a (17) y (18) permite encontrar el ángulo óptimo de rotación, es decir, donde ocurre la menor probabilidad de error de símbolo.

4 Conclusiones

De acuerdo, con los resultados que se obtienen la rotación de la constelación permite mejorar el desempeño en el canal de ruido clase A, porque disminuye en forma significativa la probabilidad de error de símbolo, con un orden de magnitud de 1×10^{-2} para un SNR de 10 dB.

La rotación de las constelaciones no hace más complejo el diseño del receptor porque se emplea la misma métrica para el estimador de símbolos de máxima probabilidad.

Referencias bibliográficas

- [Energy10] Department of energy, The smart grid and introduction, 20110, disponible en:
www.energy.gov/SmartGridIntroduction.html
- [Kim10] 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.
- [Ghavari11] H. Gharavi, R. Ghafurian, Smart Grid the Electric System of Future, Proccending of IEEE, pp. 917-921, August 2011.
- [Chen10] 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.
- [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.
- [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.
- [Kim11] M. Kim, et. al. Design and implementation of MAC protocol for smart grid HAN environment, 11th International Conference on Computer and Information Technology, pp. 212-217, 2011.
- [Zahurul11] M. Zahurul, S. Islam, Home area network technology assessment for demand response in smart grid environment, 20th Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, 2010.
- [Xiaoxian08] Y. Xiaoxian, Z. Tao, Z. Baohui, Investigation of transmission properties on 10 KV medium voltage power line- Part II: path loss, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, N° 4, pp. 1886-1895, 2008.
- [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, pp. 283-294, 2011.
- [Laguna08] G. Laguna, R. Barcón, Survey of indoor power line communication channel modeling, Electronic Robotics and automotive Mechanic Conference, CERMA, Mexico, pp. 163-167, 2008.
- [Foshini74] Gerard J. Foshini, Richard D. Gitlin and Stephen B. Weinstein, Optimization of two dimensional signal constellations in the presence of Gaussian noise, IEEE Transactions on Communications, Vol. 22, N° 1, pp. 28-38, January 1974.
- [Forney84] G. D. Forney, R. G. Gallager, G. R. Lang, F. M. Longstaff and S. U. Qureshi, Efficient modulation for band limited channels, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 2, N° 5, pp. 632-647, September 1984.
- [Simon73] Marvin K. Simon and Joel G. Smith, Hexagonal multiple phase and amplitude shift keyed signal set, IEEE Transactions on Communications, Vol. 21, N° 10, pp. 1108-1115, October 1973.
- [Conway83] John H. Conway and N. J. A. Sloane, A fast encoding method for lattice codes and quantizers, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 29, N° 6, pp. 820-824, November 1983.
- [Leszek05] L Leszek Szczecinski and Marcos Bacic, Constellations Design for multiple transmissions: maximizing the minimum squared Euclidean distance, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol. 2, pp. 1066-1071, 13-17 March 2005.
- [Aulin82] Tor Aulin and Carl E. Sundberg, On the minimum Euclidean distance for a class of signal space codes, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 28, N° 1, pp. 43-55, January 1982.
- [Forney89] G. David Forney Jr., and Lee-Fang 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, 1989.
- [Craig91] J. Craig, A new simple and exact result for calculating the probability of error for two dimensional signal constellations, MILCOM'91, pp. 571-575.
- [Stephane05] Stephane Y. Le Golf, Signal constellations for bit-interleaved coded modulation", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 49, N° 1, pp. 307-313, January 2003.
- [Johnson03] C. R. Johnson and W. Sethares, Telecommunication breakdown concepts of communication transmitters via software defined radio, Editorial Prentice Hall, 2003.