

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE RECEPTORES MC-CDMA PARA PLC

A.B. Vallejo Mora y L. Díez  
abvm@ic.uma.es.

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n 29071.

**Abstract-** This article presents an overview of the technology PLC (Power Line Communications), such as applications, advantages, inconvenients and channel characteristics. In the studied case, power lines are used indoor to support local area networks in homes or small offices. The aim of this paper is to show results of simulations based on receivers with a combination of code division and multicarrier techniques, named multicarrier code-division multiple access (MC-CDMA). It discusses the use of two different receivers (ORC and EGC) and two types of spreading code, an orthogonal code (Walsh-Hadamard) or non-orthogonal code (Gold). The binary rate as a function of number of active users is evaluated for every receiver with both types of code.

## I. INTRODUCCIÓN

La tecnología PLC (Power Line Communications), también denominada BPL (Broadband over Power Line) se basa en la utilización de la red eléctrica para la transmisión de datos, y puede proporcionar una gran variedad de servicios de banda ancha. Además, permite la implantación de una red de área local usando el cableado ya existente de la red eléctrica.

Existen dos tipos fundamentales de PLC, PLOC (Power Line Outdoors Communications o comunicaciones externas al hogar), que implica la comunicación entre la subestación eléctrica y la red doméstica (electromódem), y PLIC (Power Line Indoors Communications o comunicaciones internas al hogar), que usa la red eléctrica propia de la vivienda y es muy utilizada en el ámbito de la domótica.

Las ventajas de la tecnología PLC serían el uso de una red ya existente, con el consecuente ahorro que ello implica, servicios competitivos en calidad/precio y muy diversos sobre el mismo medio, y amplia cobertura, favoreciendo las zonas con menores infraestructuras (zonas rurales y aisladas).

El principal inconveniente se encuentra en las radiaciones producidas en la banda de alta frecuencia que provocan interferencias en frecuencias reservadas para las fuerzas de seguridad, emergencia de aviación civil y radioaficionados. No obstante, este efecto se puede paliar en gran medida con una atenuación selectiva en la banda de frecuencia.

## II. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

La red eléctrica constituye un medio hostil para la transmisión de datos, porque cuenta con una impedancia variable, un ruido considerable, y una alta atenuación.

La red interna de cada vivienda (PLIC) muestra un comportamiento variante con el tiempo que tiene una naturaleza dual. Por un lado, presenta variaciones a largo plazo causadas por la conexión y desconexión de aparatos

eléctricos, y por el otro, se tienen variaciones a corto plazo que son sincronas a la red eléctrica y que dependen de la impedancia presentada por los aparatos conectados a la misma [1][2][3].

El fenómeno de propagación multicamino aparece debido a las reflexiones que una señal sufre en cada rama, enchufe vacío, o carga encontrada a lo largo del camino directo desde el transmisor al receptor. La respuesta impulsiva resultante del canal consiste en varios ecos retardados del impulso principal, lo cual se traduce en una respuesta en frecuencia con desvanecimientos profundos (fading) [1].

La impedancia del canal varía en gran medida con la frecuencia, y el rango que comprende va desde unos pocos ohmios hasta unos pocos de kiloohmios con picos en algunas frecuencias donde la red se comporta como un circuito resonante paralelo. Está fuertemente influenciada por la topología de la red y las cargas conectadas a la misma, así que las cargas que se conectan y desconectan cada cierto tiempo introducen un cambio en la impedancia [1][4].

El ruido existente en la red eléctrica está muy coloreado, y ello se debe principalmente a los aparatos enchufados cerca del receptor. Consta de componentes impulsivas múltiples, y existe un ruido de fondo cuyo espectro es decreciente con la frecuencia. Además serán captadas por los cables, interferencias de banda estrecha. El espectro de ruido varía en gran medida con la frecuencia, carga, hora del día, y localización geográfica [1][4].

## III. TÉCNICAS DE MODULACIÓN: MULTIPORTADORA CDMA

El acceso múltiple por división de código (CDMA) es una técnica de multiplexación, en la cual un número de usuarios simultáneamente y asincrónicamente acceden a un canal mediante señales de información moduladas y extendidas con una secuencia de código preasignada.

Por otro lado, el esquema de modulación multiportadora denominado multiplexación por división en frecuencia ortogonal (OFDM) es una solución para transmitir una tasa de datos alta a través de un canal muy hostil, haciendo uso de la técnica de "bit loading" mediante la cual, cambiaría la tasa binaria en cada una de las subportadoras existentes, dependiendo de la relación señal a ruido que tuviese en recepción, y se conseguiría una equalización sencilla.

Existen tres tipos de esquemas de acceso múltiple basado en la combinación de división de código y técnica OFDM que son, "Multiportadora (MC-) CDMA", "Multiportadora DS-

CDMA” y “Multitono (MT-) CDMA”, los cuales resultan adecuados dadas las características especiales del canal (variación con el tiempo y desvanecimientos severos en frecuencia)[5].

Los esquemas de Multiportadora CDMA están divididos en dos grupos. En ambos casos, los símbolos son expandidos por un código, la diferencia es que en un grupo, los chips pertenecientes a un mismo símbolo pueden distribuirse en diferentes subportadoras (equivaldría a una expansión en el dominio de la frecuencia) y se denomina MC-CDMA, y en el otro grupo, los chips se distribuirían sobre una misma subportadora (equivaldría a una expansión temporal), y se denomina Multiportadora DS-CDMA. Este artículo se va a centrar en el esquema MC-CDMA [5].

#### IV. ESQUEMA MC-CDMA

La configuración analizada corresponde a un enlace descendente (Fig.1), donde un equipo central, por ejemplo un router, envía información a un terminal dado a través de un canal, y junto con sus datos, irán los del resto de usuarios, comportándose como señales interferentes. El terminal tendrá que separar sus datos de los interferentes mediante la utilización de su código.

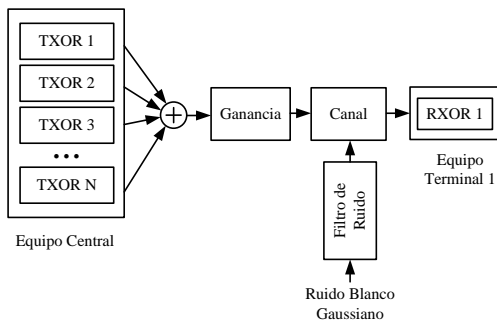


Fig. 1. Esquema de un enlace descendente.

##### A. Estructura transmisora

El transmisor MC-CDMA expande la cadena de datos original sobre diferentes subportadoras usando un código de expansión dado en el dominio de la frecuencia. En otras palabras, cada fracción del símbolo correspondiente a un chip del código es transmitida a través de una subportadora diferente [5].

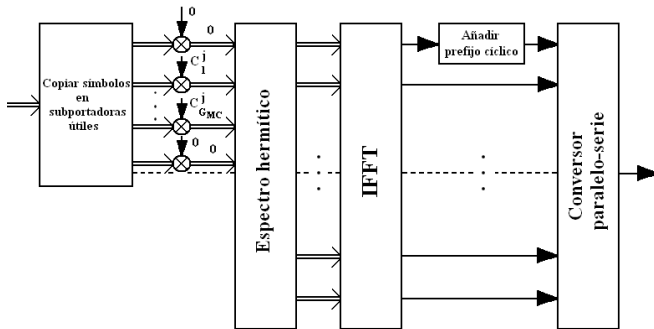


Fig. 2. Diagrama de bloques del transmisor MC-CDMA.

La Fig. 2 muestra el transmisor MC-CDMA del usuario  $j$ -ésimo, donde  $G_{MC}$  denota la ganancia de proceso y  $C^j(t) =$

$[C^j_1 C^j_2 \dots C^j_{G_{MC}}]$  el código del usuario  $j$ -ésimo. Este esquema asume que el número de subportadoras es igual a la ganancia de proceso, aunque no tiene por qué ser así. En el sistema simulado se ha impuesto que el número de subportadoras útiles (sin considerar las subportadoras de guarda) tiene que ser un múltiplo de la ganancia de proceso, de manera que el código de un usuario se repetirá un número entero de veces.

##### B. Estructuras receptoras

En un receptor MC-CDMA la señal recibida es combinada en el dominio de la frecuencia, por tanto, el receptor siempre puede emplear toda la energía de la señal recibida dispersa en el dominio de la frecuencia. Ésta es la principal ventaja del esquema MC-CDMA respecto a otros. Sin embargo, en un canal con desvanecimientos selectivos en frecuencia, todas las subportadoras tienen diferentes niveles de amplitud y fase (aunque existe alta correlación entre subportadoras), lo cual se traduce en una distorsión de la ortogonalidad entre usuarios [5].

La diferencia entre los distintos receptores con código CDMA distribuidos en frecuencia vendrá dada por la ponderación de los valores de cada subportadora.

La Fig. 3 muestra el receptor MC-CDMA del usuario  $j$ -ésimo, donde la variable de decisión viene dada por

$$D^j = \sum_{m=1}^{G_{MC}} eq_m c_m^j y_m \quad \text{siendo} \quad y_m = \sum_{j=1}^J z_m a^j c_m^j + n_m \quad (1)$$

donde,  $y_m$  y  $n_m$  son la componente banda base compleja de la señal recibida y el ruido aditivo gaussiano de la subportadora  $m$ -ésima, respectivamente,  $z_m$  y  $a^j$  son la respuesta del canal en la subportadora  $m$ -ésima y el símbolo transmitido por el usuario  $j$ -ésimo, respectivamente,  $J$  es el número de usuarios activos,  $c_m^j$  el chip correspondiente a la subportadora  $m$ -ésima dentro del código del usuario  $j$ -ésimo, y  $eq_m$  el factor de equalización que se aplica a la subportadora  $m$ -ésima, según el tipo de receptor utilizado.

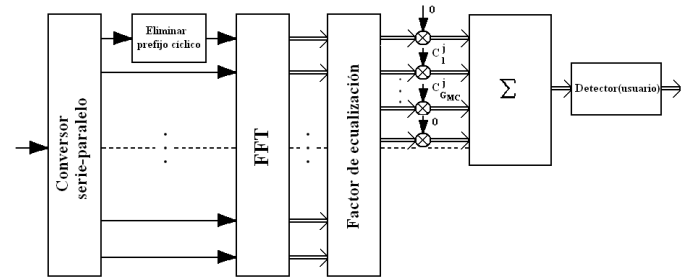


Fig. 3. Diagrama de bloques del receptor MC-CDMA.

##### 1) Combinación ortogonal (ORC)

El receptor ORC (Orthogonality Restoring Combining) minimiza la interferencia entre usuarios y elimina el efecto del canal porque hace una equalización perfecta, pero puede amplificar el ruido ya que las subportadoras de bajo nivel son multiplicadas por elevadas ganancias. El factor de equalización ( $eq_m$ ) depende de la subportadora ‘ $m$ ’ según la ecuación [5]

$$eq_m = \frac{z_m^*}{|z_m|^2 \cdot G \cdot k_1} \quad (2)$$

siendo  $z_m$  el valor que tiene la respuesta en frecuencia del canal en la subportadora  $m$ -ésima y  $G$  la ganancia que se incorpora para cumplir los niveles de densidad espectral de potencia (DEP) a la hora de transmitir la señal por el canal. La constante de normalización  $k_1$  tiene un valor igual a la longitud del código ( $l_c$ ).

En este receptor la contribución de los valores que existan en cada subportadora va a ser igual, porque la ponderación de cada subportadora es de valor unidad.

## 2) Combinación de ganancia igual (EGC)

El receptor EGC (Equal Gain Combining) tiene un factor de ecualización ( $eq_m$ ) dado por [5]

$$eq_m = \frac{z_m^*}{|z_m| \cdot G \cdot k_2}, \quad (3)$$

siendo  $k_2$  la constante de normalización, que en este caso, depende de la amplitud del canal en cada subportadora (ecuación 4).

$$k_2 = \sum_{m=l_c} |z_m| \quad (4)$$

Como se deduce de la ecuación 4, en este receptor la ponderación de cada subportadora viene dada por el módulo de la respuesta en frecuencia del canal en cada valor frecuencial, de manera que tendrán mayor contribución las subportadoras con mayor nivel.

## V. RESULTADOS

### A. Parámetro a evaluar: velocidad binaria

El parámetro evaluado en cada receptor será la velocidad binaria. Para ello, se obtendrá la relación señal a ruido (SNR) para cada grupo de frecuencias de tamaño igual a la longitud del código.

A partir de la SNR obtenida, y fijada la probabilidad de error que se quiere tener en el sistema, se obtiene la velocidad de usuario,  $v_u$

$$v_u = \sum_{n_g} v_g = \sum_{n_g} \frac{1}{T} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{10^\gamma} \right) \text{ (bps)} \quad (5)$$

donde  $n_g$  y  $v_g$  son el número de grupos de subportadoras de tamaño  $l_c$  y la velocidad alcanzada en cada uno de ellos, respectivamente, y  $T$  es el periodo de símbolo OFDM-CDMA.  $SNR$  es la relación señal a ruido de un grupo de subportadoras, y  $\gamma$  es el factor por el que hay que reducir la SNR según la probabilidad de error que se quiera permitir en el sistema, siendo en este caso, de 9dB para obtener una probabilidad de error de símbolo inferior a  $10^{-5}$ , sin utilizar codificación.

### B. Parámetros utilizados en la simulación

Los grupos de subportadoras se han formado de dos formas: todas las subportadoras contiguas, o entremezcladas de forma aleatoria dentro del ancho de banda de transmisión, siendo en este caso de [1-20] MHz.

Se han elegido los parámetros de longitud del prefijo cíclico y número de subportadoras útiles, intentando conseguir un compromiso entre complejidad y prestación.

Los valores utilizados en las simulaciones han sido, una longitud de prefijo cíclico de 120 para subportadoras contiguas, y de 300 para subportadoras entremezcladas, y 2048/1984 subportadoras, según tipo de código usado. El prefijo cíclico supondría por tanto, entre un 3-7% del símbolo transmitido.

Se han utilizado dos tipos de canales medidos en la red eléctrica: un canal menos ruidoso y dispersivo en el tiempo (Canal<sub>A</sub>-DEPruido<sub>A</sub>), y otro más ruidoso y dispersivo en el tiempo (Canal<sub>B</sub>-DEPruido<sub>B</sub>). La Fig.4 muestra la atenuación presentada por cada canal, y la DEP de ruido existente en cada caso.

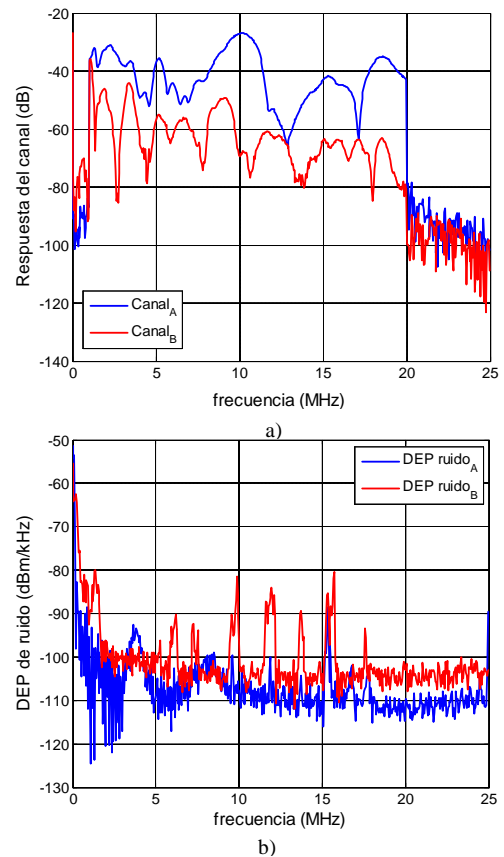


Fig. 4. Canal de la red eléctrica: a) Respuesta del canal; b) DEP de ruido.

La señal transmitida por el canal tendrá que mantener una DEP dada, impuesta por las especificaciones del sistema, siendo en este caso de -20 dBm/kHz cuando todos los usuarios están activos. En las simulaciones se ha supuesto que el número máximo de usuarios que pueden estar funcionando a la vez es treinta y dos, y que en recepción el canal es conocido, por lo que no se hace estimación del mismo.

Por otro lado, se han estudiado dos tipos de códigos, Walsh-Hadamard (código H) y Gold. El código H es ortogonal y permite una longitud de treinta y dos, mientras que con el código Gold la longitud es de treinta y uno, y no es ortogonal. No obstante, el código H requiere de usuarios síncronos, algo que no es necesario con el código Gold.

### C. Comparativa de velocidad: ORC vs EGC

La Fig.5 muestra los resultados obtenidos tras las simulaciones, para los receptores ORC y EGC, con los parámetros mencionados anteriormente.

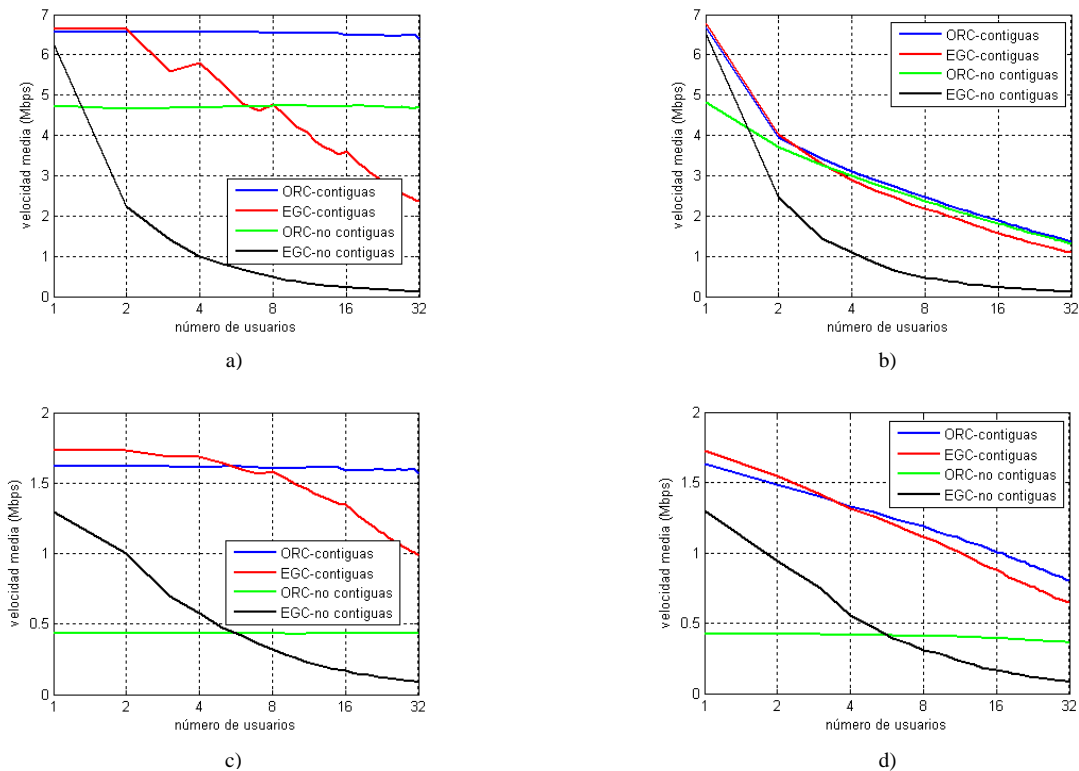


Fig. 5. Velocidad media vs número de usuarios. Cuatro situaciones: a) Canal poco ruidoso (Canal<sub>A</sub>-DEP ruido<sub>A</sub>) y código H; b) Canal poco ruidoso (Canal<sub>A</sub>-DEP ruido<sub>A</sub>) y código Gold; c) Canal ruidoso (Canal<sub>B</sub>-DEP ruido<sub>B</sub>) y código H; d) Canal ruidoso (Canal<sub>B</sub>-DEP ruido<sub>B</sub>) y código Gold.

## VI. CONCLUSIONES

En un enlace descendente se mantienen las propiedades de correlación de los códigos, porque el efecto de que cada chip sea multiplicado por un valor diferente de la respuesta en frecuencia del canal, queda eliminado por la eualización. Las conclusiones extraídas tras las simulaciones son:

### A. Velocidad

La velocidad con un usuario, es semejante para código H y Gold. El comportamiento al aumentar el número de usuarios, queda determinado por la existencia o no de interferencia entre usuarios. Además, con un canal más ruidoso, naturalmente se obtienen menores velocidades, porque la SNR obtenida por grupos de subportadoras será inferior.

### B. Código H

El receptor ORC pondera por igual a todas las subportadoras que existen en el ancho de banda evaluado, con lo cual mantiene la ortogonalidad entre los usuarios propia de este tipo de código (no existe interferencia entre usuarios), consiguiendo que la velocidad sea constante independientemente del número de usuarios activos del sistema. La interferencia entre símbolos (ISI) y la interferencia entre subportadoras (ICI) son despreciables.

El receptor EGC funciona peor conforme aumenta el número de usuarios en el sistema porque destruye la ortogonalidad del código H (pondera cada subportadora según el módulo de la respuesta en frecuencia del canal a dicha frecuencia) y por tanto, da lugar a la aparición de interferencia entre usuarios. La ISI e ICI son despreciables.

### C. Código Gold

El receptor ORC no mantiene la velocidad constante en función del número de usuarios porque el código Gold no es

ortogonal, con lo cual existen interferencias entre los usuarios. Esta interferencia aumenta con el número de usuarios y reduce la velocidad. También existe ISI e ICI.

El receptor EGC obtiene una velocidad inferior al ORC cuando hay muchos usuarios porque pondera de forma diferente cada subportadora, al multiplicar por el módulo de la respuesta del canal a dicha frecuencia, mientras que el ORC las consideraba a todas por igual. Consigue una mejora respecto al ORC, para uno o pocos usuarios, según el caso.

### D. Subportadoras contiguas o entremezcladas

Según las gráficas obtenidas, resulta más conveniente para una transmisión que las subportadoras estén contiguas. De esta manera, habrá grupos de frecuencias que tengan muy buena SNR, y otros que la tengan mala, pero ello resulta mejor, al caso en el que haya chips de un mismo código con muy buena SNR y otros con muy mala, porque al final siempre se obtendrá una SNR global baja.

## REFERENCIAS

- [1] Cañete, F.J., Cortés, J.A., Díez, L. and Entrambasaguas, J.T., "Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium", IEEE Communications Magazine, April 2003, pp. 41-46.
- [2] J.A. Cortés, F.J. Cañete, L. Díez and J.T. Entrambasaguas, "Characterization of the Cyclic Short-Time Variation of Indoor Power-line Channels Response", in International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), 2005, pp. 326-330.
- [3] F. Cañete, J. Cortés, L. Díez, and J. Entrambasaguas, "Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power-line channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 24, no. 7, pp. 1327-1338, July 2006.
- [4] Aristotle Niovi Pavlidou, A.J. Han Vinck, Javad Yazdani and Bahram Honary, "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends", IEEE Communications Magazine, April 2003, pp.34-39.
- [5] Hara, S and Prasad, R., "Overview of Multicarrier CDMA", IEEE Communications Magazine, December 1997, pp. 126-133.