

# Estudio, Modelamiento y Simulación de Alocación Adaptiva de Bits en Sistemas Multiuser OFDM

Fabián Toro Sánchez<sup>1</sup>, Ing. Hernán Córdova<sup>2</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
ftoro@espol.edu.ec<sup>1</sup>, hcordova@ieee.org<sup>2</sup>

## Resumen

*El presente trabajo investiga el problema de la alocación adaptiva (dinámica) de bits para sistemas Multiuser OFDM. Uno de los problemas principales en Multiuser OFDM es la alocación de recursos (subportadoras y potencia) entre los usuarios que comparten el canal. Dos soluciones han sido analizadas y propuestas: la primera se basa en una distribución casi equitativa de recursos, mientras que la segunda propone una distribución proporcional de la capacidad y luego se intenta optimizar la alocación de potencia una vez obtenido el esquema de alocación. La alocación de subportadoras y potencia son llevadas a cabo por separado para reducir la complejidad matemática. El algoritmo propuesto como solución fue aplicado en un sistema VDSL2, considerando únicamente el efecto del Ruido Blanco Gaussiano y del FEXT. Para la simulación de alocación de recursos se consideró un número de 15 y 25 usuarios, y distancias de 500, 1000 y 1500 metros. Finalmente, un modelo matemático para hallar la variación de la capacidad a medida que aumenta el número de usuarios es propuesto. Para dicha variación, en la simulación se consideró un número de hasta 50 usuarios.*

**Palabras Claves:** Multiuser OFDM, canal, alocación adaptiva, Capacidad, VDSL2, FEXT, subportadoras, disturber, PSD, Ruido Blanco Gaussiano.

## Abstract

*This paper studies the problem of the adaptive bit allocation for Multiuser OFDM. A key issue in OFDM is the subcarrier and power allocation among users sharing the channel. Two solutions have been analyzed and proposed: the first one is based on an equal power distribution, whereas the second one proposes a proportional distribution of capacity and then tries to optimize the power allocation, once the subcarrier allocation has been achieved. Subcarrier and power allocation are carried out separately, in order to reduce the complexity of the solution. The algorithm proposed as solution was applied over a VDSL2 system, where Additive White Gaussian Noise and FEXT were considered as the only disturbers. For resources allocation simulation, a total of 15 and 25 users were considered, and distances of 500, 1000 and 1500 m. Finally, a mathematical model is proposed in order to find the capacity variation as the number of users gets increased. For such variation, a total of up to 50 users were considered in the simulation.*

**Keywords:** Multiuser OFDM, channel, adaptive allocation, Capacity, VDSL2, FEXT, subcarriers, disturber, PSD, Additive White Gaussian Noise.

## 1. Introducción

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una técnica muy prometedora para el futuro de las telecomunicaciones. OFDM divide el ancho de banda total en  $N$  subcanales ortogonales. Estos subcanales son independientes uno del otro, de tal forma que cada uno de ellos puede tener un tipo de modulación distinto, según convenga, y gracias a esta propiedad el acceso múltiple puede ser posible [2]. Multiuser OFDM permite que múltiples usuarios puedan enviar bits dentro del mismo símbolo OFDM.

Una de las formas de definir la alocaación adaptiva de bits sería hallar el esquema que permita utilizar la potencia mínima del sistema a la vez que se debe cumplir la condición de que la tasa de transferencia de bits no decaiga de un valor establecido. Otra forma de definirlo sería hallar un esquema que permita distribuir las subportadoras a cada uno de los usuarios de tal forma que se pueda maximizar la tasa de transferencia de bits pero sin exceder un valor límite de potencia [1].

Existen dos tipos de esquemas de alocaación de recursos: esquema fijo de alocaación de recursos y alocaación dinámica de recursos [4]. En sistemas no adaptivos de alocaación de recursos, tales como TDMA o FDMA, a cada usuario se le asigna una “dimensión”, tales como un slot de tiempo (para el caso de TDMA) o una banda de frecuencia (para FDMA) [3]. Estos esquemas fijos no son óptimos ya que el esquema se mantiene siempre fijo sin considerar cuál es la actual respuesta del canal [4]. Por otra parte, los esquemas adaptivos de alocaación de recursos asignan una “dimensión” de manera dinámica [4], adaptándose a la condición actual del canal. De esta forma, se puede aprovechar la información del canal para asignar una mayor cantidad de bits en la subportadora donde la ganancia del canal sea más alta.

Se han propuesto dos clases de técnicas de optimización en la alocaación adaptiva para Multiuser OFDM: Margin Adaptive (MA) y Rate Adaptive (RA) [4]. El objetivo en MA es lograr minimizar la potencia total de transmisión con la condición de no decaer de un valor mínimo de tasa de transferencia de bits. En las técnicas RA, el objetivo es maximizar la tasa de transmisión de bits sin exceder el valor límite de potencia total de transmisión. Estos problemas de optimización son no lineales y, por tanto, matemáticamente complicados de resolver [4].

Para el presente trabajo, las dos soluciones presentadas son Rate Adaptive. La primera solución intentará maximizar la mínima capacidad, en la cual la potencia será dividida por igual entre todos los subcanales; la segunda solución introducirá una mejora a la primera solución: se incluye el uso de unos coeficientes de proporcionalidad y una mejor distribución de la potencia. La solución propuesta como primera solución será simulada.

El presente paper está organizado de la siguiente manera: la Sección II presenta la optimización de la

función que será el objeto de estudio; la Sección III analiza la primera solución propuesta; en la Sección IV se presenta la segunda solución, una versión mejorada de la primera; en la Sección V se presentan los resultados de las simulaciones; y, en la Sección VI, las conclusiones.

## 2. Modelamiento

La elaboración del presente trabajo está basada en un sistema VDSL2. Se asumirá como único disturber el efecto del FEXT.

De manera ideal, las subportadoras y la potencia deberían ser alocadas conjuntamente para lograr la óptima solución [2]. Lamentablemente, hacer esto requeriría un complicado proceso computacional. Separando la alocaación de subportadoras y potencia es una forma de reducir la complejidad, ya que el número de variables en la función objetivo se reduciría aproximadamente a la mitad [2].

En este paper, la alocaación de subportadoras para las dos soluciones está basada en el algoritmo propuesto en [2], [3] y [4]. El problema de optimización de la alocaación adaptiva de recursos puede ser formulado de la siguiente manera:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \right) \quad (1)$$

sujeto a

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} p_{k,n} \leq P_{total}$$

$$p_{k,n} \geq 0 \text{ for all } k, n$$

$$\Omega_k \text{ are disjoint for all } k$$

$$\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_k \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$$

$$R_1 : R_2 : \dots : R_k = \gamma_1 : \gamma_2 : \dots : \gamma_k$$

donde  $K$  es el número de usuarios;  $N$  es el número total de subportadoras;  $N_0$  es la densidad espectral de potencia del ruido blanco gaussiano;  $B$  y  $P_{total}$  son el ancho de banda y potencia total disponible, respectivamente;  $p_{k,n}$  es la alocaación de potencia para el usuario  $k$  en la subportadora  $n$ ;  $h_{k,n}$  es la ganancia del canal para el usuario  $k$  en la subportadora  $n$ ;  $\Omega_k$  es el conjunto cuyos elementos son las subportadoras asignadas al usuario  $k$  y son mutuamente excluyentes;  $N_k$  es el número de subportadoras en  $\Omega_k$ ; y,  $R_k$  es la capacidad del usuario  $k$  definida como

$$R_k = \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}^2}{N_0 \frac{B}{N}} \right) \quad (2)$$

### 3. Primera Solución

La meta principal de este algoritmo es maximizar la capacidad de aquel usuario que tiene la capacidad más baja de todos (es decir, maximizar la mínima capacidad). El algoritmo propuesto en [2], [3] y [4] es como sigue:

- 1) Inicialization  
set  $R_k = 0$ ,  $\Omega_k = \emptyset$  for  $k = 1, 2, \dots, K$ ; and  $A = \{1, 2, \dots, N\}$
- 2) for  $k = 1$  to  $K$ 
  - a) find  $n$  satisfying  $|H_{k,n}| \geq |H_{k,j}|$ , for all  $j \in A$
  - b) let  $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}$ ;  $A = A - \{n\}$  and update  $R_k$  according to (2)
- 3) while  $A \neq \emptyset$ 
  - a) find  $k$  satisfying  $R_k \leq R_i$ ,  $0 \leq i \leq K$
  - b) for the found  $k$ , find  $n$  satisfying  $|H_{k,n}| \geq |H_{k,j}|$ , for all  $j \in A$
  - c) for the found  $k$  and  $n$ , let  $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}$ ;  $A = A - \{n\}$  and update  $R_k$  according to (2)

En este algoritmo se define

$$H_{k,n} = h_{k,n}^2 / (N_o * B / N)$$

como la relación Ganancia de Canal a Ruido del usuario  $k$  en la subportadora  $n$ .

La explicación de este algoritmo es la siguiente: que cada usuario utilice tantos subcanales  $H_{k,n}$  más altos como sea posible. El algoritmo primero empieza asignándole una subportadora a cada usuario. Luego, mientras existan aún subportadoras sin asignar, el algoritmo buscará a aquel usuario que tenga la menor capacidad de todos. Por cada iteración, el usuario con la menor capacidad tiene la opción de elegir qué subcanal utilizar. Dicho usuario vuelve a buscar cuál es el subcanal que tiene la mejor relación Ganancia de Canal a Ruido. El algoritmo se seguirá repitiendo mientras sigan existiendo subportadoras disponibles. Ninguna subportadora puede ser asignada a más de un usuario. Este algoritmo es sub-óptimo porque asigna igual distribución de potencia para cada uno de los subcanales [4].

### 4. Segunda Solución

En [4], Z. Shen, J. G. Andrews y B. Evans sugieren una pequeña variante al uso del algoritmo propuesto en [2]. Introducen el concepto de utilizar unos coeficientes de proporcionalidad que les darán cierta prioridad a determinados usuarios. De esta forma se puede crear un servicio al cual el usuario tendría que suscribirse: aquel usuario que pague por el servicio tendrá mayor prioridad y por tanto su capacidad será mayor.

Además, en esta solución propuesta en [2] y [4] no sólo se busca introducir el concepto de prioridad sino que también se intenta hacer una optimización en la potencia. Es decir, este algoritmo ya no supone

potencias divididas por igual sino que se llega a una expresión que busca optimizar la potencia por cada usuario. La solución propuesta en [4] es la siguiente:

- 1) Inicialization  
set  $R_k = 0$ ,  $\Omega_k = \emptyset$  for  $k = 1, 2, \dots, K$ ; and  $A = \{1, 2, \dots, N\}$ 
  - a) find  $n$  satisfying  $|H_{k,n}| \geq |H_{k,j}|$ , for all  $j \in A$
  - b) let  $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}$ ;  $A = A - \{n\}$  and update  $R_k$  according to (2)
- 3) while  $A \neq \emptyset$ 
  - a) find  $k$  satisfying  $R_k/\gamma_k \leq R_i/\gamma_i$ ,  $0 \leq i \leq K$
  - b) for the found  $k$ , find  $n$  satisfying  $|H_{k,n}| \geq |H_{k,j}|$ , for all  $j \in A$
  - c) for the found  $k$  and  $n$ , let  $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}$ ;  $A = A - \{n\}$  and update  $R_k$  according to (2)

La diferencia entre esta solución y la primera es que a partir de la segunda iteración en vez de iniciar por el usuario que tiene la menor capacidad de todos, se empieza por el usuario que tiene la menor relación  $R_k/\gamma_k$ . Si un usuario tiene una alta prioridad, el valor de  $\gamma$  es alto y por tanto la fracción  $R_k/\gamma_k$  es más pequeña que la de los demás, siendo ésta la elegida para iniciar en una nueva iteración.

Una vez que se ha logrado encontrar un esquema de alocaación de bits, el algoritmo propuesto en [4] sugiere un procedimiento matemático para encontrar el valor de la potencia para el cual la capacidad total del sistema es máxima. Es decir, tenemos un problema de maximización, en el cual se tratará de maximizar la función  $L$  definida por [2], [4]:

$$\begin{aligned}
 L = & \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2 (1 + p_{k,n} H_{k,n}) \\
 & + \lambda_1 \left( \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} p_{k,n} - P_{total} \right) \\
 & + \sum_{k=2}^K \lambda_k \left( \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2 (1 + p_{1,n} H_{1,n}) \right. \\
 & \left. - \frac{\gamma_1}{\gamma_k} \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2 (1 + p_{k,n} H_{k,n}) \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

en donde  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  son los multiplicadores de Lagrange. Luego de derivar (3) con respecto a  $p_{k,n}$  y de igualar cada derivada a cero, tenemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial p_{1,n}} = & \frac{1}{N \ln 2} \frac{H_{1,n}}{1 + H_{1,n} p_{1,n}} + \lambda_1 \\
 & + \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{1}{N \ln 2} \frac{H_{1,n}}{1 + H_{1,n} p_{1,n}} = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial p_{k,n}} &= \frac{1}{N \ln 2} \frac{H_{k,n}}{1 + H_{k,n} p_{k,n}} + \lambda_1 \\ -\lambda_k \frac{\gamma_1}{\gamma_k} \frac{1}{N \ln 2} \frac{H_{k,n}}{1 + H_{k,n} p_{k,n}} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

De las ecuaciones (4) y (5) obtenemos:

$$\frac{H_{k,m}}{1 + H_{k,m} p_{k,m}} = \frac{H_{k,n}}{1 + H_{k,n} p_{k,n}} \quad (6)$$

para  $m, n \in \Omega_k$  y  $k = 1, 2, \dots, K$ . Reescribiendo la ecuación (6) tenemos:

$$p_{k,n} = p_{k,1} + \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}} \quad (7)$$

para  $n = 1, 2, \dots, N_k$  y  $k = 1, 2, \dots, K$ . La ecuación (7) muestra la distribución de potencia del usuario  $k$  en la subportadora  $n$ . Si definimos  $P_{k,tot}$  como la potencia total asignada para el usuario  $k$  usando la ecuación (7),  $P_{k,tot}$  puede ser expresada como

$$P_{k,tot} = \sum_{n=1}^{N_k} p_{k,n} = N_k p_{k,1} + \sum_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}} \quad (8)$$

para  $k = 1, 2, \dots, K$ .

Una vez que el conjunto  $\{P_{k,tot}\}_{k=1}^K$  es conocido, la asignación de potencia puede ser determinada por (7) y (8). Con (6) y (8) la capacidad puede ser expresada de la siguiente forma, obteniendo la ecuación (9):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma_1} \cdot \frac{N_1}{N} \left( \log_2 \left( 1 + H_{1,1} \frac{P_{1,tot} - V_1}{N_1} \right) + \log_2 W_1 \right) &= \\ \frac{1}{\gamma_k} \cdot \frac{N_k}{N} \left( \log_2 \left( 1 + H_{k,1} \frac{P_{k,tot} - V_k}{N_k} \right) + \log_2 W_k \right) \end{aligned}$$

en donde

$$V_k = \sum_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}} \quad (10)$$

$$W_k = \left( \prod_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n}}{H_{k,1}} \right)^{\frac{1}{N_k}} \quad (11)$$

para  $k = 2, 3, \dots, K$ . Añadiendo la condición:

$$\sum_{k=1}^K P_{k,tot} = P_{total} \quad (12)$$

tenemos que hay  $K$  variables en el conjunto de ecuaciones formadas por (9) y (12). Cualquier método iterativo para resolver dicho sistema de ecuaciones puede ser utilizado (por ejemplo, podría utilizarse el método de Newton-Raphson). Bajo condiciones especiales, la solución más cercana a la solución óptima puede hallarse en una sola iteración. A continuación se analizan dos casos:

#### 4.1. Caso Lineal

Si  $N_1: N_2: \dots: N_k = \gamma_1: \gamma_2: \dots: \gamma_k$ , entonces el conjunto de ecuaciones formadas por (9) y (12) puede ser transformada en un conjunto de ecuaciones lineales con la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & a_{K,K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{1,tot} \\ P_{2,tot} \\ \vdots \\ P_{K,tot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{total} \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde

$$\begin{aligned} a_{k,k} &= -\frac{N_1}{N_k} \frac{H_{k,1} W_k}{H_{1,1} W_1} \\ b_k &= \frac{N_1}{H_{1,1} W_1} \left( W_k - W_1 + \frac{H_{1,1} V_1 W_1}{N_1} - \frac{H_{k,1} V_k W_k}{N_k} \right) \end{aligned}$$

para  $k = 1, 2, \dots, K$ . Excepto en la primera fila, primera columna y la diagonal principal de la matriz en (13), los demás elementos son ceros. La solución a dicho sistema de ecuaciones puede ser encontrada como sigue:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{tot} - P_2 - P_3 - \dots - P_K \\ P_1 &= P_{tot} - \sum_{k=2}^K P_k \quad (13.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= (b_2 - P_1)/a_{22} \\ P_3 &= (b_3 - P_1)/a_{33} \\ &\vdots \\ P_k &= (b_k - P_1)/a_{kk} \end{aligned} \quad (13.2)$$

Reemplazando  $P_k$  en (13.1) y luego de reducir términos semejantes, tenemos una expresión que nos permitirá encontrar el valor de  $P_1$ :

$$P_1 = \left( P_{tot} - \sum_{k=2}^K \frac{b_k}{a_{kk}} \right) / \left( 1 - \sum_{k=2}^K \frac{1}{a_{kk}} \right) \quad (13.3)$$

Una vez obtenido el valor de  $P_l$  podremos hallar cualquier valor de  $P_k$  de la ecuación (13.2). Esta solución es válida sólo si la relación entre todos los  $N_k$  se mantiene igual a la relación entre todos los  $\gamma_k$ , es decir, que la proporción entre el número de subportadoras asignadas por usuario sea igual a la proporción mantenida por sus coeficientes de prioridad.

## 4.2. Relación Ganancia a Ruido muy alta

Si consideramos el hecho de que los subcanales con ganancia de canal muy alta son los elegidas en el algoritmo de asignación, se puede hacer una primera aproximación:  $V_k = 0$ , donde

$$V_k = \sum_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}}$$

Como se eligieron canales con alta ganancia, la diferencia del numerador es muy cercana a cero, y comparado con  $P_{k,tot}$ , es un valor muy pequeño; por tanto la aproximación para  $V_k = 0$  es válida.

Una segunda aproximación puede ser tomada del hecho de que  $H_{k,1} P_{k,tot} / N$  es mucho mayor que 1. Con estas dos aproximaciones, la ecuación (9) puede ser escrita como:

$$\left( \frac{H_{1,1} W_1}{N_1} \right)^{\gamma_1} (P_{1,tot})^{\gamma_1} = \left( \frac{H_{k,1} W_k}{N_k} \right)^{\gamma_k} (P_{k,tot})^{\gamma_k}$$

Despejando  $P_{k,tot}$  tenemos:

$$P_{k,tot} = \frac{N_k}{H_{k,1} W_k} \left( \frac{H_{1,1} W_1}{N_1} \right)^{\frac{N_1 \gamma_k}{\gamma_1 N_k}} (P_{1,tot})^{\frac{N_1 \gamma_k}{\gamma_1 N_k}} \quad (14)$$

Sustituyendo (14) en (12) nos queda:

$$\sum_{k=1}^K c_k (P_{1,tot})^{d_k} - P_{total} = 0 \quad (15)$$

donde

$$c_k = \begin{cases} 1, & k = 1 \\ \frac{N_k}{H_{k,1} W_k} \left( \frac{H_{1,1} W_1}{N_1} \right)^{\frac{N_1 \gamma_k}{\gamma_1 N_k}}, & 2 \leq k \leq K \end{cases}$$

$$d_k = \begin{cases} 1, & k = 1 \\ \frac{N_1 \gamma_k}{N_k \gamma_1}, & 2 \leq k \leq K \end{cases}$$

La ecuación (15) es una sola ecuación con una sola variable, aunque es no lineal. Algoritmos numéricos se pueden aplicar para hallar las raíces de dicha ecuación.

## 5. Resultados de la Simulación

En esta sección comparamos los resultados obtenidos en la simulación de la primera solución, en la cual  $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k = 1$ . Bajo esta consideración, la optimización de la ecuación (1) es equivalente a maximizar la mínima capacidad de un usuario, ya que dicha capacidad es maximizada cuando todos los usuarios tienen la misma capacidad [2]. Parte del código utilizado para realizar las simulaciones fue obtenido del sitio web: <http://www.ece.utexas.edu/~bevans/projects/ofdm/software>.

La figura 1 muestra la gráfica de la ganancia del canal para distintas distancias: 500, 1000 y 1500 m. Este es un modelo aproximado para un cable UTP.

La figura 2 nos muestra la gráfica del FEXT considerando distancias de 500, 1000 y 1500 m.

Las figuras 3, 4 y 5 nos muestran los esquemas de asignación de subportadoras obtenidos para cuando el sistema tiene 25 usuarios, a distancias de 500, 1000 y 1500 m, respectivamente. En todas las simulaciones se consideró que la PSD del ruido blanco aditivo gaussiano es de -140 dbm; la potencia total del sistema es 14.5 dbm y el  $\Delta f$  para un sistema VDSL2 es de 4.3125 KHz.

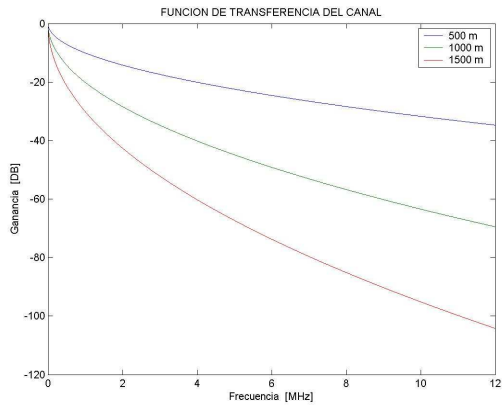
Las figuras 6 y 7 nos muestran la capacidad asignada a cada uno de los usuarios para cuando se tienen 15 y 25 usuarios, respectivamente. En ambas figuras se consideró una distancia de 1500 m.

En la figura 8 se muestra la gráfica de cómo varía la mínima capacidad obtenida a medida que el número de usuarios se incrementa.

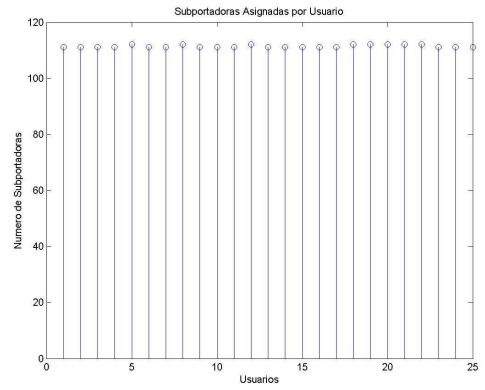
Finalmente, la figura 9 muestra una comparación entre la variación de la capacidad mínima del sistema a medida que aumenta el número de usuarios y un modelo aproximado para calcular dicha variación. Para el algoritmo propuesto, la mínima capacidad del sistema puede ser aproximada mediante la expresión:

$$R_{\min}(K) = \frac{30.5}{K}$$

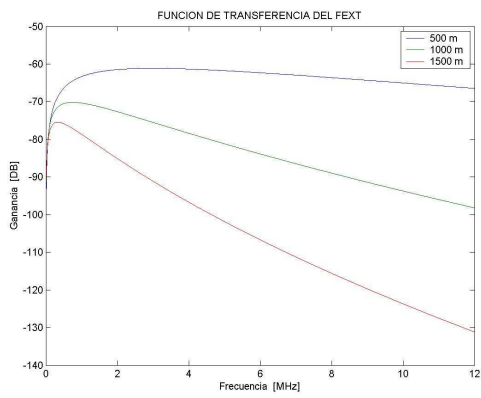
para  $K \geq 1$ , en donde  $K$  es el número total de usuarios del sistema. El valor del numerador es el valor de la capacidad total del sistema para la distancia considerada (1500 m en este caso). Utilizando esta expresión podría calcularse de manera aproximada cuál será la mínima capacidad obtenida en el sistema para un determinado número de usuarios. Esta expresión es válida sólo cuando la potencia total del sistema se divide por igual a cada una de las subportadoras.



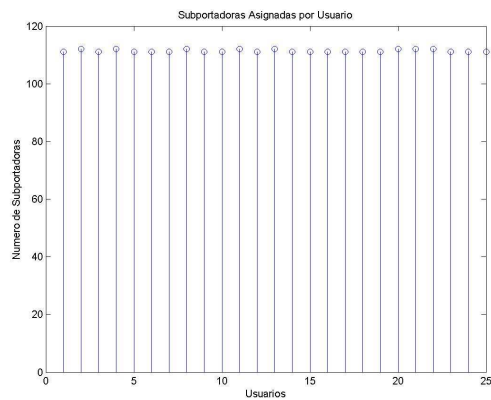
**Fig. 1 Ganancia del Canal**



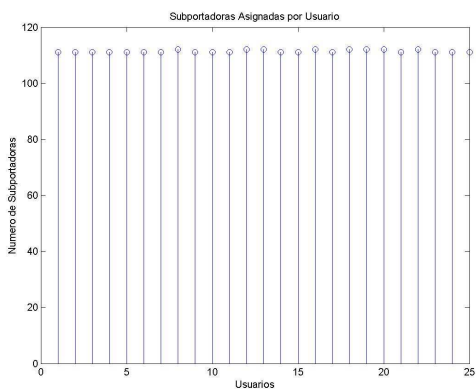
**Fig. 4 Esquema de asignación de subportadoras a 500 metros con 25 usuarios.**



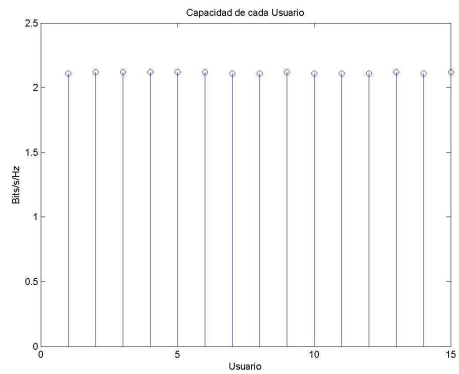
**Fig. 2 Modelo del FEXT**



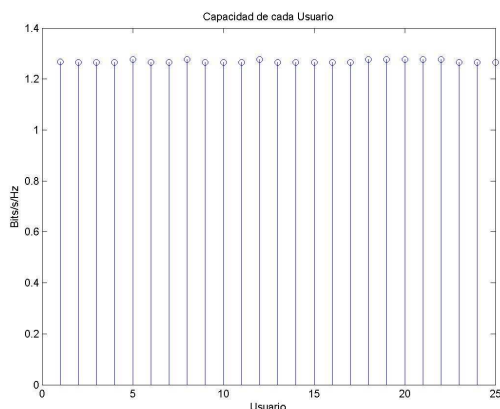
**Fig. 5 Esquema de asignación de subportadoras a 1500 metros con 25 usuarios.**



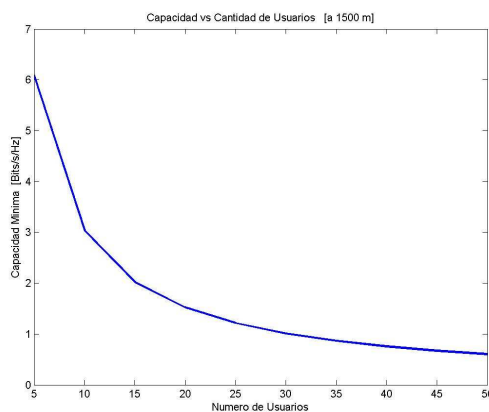
**Fig. 3 Esquema de asignación de subportadoras a 1000 metros con 25 usuarios.**



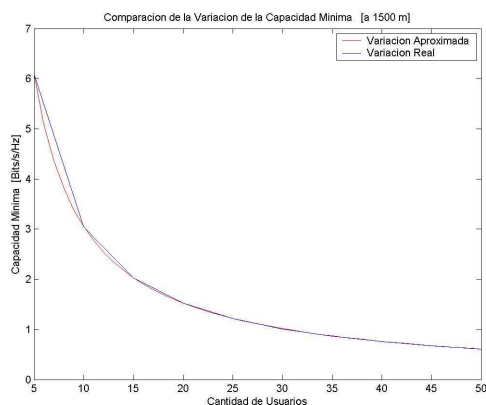
**Fig. 6 Bits alocados por usuario cuando hay 15 usuarios a 1500 m.**



**Fig. 7 Bits asignados por usuario cuando hay 25 usuarios a 1500 m**



**Fig. 8 Variación de la Capacidad Mínima cuando aumenta el número de usuarios.**



**Fig. 9 Comparación entre la variación real de la capacidad mínima del sistema y la variación aproximada propuesta.**

## 6. Conclusiones

El esquema de asignación de bits es casi siempre el mismo, variando, obviamente, el número de subportadoras asignadas conforme varía el número de usuarios. Aproximadamente, a cada usuario se le asigna la misma cantidad de subportadoras.

Las capacidades individuales se verán afectadas dependiendo del número de usuarios: a mayor cantidad de usuarios, menor será la capacidad de cada usuario.

Independientemente del número de usuarios que se utilicen en el sistema, utilizando el simulador podemos observar que la capacidad total del sistema permanece constante (para una misma distancia). A mayor distancia, la capacidad total del sistema disminuye.

Dado que la potencia se distribuyó por igual a cada subportadora, se esperaba que cada usuario tenga aproximadamente la misma capacidad. Con los resultados obtenidos, se cumple con el objetivo de maximizar la mínima capacidad.

Para  $K \geq 20$ , observamos que la diferencia entre la curva real de la variación de la capacidad mínima y la curva del modelo aproximado es casi insignificante. Es correcto hacer la asunción de que a cada usuario le corresponderá aproximadamente la misma cantidad de subportadoras.

## 7. Referencias

- [1] Miguel Angel Aceña, "Power and Bit Allocation for Multicarrier Modulation in Multi-User Environments", <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.62.6164>, 2005.
- [2] Zukang Shen, Jeffrey G. Andrews, and Brian L. Evans, "Optimal Power Allocation in Multiuser OFDM Systems", [http://cs-ww.cs.yale.edu/homes/yry/readings/wireless/wireless\\_readings/shen.pdf](http://cs-ww.cs.yale.edu/homes/yry/readings/wireless/wireless_readings/shen.pdf), 2005
- [3] Wonjong Rhee, and John M. Cioffi, "Increase in Capacity of OFDM Multiuser Systems using Dynamic Subchannel Allocation", in Proc. IEEE International Vehicular Technology Conference, vol. 2, pp. 1085-1089, Mayo 2000.
- [4] Zukang Shen, Jeffrey G. Andrews, and Brian L. Evans, "Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems", [http://users.ece.utexas.edu/~bevans/students/phd/zukang\\_shen/phd.pdf](http://users.ece.utexas.edu/~bevans/students/phd/zukang_shen/phd.pdf), Mayo 2006.

