



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE SISTEMAS  
CELULARES CON  
COORDINACIÓN ENTRE  
ESTACIONES BASE Y  
“CLUSTERING”**

Autor: Alejandro Medina Noguerales

Tutor: Matilde Sánchez Fernández

Leganés, Noviembre de 2010

## **Agradecimientos**

A lo largo de estos años de carrera, en los que se pasan momentos muy buenos y algunos no tan buenos, lo que nos permite seguir es el objetivo de conseguir una meta, meta a la que se llega cuando se finaliza este proyecto.

En primer lugar y, mas importante, es agradecer a mis padres la oportunidad que me dieron de estudiar lo que deseaba. Siempre han estado a mi lado apoyándome y creyendo en mi, incluso en momentos en los que esa credibilidad la había perdido, espero poder compensarlos todos estos años.

Al resto de mi familia, tíos, primos y abuelos por preocuparse siempre por mi y apoyarme en momentos complicados y hacerme sentir que, aunque el resto de cosas pueden fallar, ellos siempre van a estar para lo que necesite.

A mis amigas de Alcorcón, Isa, Roci, Laura, Elena y a mis amigos del pueblo Sara, Nuria, Abel, Sergio, Laura que han aguantado todos esos meses de estrés, agobios y de vernos poco, y por supuesto a todos mis compañeros de la Carlos III, a los que siguen a mi lado Julio, Forneas, Eli, Adri, Roci, Chechu, Jandro, Casano, Sergio, Adri, Luis, Lucia, y a los que se quedaron por el camino Lara, Cobos, Oscar, Jaime. Estos años no hubieran sido soportables sin todos vosotros en la biblioteca o tomando uno de los millones de cafés en los descansos. No me puedo olvidar de un amigo, Carlos, que siempre cuando le llamé estaba para lo que necesitara, espero que sigamos tomando café durante muchos años.

Y por último, a mi tutora por darme la oportunidad de hacer este proyecto y por estar siempre disponible cuando lo he necesitado.

Gracias a todos.

## **RESUMEN**

En este proyecto realizaremos un estudio detallado, de las ventajas y desventajas de la clusterización en sistemas de comunicaciones inalámbricos celulares, en los que tendremos coordinación entre las estaciones base.

Estudiaremos diferentes escenarios, en los que veremos como influyen en las tasas de transmisión, parámetros de nuestro diseño como el numero de celdas por cluster, cancelación de la interferencia de cluster adyacentes o el aumento de las antenas con las que transmiten las estaciones base. Todo esto siempre en relación al enlace descendente (De la estación base al usuario) .

# INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Estado del arte.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estructura de la memoria.....	5
2. TECNOLOGÍA MIMO Y PLANIFICACIÓN CELULAR	6
2.1 Sistemas MIMO.....	6
2.1.1 Beneficios de las rede MIMO.....	7
2.1.2 Sistemas MIMO en rede inalámbricas.....	9
2.1.2.1 Sistemas MIMO en rede inalámbricas celulares.....	9
2.1.2.2 Sistemas MIMO en los estándar inalámbricos.....	10
2.1.3 Canal de los sistemas MIMO.....	10
2.1.4 Diagonalización del canal en sistemas MIMO.....	11
2.1.5 Capacidad del canal MIMO.....	12
2.2 Sistema coordinado.....	14
2.2.1 Modelado del sistema coordinado.....	15
2.3 Estrategia de planificación en un sistema celular.....	16
3. MODELADO DEL SISTEMA	20
3.1 Sistema modelado.....	20
3.2 Escenario que estudiamos.....	25
3.3 Cancelación interferencia en el clustering.....	27

4. SIMULACIONES	31
4.1 Cluster J=3.....	33
4.2 Cluster J=4.....	45
5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS	57
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Líneas futuras.....	58
6. PRESUPUESTO DEL PROYECTO	59
BIBLIOGRAFIA.....	62

# ***CAPITULO 1 “Introducción”***

## **1.1 Estado del arte**

Los sistemas de telefonía celular surgen por la necesidad de abastecer de servicio a gran numero de usuarios. Para ello, la estrategia mas adecuada a la que se llegó fue dar servicio en áreas mas pequeñas (celdas o células) en función de la demanda de trafico y la reutilización de frecuencias entre celdas separadas por una distancia suficiente. La idea era que no afecte la interferencia cocanal aumentando en gran medida el numero de usuarios a los que se les puede dar servicio.

La popularización de los sistemas de comunicaciones móviles llega en la década de los 90, con la segunda generación (2G) y el estándar GSM (Global System Mobile) el cual se basa en conseguir una buena calidad de voz, itinerancia, la búsqueda de la implantación internacional y terminales accesibles a todos los consumidores (tanto por precio como por tamaño)[1].

GSM consiguió sus objetivos, pero el mercado fue avanzando y requería servicios multimedia, y GSM solo daba servicios de voz y datos a baja velocidad (9.6Kbps)[1].

La tercera generación (3G) nace por la necesidad de tasas de transmisión más elevadas, para ofrecer servicios como videoconferencias, descargas de archivos, Internet en los terminales etc [1]. Y esto se consigue mediante UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) que utiliza tecnología CDMA (Code Division Multiple Access) el cual es un método de acceso múltiple por división de código basado en la tecnología del espectro expandido consiguiendo velocidades muy elevadas de 144Kbps a 7.2Mbps. Hasta el desarrollo de esta tecnología y con las necesidades de mercado se aumento la tecnología 2G a 2.5G introduciendo servicios de EMS (Enhanced Messaging Service) y MMS (Multimedia Messanging Service) haciendo uso de las tecnologías GPRS (General Packet Radio Service) y EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution).

La tendencia futura, lo que será 4G, es una red de redes que una vez conseguida la convergencia entre equipos conseguirá alcanzar velocidades de 100Mbps en movimiento y de 1Gbps en reposo [1]. Estas tecnologías incluyen técnicas de radiocomunicación de alto rendimiento como MIMO (Multiple Input Multiple Output) o OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1].

Se ha demostrado [2] que el incremento en recepción y en transmisión del numero de antenas (MIMO) mejora el sistema de comunicación, con mejoras de la relación SNR (Signal Noise Ratio) o de la tasa de transmisión. Estas demostraciones se llevan a cabo en un escenario controlado en transmisiones punto a punto o punto a multipunto. En este tipo de escenarios uno de los elementos mas importantes es la interferencias introducidas por el resto de celdas.

### **Telefonía móvil celular: conceptos básicos**

Se trata de un sistema de comunicaciones en el cual el área de cobertura esta dividida en celdas (células), cada celda tiene una estación base (BTS) dando servicio a los usuarios que se encuentren dentro de su área, de tal modo que un usuario que se desplace por la zona de cobertura no pierda la comunicación ni aunque cambie de celda, en este caso lo que se llevaría acabo sería un cambio de BTS pero el servicio no sufriría perdidas.

El servicio básico de este sistema permite el establecimiento de una llamada telefónica entre cualesquiera dos abonados del servicio dentro de la zona de cobertura del mismo, o entre un abonado de dicho servicio y uno de la red telefónica publica conmutada (red telefónica convencional).

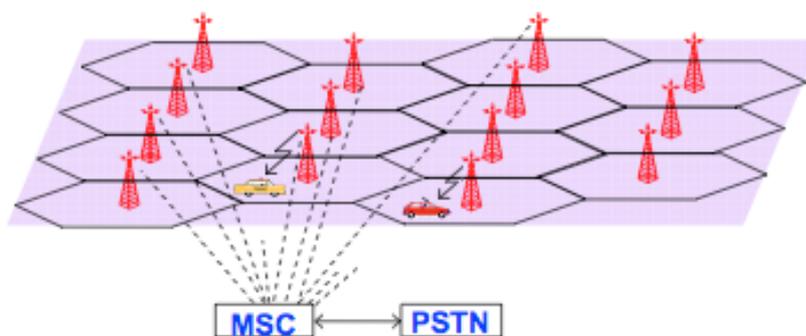


FIG. 1.1 " Sistema de comunicaciones celulares"

El tráfico ofrecido en una zona de cobertura es proporcional a su superficie. Al ser las celdas también de tamaño reducido, el tráfico que se cursara en cada una de ellas será pequeño por lo que podrá ser cursado con un número moderado de recursos y de esta manera la probabilidad de pérdidas será adecuada.

Por otro lado, gracias a la reutilización de frecuencias entre celdas del mismo escenario, se podrán efectuar más llamadas que frecuencias haya disponibles ya que multiplicaremos la capacidad de las frecuencias para cursar tráfico y también debido a que cualquier radiocanal es capaz de cursar varias comunicaciones simultáneamente entre celdas distintas.

Se realizarán agrupaciones entre celdas dentro del espacio celular, pudiendo reutilizar las frecuencias disponibles entre celdas de distintas agrupaciones, estas agrupaciones son conocidas como cluster.

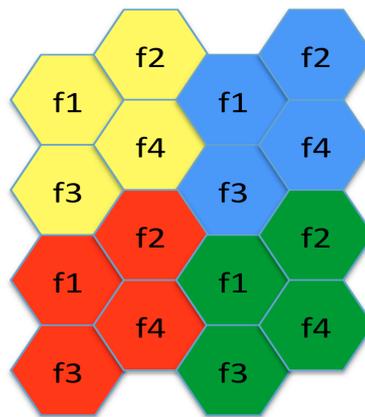


FIG 1.1 "Reutilización de frecuencias en un espacio clusterizado"

Por todo lo dicho antes, evidentemente cuanto menor sea la agrupación también lo será el número de frecuencias necesarias, por lo que, a la hora del diseño uno de los parámetros importantes es el de tamaño óptimo de la agrupación teniendo en cuenta los requisitos de capacidad y rendimiento espectral con los de interferencia.

## 1.2Objetivos

Como se ha comentado anteriormente los sistemas de radiocomunicaciones MIMO de alto rendimiento han demostrado mejoras sustanciales en las comunicaciones inalámbricas y se están tomando en cuenta en el diseño de las nuevas tecnologías de comunicaciones móviles, lo que será el futuro 4G.

El objetivo fundamental del proyecto es comprobar las ventajas y desventajas en la tasa de transmisión de bits introducidas por la clusterización de un espacio celular multiusuario frente al mismo escenario sin clusterizar. En el escenario celular cada transmisor estará equipado con varias antenas y el receptor con una única antena. Se definirá una precodificación que busca cancelar las interferencias de cada cluster y se analizarán diferentes agrupaciones de cluster.

Se supondrá una distribución uniforme de los usuarios y estaciones base en el centro de cada celda, pudiendo modificar también el número de antenas que transmiten tanto en los usuarios como en las estaciones base.

El problema principal de este modelo son las interferencias introducidas por las celdas adyacentes, en nuestro caso solo nos preocuparemos de cancelar la interferencia de las celdas que estén dentro del cluster donde se encuentre la propia celda. Asumimos que todas las celdas, tanto la de un cluster concreto, como las de cluster adyacentes trabajan a la misma frecuencia.

### **1.3 Estructura de la memoria**

A lo largo de toda esta memoria se busca que el lector sea capaz de comprender el objeto de nuestro estudio, de forma que sean comprensibles las técnicas de clusterización de un sistema celular, transmisiones con múltiples antenas en sistemas coordinados y cancelación de las interferencias de clusters contiguos.

En primer lugar se planteará un análisis teórico, analizando las ventajas que se obtienen al utilizar tecnologías MIMO (Multiple Input Multiple Output) frente a canales SISO (Single Input Single Output) y la estructura básica de estos sistemas MIMO.

Proseguiremos introduciendo esta tecnología, en redes inalámbricas celulares, hablando de la composición del canal MIMO, la diagonalización de sus canales mediante el multiplexado espacial y la capacidad de dicho canal.

Una vez explicada la tecnología MIMO, ampliaremos esta a un escenario multiusuario, en el que buscaremos la coordinación de las estaciones base en el enlace descendente y la eliminación de las interferencias mediante el criterio de forzado a cero (ZF).

Como última parte del análisis teórico, se verán las diferentes técnicas de clusterización de un sistema celular.

Una vez analizados todos los modelos teóricos a tener en cuenta para el desarrollo de este estudio, se pasará a realizar el modelado del sistema, generación del espacio celular, situación de los usuarios y estaciones base, etc. y una de las partes más importantes de este diseño, la división del espacio celular generado en cluster y la cancelación de las interferencias.

Por último se presentará el resultado de las simulaciones, realizadas todas ellas en Matlab, viendo las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos estudiados.

## CAPITULO 2 “Tecnología MIMO y planificación celular”

### 2.1 Sistemas MIMO

Los sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) en las comunicaciones inalámbricas han ido ganando popularidad gracias a la mejora en la capacidad que generan.

En las comunicaciones inalámbricas la principal preocupación se encuentra en las pérdidas de multitrayecto. Al no encontrarnos en un medio confinado, es decir emitiendo en medio libre, la señal transmitida puede tomar diferentes caminos hasta el receptor, pudiendo llegar en diferentes espacios de tiempo, diferentes ángulos y diferentes frecuencias (efecto Doppler), estos cambios vienen dados por la dispersión de las ondas electromagnéticas en el medio. Todo lo comentado provoca variaciones aleatorias en el nivel de la señal (conocido como desvanecimiento) afectando la fiabilidad de las comunicaciones inalámbricas. La tecnología MIMO aporta una serie de mejoras frente a los sistemas SISO (Single-Input Single-Output) que pueden mejorar las dificultades de las comunicaciones inalámbricas.

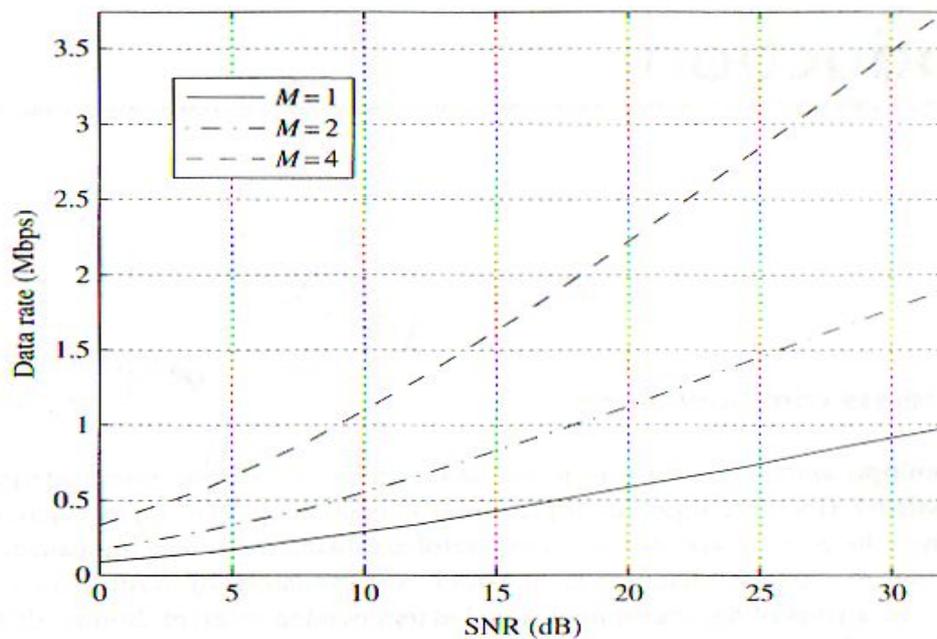


FIG. 2.1. “ Tasa de datos vs. SNR para diferentes configuraciones de antenas con un BW de 100KHz [2]”

Podemos observar un aumento de la tasa de bit y de la relación señal a ruido (SNR) cuando se transmite con más antenas, frente a la transmisión con sistemas SISO (FIG. 2.1).

### **2.1.1 Beneficios de las redes MIMO**

Los beneficios en el sistema por el uso de tecnología MIMO [2] son:

#### **GANANCIA DE ARRAY**

Mediante la combinación coherente de las señales inalámbricas en el receptor, se incrementa la SNR, de esta manera se mejora la resistencia al ruido y la cobertura en la red inalámbrica.

#### **GANANCIA DE DIVERSIDAD ESPACIAL**

El principal problema de la comunicación en medio abierto es, como se ha comentado anteriormente, la variación del nivel de la señal producido por las pérdidas multi-trayecto. Con la ganancia de diversidad espacial conseguimos reducir dichas oscilaciones de la señal.

Esta mejora viene dada por la recepción de múltiples copias de la señal en frecuencia, en el espacio o en el tiempo, de tal manera que al tener más copias habrá una probabilidad más alta de que alguna de ellas se vea menos afectada por los “desvanecimientos” y de esta manera la SNR aumente.

Dicha ganancia queda caracterizada en el caso multi usuario y multi antena como el producto  $(N \times r) \times (M \times t)$  donde  $N$  es el número de usuarios,  $M$  el número de BTS y  $r$  es el número de antenas en cada usuario y  $t$  el número de antenas en cada BTS.

#### **GANANCIA DE MULTIPLEXADO ESPACIAL**

La multiplexación espacial permite un aumento de la tasa de datos y por lo tanto de la red inalámbrica, ya que es capaz de transmitir múltiples canales de datos independientes, separables por el receptor si se dan las condiciones necesarias.

En general, el número de canales de datos que pueden ser soportados por un canal MIMO viene dado por el mínimo número de antenas transmisoras y el mínimo número de antenas receptoras  $\min(r,t)$ .

La estructura básica de un sistema de comunicaciones MIMO viene dada por:

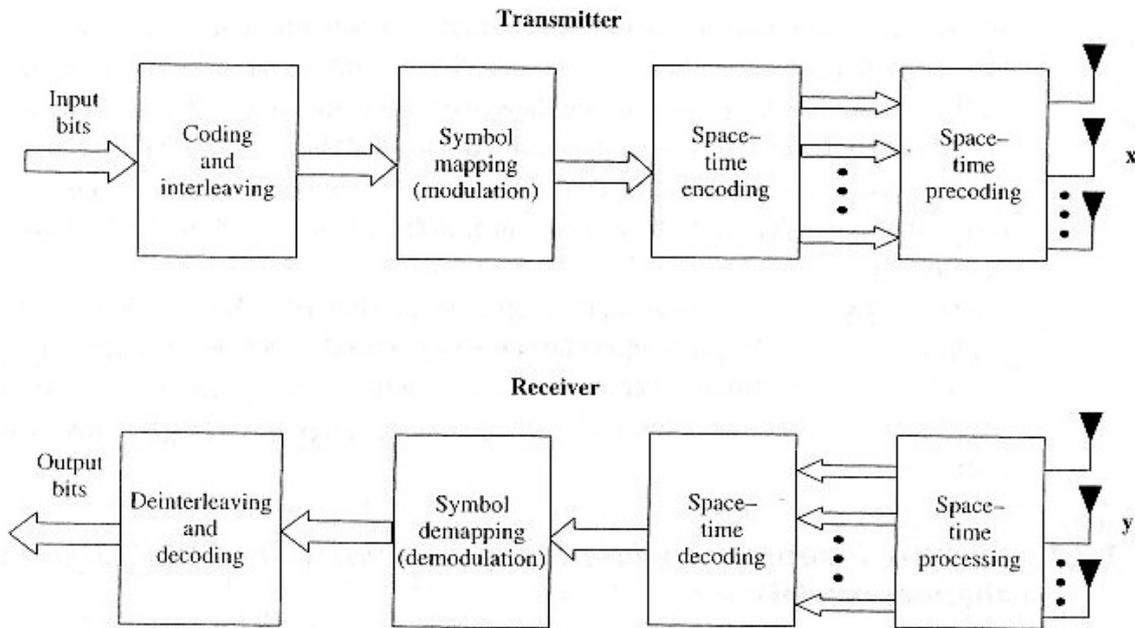


FIG 2.2" Diagrama de bloques básico de un sistema MIMO [2]"

Donde la información a transmitir se codifica y entrelaza en el primer modulo (Coding and Interleaving, generalmente usando codificador convolucional). El siguiente bloque (Symbol mapping) hace una asignación de las palabras código a los símbolos (este tipo de modulaciones puede ser por ejemplo una modulación en cuadratura de amplitud QAM). Esta secuencia de símbolos se pasa al codificador tiempo-espacio del cual salen uno o varios canales espaciales de datos, estos canales se precodifican y se envían por las antenas mediante el bloque precodificación espacio-tiempo. Todo este proceso revierte en el receptor realizando los mismo pasos a la inversa. En este proyecto nos centraremos en el bloque de precodificación espacial generando una precodificación que evite que el receptor reciba las interferencias de las celdas adyacentes del sistema.

## 2.1.2 Sistemas MIMO en redes inalámbricas

Las redes inalámbricas de comunicaciones se pueden dividir a grandes rasgos en dos tipos, redes inalámbricas celulares y en redes *ad-hoc* [2]. En las primeras tenemos múltiples usuarios conectados a una estación base (BTS) la cual es la que controla todas las transmisiones y recepciones de datos entre usuarios. Por otro lado las redes *ad-hoc* se trata de redes sin infraestructura, es decir, de redes flexibles en las cuales todas las estaciones ofrecen servicios de encaminamiento para permitir comunicación entre estaciones que no tienen conexión inalámbrica directa. En nuestro estudio solo nos centraremos en las redes inalámbricas celulares.

### 2.1.2.1 Sistemas MIMO en redes inalámbricas celulares

En las redes inalámbricas celulares, múltiples usuarios pueden comunicarse en el mismo instante de tiempo y/o en la misma frecuencia. Cuanta mas reutilización de los recursos de tiempo y frecuencia se tenga, mas capacidad tendrá la red, siempre y cuando las señales puedan ser detectadas con fiabilidad. Con los sistemas MIMO además de la separación de usuarios por código, frecuencia o tiempo se provee de una nueva forma de separación, mediante la dimensión espacial.

En una celda de una red inalámbrica con tecnología MIMO, se tendría una estación base que dispondría de  $t$  antenas para comunicarse con  $N$  usuarios y cada uno de estos usuarios estaría equipado con  $r$  antenas.

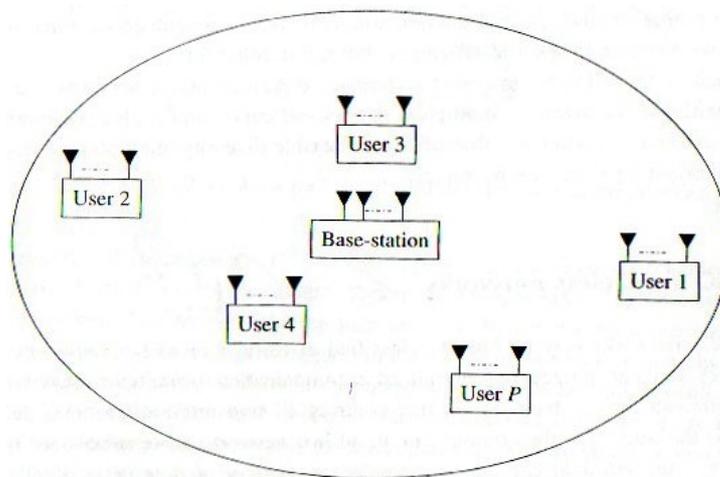


FIG. 2.3 “ Sistema celular MIMO [3]”

Dentro de esta distribución tendríamos dos tipos de enlace, el descendente también denominado broadcast (*Broadcast channel*), de la BTS a todos los usuarios y el segundo tipo de enlace sería el ascendente (de los usuarios a la estación base) este sería de tipo acceso múltiple (*MAC multiple-acces channel*).

El uso de un esquema de precodificación con criterio de ZF (Zero-Forcing) o MMSE (Minimum Mean Squared Error) podría permitir una separación perfecta entre los canales de datos de cada usuario en la estación base, evitando las interferencias.

### 2.1.2.2 Sistemas MIMO en los estándar inalámbricos.

Con la llegada de Internet a los dispositivos móviles, necesitando una tasas de datos cada vez mayores, las limitaciones de ancho de banda y las mejoras ofrecidas por la tecnología MIMO hacen que esta tecnología sea indispensable para abastecer las nuevas necesidades de transmisión de datos.

La tecnología MIMO es el centro de investigación de nuevos estándares para comunicaciones inalámbricas [2], como el IEEE 802.11 (para redes inalámbricas locales WLAN), IEEE 802.16 (para redes inalámbricas metropolitanas WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) ) o el IEEE 802.20 (para acceso de banda ancha en móviles MBWA (Mobile Broadband Wirelees Acces)).

### 2.1.3 Canal de los sistemas MIMO

Se trata de un canal de comunicaciones punto a punto con  $t$  antenas transmitiendo y  $r$  recibiendo.

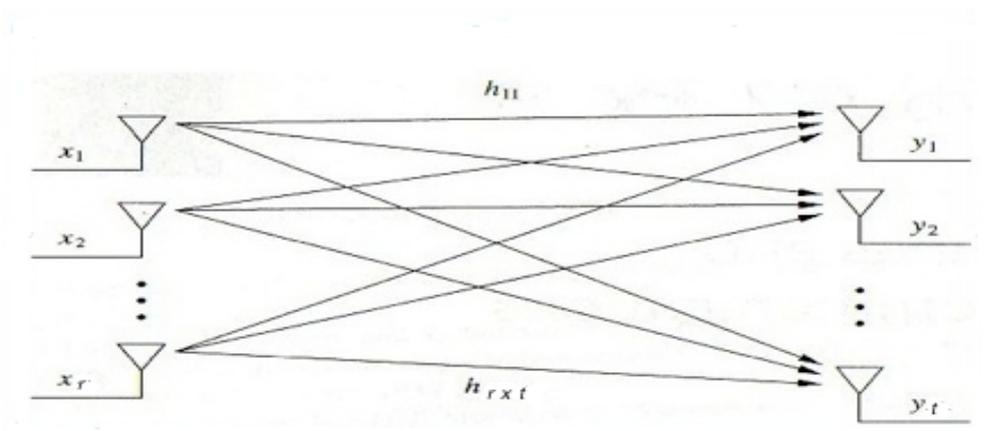


FIG. 2.4 " Transmisión en sistemas MIMO [2]"

Matemáticamente el canal se define de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,t} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{r,1} & h_{r,2} & \cdots & h_{r,t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_r \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

por simplicidad  $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$  donde  $\mathbf{x}$  es el vector  $(t)$ -dimensional de señales transmitidas,  $\mathbf{n}$  el vector de  $(r)$ -dimensional de ruido y  $\mathbf{H}$  la matriz de interferencias del canal con dimensiones  $t \times r$ , cada elemento de esta matriz ( $h_{ij}$ ) representa la ganancia transmitida por la antena  $j$  y recibida por la antena  $i$ , se asume un ancho de banda  $B$  y un ruido blanco y Gaussiano de media cero y varianza  $\sigma^2 = E[n_i^2] = N_0/2$ .

#### 2.1.4 Diagonalización del canal en sistema MIMO

Al tener tanto en transmisión como en recepción múltiples antenas, mediante el multiplexado espacial podemos descomponer el canal MIMO en un número  $R_H$  de canales paralelos independientes.

Mediante la multiplexación independiente de cada flujo de datos se consigue una tasa de datos  $R_H$  veces mayor, donde  $R_H$  es el rango de la matriz  $\mathbf{H}$ , esto se conoce como la ganancia de multiplexación, ya explicada anteriormente (2.1.1).

Considerado el canal MIMO como un canal  $r \times t$  y una matriz de canal  $\mathbf{H}$  conocida para el transmisor y el receptor. Para cualquier  $\mathbf{H}$  se puede obtener su descomposición mediante valores singulares (SVD) como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H, \quad (2.2)$$

donde  $\mathbf{U}$  es  $r \times r$  y  $\mathbf{V}$  es  $t \times t$  siendo estas matrices unitarias (esto implica que  $\mathbf{U}^H\mathbf{U} = \mathbf{I}_{N_r}; \mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{I}_{M_t}$ ) y donde  $\mathbf{\Sigma}$  es una matriz  $r \times t$  diagonal de valores  $\{\sigma_i\}$ .

La descomposición en canales paralelos se obtiene por la transformación en canales entrantes  $\mathbf{x}$  y salientes  $\mathbf{y}$  realizando una precodificación en el transmisor y una reconstrucción en el receptor. Por ejemplo en transmisión se realiza la precodificación del vector de entrada  $\mathbf{x}$  como  $\mathbf{x} = \mathbf{V}\tilde{\mathbf{x}}$  y este se envía por las antenas. Se realiza un proceso similar pero a la inversa para obtener el vector de salida  $\mathbf{y}$ .

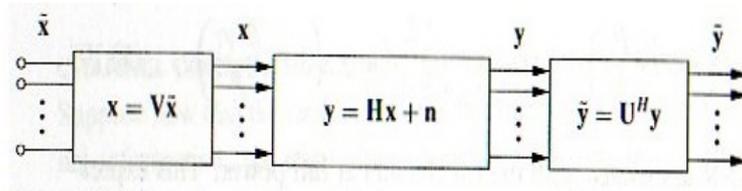


FIG. 2.5 " Precodificación en transmisión y forma de recepción [2]"

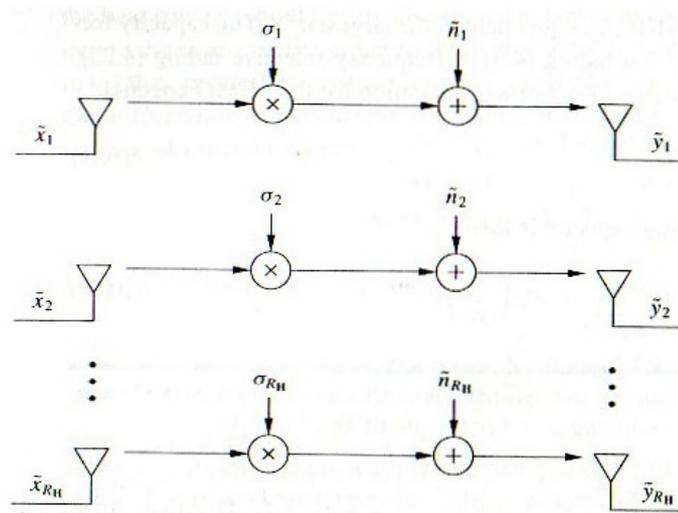


FIG. 2.6 " Diagonalización del canal MIMO [2]"

### 2.1.5 Capacidad del canal MIMO

La capacidad del canal MIMO intenta obtener la mayor tasa de datos con la menor probabilidad de error posible. La capacidad dependerá del conocimiento que tenga el transmisor y/o el receptor del propio canal. Nosotros nos centraremos en el caso de que el transmisor conozca el canal ( en el enlace descendente BTS-usuario).

## Canal conocido por el transmisor: Water-filling

En este caso tanto el transmisor como el receptor conocerán la matriz de canal  $\mathbf{H}$ , siendo la capacidad del canal la suma de las capacidades de cada canal paralelo independiente, con la potencia optima repartida por estos canales.

La potencia optima a repartir por cada canal independiente se calcularía de la optimización de la matriz de covarianzas de la entrada  $\mathbf{R}_x$  y maximizar la capacidad de la siguiente formula

$$C = \max_{\mathbf{R}_x: \text{Tr}(\mathbf{R}_x) = \rho} \log_2 \det[\mathbf{I}_{M_r} + \mathbf{H}\mathbf{R}_x\mathbf{H}^H] \quad (2.3)$$

donde  $\rho = P/\sigma^2$  [3].

Si sustituimos en (2.3) la matriz **SVD** (2.2) la capacidad del canal quedará

$$C = \max_{\rho_i: \sum_i \rho_i \leq \rho} \sum_{i=1}^{R_H} \log_2(1 + \sigma_i^2 \rho_i) \quad (2.4)$$

donde  $R_H$  es el numero de valores de  $\sigma_i^2$  distinto de cero. Siendo la relación señal a ruido (SNR)  $\rho = P/\sigma^2$ . La capacidad (2.4) puede expresarse en términos de la potencia repartida  $P_i$  en cada uno de los  $i$  canales paralelos

$$C = \max_{P_i: \sum_i P_i \leq P} \sum_{i=1}^{R_H} \log_2\left(1 + \frac{\sigma_i^2 P_i}{\sigma^2}\right) = \max_{P_i: \sum_i P_i \leq P} \sum_{i=1}^{R_H} \log_2\left(1 + \frac{P_i \gamma_i}{P}\right) \quad (2.5)$$

donde  $\gamma_i = \sigma_i^2 P / \sigma^2$  es la SNR asociada al canal  $i$ -ésimo.

## 2.2 Sistema coordinado

En nuestro estudio ampliaremos el esquema MIMO explicado anteriormente a un sistema multiusuario, donde tendremos múltiples BTS y múltiples usuarios. En este escenario, coordinaremos las estaciones base en el enlace descendente y eliminaremos las interferencias entre usuarios mediante el criterio de forzado a cero (ZF).

Los sistemas celulares están de forma inherente limitados por la interferencia y esto evita conseguir las mejoras esperadas con la introducción de la tecnología MIMO. La SDM (Space-Division Multiplexing) necesita una alta relación señal a ruido interferente (SINR Signal to Noise plus Interferente Ratio) para funcionar correctamente, el problema es que debido a las interferencias introducidas por usuarios adyacentes, la SINR, es demasiado baja para alcanzar el funcionamiento óptimo de la tecnología MIMO.

Para minimizar la interferencia celular en las redes MIMO, si la interferencia es conocida por los transmisores, se pueden eliminar estas forzando a cero (ZF) las interferencias que no interesan. Esta se elimina de manera conjunta y con coordinación coherente en la transmisión en las estaciones base de la red, siempre que las estaciones conozcan todas las señales del enlace descendente (conocimiento del estado del canal).

El conocimiento del canal resulta de gran utilidad, ya que permite desarrollar técnicas que eviten las interferencias generadas por usuarios adyacentes. Permite realizar una codificación en la señal transmitida de tal manera que al llegar la señal al receptor habiendo atravesado el medio, la interferencia del canal no influya en la señal enviada.

Aprovechando dicha información de canal para evitar las interferencias, se pueden alcanzar tasas de datos muy elevadas, esta codificación se puede interpretar como una conformación de haz generalizada, la cual es la ya mencionada ZF.

Con esta técnica se busca como ya se ha comentado el eliminar las interferencias introducidas por las celdas adyacentes del sistema mediante la coordinación coherente de las bases, de tal manera que las señales provenientes de usuarios de otras células siempre sean cero, esto se consigue con transmisiones ortogonales entre los usuarios de distintas celdas.

El procedimiento de Forzado a Cero se trata de un tipo de procesamiento lineal, pero también existe uno no lineal, el denominado Dirty Paper Coding (DPC) [4] el cual es capaz de transmitir a múltiples usuarios simultáneamente. El problema de este esquema es que necesita una carga computacional muy elevada.

### 2.2.1 Modelado del sistema coordinado

Para el modelado del sistema se asume que el enlace descendente del escenario tiene coordinación en transmisión lo que supone que todas las BTS tienen la información destinada a todos los usuarios. Con  $M$  estaciones base, una por cada celda, transmitiendo a  $N$  usuarios, cada estación base transmite con  $t$  antenas y cada usuario recibe con  $r$  antenas. Se establecerán pares de enlace entre un usuario y una estación base, por lo que se considerara que  $M=N$ .

La señal recibida es [7]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.6)$$

donde  $\mathbf{y}$  es el vector  $(N \times r) \times 1$  de señales recibidas,  $\mathbf{x}$  el vector  $(M \times t) \times 1$  de señales transmitidas por la estación base,  $\mathbf{H}$  será una matriz de dimensiones  $(N \times r) \times (M \times t)$  donde cada elemento  $h_{ij}$  representa el desvanecimiento de cada antena de transmisión de la estación base y cada antena de recepción de cada usuario. Si se define  $\mathbf{H}_i$   $r \times (M \times t)$  con  $i$  de 1 hasta  $N$  como la matriz de canal vista por cada usuario  $i$ , entonces  $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^T \mathbf{H}_2^T \dots \mathbf{H}_N^T]^T$  y  $\mathbf{n}$  es el vector  $(N \times r) \times 1$  de ruido gaussiano.

En el caso en el que se pretenda eliminar toda la interferencia se busca realizar una precodificación para que todos los elementos  $i \neq j$  de la matriz de canal  $\mathbf{H}$  multiplicados por la matriz de precodificación  $\mathbf{W}$  sean cero por lo que  $\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{b}$ , es decir:

$$\mathbf{x} = \sum_{j=1}^r b_{1j} \mathbf{w}_{1j} + \sum_{j=1}^r b_{2j} \mathbf{w}_{2j} + \dots + \sum_{j=1}^r b_{Nj} \mathbf{w}_{Nj} = \mathbf{W}\mathbf{b} \quad (2.7)$$

donde cada  $b_{ij}$  representa el  $j$ -símbolo que cada usuario  $i$  transmite con una potencia  $P_{ij}$

y la matriz de precodificación  $\mathbf{w}_{ij} = [\mathbf{w}_{ij}^{11}, \dots, \mathbf{w}_{ij}^{1r}, \dots, \mathbf{w}_{ij}^{kl}, \dots, \mathbf{w}_{ij}^{Mr}]^T$ .

Para obtener la matriz de precodificación  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_{11}, \dots, \mathbf{w}_{1r}, \dots, \mathbf{w}_{Nr}]$ , se tienen en cuenta los criterios anteriormente mencionados del ZF:

$$\mathbf{H}_i[\mathbf{w}_{n1}, \mathbf{w}_{n2}, \dots, \mathbf{w}_{nr}] = \begin{cases} 0 & : i \neq n \\ \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i & : i = n \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\|\mathbf{w}_{ij}\|^2 = 1, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, r$$

donde  $\mathbf{U}_i$  es una matriz unitaria y  $\mathbf{S}_i = \text{diag}\{\lambda_{i1}^{1/2}, \lambda_{i2}^{1/2}, \dots, \lambda_{ir}^{1/2}\}$ .

De esta manera se podrá expresar la señal recibida como:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{U}_2 \mathbf{S}_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{U}_N \mathbf{S}_N \end{bmatrix} \mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (2.9)$$

Cada usuario puede separar la señal recibida en diferentes canales.

$$\tilde{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^\dagger & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{U}_2^\dagger & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{U}_N^\dagger \end{bmatrix} \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^{1/2} b_{11} \\ \vdots \\ \lambda_{1r}^{1/2} b_{1r} \\ \vdots \\ \lambda_{Nr}^{1/2} b_{Nr} \end{bmatrix} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (2.10)$$

### 2.3 Estrategia de planificación en un sistema celular

En la planificación de la estructura celular, se estudian celdas de tipo poligonal que recubran la zona de cobertura, de esta manera se evitan zonas sin servicio o solape entre celdas [5], por esto las superficies estudiadas son :

- Triángulo:  $S = 3\sqrt{3}R^2/4$  (2.11)

- Cuadrado:  $S = 2R^2$  (2.12)

- Hexágono:  $S = 3\sqrt{3}R^2/2$  (2.13)

Para minimizar el numero de celdas necesarias para un radio de cobertura fijo  $R$ , el polígono que se utilizara es el hexágono ya que es el que da una superficie mayor de celda.

Una vez elegida la situación de las estaciones base, con estructura hexagonal, se usa un sistema de coordenadas oblicuas, cuyos ejes denominados  $u$  y  $v$ . Dichas coordenadas forman un ángulo de  $60^\circ$  entre sí, denominado retícula de planificación, en los nodos de esta retícula será donde están situadas las BTS.

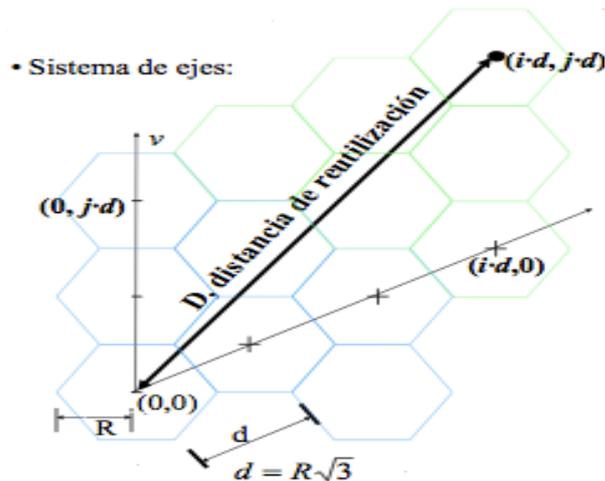


FIG. 2.7 " Eje de coordenadas en sistema celular y distancia de reutilización"

La situación de las BTS vendrá dada por las coordenadas  $i \cdot d$  y  $j \cdot d$ , por lo cada estación base quedara caracterizada por una pareja de números enteros  $(i, j)$ , de esta

manera se puede establecer que la distancia entre dos estaciones cualesquiera P(m,n) y Q(k,l) será:

$$D^2(P,Q) = (i^2 + j^2 + i \cdot j) d^2 \quad (2.14)$$

siendo  $i = m-k$  y  $j = n-l$ .

El cuadrado de la distancia entre los centros de las células D es la distancia de reutilización de frecuencias y queda caracterizado por un numero J.

$$\left(\frac{D}{d}\right)^2 = i^2 + j^2 + i \cdot j = J \quad (2.15)$$

El valor de J solo puede tomar determinados valores, aquellos que cumplan la relación (2.23), a estos valores se les conoce como números rómbicos, debido a que la disposición de transmisores obtenida con la distancia D desde la celda de referencia forma un rombo de lado D, llamado rombo cocanal.

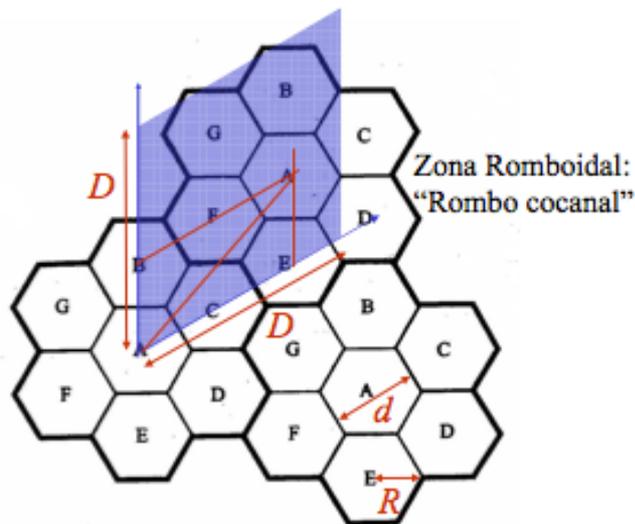


FIG. 2.8 "Rombo cocanal"

En la planificación se suele tomar como referencia el radio celular R.

Expresando la distancia de reutilización D en función de R:

$$J = \frac{1}{3} \left( \frac{D}{R} \right)^2 \quad (2.16)$$

Por todo lo comentado anteriormente el valor de los números rómicos solo podrá tomar los valores dados por la ecuación (2.16) que son:

$$J = 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 25, 27, 28, 31, 36, \text{etc.}$$

Y la reutilización de frecuencias dependerá de la distancia D y el numero de celdas por cluster, quedando por ejemplo para J=7 de la siguiente manera.



FIG. 2.8 " Patrón de reutilización de frecuencias en cluster de 7 celdas"

En el caso de la clusterización dentro del sistema de nuestro estudio no tendremos diferentes frecuencias, sino que realizaremos una separación por canal de frecuencias/código. Utilizaremos los clustes como conjunto de celdas sobre los que eliminaremos las interferencias.

## CAPITULO 3 “Modelo del sistema”

### 3.1 Sistema modelado.

Este proyecto estudiara las posibles mejoras introducidas por la clusterización de un espacio celular, en el cual se aplican tecnologías MIMO. Se han realizado estudios que demuestran la gran mejora espectral de este tipo de sistemas una vez que se eliminan las interferencias introducidas por el canal. Las interferencias se van a eliminar de forma parcial, consiguiendo así un equilibrio entre prestaciones y complejidad.

Nos centraremos en un modelo de comunicación celular, dividido en celdas hexagonales, cada celda contara con una estación base situada en el centro de cada celda y un único usuario. Se tendrá la opción de elegir el numero de antenas en la BTS y el usuario. En principio solo trataremos la posibilidad de antenas iguales en la BTS y en el usuario.

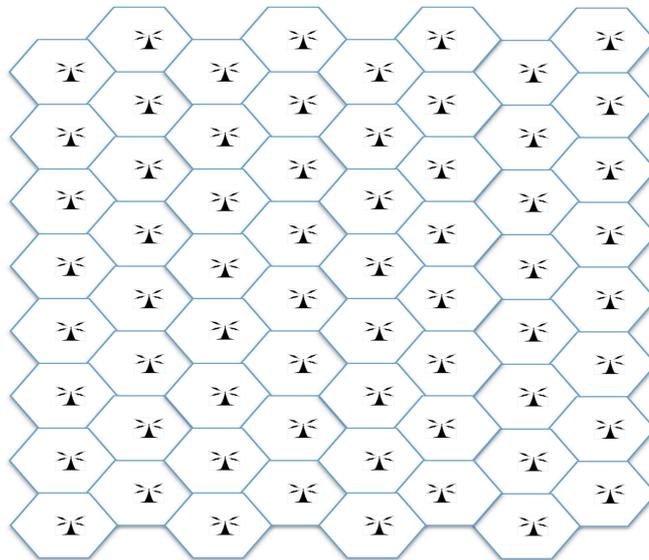


FIG 3.1 “Situación de las estaciones base en el espacio celular”

Nuestro estudio se centrara en principio en espacios celulares de 64 celdas. Debido a que en definitiva el problema se trata de cómo gestionar las interferencias intercelulares. Para que todas las celdas tengan el mismo numero de celdas interferentes tomaremos el escenario como un toroide, de esta manera todas las celdas tendrán el mismo numero de interferencias, independientemente de la posición de la celda.

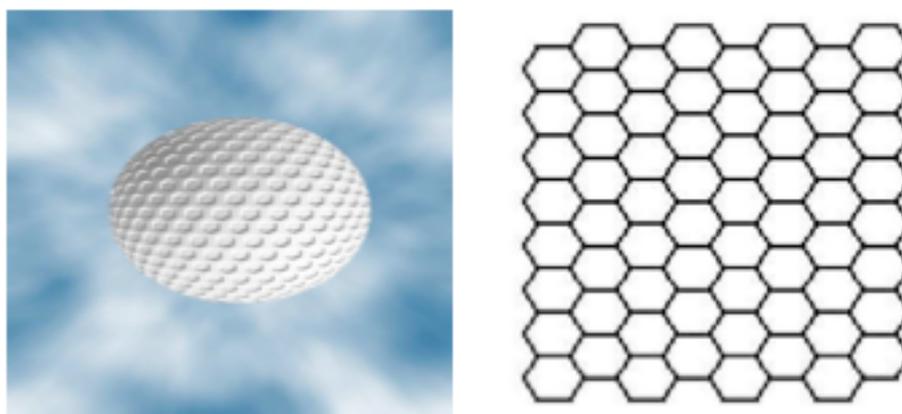


FIG 3.2 "Espacio celular en forma toroidal"

Asumiremos que la potencia máxima a transmitir por cada estación base [6] es de 10 W, la figura de ruido del receptor es de 5 dB, la ganancia vertical de las antenas es de 10.3 dBi, con un canal de ancho de banda de 5 MHz y una temperatura de ruido en el receptor de 300°K. Lo cual, descontando las perdidas por desvanecimiento y en una situación libre de interferencia nos permite alcanzar 18 dBs de SNR en el receptor a una distancia de referencia de 1.6 km, hipotesis perfecta para poder trabajar en un escenario que estará limitado por la interferencia intercelular, dado que la SNR es suficientemente elevada.

El escenario en estudio tendrá un usuario por estación base como máximo. Los usuarios son introducidos en la red de manera aleatoria, independiente y uniforme. Se establecerán 64 parejas BTS-Usuarios, estas asignaciones no se harán en relación a la estación base que mas cerca este, sino a la que mayor potencia le aporte teniendo en

cuenta la atenuación por distancia y el “*shadowing*”, de esta manera se hará hasta completar el escenario completo, es decir a las 64 parejas BS-Usuario.

En el caso de que al asignar un usuario, la estación base que mayor potencia proporcione a dicho usuario ya este asignada a otro, este se descartara.

Este usuario “descartado” no se le elimina del sistema se le reasigna a otra frecuencia/código en el que la estación base que mayor potencia le de este libre, para nuestro caso es como si lo elimináramos, ya que nosotros solo trabajaremos con un único canal frecuencia/código .

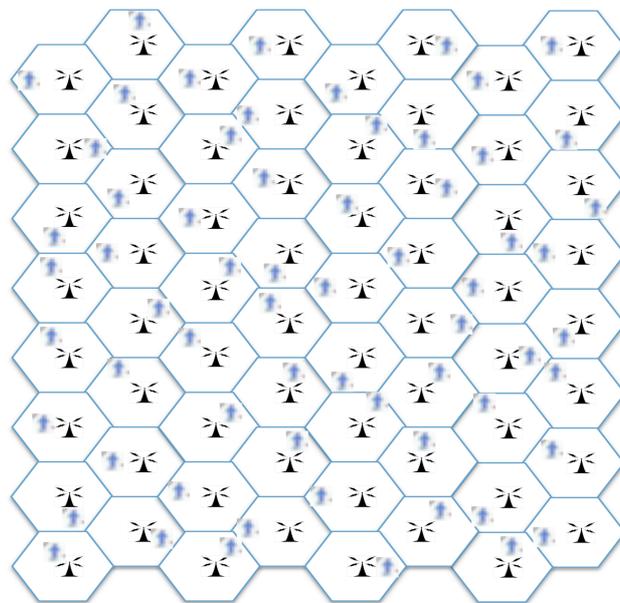


FIG. 3.3 “Espacio celular con 64 parejas usuario-base”

Para poder obtener el parámetro de referencia en nuestro estudio, que será la tasa de transmisión, partimos de la siguiente expresión:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x} + \mathbf{n}_k \quad (3.1)$$

donde  $\mathbf{y}_k \in C_{r \times 1}$  es la señal recibida por el usuario  $k$ ,  $\mathbf{H}_k = [h_{ij}]_{r \times lM}$  denota la matriz de canal del usuario  $k$ -ésimo con  $h_{ij}$ , representando la ganancia completa de canal entre la  $i$ -ésima antena receptora y la  $j$ -ésima antena transmisora. Esta matriz la podemos subdividir, como vimos en el apartado 2.2.1, en los canales del usuario  $k$  y las diferentes estaciones base de la forma  $\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_{k1} \cdots \mathbf{H}_{kM}]$ , mientras que  $\mathbf{x} \in C_{lM \times 1}$  equivale a su vez a  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_2^T \cdots \mathbf{x}_M^T]^T$  y representan las salidas complejas de las antenas,  $M$  es el número de estaciones base del sistema y  $N$  el número de usuarios en el sistema y  $\mathbf{n}_k \in C_{r \times 1}$  denota al vector de ruido blanco y gaussiano de media cero y matriz de covarianza  $\sigma^2 \mathbf{I}_r$ .

La potencia  $P_i$  transmitida por una estación base, queda definida como

$$E\left\{\|x_i\|^2\right\} = P_i < P_{\max}$$

donde  $P_{\max}$  es la potencia máxima que se permite transmitir a una estación base.

Dentro del programa sobre el que se trabaja [8], el cual esta realizado sobre Matlab, pasamos a configurar los parámetros de este. Podemos configurar el tamaño del espacio celular, numero de antenas tanto en transmisión como en recepción, numero de celdas por cluster, opción de las bases, etc.

Una vez configurados los parámetros, pasamos al diseño del propio escenario, implementaremos un escenario con distribución cuadrada y en la que asumiremos, como ya se ha comentado, que tendrá forma toroidal, de tal manera que todas las celdas reciban el mismo numero de canales interferentes, en nuestro caso tendremos un espacio

de  $8 \times 8$  celdas quedando las estaciones bases colocadas como se muestra en la figura 3.4.

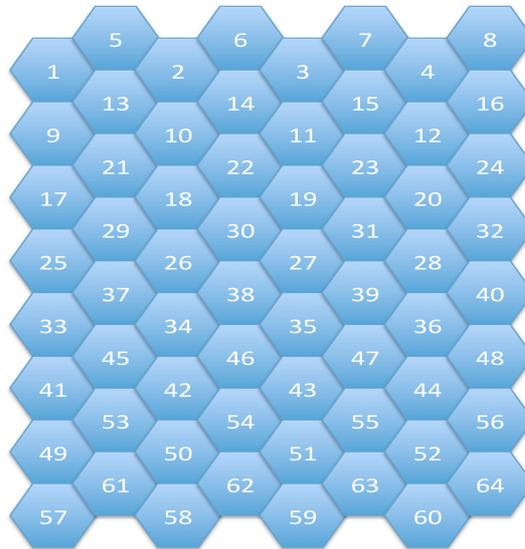


FIG. 3.4 "Distribución de las estaciones base en un espacio 8x8"

En cuanto a la distribución de los usuarios a lo largo del escenario existen también varias posibilidades, pudiendo elegirse el número de los usuarios, tipo de distribución, etc. Se repartirán 1000 usuarios uniformemente en el espacio y como último paso de la creación del escenario se establecen las parejas usuario-base como ya se ha explicado anteriormente, quedando como se muestra en la figura 3.3.

### 3.2 Escenario que estudiamos.

El objetivo de este proyecto es el estudio de las ventajas o desventajas de la clusterización en un sistema como el que hemos descrito en el apartado anterior. Suponemos para ello que la señal  $x$  se genera a partir de información común que tienen las BTS y que permitirá eliminar parcial o totalmente la interferencia del resto de usuarios.

A la hora de realizar la clusterización de un sistema celular tendremos en cuenta todo lo visto en el apartado 2.3, por esto sabemos que el número de celdas por cluster ( $J$ ) no puede tomar un valor cualquiera, depende de la distancia de reutilización, del radio de la celda y de la posición de esta en el eje de coordenadas (fórmula 2.23), por lo tanto  $J$  solo puede estar dentro de los números racionales 3,4,7,9,12,13,16,19,21,25, etc.

En nuestro caso nos centraremos en el estudio de dos tipos de cluster de tamaño  $J=3$  y  $J=4$

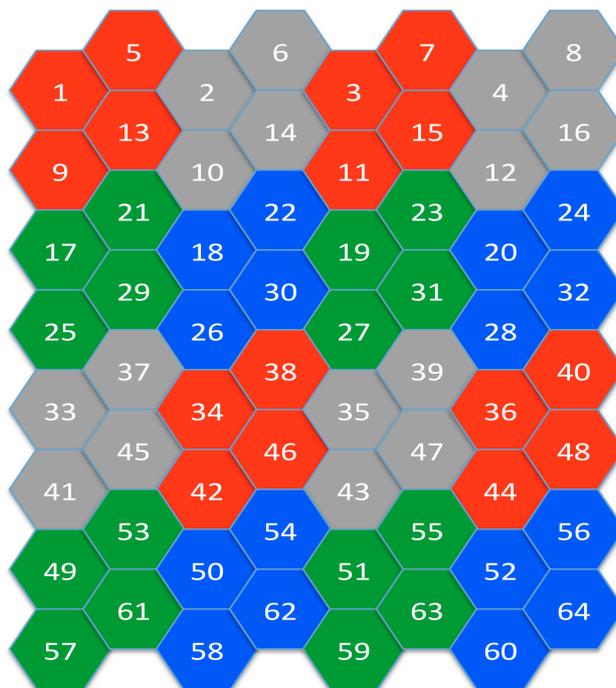


FIG. 3.5 "Espacio celular 8x8 para agrupaciones de  $J=4$ "

Para  $J=4$  (FIG. 3.5) el escenario queda dividido en 16 clusters y para el de  $J=3$  (FIG. 3.6) debido a la geometría del espacio celular diseñado y a la geometría del cluster tendremos que eliminar las bases 57,58,59 y 60.

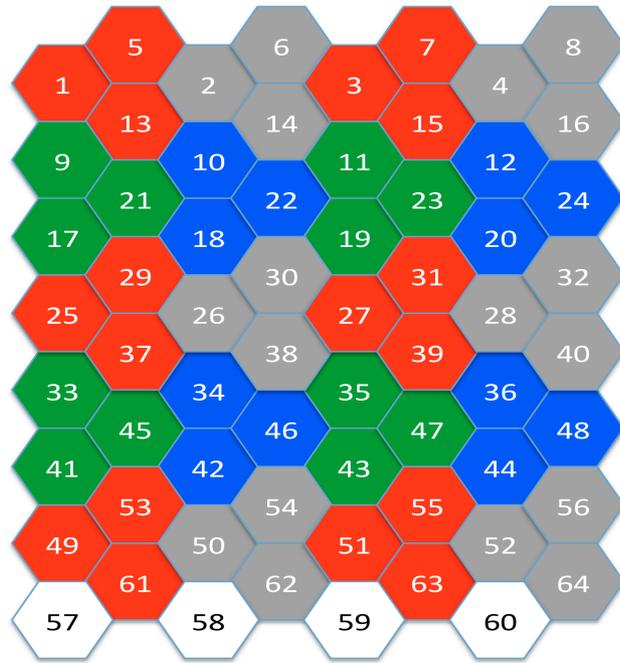


FIG. 3.6 "Espacio celular 8x8 para agrupaciones de  $J=3$ "

### 3.3 Cancelación interferencia en clustering.

A la hora de eliminar las interferencias en el sistema descrito, se van a estudiar dos casos. En el primero eliminamos todas las interferencias, lo que implica que cada BTS tiene que conocer las señales de las otras BTS. Este escenario fue el descrito en la sección 2.2.1.

En el caso de definir cluster solo se tratarán las interferencias que introducen las celdas pertenecientes a esa agrupación, de esta manera para calcular la matriz de precodificación  $\mathbf{W}$  generaremos una matriz de canal auxiliar en la que solo aparecerán los elementos interferentes para cada cluster, quedando de la siguiente manera:

$$\mathbf{H}_{aux} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,1} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{5,1} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{9,1} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{13,1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{2,2} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{6,2} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{10,2} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{14,2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{3,3} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{7,3} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{11,3} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{15,3} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{4,4} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{8,4} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{12,4} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{16,4} & \dots & 0 \\ \mathbf{H}_{1,5} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{5,5} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{9,5} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{13,5} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{2,6} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{6,6} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{10,6} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{14,6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{3,7} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{7,7} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{11,7} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{15,7} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{4,8} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{8,8} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{12,8} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{16,8} & \dots & 0 \\ \mathbf{H}_{1,9} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{5,9} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{9,9} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{13,9} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{2,10} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{6,10} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{10,10} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{14,10} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{3,11} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{7,11} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{11,11} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{15,11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{4,12} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{8,12} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{12,12} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{16,12} & \dots & 0 \\ \mathbf{H}_{1,13} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{5,13} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{9,13} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{13,13} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{2,14} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{6,14} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{10,14} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{14,14} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{3,15} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{7,15} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{11,15} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{15,15} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{4,16} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{8,16} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{12,16} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{16,16} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{H}_{64,64} \end{bmatrix}$$

FIG. 3.7 "Matriz de canales interferentes por cluster para una agrupación de J=4"

De esta manera conseguimos que al multiplicar el vector de precodificación  $\mathbf{W}$  con la matriz de canal  $H$  solo se realiza el ZF de los elementos que interfieren en cada cluster y no de las celdas del resto que siguen interfiriendo en el sistema en estudio.

La figura 3.7 se corresponde con una agrupación de  $J=4$ . Para cluster de  $J=3$  se debe hacer un estudio de la geometría del sistema y ver que celdas interfieren en el sistema (FIG. 3.6) y al igual que se hizo para el sistema con agrupaciones de  $J=4$  (FIG. 3.7). La matriz auxiliar para la agrupación de  $J=3$  queda de la siguiente manera:

$$H_{aux} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & 0 & 0 & 0 & H_{5,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{13,1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_{2,2} & 0 & 0 & 0 & H_{6,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{14,2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & H_{3,3} & 0 & 0 & 0 & H_{7,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{15,3} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{4,4} & 0 & 0 & 0 & H_{8,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{16,4} & \dots & 0 \\ H_{1,5} & 0 & 0 & 0 & H_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{13,5} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_{2,6} & 0 & 0 & 0 & H_{6,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{14,6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & H_{3,7} & 0 & 0 & 0 & H_{7,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{15,7} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{4,8} & 0 & 0 & 0 & H_{8,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{16,8} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{9,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{10,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{11,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{12,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ H_{1,13} & 0 & 0 & 0 & H_{5,13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{13,13} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_{2,14} & 0 & 0 & 0 & H_{6,14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{14,14} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & H_{3,15} & 0 & 0 & 0 & H_{7,15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{15,15} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{4,16} & 0 & 0 & 0 & H_{8,16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{16,16} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & H_{64,64} \end{bmatrix}$$

FIG. 3.8 “Matriz de canales interferentes por cluster para una agrupación de  $J=3$ ”

En cuanto a la asignación de potencias tendremos que tener en cuenta que ya no tenemos una matriz con todos los elementos a cero menos la diagonal principal con valores  $\mathbf{U}_i \mathbf{S}_i$  (Formulas 2.11 y 2.12) por lo que la potencia  $P_{ij}$  no se puede calcular

mediante la formula  $\max \left\{ \sum_{i=1}^N \alpha_i \sum_{j=1}^r \log_2 (1 + \lambda_{ij} P_{ij}) \right\}$  (2.14). En nuestro caso tendremos

que tener en cuenta las matrices interferentes que no hemos forzado a cero, es decir las de cualquier celda del sistema que no se encuentre en el cluster en estudio. Para ello utilizaremos el modelo de máxima potencia con transmisión individual. Es decir todas las BTS transmiten a la misma potencia, cumpliendo la restricción de máxima potencia transmitida.

En este modelo de transmisión cada estación base puede transmitir al usuario asignado con la máxima potencia permitida, de esta manera cada usuario recibirá la señal de la estación base que tiene asignada, pero afectada por todas las señales interferentes de las celdas contiguas, cuyas interferencias no se hayan podido cancelar.

Utilizamos la ecuación (3.1) pero expresada de tal forma que quede en términos de interferencia:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{kk} \mathbf{x}_k + \left( \sum_{i=1, i \neq k}^N \mathbf{H}_{ki} \mathbf{x}_i \right) + \mathbf{n}_k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

donde el  $\mathbf{H}_{kk} \in C_{r \times t}$  se refiere al canal asociado al usuario  $k$ ,  $\mathbf{x}_k \in C_{t \times 1}$  indica la señal transmitida de la estación base asociada al usuario  $k$ , mientras que los términos entre paréntesis (caracterizadas por  $\mathbf{H}_{ki} \in C_{r \times t}$ ) representan las interferencias provenientes de las estaciones base que se encuentran en celdas contiguas y que afectan al usuario  $k$ ;  $\mathbf{x}_i \in C_{t \times 1}$  son las salidas de las BTS de las celdas contiguas y  $\mathbf{n}_k \in C_{r \times 1}$  el ruido que afecta al usuario  $k$ .

Consideramos la señal  $\mathbf{x}_k$  transmitida por cada BTS con una distribución Gaussiana de covarianza  $P_k \mathbf{I}_t$ , resultando la tasa del usuario  $k$

$$\log_2 \left[ \det(\mathbf{I}_r + P_k \mathbf{H}_{kk} \mathbf{H}_{kk}^\dagger R^{-1}) \right] \quad (3.3)$$

donde recordamos que  $\mathbf{H}_{kk}$  es el canal del usuario  $k$ , y añadimos además  $\mathbf{R}$  que es la contribución de la interferencia y que queda expresado como

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1, i \neq j}^N P_{\max} \mathbf{H}_{ki} \mathbf{H}_{ki}^\dagger + \mathbf{I}_r \sigma^2 \quad (3.4)$$

donde  $\mathbf{H}_{ki}$  es el canal entre las antenas de las estaciones bases no asignadas al usuario  $k$ -ésimo y las antenas del usuario  $k$ -ésimo.

## CAPITULO 4 “SIMULACIONES”

Una vez realizado el estudio teórico desarrollaremos una plataforma en Matlab para poder simular lo estudiado. En primer lugar es importante establecer los parámetros del diseño, opción de las estaciones base, numero de usuarios, radio de las celdas del sistema, tamaño del espacio celular, ancho de banda, numero de celdas por cluster, antenas en los usuarios y en la BTS, etc.

De todos estos parámetros mantendremos fijos para todas las simulaciones, el numero de usuarios, radio de las celdas, ancho de banda, la opción de las estaciones base y la máxima potencia a la que pueden transmitir estas. En el receptor configuraremos la SNR, la temperatura de ruido, la figura de ruido en el receptor, temperatura de ruido también en el receptor todos estos valores fueron mencionados con anterioridad en el apartado 3.1.

Una vez definidos los parámetros fijos que caracterizaran nuestro sistema, realizaremos las simulaciones estudiando los resultados de realizar una clusterización del sistema con agrupaciones de  $J=3$  y  $J=4$ .

Dentro de cada uno de estos escenarios, realizaremos la simulación de transmitir desde la BTS con  $t=1$ ,  $t=2$  y  $t=4$  antenas, en cuanto a la recepción, con el fin de tener un sistema mas realista, el usuario siempre recibirá la señal con una única antena ( $r=1$ ).

Mostramos también, con fines comparativos, dos escenarios mas. El primero es un escenario con cluster, donde se fuerza que las interferencias fuera de ese cluster sean nulas, se le denomina “Espacio clisterizado ideal”. El segundo es el “peor” de los escenarios, donde no se definen cluster, y por tanto no se elimina la interferencia de ninguna de las celdas en el sistema.

La asignación de potencia que se realiza en todos los escenarios es una asignación uniforme para todas las BTS. Esta asignación siempre cumple la restricción, una vez hecha la precodificación en los casos que corresponda, de que la potencia transmitida por cada BTS esté por debajo de la  $P_{\max} = 10W$ . En los resultados que se muestran a continuación se muestra siempre el nivel de potencia media que se alcanza en cada escenario y se compara con el de una estrategia de “Water-filling” donde

estamos optimizando la asignación de potencias a cada canal resultado de una diagonalización completa.

Empezaremos desde el cluster de menor tamaño y con el menor número de antenas hasta el de mayor número de celdas y el mayor número de antenas, todas las simulaciones se han llevado a cabo después de 100 iteraciones del sistema.

## 4.1 Clusterización J=3

ANTENAS EN LA BTS  $t=1$ :

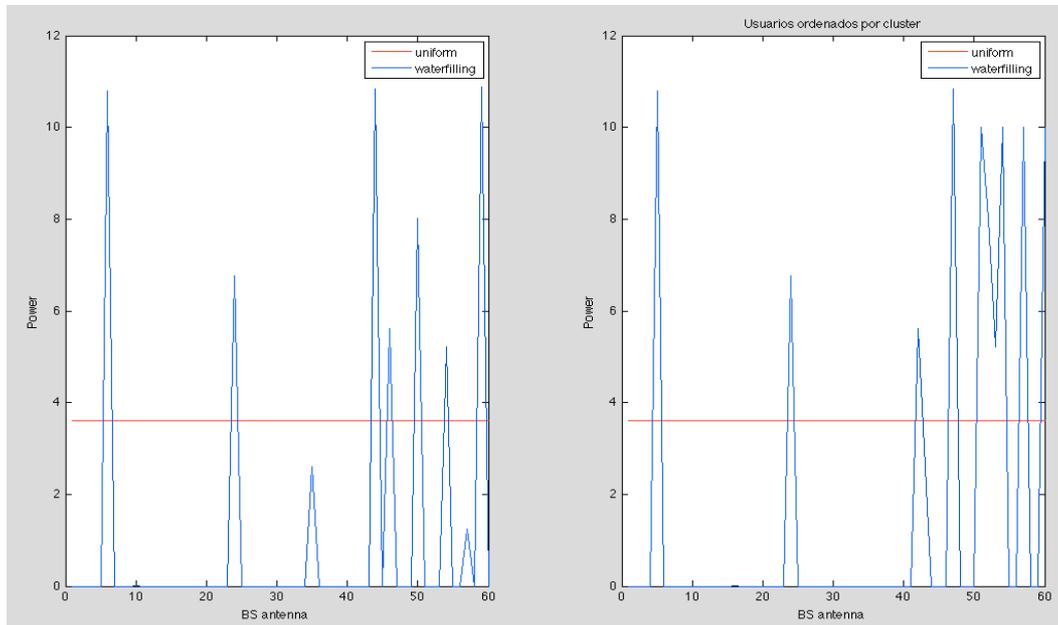


FIG. 4.1 "Asignación de potencias J=3, t=1"

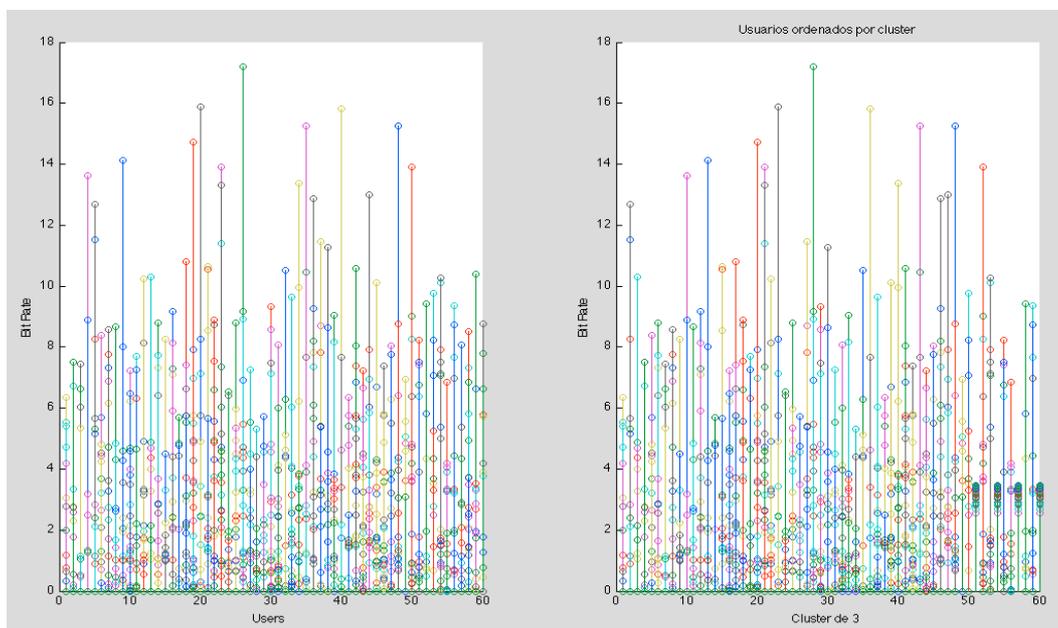


FIG. 4.2 "Espacio clusterizado ideal J=3,t=1"

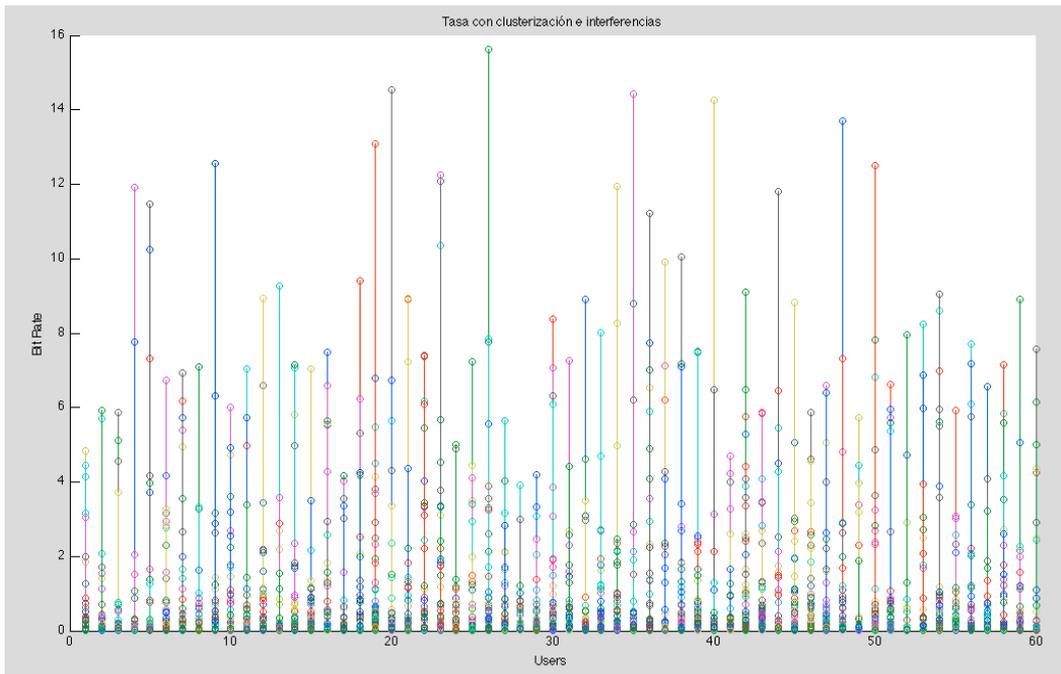


FIG. 4.3 "Tasa con clusterización e interferencias  $J=3, t=1$ "

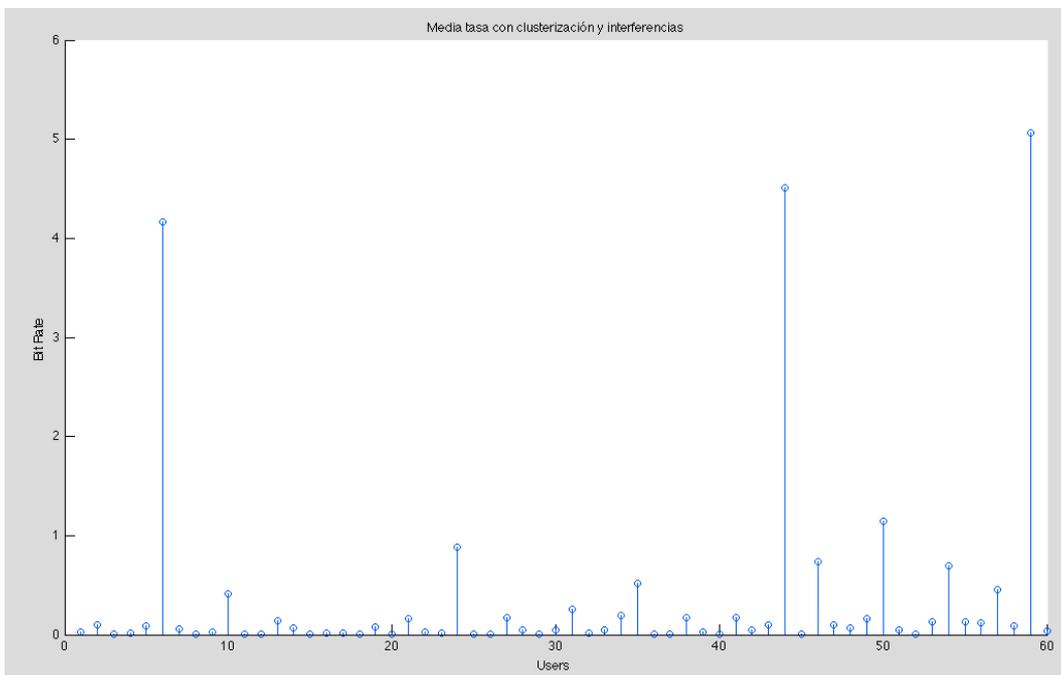


FIG. 4.4 "Tasa media para el escenario clusterizado y con interferencias  $J=3, t=1$ "

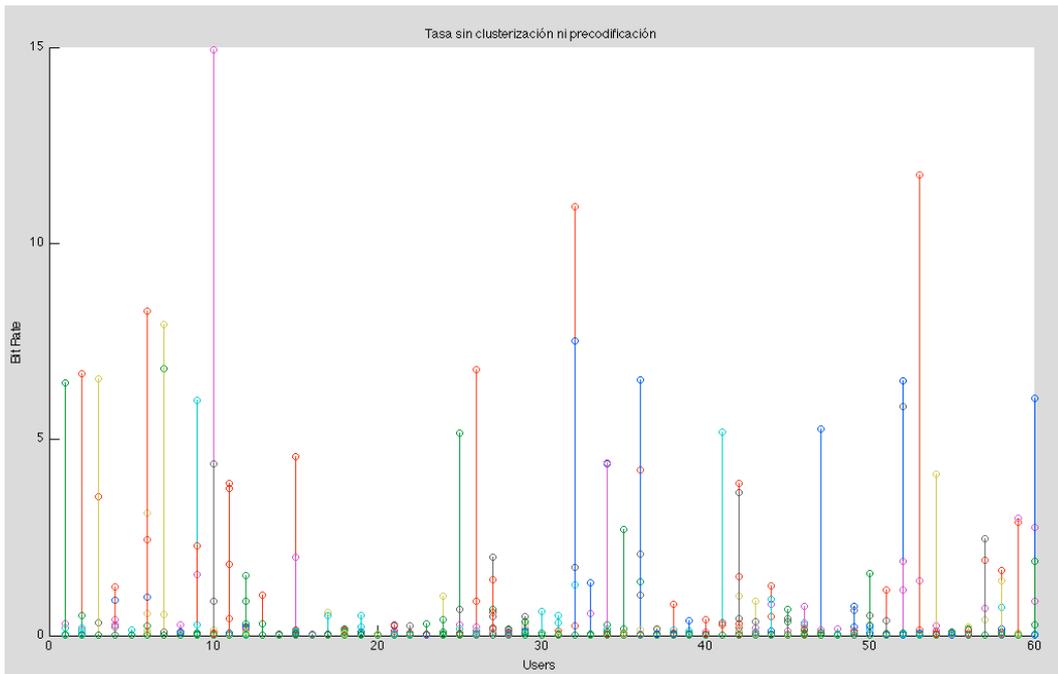


FIG. 4.5 "Espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=3, t=1$ "

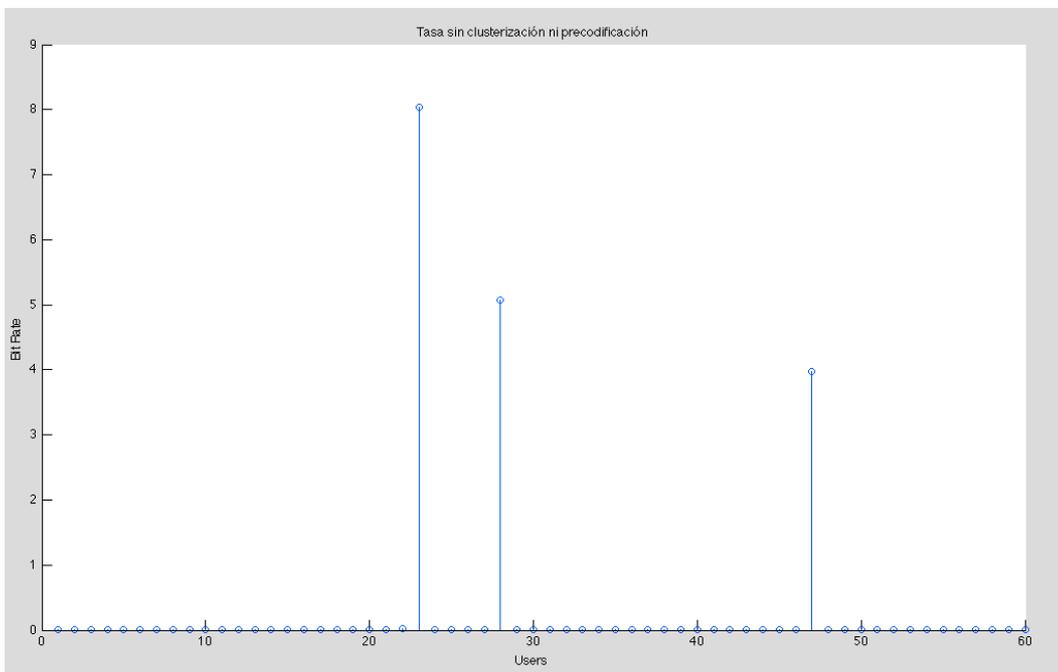


FIG. 4.6 "Tasa media del espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=3, t=1$ "

Podemos observar en la figura 4.6 como sería la tasa de transmisión para el espacio celular sin clusterizar y con todas las celdas contiguas interfiriendo, esto unido a que solo se transmite con una única antena da una tasa de transmisión muy baja, dando en media solo servicio a tres usuarios y pudiendo observarse en la figura 4.5 como de una forma aproximada no supera en media una tasa de transmisión de 4 o 5 bits por símbolo.

Al clusterizar, si se toma el escenario de una manera ideal, es decir que el resto de cluster no interfieren a la hora de transmitir y solo anulando las interferencias del propio cluster, alcanzamos unas tasas de transmisión de el doble de lo conseguido, aproximadamente entre 19 o 12 bits.

En la figura 4.3 y figura 4.4 observamos el escenario real, donde hacemos cero mediante precodificación todas las interferencias que proceden del cluster en estudio, pero el resto de cluster interfiere. Podemos observar una mejoría considerable en relación a la figura 4.6 en este caso conseguimos subir al doble la tasa de datos y abastecer de servicio a casi la mitad de usuarios del sistema completo, aunque todavía con una tasa muy baja.

En cuanto a la asignación de potencias podemos ver la en la figura 4.1 la asignación casi optima para la digonalización de la matriz de canal de cada cluster que se corresponde con el modelo water-filling, necesitando asignar potencia a pocos usuarios para dar este servicio.

## ANTENAS EN LA BTS t=2:

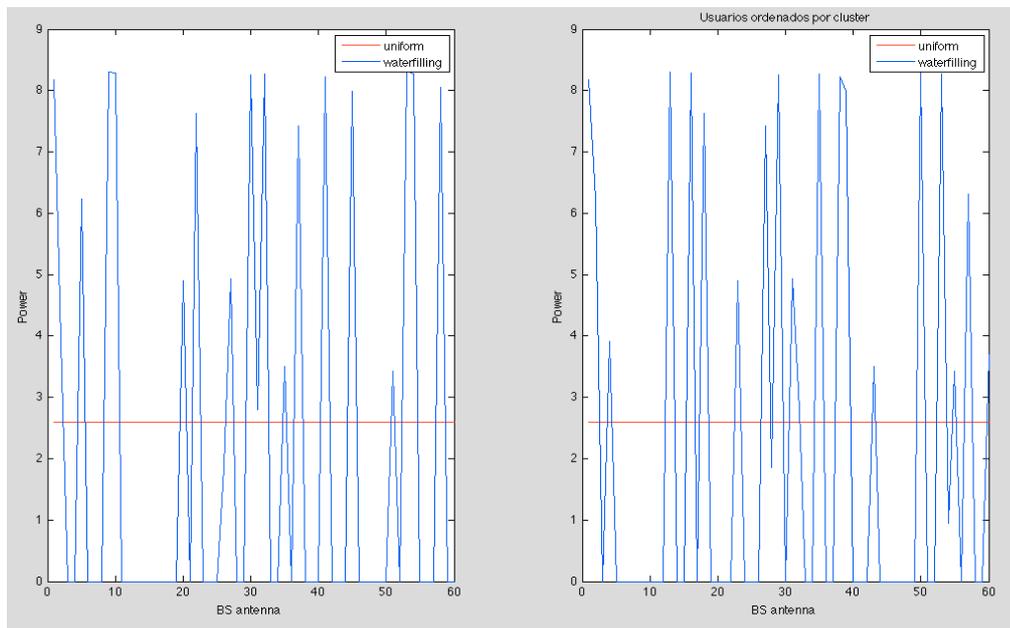


FIG. 4.7 "Asignación de potencias J=3, t=2"

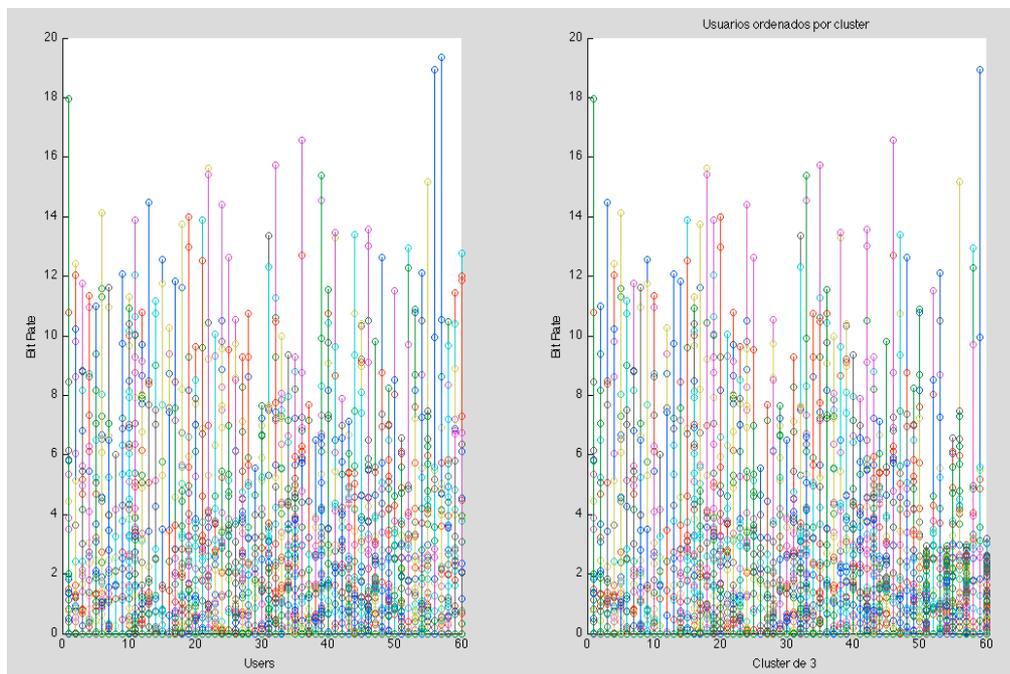


FIG. 4.8 "Espacio clusterizado ideal J=3,t=2"

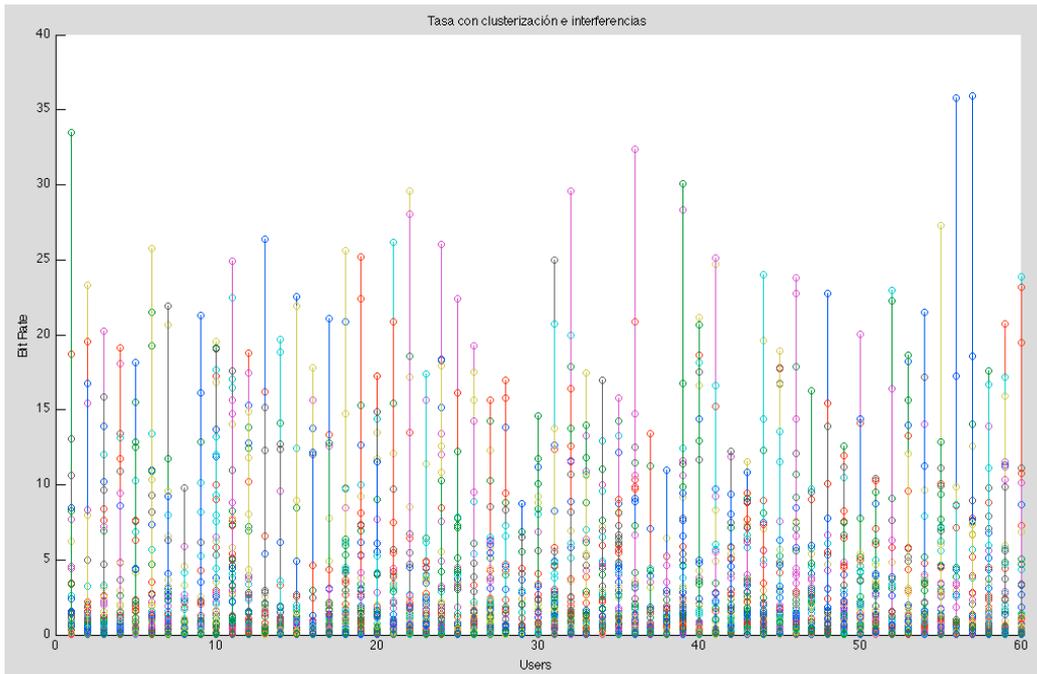


FIG. 4.9 "Tasa con clusterización e interferencias  $J=3, t=2$ "

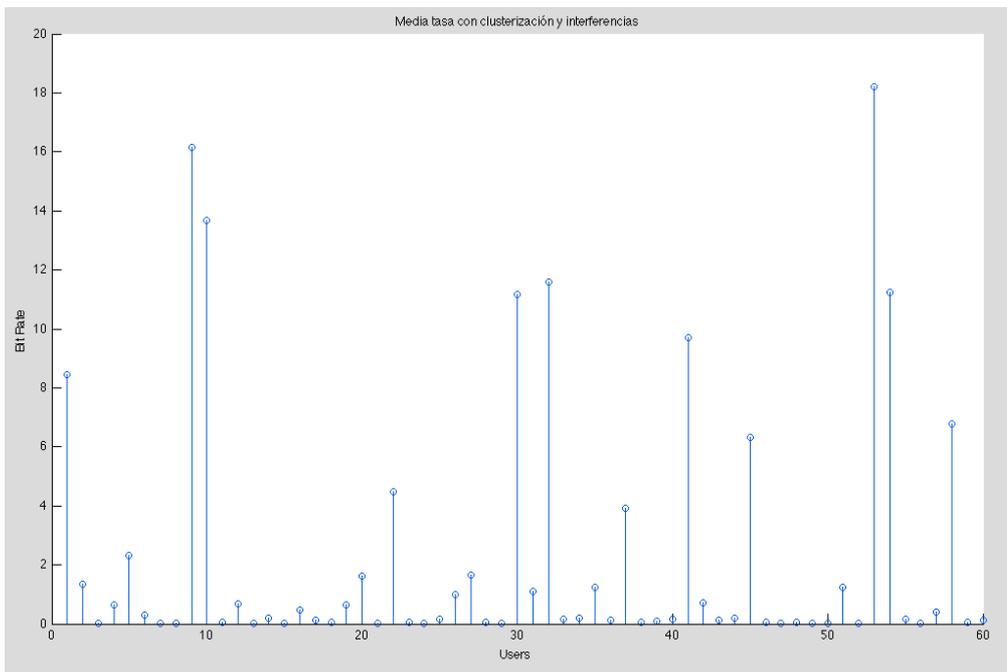


FIG. 4.10 "Tasa media para el escenario clusterizado y con interferencias  $J=3, t=2$ "

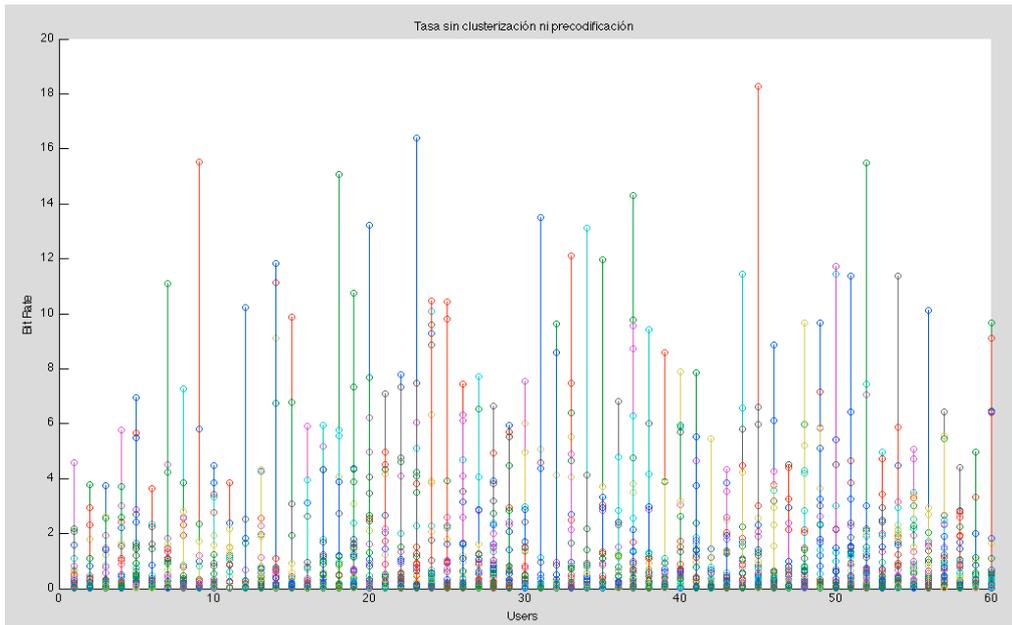


FIG. 4.11 "Espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=3, t=2$ "

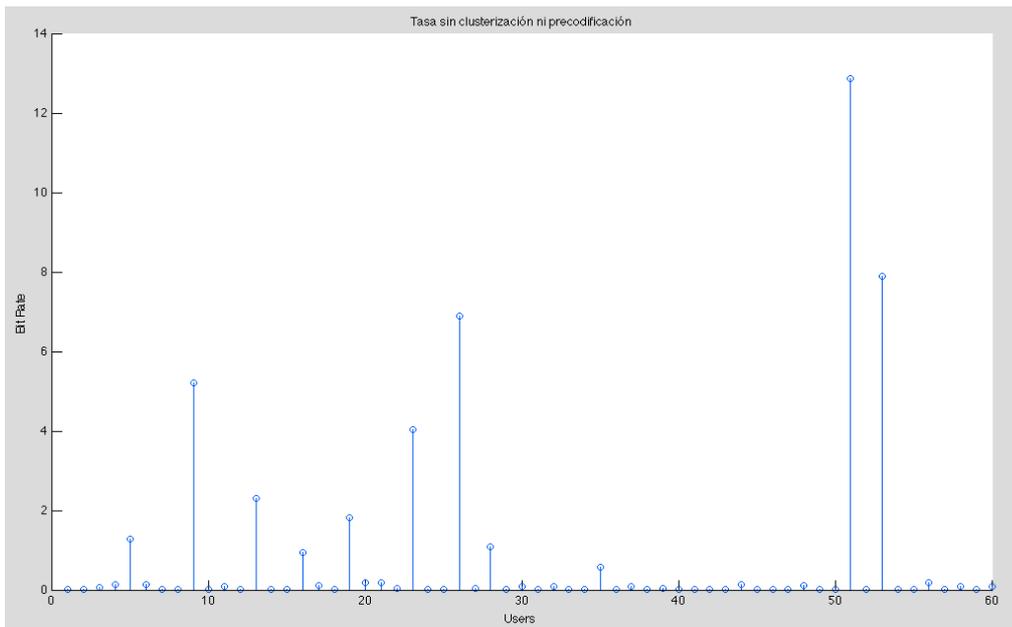


FIG. 4.12 "Tasa media del espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=3, t=2$ "

En esta simulación aumentamos a dos el número de antenas de la BTS. Podemos ver como para la figura 4.22, que se corresponde al peor de los casos, ya comentado anteriormente, tenemos una mejora sustancial puesto que en relación a transmisión con una única antena se da servicio a cuatro veces mas usuarios y duplicando la tasa llegando en media a unos 6 bits como se observa en la figura 4.11.

En cuanto a la figura 4.8 vemos que la tasa de datos aumenta en relación a la figura 4.2 en uno o dos bits por símbolo, pero realmente lo que aumenta sustancialmente es el numero de usuarios a los que se da servicio con tasas hasta de cuatro bits, dando un servicio muy uniforme hasta este rango de valores.

En el escenario real tenemos un aumento de la tasa muy considerable hasta alcanzar valores medios de unos 16 o 17 bits y como cotas máximas 35 bits por símbolo. De esta manera podemos dar servicio con tasas relativamente elevadas, pero poco uniforme, solo pudiendo garantizar unas tasas relativamente constantes de unos 2 bits. Aunque estas tasas han aumentado siguen siendo bajas.

En cuanto a la asignación de potencia necesitaríamos alimentar a mayor numero de usuarios para dar servicio que para el modelo de transmisión anterior.

## ANTENAS EN LA BTS t=4:

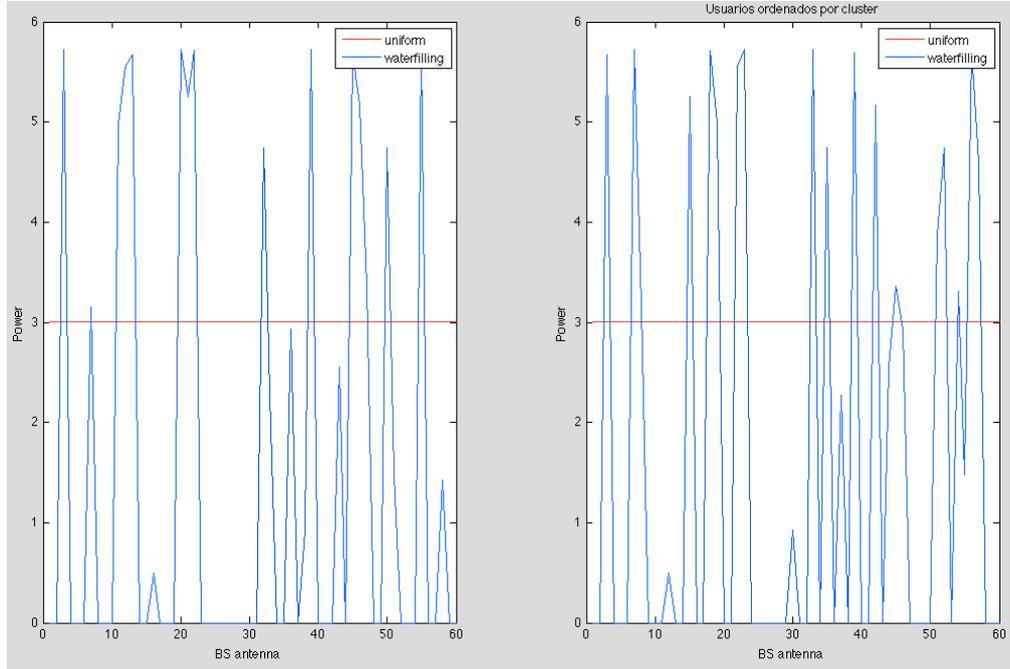


FIG. 4.13 "Asignación de potencias J=3, t=4"

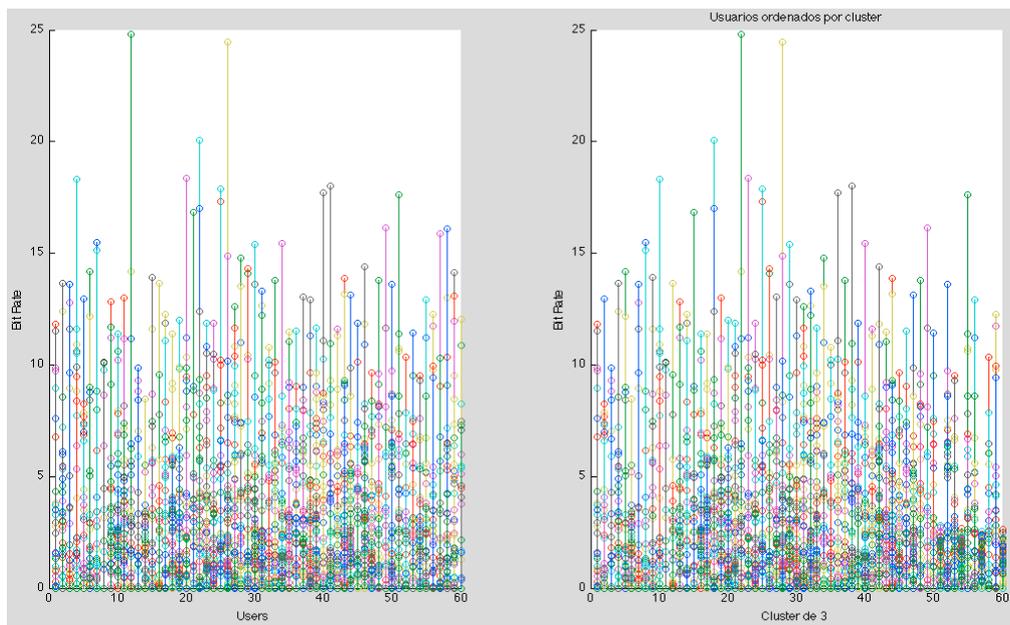


FIG. 4.14 "Espacio clusterizado ideal J=3,t=4"

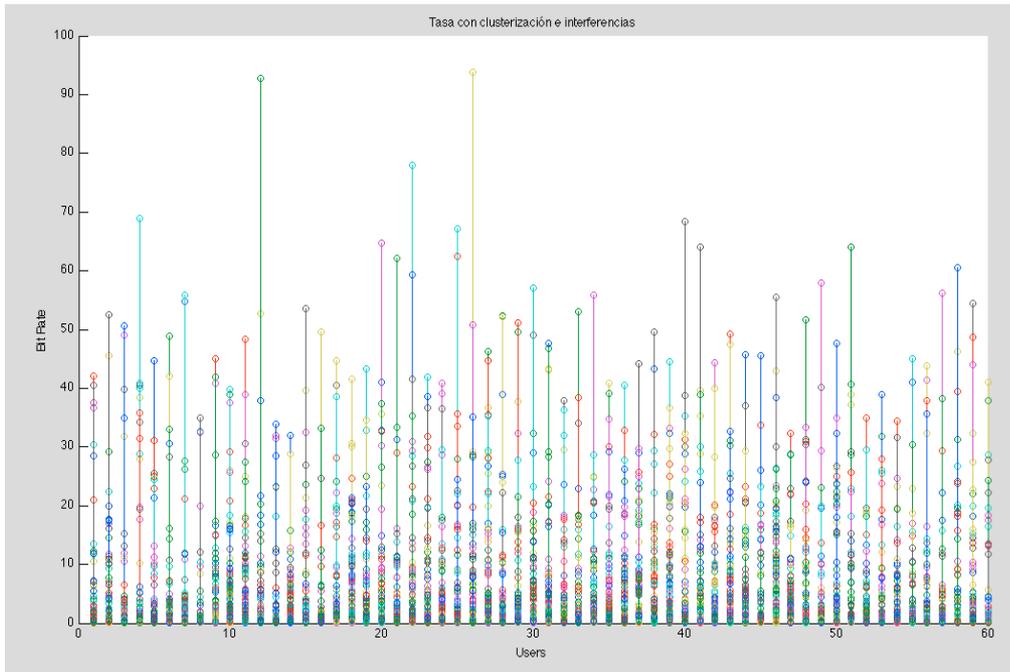


FIG. 4.15 "Tasa con clusterización e interferencias J=3,t=4"

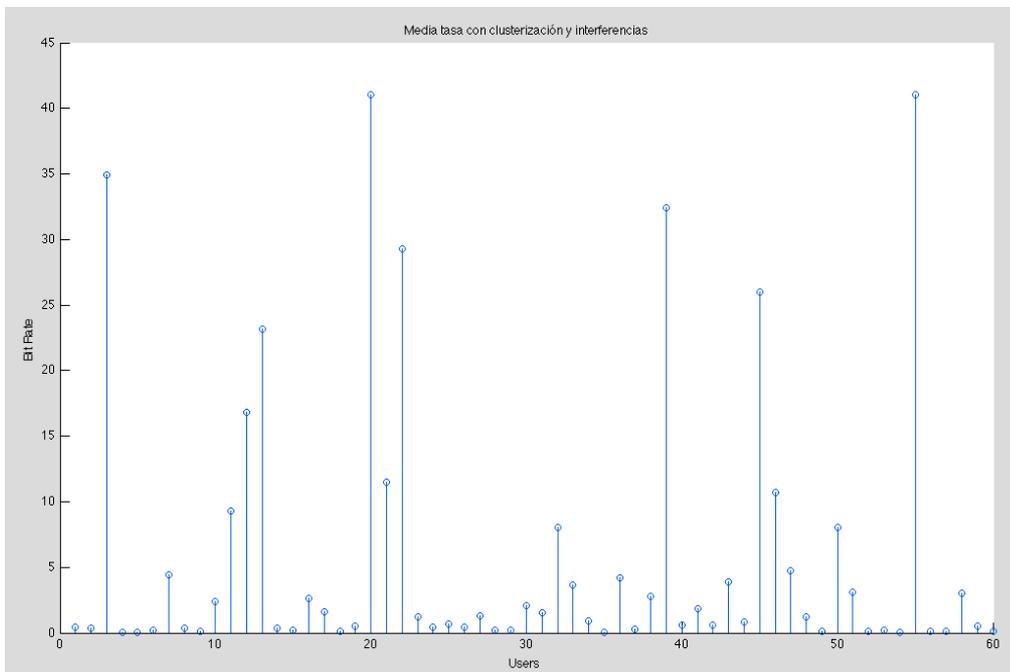


FIG. 4.16 "Tasa media para el escenario clusterizado y con interferencias J=3,t=4"

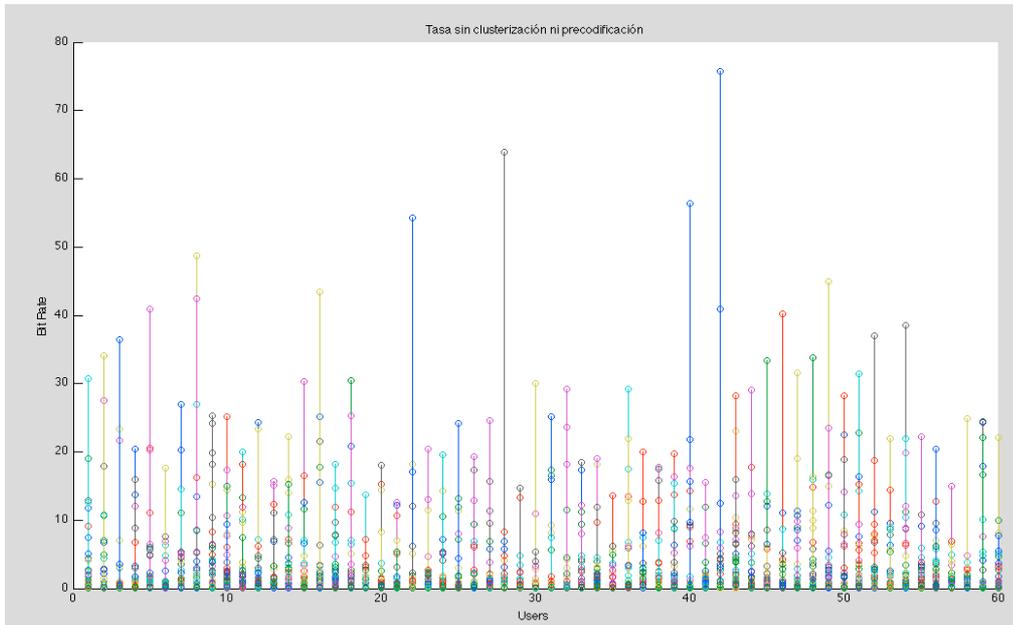


FIG. 4.17 "Espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=3, t=4$ "

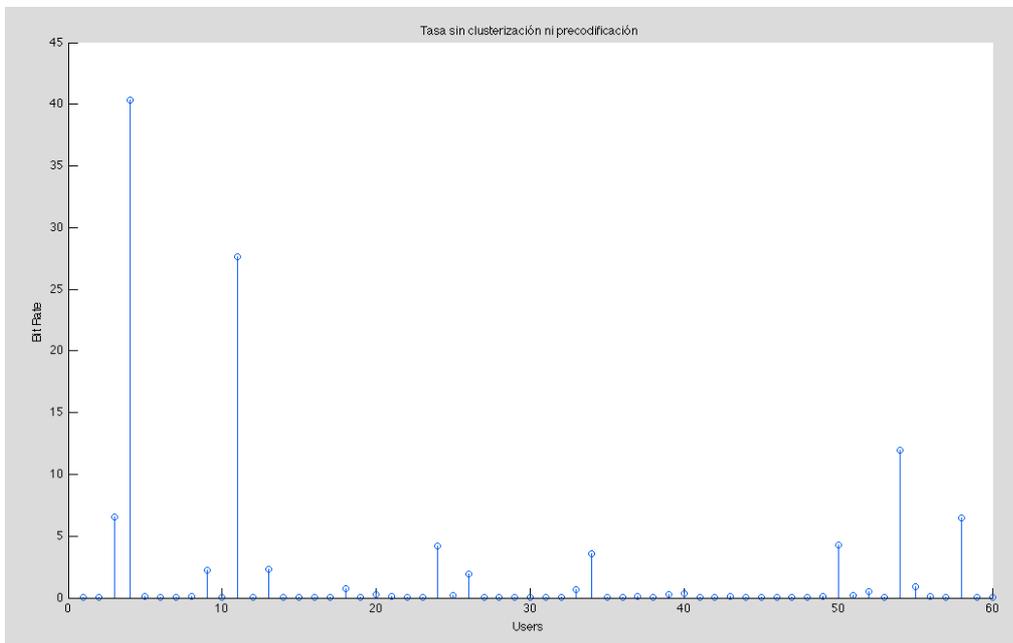


FIG. 4.18 "Tasa media del espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=3, t=4$ "

Al aumentar el número de antenas en las BTS como es de esperar conseguimos mejoras en la transmisión, en la figura 4.18, el aumento de usuarios no es muy elevado en comparación a lo observado entre la transmisión con una antena y dos, en este caso tan solo tenemos uno o dos usuarios más, lo que si podemos destacar son unos picos máximos mucho más elevados hasta de 56 bits por símbolo y tasas medias cercanas a los 28 bits como se puede observar en la figura 4.17, aunque con una distribución muy poco uniforme.

En la figura 4.14 no conseguimos aumentar la tasa de datos, pero si dar servicio de una manera muy uniforme a todos los usuarios garantizando un tasa constante de cerca de los 10 bits por símbolo, lo que supone duplicar la tasa respecto a la transmisión con dos antenas.

En el escenario real, con la interferencia del resto de clusters, podemos observar un aumento sustancial en todos los parámetros, este sistema es capaz de abastecer de servicio a casi todos los usuarios del sistema figura 4.16, aumenta la tasa media cerca de los 45 bits por símbolo y lo que es más importante da servicio de una manera uniforme cerca de los 20 bits por símbolo, lo que supone un aumento muy elevado en comparación a la transmisión con una antena en una clusterización  $J=3$ .

## 4.2 Clusterización J=4

ANTENAS EN LA BTS  $t=1$ :

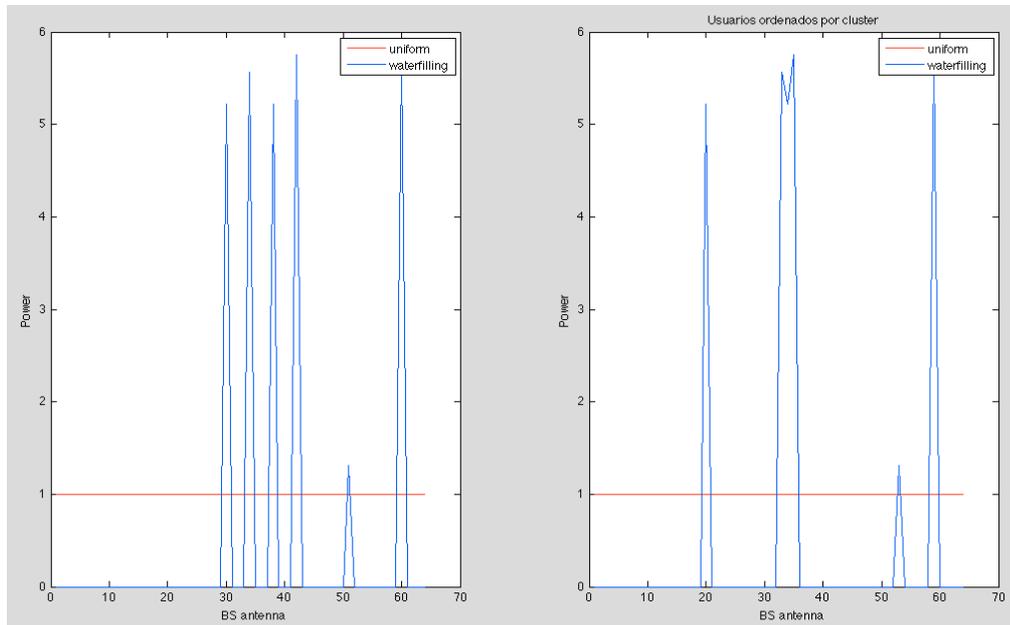


FIG. 4.19 "Asignación de potencias J=4, t=1"

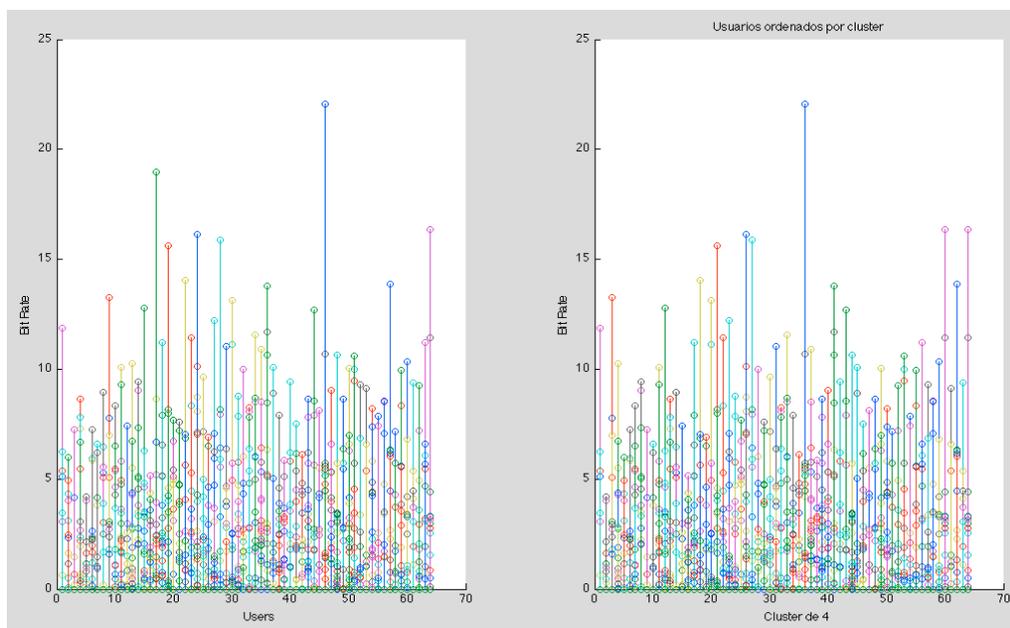


FIG. 4.20 "Espacio clusterizado ideal J=4, t=1"

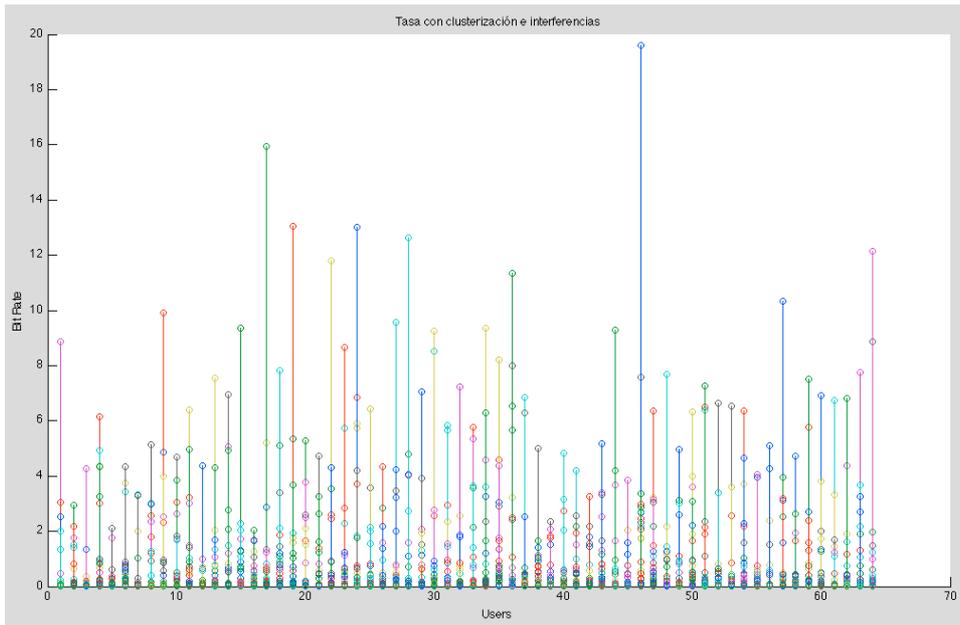


FIG. 4.21 "Tasa con clusterización e interferencias J=4,t=1"

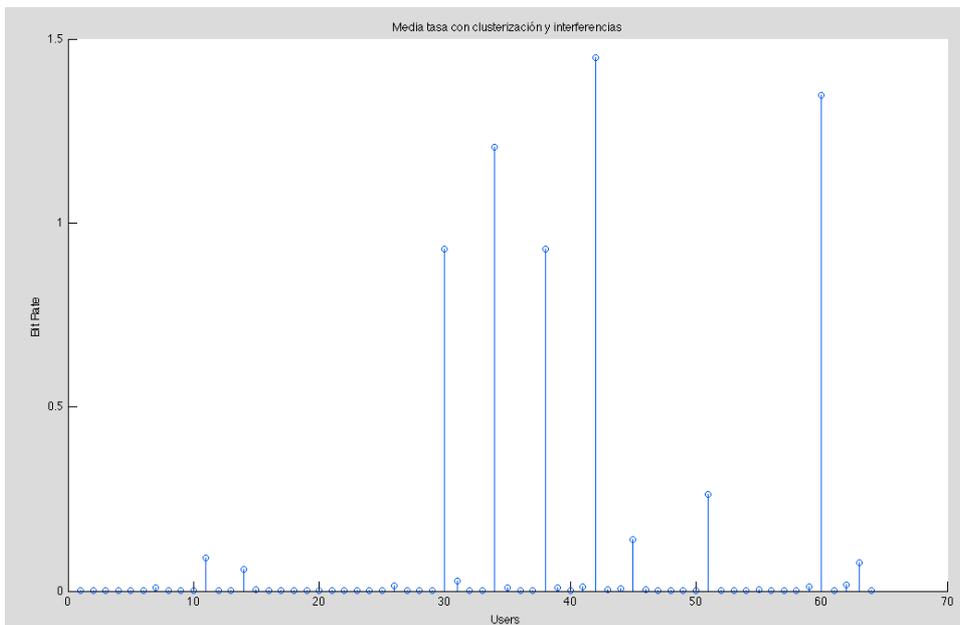


FIG. 4.22 "Tasa media para el escenario clusterizado y con interferencias J=4,t=1"

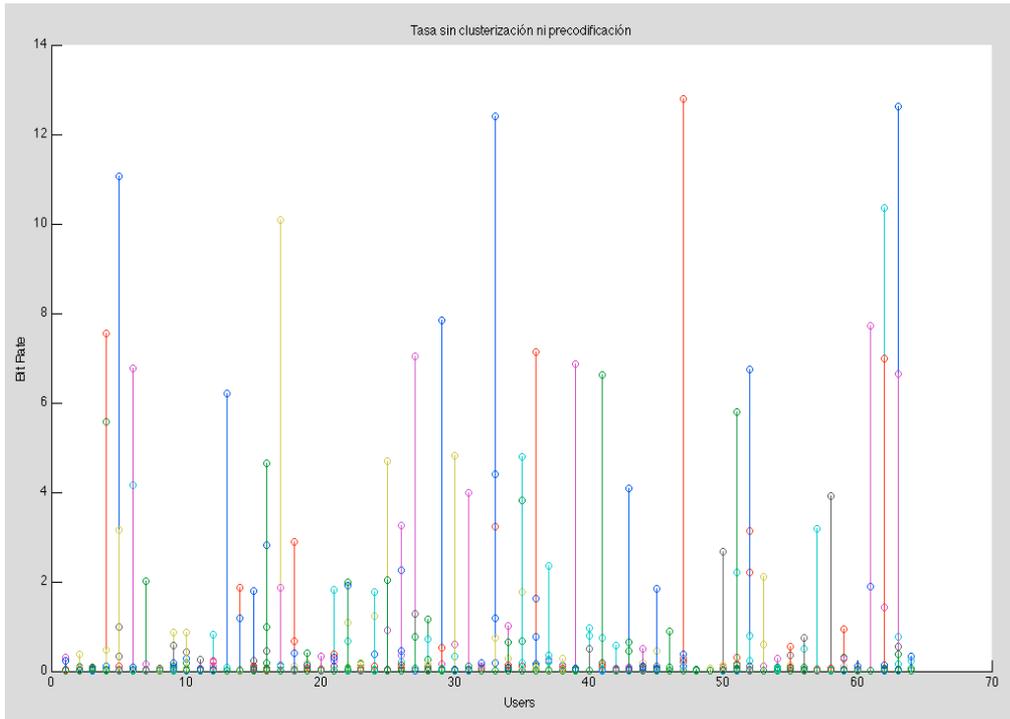


FIG. 4.23 “Espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=4, t=1$ ”

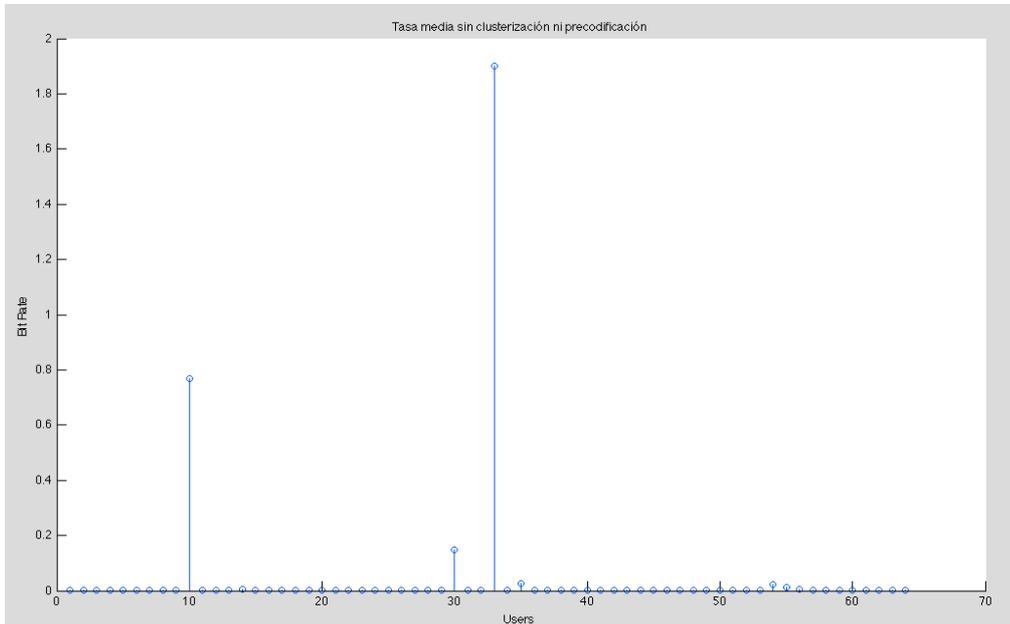


FIG. 4.24 “Tasa media del espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=4, t=1$ ”

Como podemos observar en la figura 4.24 y 4.23 prácticamente no hay diferencia entre este espacio celular y el de la figura 4.6 y la 4.5. Geométricamente hablando, en el caso de la figura 4.24 se tienen cuatro celdas mas, pero en cuanto a la distribución de tasa no se aprecian diferencias significativas.

En el espacio celular clisterizado de  $J=4$ , considerándolo ideal (sin interferencias de los cluster contiguos), se consiguen unas tasas medias de aproximadamente 8 o 9 bits, pero de una manera muy irregular dando servicio de una forma muy poco uniforme (FIG. 4.20).

Teniendo en cuenta las interferencias de cluster contiguos, la situación como es evidente empeora dando servicio a unos 10 usuarios (FIG. 4.22), con valores medios de tasa de 7 o 8 bits (FIG. 4.21) y de manera uniforme en torno a 1 bit por símbolo. La clusterización de 4 mejora la de 3 para la transmisión con una antena pero los valores conseguidos son muy bajos.

## ANTENAS EN LA BTS $t=2$ :

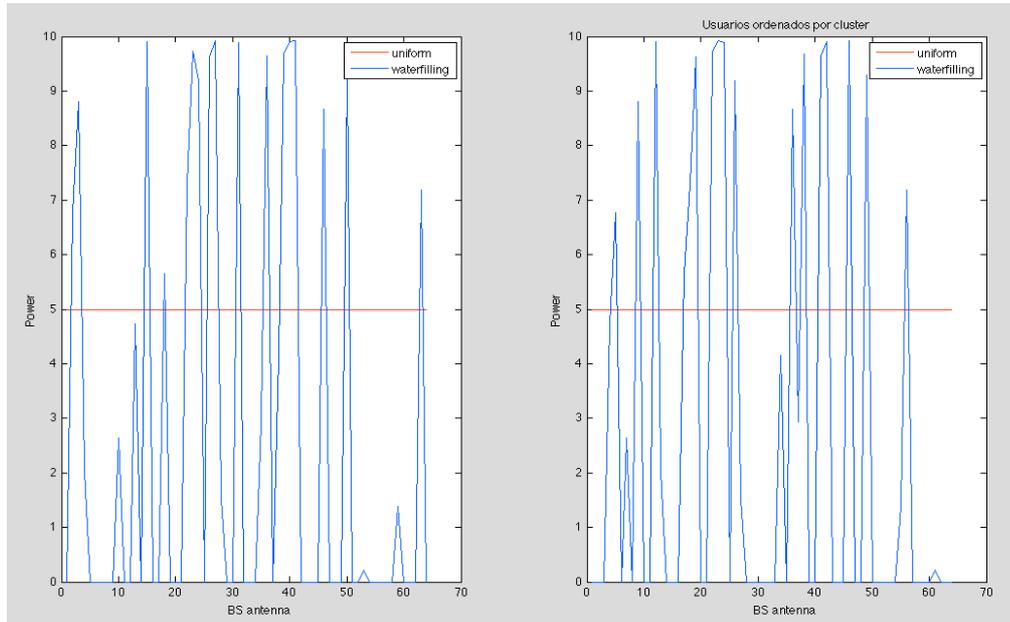


FIG. 4.25 "Asignación de potencias  $J=4, t=2$ "

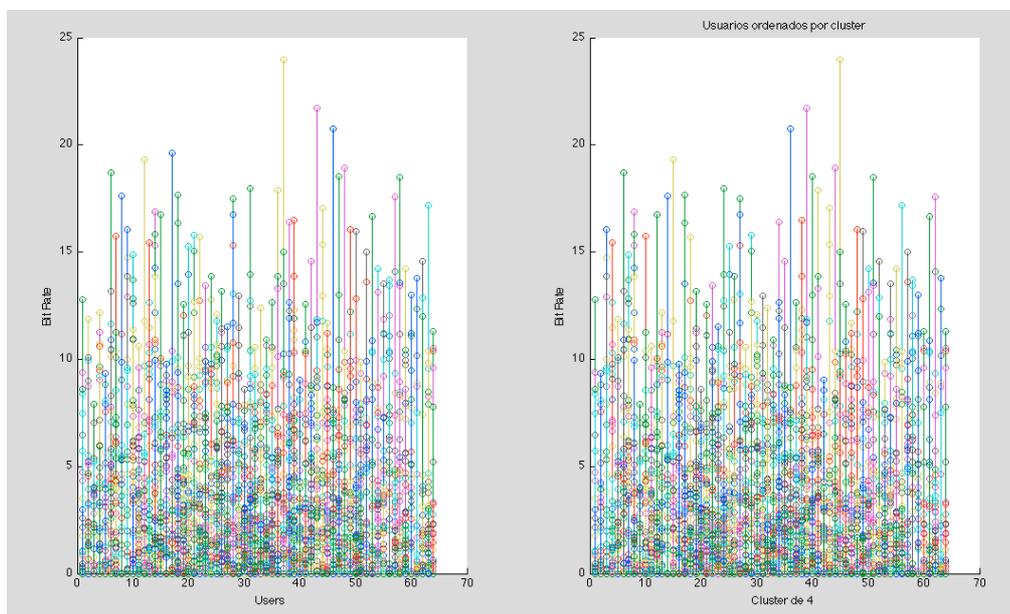


FIG. 4.26 "Espacio clusterizado ideal  $J=4, t=2$ "

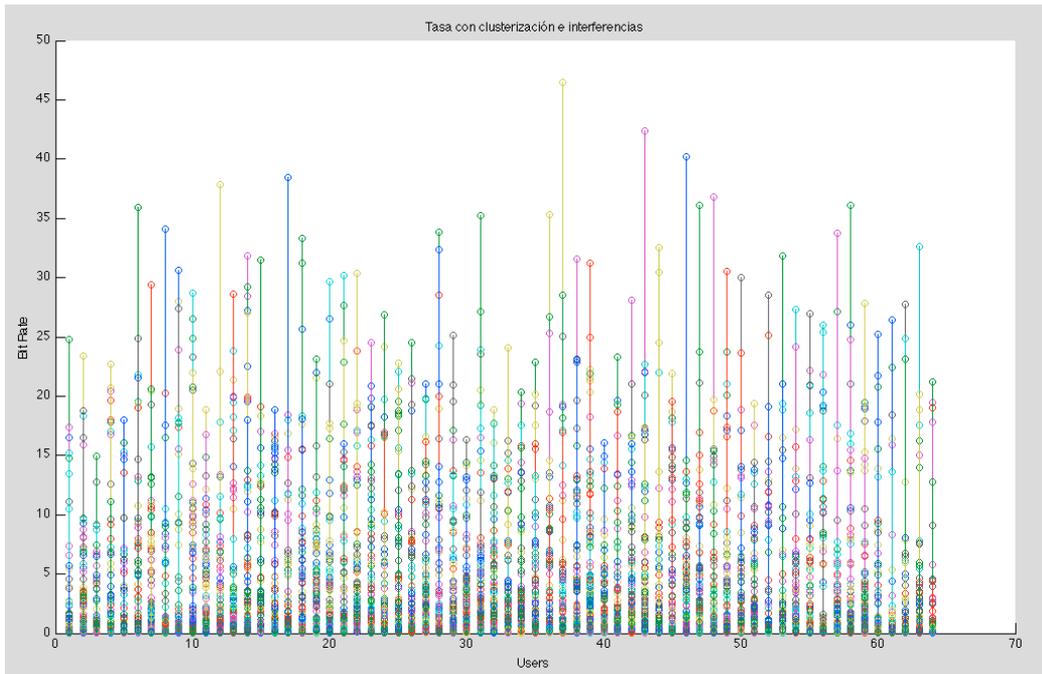


FIG. 4.27 "Tasa con clusterización e interferencias  $J=4, t=2$ "

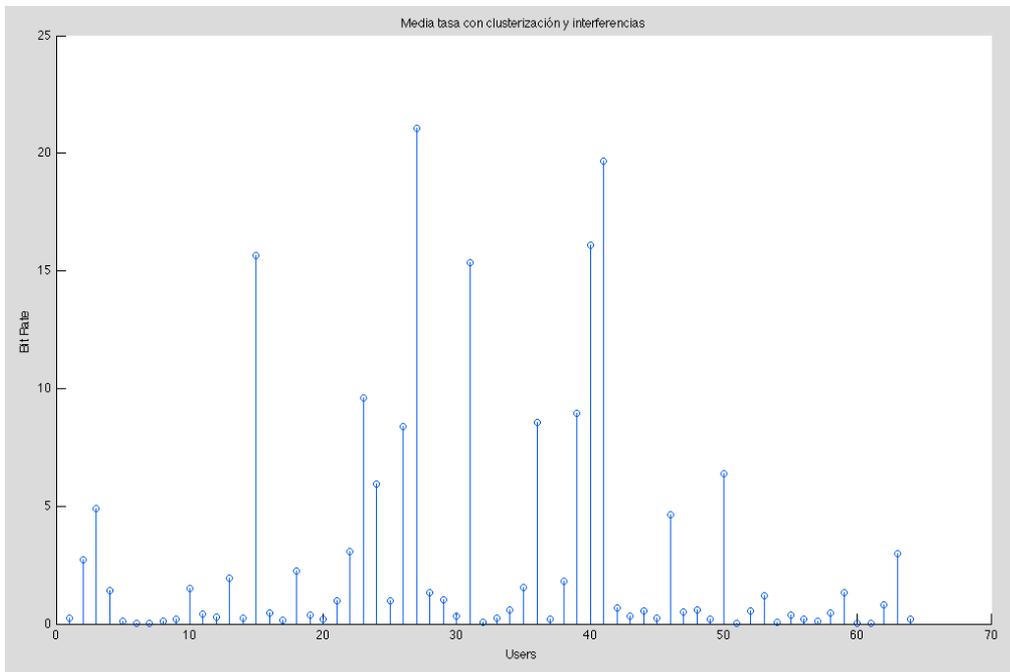


FIG. 4.28 "Tasa media para el escenario clusterizado y con interferencias  $J=4, t=2$ "

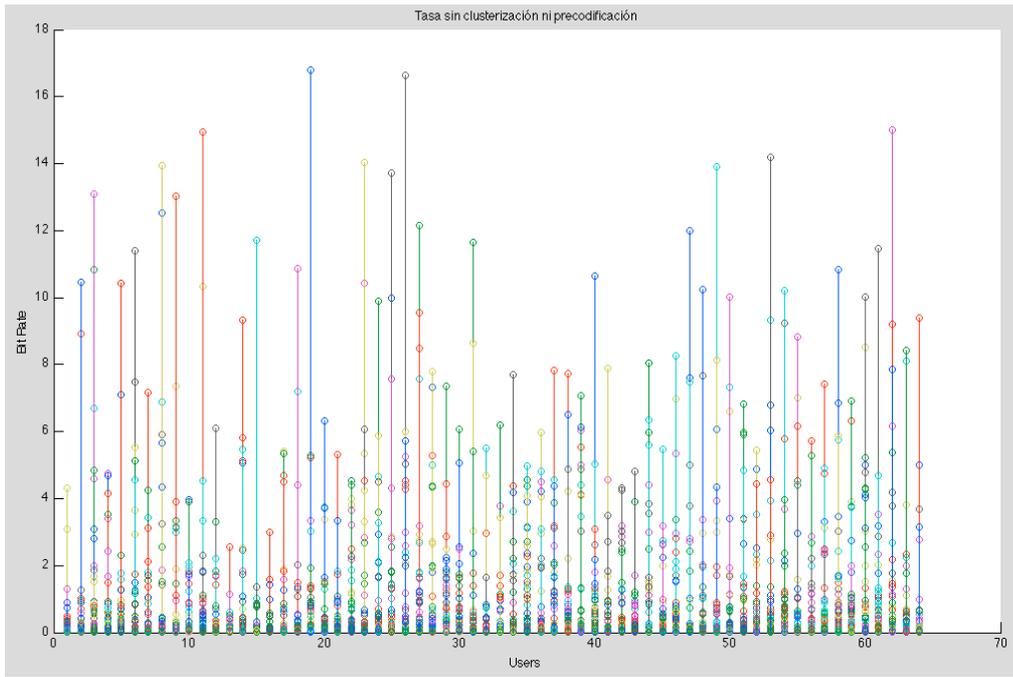


FIG. 4.29 “Espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=4, t=2$ ”

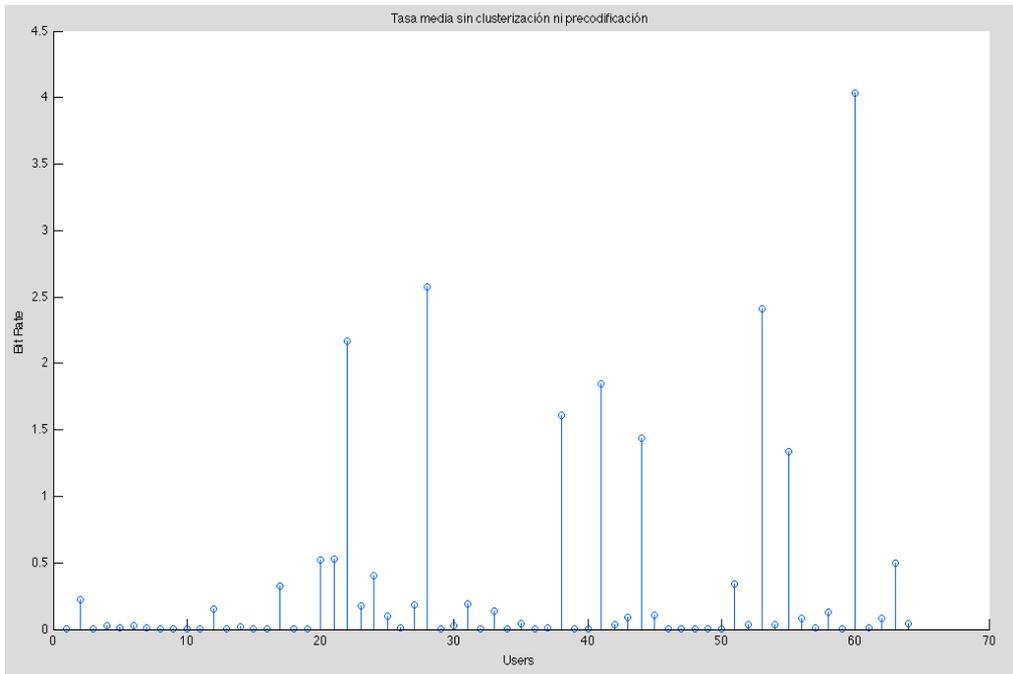


FIG. 4.30 “Tasa media del espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=4, t=2$ ”

Al igual que en el caso anterior en el caso de no clusterizar y no cancelar interferencias queda prácticamente igual para el caso de  $J=3$  y el de  $J=4$  figuras 4.30 y 4.31 con las figuras 4.12 y 4.11 .

Hay un aumento considerable en la tasa de transmisión de datos para el caso ideal (FIG. 4.26) al realizar la clusterización con agrupaciones de 4, alcanzando valores de tasa media entorno a los 15 bits y con una distribución uniforme del servicio cercana a los 8 bits.

En el objeto de nuestro estudio figuras 4.27 y figuras 4.28, escenario donde clusterizamos y tenemos en cuenta las interferencias de los cluster contiguos, empezamos a encontrar mejoras importantes, ya que con esta configuración abastecemos de servicio a casi todos los usuarios del sistema (FIG. 4.28) y podemos observar en la figura 4.27 que se ha aumentado considerablemente la tasa media hasta valores de 25 bits por símbolo, dando servicio de manera uniforme hasta aproximadamente los 5 bits, mientras que para el caso de  $J=3$  con las mismas antenas solo se llegaba a los 2 bits aproximadamente.

## ANTENAS EN LA BTS t=4:

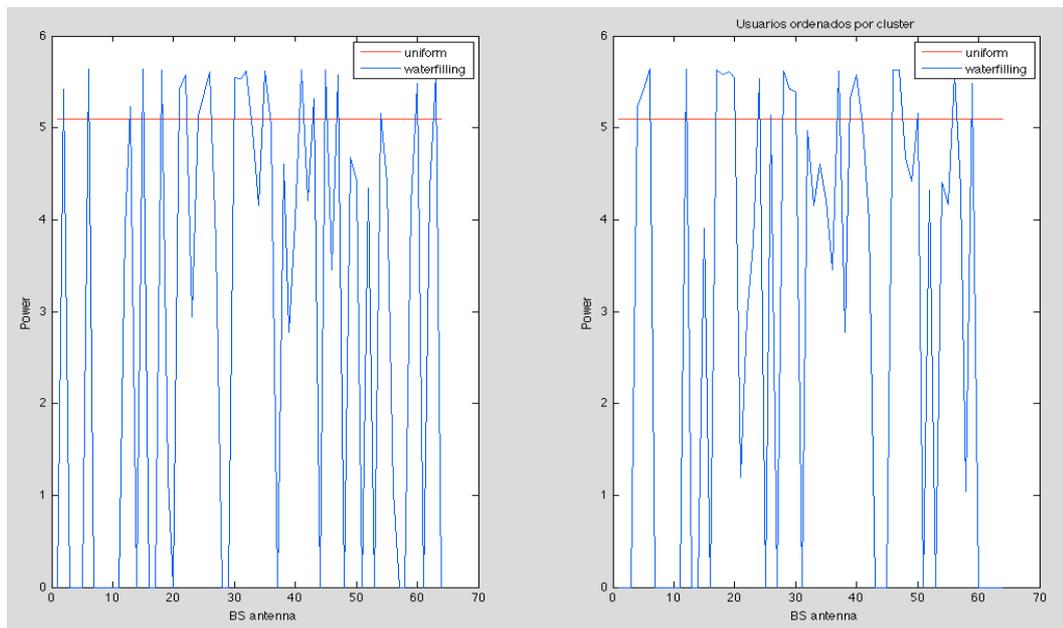


FIG. 4.31 "Asignación de potencias J=4, t=4"

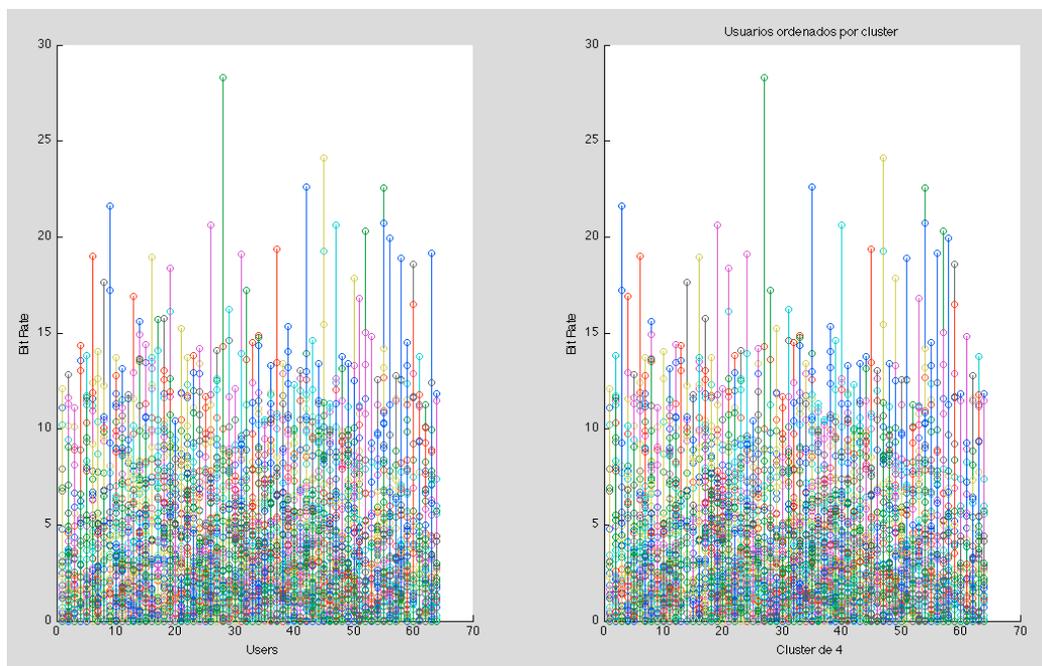


FIG. 4.32 "Espacio clusterizado ideal J=4, t=4"

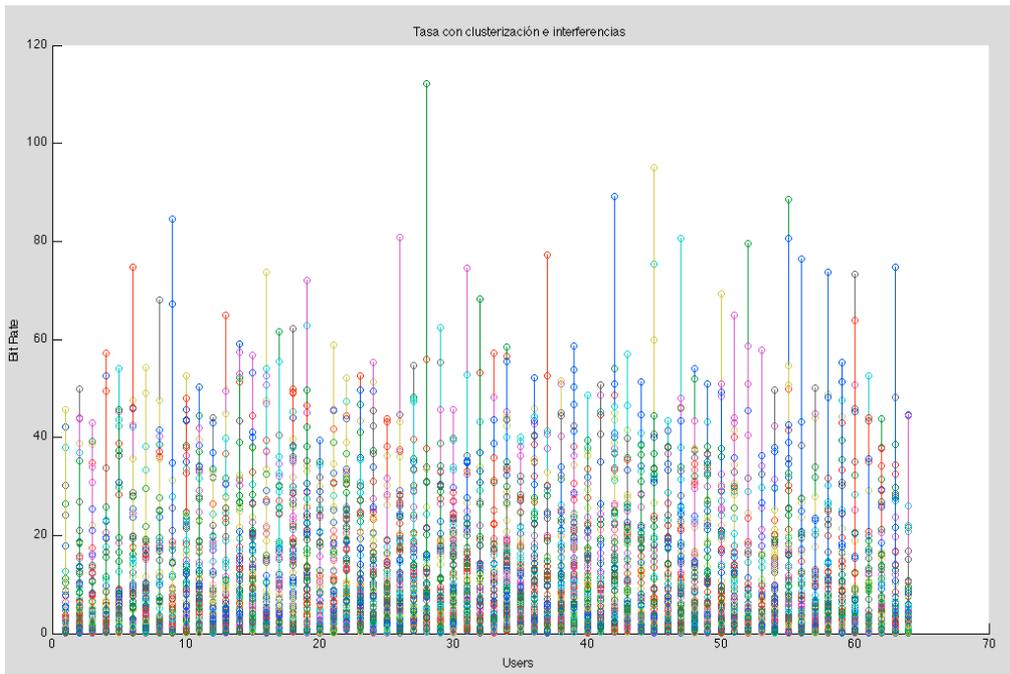


FIG. 4.33 "Tasa con clusterización e interferencias  $J=4, t=4$ "

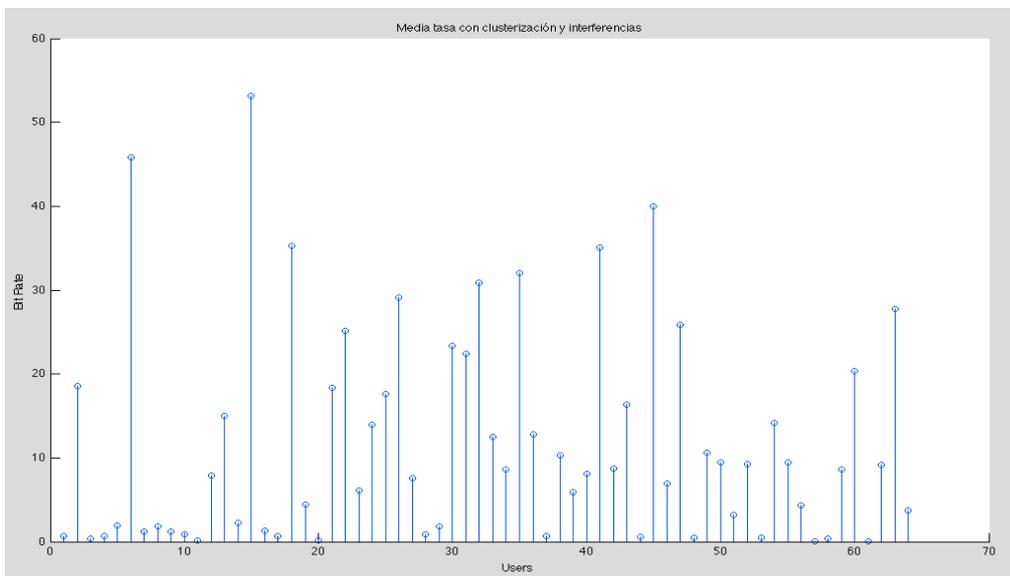


FIG. 4.34 "Tasa media para el escenario clusterizado y con interferencias  $J=4, t=4$ "

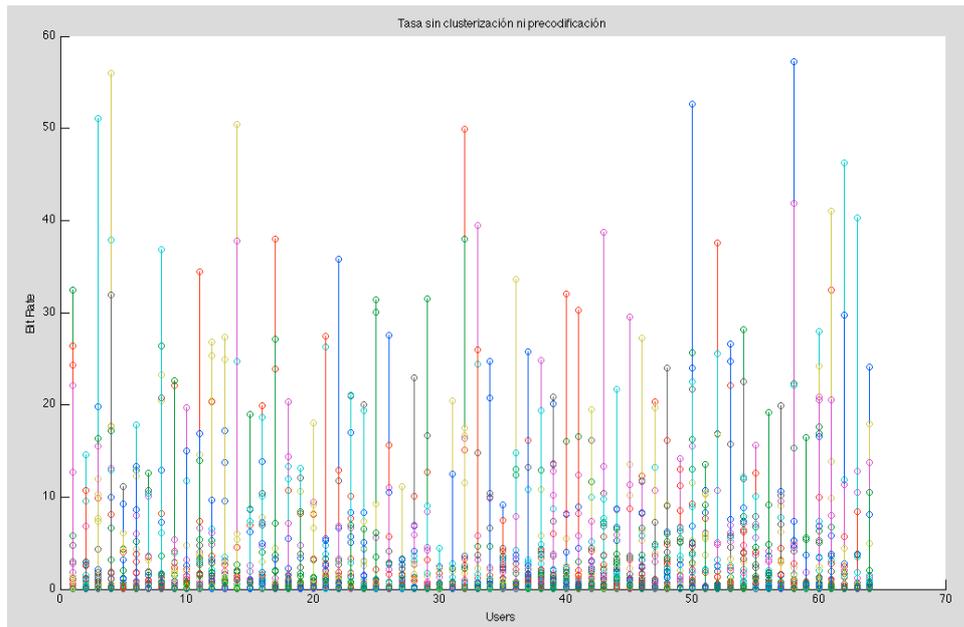


FIG. 4.35 "Espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=4, t=4$ "

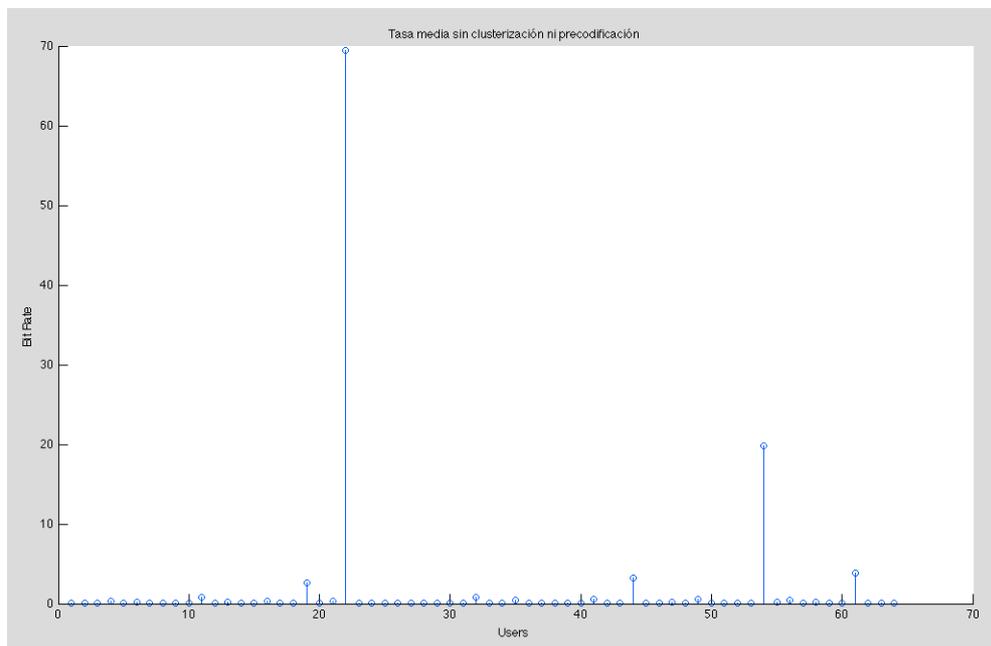


FIG. 4.36 "Tasa media del espacio sin clusterizar y sin anulación de interferencias  $J=4, t=4$ "

Este es la configuración que mayores mejoras aporta de todas las estudiadas, en el escenario ideal (FIG. 4.32) podemos observar el aumento de la tasa uniforme que se puede dar , llegando prácticamente a 10 bits por símbolo y tasas medias de 15 bits, las mayores conseguidas en todas las simulaciones.

Las mejoras también se repiten para el escenario concreto de este estudio, clusterización con interferencias de celdas contiguas, dando servicio a prácticamente todos los usuarios del sistema (FIG. 4.34) , proporcionando una tasa de servicio uniforme hasta prácticamente 18 bits y alcanzando valores máximos de 60,80 y 110 bits por símbolo (FIG. 4.33).

## ***CAPITULO 5 “Conclusiones y futuras líneas”***

### **5.1 Conclusiones**

A la vista de los resultados, podemos decir que a mayor tamaño de cluster y mayor número de antenas de transmisión, mayores serán las prestaciones del sistema. Viendo que las dos mejores configuraciones corresponden a la clusterización de  $J=4$  para la transmisión con 2 y 4 antenas, esta última la mejor. Después nos quedaríamos con las de la clusterización de  $J=3$  con 2 y 4 antenas siendo otra vez la de 4 la mejor para este tipo de agrupación.

Por lo que, los resultados de la simulación coinciden con los teóricos desarrollados en los capítulos anteriores, quedando demostradas las ventajas del canal MIMO frente a los canales SISO y también las ventajas de realizar agrupaciones de mayor tamaño a la hora del diseño de una red celular con clusterización

## 5.2 Líneas futuras

A la vista de los resultado de las situaciones, sería lógico llevar acabo estudios de clusterizaciones en sistemas celulares con agrupaciones de mayor tamaño, probando con cluster de  $J=7$  y  $J=9$  para empezar. Y también el aumento de las antenas en las BTS.

Así como algoritmos mas eficientes de asignación de potencias, en lugar de la asignación uniforme vista en este proyecto.

Otro posible estudio sería, en lugar de realizar la cancelación de las interferencias mediante ZF, se podría el de realizar con un criterio de MMSE.

## ***CAPITULO 6 “Presupuesto del proyecto”***

En este capítulo se detallaran las etapas, duraciones y costes de la realización de este proyecto, teniendo en cuenta en estos últimos los recursos humanos, hardware y software utilizados.

### **Planificación del proyecto:**

#### A. Estudio previo de la tecnología existente

- i. Estudio de los sistemas de comunicaciones celulares en la actualidad.
- ii. Estudio de la clusterización en un sistema celular.
- iii. Estudio de la tecnología MIMO.
- iv. Estudio de los esquemas Waterfilling con forzado a cero y coordinación entre estaciones bases.

#### B. Análisis teórico de las necesidades específicas del proyecto.

- i. Clusterización de un sistema coordinado.
- ii. Análisis de la clusterización para cluster de  $N=3$  y  $N=4$ .
  1. Análisis de la geometría específica de cada cluster.
  2. Análisis de la interferencia cocanal para cada geometría.

#### C. Implementación en la plataforma usada.

- i. Familiarización con el entorno de la plataforma diseñada en Matlab.
- ii. Implementación de la clusterización.

#### D. Simulaciones y análisis de los resultados.

E. Redacción de la memoria del proyecto.

### Duración del proyecto

Asumimos jornadas laborales de 8h/día.

Tarea A	Duración total = 56h
A.i	12h
A.ii	12h
A.iii	16h
A.iv	16h

Tarea B	Duración total = 280h
B.i	56h
B.ii	112h
B.ii.1	56h
B.ii.2	56h

Tarea C	Duración total = 296h
C.i	56h
C.ii	240h

Tarea D	Duración total = 240h
Tarea E	Duración total = 240h

Tarea A	Duración =56h
Tarea B	Duración = 280h
Tarea C	Duración = 296h
Tarea D	Duración = 240h
Tarea E	Duración =240h

Proyecto completo	Duración total = 1112h
-------------------	------------------------

## Presupuesto

Recursos Humanos	Sueldo neto (€/h)	Horas (h)	Coste (€)
<b>Desarrollador</b>	12	1112	13344
<b>Tutora</b>	24	112	2688
<b>Total sin IVA</b>	-	1224	16032
<b>Total (17% de IVA)</b>	-	1224	18757.44

Recursos Técnicos	Precio (€)	Amortización*(€)	Coste*(€)
<b>Software</b>	-	-	866.25
Programa	129	10.75	53.75
Licencia	1950	162.5	812.5
<b>Hardware</b>			
MacBook Pro	1118	93.20	465.80
<b>Total</b>	-	-	1332

\* Las amortizaciones se calculara en base a los 12 meses del trabajo.

\* Los costes son calculara multiplicando la amortización por la duración del proyecto (Estimado 5 meses)

	Coste (€)
<b>Recursos Humanos</b>	18757.44
<b>Recursos técnicos</b>	1332
<b>Total del proyecto</b>	20089.44

## ***Bibliografía***

- [1] C. Lluch Mesquida, J. M. Hernando Rábanos “Comunicaciones móviles de tercera generación” Telefonica Móviles España, S.A. Segunda Edición. Marzo 2001.
- [2] A. Goldsmith, E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Paulraj, H. Vincent Poor, “MIMO wirelees communications”. Cambrige 2007.
- [3] T.S. Rappaport, “Wireless Communications, Principles & Practice”, Prentice Hall Communications engineering and emerging technologies series, 1996.
- [4] A.Garcia Armada, M. Sanchez Fernandez, R. Corvaja “Waterfilling schemes for Zero-forzing Coordinated Base Station Transmition”, Conferencia global de Telecomunicaciones, 2009.
- [5] J. M. Hernando Rábanos “Comunicaciones moviles” Centro de Estudios Ramón Areces. Segunda edición, Marzo 2004.
- [6] G.J. Foschini, K. Karakayali, R.A. Valenzuela, “Coordinating multiple antenna cellular networks to achieve enormous spectral efficiency”, IEEE Proceedings Communications, Vol. 153, No. 4, pp. 548–555, Agosto 2006.
- [7] Q.H. Spencer, A. Lee Swindlehursts, M.Haardt “Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multiuser MIMO Channels” Signal Procesing, Febrero 2009.
- [8] O. I. Pérez Navarro “Coordinacion de multiples antenas en redes celulares para alcanzar una alta eficiencia espectral”, Proyecto fin de carrera, Escuela Politecnica Superior, Universidad Carlos III.

