

# **Control de interferencias en redes heterogéneas LTE-A con despliegues de femtoceldas**

**Trabajo Fin de Máster**

Autor: Miguel Eguizábal Alonso

Directora: Ángela Hernández Solana

Curso 2010-2011

Septiembre 2011

## **ANEXO A**

Máster y Doctorado en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza



Departamento de  
Ingeniería Electrónica  
y Comunicaciones  
**Universidad Zaragoza**



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad Zaragoza**



**Universidad  
Zaragoza**

## **ANEXO A: Revisión del estado del arte**

### **A.1 Problemática de las femtoceldas OFDMA**

Las femtoceldas son estaciones base de baja potencia, instaladas típicamente en casas o en oficinas. El radio de cobertura de las femtoceldas generalmente ronda las varias decenas de metros. Una de las principales características de las femtoceldas es que su enlace backhaul es un enlace de banda ancha cableado, como puede ser una fibra óptica o una línea ADSL.

Las femtoceldas pueden beneficiar tanto al usuario como al operador. El usuario disfrutará de una mejor calidad de señal debido a la proximidad con la femtocelda, lo que le permitirá disfrutar de altas tasas de datos. Desde el punto de vista del operador, como el enlace backhaul se realiza a través de una conexión de banda ancha como puede ser un ADSL, que el usuario se conecte a la femtocelda le supone un ahorro de recursos, los cuales puede asignar a otros usuarios, aumentando la capacidad de la macrocelda y mejorando la eficiencia espectral.

Las femtoceldas deben afrontar numerosas cuestiones antes de poder garantizar la interoperabilidad con las macroceldas existentes. A continuación se comentan varias de estas cuestiones, aunque nos centraremos en la gestión de recursos radio y en la gestión de la interferencia, ya que la interferencia entre femtoceldas vecinas y entre femtoceldas y macroceldas se considera uno de los principales retos de los despliegues femtocelulares.

En primer lugar hay que tener en cuenta el método de acceso, ya que las femtoceldas pueden configurarse de tres formas:

- Acceso abierto: Todos los usuarios pueden conectarse a la femtocelda.
- Acceso cerrado: Solo los abonados a la femtocelda pueden conectarse a ella.
- Acceso Híbrido: Los usuarios no abonados solo pueden utilizar una determinada cantidad de los recursos de la femtocelda.

Algunas investigaciones han mostrado que el acceso abierto mejora la capacidad global de la red, principalmente porque los usuarios de la macrocelda pueden conectarse a femtoceldas cercanas en zonas donde la cobertura de la macrocelda es deficiente. Desde el punto de vista de la interferencia, esto evita que las femtoceldas tengan usuarios interferentes en sus alrededores, ya que esos usuarios pueden conectarse a las femtoceldas. Como contrapartida, el acceso abierto aumenta el número de handoffs y señalización. Tampoco hay que olvidar que los abonados son los que pagan y mantienen las femtoceldas, por lo tanto, ellos no desearán que usuarios no abonados consuman parte de sus recursos, a menos que reciban algún tipo de beneficio o recompensa. Por lo tanto, este tipo de acceso es más interesante para lugares públicos, como aeropuertos, centros comerciales, etc. donde cualquier usuario puede beneficiarse de los servicios.

En cuanto a femtoceldas de acceso cerrado, parece que son más convenientes para despliegues en hogares. Sin embargo esto implica, que la potencia que atraviesa ventanas y puertas se convertirá en interferencia para los usuarios de las macroceldas que se encuentran

en la zona, empeorando la calidad de su señal. Para tratar de solucionar estos problemas hay que emplear algoritmos de gestión de recursos.

El acceso híbrido permite la conexión de usuarios no abonados restringiendo la cantidad de recursos OFDMA que son compartidos. De esta manera, se solucionan la mayor parte de los problemas de interferencia del acceso cerrado mientras controlamos el impacto sobre los propietarios de las femtoceldas.

Otro aspecto a tener en cuenta en las redes heterogéneas con femtoceldas es cómo vamos a gestionar la movilidad. En redes homogéneas con macroceldas el handoff celular se realiza cuando el usuario entra en la zona de cobertura de otra celda. Sin embargo en el caso de femtoceldas de acceso abierto o híbrido esto ocurre con más frecuencia, aumentando la señalización de la red. Se necesitan diferentes procedimientos de gestión de handoffs para permitir a los no abonados estar conectados durante periodos largos a femtoceldas cercanas evitando un aumento excesivo del número de handoffs.

Como las femtoceldas son instaladas por los usuarios, no es necesaria la existencia de un nodo central encargado de la gestión de sus recursos radio. Sin embargo es necesaria una sincronización temporal en la red entre macroceldas y femtoceldas tanto para minimizar la interferencia como para que los handovers se desarrollen correctamente. Como uno de los objetivos de las femtoceldas es que sean de bajo coste, la fabricación de este tipo de estaciones equipadas con osciladores de gran precisión no es una cuestión trivial, así que es necesario considerar otras aproximaciones para lograr una sincronización temporal fiable.

Como una posible solución se ha propuesto en la literatura la utilización de receptores GPS, que proporcionan la hora con precisión. Sin embargo, su funcionamiento depende de la disponibilidad de cobertura GPS dentro de la casa o la oficina del usuario. Otra posible solución es el uso del protocolo PTP (Precision Timing Protocol) definido en el IEEE-1588, como un método para conseguir la sincronización. Sin embargo, son necesarias algunas modificaciones para llevar a cabo la sincronización de una forma eficiente sobre un enlace backhaul asimétrico como el ADSL.

El hecho de que las femtoceldas sean instaladas por los usuarios también implica que las femtoceldas tengan que operar bajo los principios de “plug-and-play”, es decir que las femtoceldas puedan organizarse y configurarse de manera autónoma y accedan al medio radio de manera inteligente para causar el menor impacto posible sobre el resto de redes. También hay que prestar especial atención a la seguridad, ya que las femtoceldas pueden ser vulnerables a ataques maliciosos (ataque de hombre en el medio, etc.). Por lo tanto es necesario implementar mecanismos de autenticación y de cifrado para garantizar la seguridad en las redes femtocelulares.

Para identificar una macrocelda, normalmente se emplea el PCI (Physical Cell Identity). Por ejemplo, los procedimientos de handoff se simplifican proporcionando la lista de los PCIs que el terminal móvil tiene que monitorizar. Esta lista normalmente se conoce con el nombre de “lista de celdas vecinas” (neighboring cell list). No es necesario que el PCI de una celda sea único en toda la red, sin embargo debe ser único en una escala local, para evitar confusiones entre celdas vecinas. Este aspecto representa un reto en redes con femtoceldas, ya que deben

seleccionar su PCI dinámicamente después de encenderse o de cambiar de posición para evitar colisiones con otras femtoceldas o con las macroceldas. Además, para situaciones con un despliegue extensivo de femtoceldas el reuso de PCIs entre femtoceldas de un mismo área es inevitable, debido al limitado número de PCIs (en el caso de LTE, existen 504 PCIs), causando confusión entre PCIs duplicados.

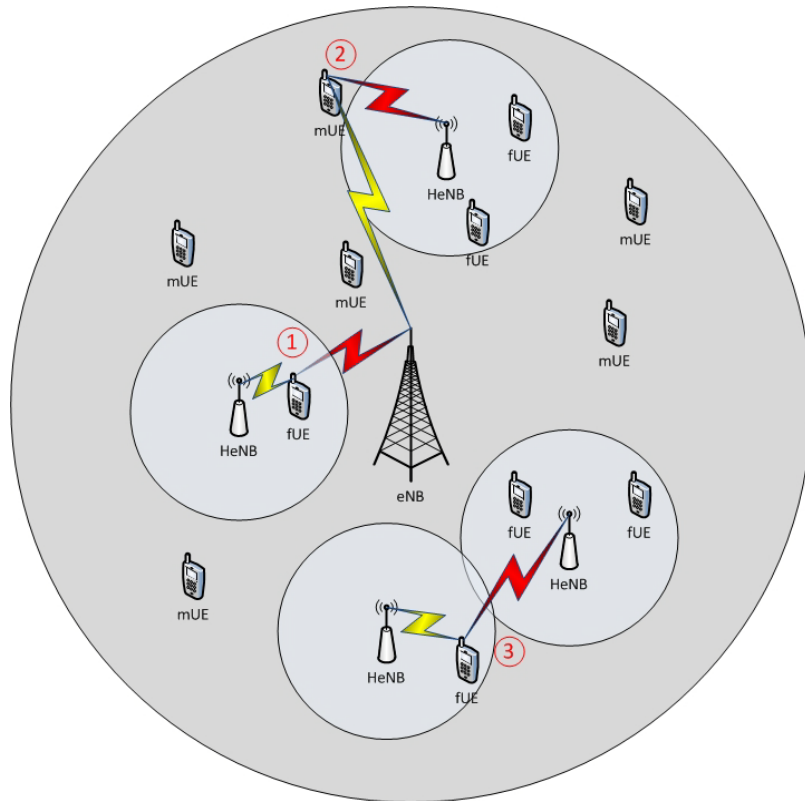
El hecho de que las femtoceldas puedan encenderse o apagarse, o puedan cambiar de lugar hace que sus celdas vecinas varíen continuamente. Por lo tanto las femtoceldas deben ser capaces de variar su lista de celdas vecinas de una forma dinámica. Debido a esto, la relación entre femtoceldas debe manejarse de forma diferente que la relación entre femtoceldas y macroceldas. Además se espera, que el número de femtoceldas vecinas dentro de una macrocelda crezca por encima de las 32, que son el número de celdas vecinas que se consideran en las macroceldas. Por lo tanto, se deben desarrollar nuevas técnicas para permitir a las macroceldas y a las femtoceldas soportar un largo número de celdas vecinas y manejarlas rápidamente.

El aspecto clave en el que nos vamos a centrar es el análisis de interferencia, para ser capaces de encontrar estrategias de gestión de recursos radio que nos permitan minimizar la interferencia de la red, maximizando de esta forma el número de usuarios que puede soportar la red celular.

Hay que tener en cuenta que una femtocelda no solo proporciona cobertura dentro de la casa, sino que también radia hacia el exterior, introduciendo interferencia. Debido a esto y a que las femtoceldas se despliegan dentro de la cobertura de macroceldas ya existentes, pueden causar una fuerte degradación de las prestaciones de las macroceldas. Además, el despliegue de nuevas femtoceldas puede alterar el correcto funcionamiento de las femtoceldas ya existentes. En este tipo de despliegues se suelen considerar dos capas separadas (la capa de las femtoceldas y la de las macroceldas) dentro de la red, permitiendo clasificar las interferencias de la siguiente forma:

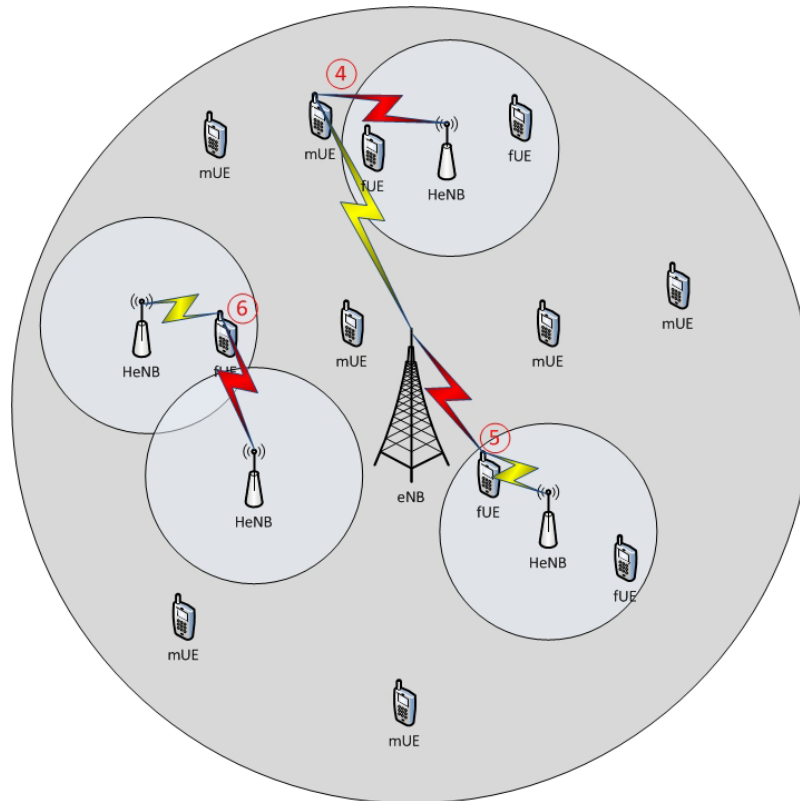
- Cross-layer: Se refiere a situaciones en las que el agresor (por ejemplo una femtocelda) y la víctima (por ejemplo un usuario de una macrocelda) de la interferencia pertenecen a diferentes capas de la red.
- Co-layer: En este caso el agresor (por ejemplo una femtocelda) y la víctima (por ejemplo un usuario de una femtocelda vecina) pertenecen a la misma capa de la red.

Otro aspecto a tener en cuenta es que debido a las características de los sistemas OFDMA, la interferencia solo ocurre cuando agresor y víctima utilizan los mismos subcanales de forma simultánea. Esto hace que sea necesaria una asignación eficiente de los recursos y un control de potencia adecuado para mitigar tanto la interferencia co-layer como la cross-layer. En las Figuras Figura A1 y Figura A2 podemos observar los casos más comunes de interferencia en este tipo de redes heterogéneas, para el enlace descendente (DL) y ascendente (UL).



**Figura A1.** Escenarios de interferencia para el DL

El primer escenario a tener en cuenta es el caso 1 de la Figura A1 en el que un usuario servido por una femtocelda se ve interferido por la macrocelda en la que está desplegada dicha femtocelda. Aunque los usuarios estén bastante cerca de la femtocelda, como las femtoceldas transmiten con poca potencia, pueden ser interferidos por la macrocelda si no están muy alejados de la estación base. Para el caso 2 de la Figura A1 un usuario servido por una macrocelda se ve interferido por una femtocelda cercana. En el caso de femtoceldas de acceso abierto o acceso híbrido esta situación puede evitarse, ya que el usuario podrá conectarse a esa femtocelda cercana y no será interferido. Sin embargo, para femtoceldas de acceso cerrado, si ese usuario no es un abonado será interferido por ella. Los dos escenarios anteriores hacen referencia a situaciones de interferencia cross-layer, mientras que el caso 3 de la Figura A1 se trata de interferencia co-layer donde un usuario de una femtocelda se ve interferido por una femtocelda cercana.



**Figura A2.** Escenarios de interferencia para el UL

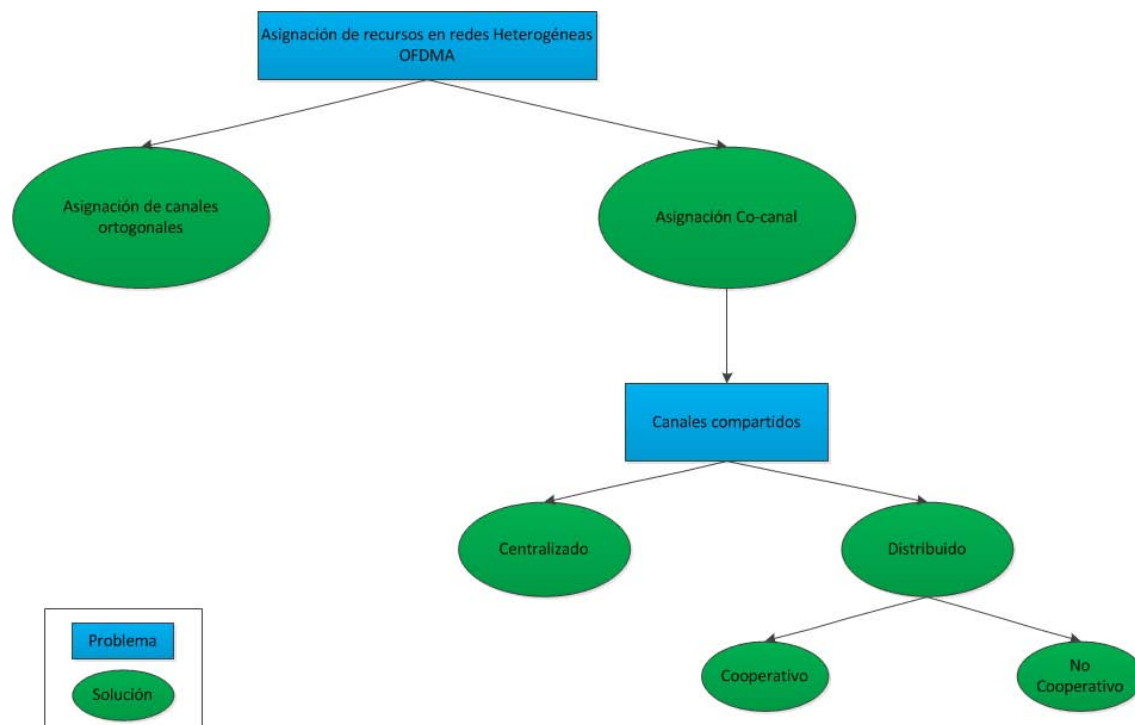
En el enlace ascendente, el primer escenario de interferencia que podemos considerar es el caso 4 mostrado en la Figura A2, donde un usuario servido por la macrocelda interfiere a una femtocelda cercana, ya que los usuarios servidos por la femtocelda transmitirán con poca potencia al encontrarse cerca de ella, mientras que un usuario de la macrocelda que este lejos de la estación base transmitirá con bastante potencia, interfiriendo a las femtoceldas cercanas. Si las femtoceldas son de acceso abierto o híbrido esta situación podría evitarse, dejando que ese usuario se conectase a la femtocelda a la que interfiere. En el caso 5 de la Figura A2 un usuario servido por una femtocelda interfiere a la macrocelda. Si la femtocelda está desplegada cerca de la macrocelda, sus usuarios pueden llegar a interferirla aunque transmitan con poca potencia. Estos dos escenarios mostraban situaciones de interferencia cross-layer, mientras que el caso 6 de la Figura A2 muestra una situación de interferencia co-layer, donde un usuario de una femtocelda interfiere sobre una femtocelda cercana.

Para evitar todas estas posibles situaciones de interferencia hay que realizar una gestión de recursos adecuada, para tratar de mitigar tanto la interferencia cross-layer como co-layer. Además, las técnicas convencionales de gestión de recursos radio para sistemas macrocelulares no son válidas para despliegues femtocelulares ya que la posición de las femtoceldas es desconocida, depende de donde la despliegue el usuario final. De aquí en adelante nos centraremos en estrategias de scheduling para el caso de femtoceldas de acceso abierto. En el punto A.4 se presenta una posible clasificación para estas técnicas de asignación de recursos y posteriormente se mostrarán diferentes planteamientos encontrados en la literatura. El punto A.5 se centra en algunas propuestas para la asignación de potencia de las femtoceldas.

Como se ha podido ver aún quedan muchas cuestiones abiertas que solucionar para que los despliegues de femtoceldas sean realizables y tengan un comportamiento adecuado, sin perturbar en exceso el funcionamiento de los sistemas celulares sobre los que se despliegan.

## A.2 Técnicas de asignación de recursos para femtoceldas OFDMA

En la Figura A3 aparece una posible clasificación de las distintas técnicas de gestión de recursos radio. Los rectángulos azules representan los problemas y las elipses verdes las posibles soluciones a esos problemas.



**Figura A3.** Clasificación de técnicas de asignación de recursos radio

Lo primero que debemos plantearnos es si las femtoceldas van a utilizar canales diferentes a los que emplean las macroceldas o si van a compartir el mismo ancho de banda. Si las femtoceldas emplean canales diferentes, no habrá ningún tipo de interferencia cross-layer, ya que los canales utilizados por las macroceldas y las femtoceldas son ortogonales. Sin embargo, aunque esta estrategia elimina por completo la interferencia cross-layer utiliza los recursos frecuenciales de una manera ineficiente.

Por lo tanto para realizar un uso más eficiente del espectro lo normal es que femtoceldas y macroceldas compartan el mismo ancho de banda. Así que como los canales son compartidos necesitamos realizar algún tipo de control, para asignar los canales de forma que mitigemos la interferencia. Una primera opción es que el scheduler sea centralizado, es decir que un nodo central (por ejemplo, la estación base) sea el encargado de distribuir los recursos entre la macrocelda y las femtoceldas desplegadas en ella. La otra opción es que el scheduler

sea distribuido, es decir, que sean las propias femtoceldas las encargadas de escoger en qué recursos o canales asignar a sus usuarios.

Dentro del scheduling distribuido podemos diferenciar entre cooperativo y no cooperativo. En el caso no cooperativo cada femtocelda planifica sus canales para maximizar el throughput y la QoS de sus usuarios. Mientras que por el contrario, en el caso cooperativo las femtoceldas recopilan información sobre las femtoceldas vecinas y tienen en cuenta dicha información a la hora de planificar los canales que emplea. De esta forma se trata de maximizar el throughput y la QoS de todos los usuarios de las femtoceldas vecinas.

En los puntos A.4.2, A.4.3 y A.4.4 se presentan diferentes planteamientos encontrados en la literatura agrupados según la clasificación mostrada anteriormente en la Figura A3. Nos vamos a centrar exclusivamente en asignaciones co-canal ya que ofrecen mayor eficiencia espectral y para el caso del enlace descendente (DL). En el punto A.4.1 se introduce la notación que se va a emplear en la descripción de los esquemas de gestión de recursos.

### A.2.1 Notación

En este punto se va a introducir la notación que se va a emplear en la descripción de los esquemas de coordinación de interferencias propuestos en la literatura. El escenario más común sobre el que se realizan las simulaciones de los esquemas propuestos está formado por  $M$  macroceldas y  $F$  femtoceldas en cada macrocelda. Se despliegan  $K_m$  usuarios en la macrocelda  $m$  y  $K_f$  usuarios en la femtocelda  $f$ , de tal forma que en una determinada macrocelda hay  $K$  usuarios teniendo en cuenta tanto los usuarios servidos por la macrocelda como los servidos por las femtoceldas desplegadas en la macrocelda. Se definen bloques de recursos radio (RB: Resource Block), que están compuestos por  $N_{sc}$  subportadoras durante  $N_s$  símbolos OFDM consecutivos, de tal forma que el sistema dispondrá de  $N$  RBs. Un RB es la unidad mínima de asignación, es decir, un usuario no puede recibir menos subportadoras que las que componen un RB.

En este tipo de despliegues podemos obtener la relación señal a ruido más interferencia para el usuario  $k$  de la macrocelda  $m$  en el RB  $n$  mediante la siguiente expresión:

$$SINR_k^{m,n} = \frac{P_{m,n} \times G_{m,n,k}}{N_0 W_{RB} + \sum_{\substack{m' \in M \\ m' \neq m}} P_{m',n} G_{m',n,k} + \sum_{f \in F} P_{f,n} G_{f,n,k}} \quad (A1)$$

donde  $P_{m,n}$  y  $P_{m',n}$  es la potencia transmitida por la macrocelda  $m$  que da servicio y por la macrocelda vecina  $m'$  en el RB  $n$  respectivamente.  $G_{m,n,k}$  es la ganancia de canal entre el usuario  $k$  y la macrocelda que le sirve  $m$ , en el RB  $n$ . La ganancia de canal de las macroceldas vecinas se denota  $G_{m',n,k}$ . La ganancia de canal incluye la ganancia de la antena, las pérdidas de propagación, los desvanecimientos lentos (shadowing) y los desvanecimientos rápidos (Rayleigh). De forma similar,  $P_{f,n}$  es la potencia de transmisión de la femtocelda vecina  $f$  en el RB  $n$ .  $G_{f,n,k}$  es la ganancia de canal entre el usuario  $m$  y las femtoceldas vecinas  $f$  en el RB  $n$ .  $N_0$  es la densidad espectral de potencia de un ruido blanco, y  $W_{RB}$  es el ancho de banda que ocupa un RB. De forma similar podemos expresar la SINR para el usuario  $k$  de la femtocelda  $f$  en el RB  $n$  mediante la expresión (A2).



$$SINR_k^{f,n} = \frac{P_{f,n} \times G_{f,n,k}}{N_0 W_{RB} + \sum_{m \in M} P_{m,n} G_{m,n,k} + \sum_{\substack{f' \in F \\ f' \neq f}} P_{f',n} G_{f',n,k}} \quad (A2)$$

## A.2.2 Asignación centralizada

En un sistema celular puede ocurrir una concentración temporal de tráfico en una determinada zona, produciéndose una degradación en las prestaciones de los usuarios. Si la red dispone de femtoceldas desplegadas dentro de la macrocelda, la estación base podría controlarlas y encenderlas o apagarlas según varíe la concentración de tráfico en las diferentes zonas de la celda. En [3] proponen un esquema para gestionar estas situaciones en el enlace descendente, que es el que se explica a continuación.

Adaptar la modulación en función de la calidad del enlace es un método usado frecuentemente para maximizar el throughput del sistema. Sin embargo, los usuarios situados en los bordes de las celdas requieren más recursos (mayor número de subportadoras) debido a su baja ganancia de canal. Por ello, cuando los usuarios se concentran más en los bordes, la eficiencia del sistema decae. Por lo tanto, si disponemos de femtoceldas situadas en los exteriores de las macroceldas, esos usuarios de los bordes pueden conectarse a dichas femtoceldas, experimentando unas condiciones de canal mucho mejores y por lo tanto utilizando menos recursos para mantener la misma tasa de datos.

Proponen que la macrocelda estime continuamente la utilización de recursos y la probabilidad de outage teniendo en cuenta la localización de los usuarios y las características de los tráficos y entonces decida si debe poner en marcha alguna de las femtoceldas porque se ha formado una concentración de tráfico. Por otra parte, cuando una concentración de tráfico cerca de una femtocelda activa se reduce o la interferencia generada a las macroceldas vecinas es excesiva, la macrocelda decide apagar la femtocelda.

Como hemos comentado, las concentraciones de tráfico en determinadas zonas, especialmente en los bordes de la celda, consumen una gran cantidad de recursos radio, provocando la reducción del throughput del sistema. Para tratar de solucionar estas situaciones la macrocelda estima el número de RBs que se requieren de la siguiente forma:

$$N_{req} = \sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^C \left\lceil \frac{R_k^c}{\bar{b}_k \times W_{RB}} \right\rceil \quad (A3)$$

donde  $C$  es el número de clases de QoS que hay y  $R_k^c$  es la tasa de datos requerida por el usuario  $k$  con la clase de QoS  $C$ ,  $\bar{b}_k$  es la eficiencia media de modulación en bps/Hz del usuario  $k$ . La eficiencia de modulación se va calculando de forma adaptativa, en función de la localización del usuario. Es decir, si el usuario se encuentra en los bordes de la celda tendrá que emplear modulaciones menos eficientes que si se encuentra en el interior, por lo tanto en función de su localización y de las modulaciones que puede emplear se puede realizar una estimación de los bits por segundo que puede transmitir en cada RB.

Si la celda esta temporalmente sobrecargada, el número de usuarios que no reciben suficientes recursos para garantizar su QoS puede incrementar. Vamos a definir una probabilidad de outage,  $p_{outage}$ , que representa la probabilidad de que un usuario no logre la tasa de datos requerida:

$$p_{outage} = E \left[ \frac{1}{K} \times \sum_{k=1}^K \delta_k \right] \quad (A4)$$

donde:

$$\delta_k = \begin{cases} 1 & \text{si } r_k < R_k^c, \\ 0 & \text{en otro caso,} \end{cases}$$

y  $r_k$  es la tasa de datos ofrecida al usuario  $k$ .

Para mantener el funcionamiento del sistema a pesar de estas variaciones del tráfico, es importante estimar las situaciones de sobrecarga con antelación y controlar las femtoceldas de una forma inteligente. La propuesta se basa en estimar una diferencia entre el número de RBs requerido ( $N_{req}$ ) y el número disponible ( $N$ ), y que representa el número de RBs que faltan. Dividiendo la estimación por el número medio de RBs pedidos por usuario, podemos estimar el número de posibles usuarios outage. Por lo tanto, para llevar a cabo los procedimientos de ON/OFF de las femtoceldas podemos definir una estimación de sobrecarga del sistema de la siguiente manera:

$$D(N_{req}) = \left[ \frac{1}{Kv} \times \left( \frac{N_{req} \lambda N}{avg} \right) \right]^+ \quad (A5)$$

donde  $[x]^+$  se define como  $\max\{x, 0\}$ , y  $v_{avg}$  representa el número medio de RBs requeridos por usuario. El parámetro  $\lambda$  es un parámetro de sensibilidad dentro del rango  $[0, 1]$  para controlar la frecuencia de los procedimientos ON/OFF de las femtoceldas. Con un valor de  $\lambda=1$ , las femtoceldas solo se activarían en caso de que la demanda del sistema sea superior a la capacidad del mismo. Con valores pequeños de  $\lambda$ ,  $D(N_{req})$  es positivo con pequeñas concentraciones de tráfico, así que los procedimientos ON/OFF de las femtoceldas tienden a ser realizados con mayor frecuencia para mantener el correcto funcionamiento del sistema.

El esquema propuesto trabaja con dos umbrales, el umbral superior,  $\rho_{ON}$ , y el umbral inferior,  $\rho_{OFF}$ , los cuales deben ser optimizados por el diseñador en cada sistema. Sin embargo, en situaciones reales estos dos parámetros pueden ser determinados en función de la calidad de servicio objetivo, ya que la respuesta del sistema depende de esos valores. El esquema está compuesto por dos procedimientos: procedimiento ON y procedimiento OFF. Si  $D(N_{req})$  aumenta hasta ser superior a  $\rho_{ON}$ , la macrocelda inicia el procedimiento de ON. Por otra parte, si  $D(N_{req})$  se reduce hasta ser más pequeño que  $\rho_{OFF}$ , la macrocelda inicia el procedimiento de OFF. Diseñando un salto apropiado entre  $\rho_{ON}$  y  $\rho_{OFF}$  los efectos ping-pong entre los procedimientos ON y OFF pueden evitarse. A continuación se explican ambos procedimientos.

## Procedimiento ON

En el caso de que se produzca una concentración de tráfico en zonas del borde de la celda, la macrocelda necesitará asignar muchos RBs para soportar la misma QoS. Esto provocará un incremento de la probabilidad de outage. Si una femtocelda situada en el borde se enciende, los usuarios cercanos experimentarían altas ganancias de canal, con lo que podrán utilizar modulaciones superiores, necesitando menos RBs para obtener la misma QoS. Los RBs que se ahorran encendiendo la femtocelda, pueden ser asignados a usuarios outage, reduciendo la probabilidad de outage.

Para el procedimiento ON, la macrocelda estima continuamente la sobrecarga del sistema,  $D(N_{req})$ . Si la estimación es superior al umbral superior, la macrocelda inicia el procedimiento ON. Este procedimiento consta de dos fases: Elección de las femtoceldas y Distribución de recursos entre macrocelda y femtoceldas.

### A. Elección de las femtoceldas

En este paso, la macrocelda determina el conjunto de femtoceldas que podrían ser encendidas para maximizar la capacidad del sistema. Para escoger el conjunto adecuado, se define una ganancia para cada femtocelda,  $G_f$ , que indica el número de RBs que pueden ser ahorrados a la macrocelda, activando la femtocelda  $f$ :

$$G_f = K_f \left( v_{f,max} - v_{f,min} \right) \quad (A6)$$

donde  $v_{f,max}$  y  $v_{f,min}$  son el número medio de RBs necesarios por usuario cuando la femtocelda  $f$  está desactivada y cuando está activada respectivamente.

La macrocelda escoge el conjunto de femtoceldas en orden descendiente de ganancia  $G_f$  hasta que  $\rho_{ON}$  está garantizado. A continuación vamos a explicar en detalle el algoritmo que sigue la macrocelda para escoger el conjunto de femtoceldas a encender. En el algoritmo,  $d_f$  y  $d_{k,f}$  son el radio de la femtocelda  $f$  y la distancia de la femtocelda  $f$  al usuario  $k$  respectivamente,  $F_{s,f}$  representa el estado actual de la femtocelda  $f$ ,  $F_{t,f}$  es el estado futuro sugerido para la femtocelda  $f$ .

Mientras  $D(N_{req}) > \rho_{ON}$  y queden aún femtoceldas para encender, la macrocelda ejecuta un bucle en el cual calcula para cada femtocelda el número de usuarios que están dentro de su cobertura ( $d_{k,f} < d_f$ ) y cuando tiene el número de usuarios obtiene la ganancia  $G_f$  mediante la expresión (A6). Una vez calculada la ganancia para todas las femtoceldas apagadas, enciende la que tenga mayor ganancia. Después actualiza el valor de  $N_{req}$  y obtiene el nuevo  $D(N_{req})$ . De esta forma la macrocelda escoge el conjunto de femtoceldas que va a encender.

### B. Distribución de recursos entre macrocelda y femtoceldas

La macrocelda informa a las femtoceldas escogidas de la información de los usuarios que van a controlar y de los índices de RBs que van a poder asignar. Con esta información, las femtoceldas pueden realizar las asignaciones de recursos a sus usuarios. En el artículo proponen dos métodos para la distribución de recursos, uno centralizado y otro semi-centralizado. El método de asignación óptimo es el centralizado, en el cual la macrocelda

recoge la información del estado del canal y los requisitos de QoS para todos los usuarios, incluyendo los de las femtoceldas. Entonces la macrocelda realiza la asignación óptima de RBs e informa a las femtoceldas de la asignación que ha decidido para sus usuarios. De esta forma, todo el ancho de banda puede ser utilizado para ambos tipos de usuarios, obteniendo la SINR en teoría óptima para cada usuario. Como contrapartida tenemos un aumento de señalización, ya que en primer lugar tenemos que enviar los informes del estado de canal de todos los usuarios a la macrocelda y en segundo lugar, la macrocelda debe enviar las asignaciones concretas a todas las femtoceldas encendidas. Además, la existencia de una latencia no despreciable entre la medida del estado del canal, y la aplicación efectiva de la asignación de recursos en base a dicha estimación, pone en peligro la eficiencia del esquema en determinados escenarios, debido a la pérdida de vigencia de la estimación

El otro método se basa en que la macrocelda asigne un conjunto fijo de RBs contiguos a cada femtocelda, y luego ella es la encargada de realizar la asignación de sus usuarios. Con este método, la diversidad espectral es más limitada, pero nos ahorramos la señalización derivada del método centralizado.

### Procedimiento OFF

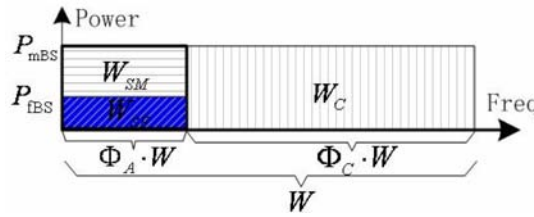
Ya que la distribución de usuarios y de requerimientos de QoS varía con el tiempo, bajo ciertas condiciones podemos querer desactivar algunas femtoceldas que están activadas. Consideramos tres posibles casos: 1) Cuando la ganancia  $G_f$  es cero, lo cual implica que no hay ningún usuario en la femtocelda o que  $v_{f,max}$  es igual a  $v_{f,min}$ , 2) Cuando la concentración de tráfico ya no se produce en zonas del borde de la celda,  $D(N_{req})$  puede ser inferior al umbral  $\rho_{OFF}$ , 3) Cuando la femtocelda causa una interferencia excesiva sobre las celdas vecinas.

Cuando se activa una femtocelda en el borde de una macrocelda, esta causa una interferencia adicional. Si nos fijamos en la SINR en el RB  $n$  para el usuario  $k$  de una macrocelda vecina, mostrada en la ecuación (A1), si la interferencia generada por las femtoceldas vecinas aumenta demasiado, el comportamiento del sistema se degrada debido a una SINR demasiado baja. Con la finalidad de disminuir este problema, añadimos al procedimiento de OFF un umbral,  $T_{CCI}$ , de tal forma que si la interferencia co-canal (CCI) es superior al umbral iniciamos el procedimiento de desactivar una femtocelda.

Para describir el algoritmo denotamos la interferencia co-canal procedente de la femtocelda  $f$ , como  $T_f$ . En primer lugar, para cada femtocelda encendida, si su ganancia  $G_f$  es cero, la apagamos y si su interferencia co-canal supera el umbral ( $T_f > T_{CCI}$ ) también la apagamos. Una vez realizada esta revisión ejecutamos el siguiente bucle mientras estemos por debajo del umbral inferior ( $D(N_{req}) < \rho_{OFF}$ ) y mientras queden femtoceldas encendidas: calculamos la ganancia  $G_f$  para todas las femtoceldas y apagamos la femtocelda de menor ganancia. Después actualiza el valor de  $N_{req}$  y obtiene el nuevo  $D(N_{req})$ .

En resumen, la macrocelda está continuamente estimando  $D(N_{req})$  y lo compara con los umbrales de tal forma que si  $D(N_{req}) > \rho_{ON}$  comienza el procedimiento de ON y si  $D(N_{req}) < \rho_{OFF}$  o  $G_f = 0$  o  $T_f > T_{CCI}$  comienza el procedimiento de OFF. De esta forma se gestiona de forma adaptativa la variación de la distribución de tráfico y de los requerimientos de QoS.

Continuando con esquemas de asignación centralizada, en [13] proponen un algoritmo para formar clústeres de femtoceldas, de tal forma que las femtoceldas que pertenecen a un mismo clúster utilizarán los mismos recursos frecuenciales, mientras que las femtoceldas pertenecientes a diferentes clústeres emplearán recursos frecuenciales distintos. Lo que proponen en este trabajo es dividir todo el ancho de banda del sistema en dos subbandas tal y como aparece en la Figura A4.  $W_{SM}$  y  $W_{SF}$  es la subbanda compartida por macrocelda y femtocelda, con diferentes potencias ( $P_{mBS}$  y  $P_{fBS}$  respectivamente). Mientras que  $W_C$  es la subbanda dedicada a la macrocelda. El ratio de ancho de banda compartido por macrocelda y femtoceldas es  $\phi_A$ , mientras que el ratio de ancho de banda dedicado a las macroceldas es  $\phi_C$ . El ratio de frecuencias compartidas,  $\phi_A$ , se determina en función del número de clústeres de femtoceldas.



**Figura A4.** División frecuencial del ancho de banda del sistema

Consideran la existencia de un nodo central en cada macrocelda, al que llaman FSC (Femtocell System Controller) que puede ser un nodo propio, o un proceso dentro de un nodo central, como por ejemplo la estación base de la macrocelda. Asumen que el FSC puede obtener toda la información necesaria sobre la configuración de las femtoceldas a través del backhaul, como por ejemplo la posición de las femtoceldas. Entonces plantean la construcción de los clústeres a partir de un grafo de interferencia. El algoritmo concreto se explica a continuación.

Lo primero de todo es estimar la distancia umbral entre todas las femtoceldas,  $d_{th}$ . Si la distancia entre dos femtoceldas,  $f$  y  $f'$  es inferior a la distancia umbral habrá que asignarlas a diferentes clústeres para evitar interferencias. La distancia umbral la estima el FSC igualando la SINR que se espera obtener en la femtocelda  $f$ , teniendo en cuenta solo la interferencia introducida por la macrocelda y por la femtocelda  $f'$  con una SINR umbral que queremos garantizar en el borde de las femtoceldas. Por lo tanto, si simplificamos la expresión de la SINR vista en la ecuación A2 y la igualamos a la SINR umbral que denotamos como  $\gamma_{th}$ , podemos despejar  $d_{th}$  de la ecuación (A7).

$$SINR = \frac{P_f \times G_f}{N_0 W_{RB} + P_m G_m + P_{f'} G_{f'} (R_{ff'}^{th})} = \gamma_{th} \quad (A7)$$

Una vez estimadas todas las distancias umbrales podemos formar la matriz  $R_{th} = [R_{th,ij}]_{N \times N}$ . Consideran que  $R_{th,ij} = R_{th,ji}$  y por lo tanto la matriz  $R_{th}$  es simétrica. La siguiente fase del algoritmo propuesto consiste en obtener el grafo de interferencia con su correspondiente matriz adyacente. Para ello hay que seguir los siguientes pasos:

1. Calcular la matriz  $Q$  como  $Q=D^{-\alpha}$ , donde  $D=[d_{f,f'}]_{N \times N}$  es la matriz de distancias entre las femtoceldas.
2. En la matriz  $Q$ , si  $d_{f,f'} < \theta$  los vértices están conectados. De otra forma, los vértices están desconectados. Mediante esta regla obtenemos el grafo de interferencia, que denotamos como  $G$ .
3. Construimos la matriz adyacente  $A(G)$ , de tal forma que si dos vértices,  $f$  y  $f'$ , están conectados ponemos un 1 y si dos vértices,  $f$  y  $f'$ , no están conectados ponemos un 0.

En la matriz adyacente  $A(G)$  tenemos marcado con un 1, aquellas femtoceldas cuya distancia es menor que la umbral, por lo tanto están demasiado cerca y las tendremos que asignar a clústeres diferentes. Por el contrario tenemos marcado con un 0, aquellas femtoceldas cuya distancia es superior a la distancia umbral y que por lo tanto pueden asignarse al mismo clúster. Se denomina grado de un vértice al número de conexiones de un vértice, es decir, al número de unos de un vértice (número de unos de la fila o columna correspondiente al vértice en la matriz  $A(G)$ ). Por lo tanto si el grado de un vértice es cero, quiere decir que esa femtocelda está aislada y por lo tanto podrá asignarse a cualquier clúster. El algoritmo para formar los clústeres está formado por los siguientes pasos:

1. Inicializar  $l=1$  que indica el índice del clúster. Hay que tener en cuenta que cuando se dice en los siguientes pasos remover un vértice, se refiere a poner un cero en los elementos de la fila y la columna correspondientes al vértice.
2. Remover todos los vértices que tengan grado cero y añadirlos al conjunto de vértices aislados  $S$  en orden arbitrario. Formular la nueva matriz adyacente  $A_l(G)$  con los vértices restantes.
3. Remover el vértice de mayor grado hasta que  $A_l(G)$  sea una matriz de todo ceros. Los vértices removidos se van almacenando en el conjunto  $B$ . Los vértices que han quedado en  $A_l(G)$  forman el clúster  $R_l$ . Actualizamos  $l=l+1$ .
4. Utilizamos el conjunto  $B$  para reconstruir la matriz adyacente  $A_l(G)$ . Si la nueva matriz es de todo ceros, los vértices que la componen forman el clúster  $R_L$ , donde  $L=l$ . Si no es una matriz de todo ceros se vuelve al paso 3.
5. Los vértices aislados, almacenados en el conjunto  $S$  se asignan a los clústeres que satisfagan la siguiente condición:  $\arg \max_{l \in [1, L]} (\min_{f' \in R_l} d_{f,f'})$ .

De esta forma obtenemos los clústeres. Solo faltaría determinar cuál es la porción de ancho de banda que compartirán femtoceldas y macroceldas,  $\phi_A$ , y repartir esa porción de ancho de banda entre los diferentes clústeres. Cuanta mayor parte del ancho de banda permitamos que sea compartida, mayor número de femtoceldas podrán ser desplegadas pero también aumentará la probabilidad de que un usuario de la macrocelda se vea degradado por la interferencia de femtoceldas cercanas.

### A.2.3 Asignación distribuida Cooperativa

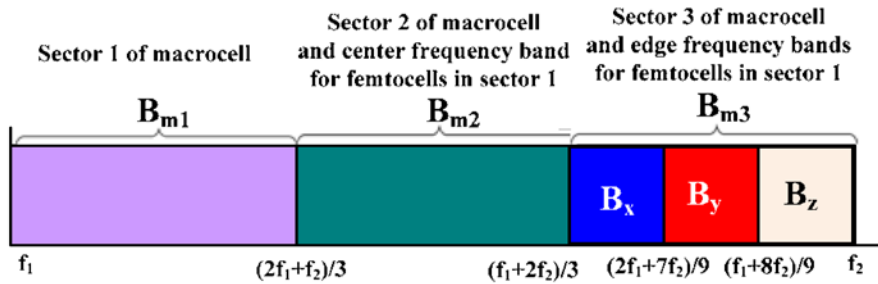
En [4] proponen Dynamic Frequency Reuse (DFR) como esquema para mitigar la interferencia entre femtoceldas y macroceldas en una red heterogénea. En este esquema, la asignación de frecuencias para las femtoceldas desplegadas dentro de un sector de la macrocelda y ese propio sector utilizan subbandas frecuenciales separadas para mitigar la

interferencia entre femtoceldas y macroceldas. La frecuencia y la potencia de transmisión entre femtoceldas vecinas se ajustan automáticamente para mitigar interferencias entre femtoceldas.

Estamos hablando de “Self Organizing Networks” (SON) basadas en femtoceldas que llevan a cabo auto-configuración, auto-optimización y auto-reparación. Es decir, las femtoceldas son capaces de escoger de forma automática la configuración de frecuencia y realizar automáticamente la optimización de la potencia de transmisión para mitigar la interferencia entre femtoceldas vecinas. El esquema DFR es utilizado en despliegues de femtoceldas de media y alta densidad para incrementar la eficiencia espectral y mitigar la interferencia.

En un sistema de comunicaciones celular, la frecuencia es un recurso muy caro. Vamos a denotar el ancho de banda total del sistema como  $B_T$ , el ancho de banda utilizado por macroceldas como  $B_m$  y el ancho de banda utilizado por femtoceldas como  $B_f$ . En el esquema DFR propuesto, el ancho de banda total del sistema se divide en tres bandas frecuenciales:  $B_{m1}$ ,  $B_{m2}$  y  $B_{m3}$ . Consideramos una macrocelda con tres sectores, de tal forma, que cada sector utiliza una de esas partes del ancho de banda y las femtoceldas desplegadas en un sector pueden utilizar las dos bandas que no se utilizan en ese sector.

El ancho de banda de las femtoceldas puede contener dos bandas separadas. Una de esas bandas se utiliza para la zona central de la femtocelda y la otra para la zona exterior de las femtoceldas. Todas las femtoceldas utilizan la misma banda frecuencial para la zona central. Para la zona exterior, las femtoceldas vecinas utilizan subbandas frecuenciales diferentes para mitigar la interferencia. Esto se consigue dividiendo la banda frecuencial utilizada para la zona exterior en tres subbandas, de tal forma que las femtoceldas vecinas escojan subbandas diferentes. Esta división del ancho de banda puede observarse en la Figura A5.



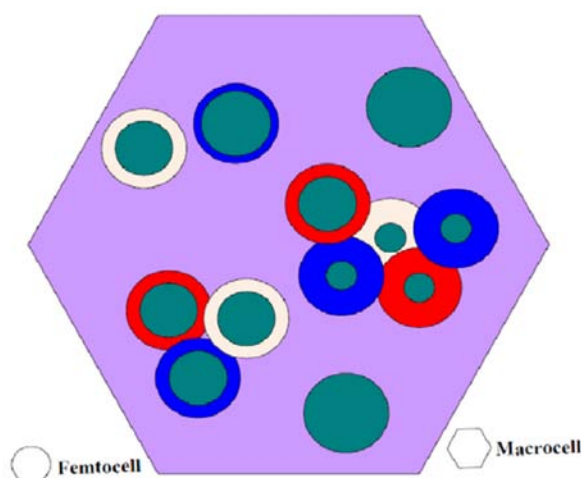
**Figura A5.** División del ancho de banda del sistema

$$\left. \begin{aligned} B_T &= f_2 - f_1 \\ B_{m1} &= B_{m2} = B_{m3} = \frac{B_T}{3} \\ B_{f1} &= B_{m2} + a \times B_x + b \times B_y + c \times B_z \end{aligned} \right\} \quad (A8)$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son valores binarios (0 o 1) y el valor de  $(a+b+c)$  es también un valor binario. Los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$  dependen de las subbandas frecuenciales utilizadas en las zonas exteriores

de las femtoceldas vecinas.  $B_{m1}$ ,  $B_{m2}$  y  $B_{m3}$  se refiere a las bandas frecuenciales utilizadas en el sector 1, sector 2 y sector 3 de la macrocelda respectivamente.  $B_{f1}$  hace referencia a la banda frecuencial que puede utilizar cada femtocelda desplegada en el sector 1 de la macrocelda.

En función del número de femtoceldas vecinas y de su distancia, las femtoceldas pueden ajustar dinámicamente la potencia de transmisión en la banda frecuencial de la zona interior, aumentando o disminuyendo el radio de dicha zona. De esta forma podemos conseguir mitigar la interferencia en esa banda frecuencial. En la banda dedicada a la zona exterior de la femtocelda no proponen que se ajuste la potencia dinámicamente, ya que mediante la distribución frecuencial vista anteriormente ya ajustamos dinámicamente la frecuencia para mitigar la interferencia. Este ajuste dinámico de la potencia y de la frecuencia puede verse representado en la Figura A6.



**Figura A6.** Distribución del ancho de banda en el sector 1 de la macrocelda

La configuración automática de las frecuencias exteriores y de la potencia de transmisión se basa en femtoceldas capaces de configurarse y optimizarse de forma autónoma, es decir, el concepto de SON comentado anteriormente. Las principales funcionalidades de redes femtocelulares/macrocelulares SON son: auto-configuración, auto-optimización y auto-reparación. La auto-configuración incluye asignación inteligente de frecuencia entre femtoceldas vecinas; La auto-optimización incluye la optimización de la potencia de transmisión entre femtoceldas vecinas, lista con las celdas vecinas, cobertura; Y la auto-reparación incluye detección y solución automática de la mayor parte de los fallos.

La funcionalidad de “escuchar” el entorno es necesaria para poder desplegar una femtocelda en este tipo de redes heterogéneas, para que la femtocelda pueda escanear la interfaz aire en busca de frecuencias disponibles. La red femtocelular/macrocelular debe tener capacidades SON para que las femtoceldas vecinas puedan comunicarse entre ellas para configurar los recursos, la potencia de transmisión y la frecuencia.

Se pueden dar diferentes escenarios de cooperación entre femtoceldas. Lo más común sería pensar en un despliegue de numerosas femtoceldas, entre las cuales se intercambian información relativa a qué banda frecuencial utilizan y con qué potencia transmiten, para que las femtoceldas puedan configurarse y mitigar las interferencias entre femtoceldas. Por



ejemplo, otra situación que podría darse es que una femtocelda sea la maestra, de tal forma que si esta femtocelda detecta que uno de sus usuarios sufre mucha interferencia, manda un orden al resto de femtoceldas vecinas para que configuren sus potencias de transmisión y sus frecuencias para disminuir la interferencia.

En [14] proponen un esquema de coordinación de interferencias cognitivo y distribuido. Se basa en que las femtoceldas escogen inteligentemente los recursos frecuenciales a utilizar empleando información sobre las pérdidas de propagación medidas por las femtoceldas vecinas. Concretamente todos los usuarios servidos por las femtoceldas toman medidas RSRP del enlace con la femtocelda que le da servicio y de los enlaces con las femtoceldas vecinas. Estos informes se realizan periódicamente y son enviados a la femtocelda que les da servicio. Posteriormente las femtoceldas distribuyen por broadcast los informes de todos sus usuarios de tal forma que cada femtocelda tiene información acerca de las pérdidas de propagación con sus usuarios y con los usuarios de las femtoceldas vecinas.

Lo que proponen es dividir el ancho de banda del sistema en diferentes subbandas, de tal forma que con la información que dispone cada femtocelda pueda seleccionar inteligentemente sobre qué subbandas va a asignar a sus usuarios. Cada femtocelda dispone de la siguiente información:

- ❖ Pérdidas de propagación del enlace con sus usuarios, con lo que puede estimar la potencia útil que recibirán sus usuarios.
- ❖ Pérdidas de propagación del enlace entre sus usuarios y las femtoceldas vecinas, con lo que puede estimar la interferencia que sufrirá cada uno de sus usuarios.
- ❖ Pérdidas de propagación del enlace con los usuarios de las femtoceldas vecinas, con lo que puede estimar la interferencia que introducirá sobre esos usuarios.
- ❖ Pérdidas de propagación del enlace entre los usuarios de las femtoceldas vecinas y sus femtoceldas vecinas interferentes, con lo que puede estimar toda la interferencia que sufrirán los usuarios de las femtoceldas vecinas.

Con toda esta información las femtoceldas son capaces de estimar la relación señal a interferencia potencial que van a sufrir tanto sus usuarios ( $SIR_{self}$ ) como los usuarios de las femtoceldas vecinas ( $SIR_{others}$ ). Hay que tener en cuenta que para esto las femtoceldas también deben conocer con qué potencia transmite cada femtocelda. En el artículo asumen que todas las femtoceldas transmiten con la misma potencia y que por lo tanto es conocida a priori.

La femtocelda estimará la  $SIR_{self}$  y la  $SIR_{others}$  para cada subbanda definida y obtendrá lo que llaman impacto interferente ( $II$ ) mediante la expresión (A9), de tal forma que escogerá aquellas subbandas en las que el impacto interferente sea mayor.  $SIR_{target}$  es la relación señal a interferencia que queremos garantizar para los usuarios de la femtocelda. La femtocelda calcula el impacto interferente tanto sobre sus propios usuarios como sobre los usuarios de las femtoceldas vecinas.

$$II = SIR_{self/others} - SIR_{target} \quad (A9)$$

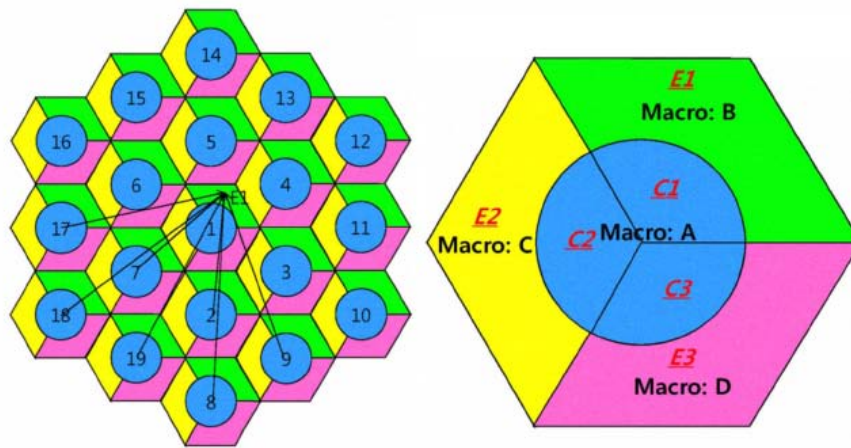
Hay que notar que en este artículo no tienen en cuenta la interferencia cross-layer entre macroceldas y femtoceldas. Solo plantean un esquema para coordinar la interferencia

co-layer entre femtoceldas cercanas. Además también hay que tener en cuenta que en función de la densidad del despliegue de femtoceldas y del número de usuarios que sirva cada femtocelda la sobrecarga añadida a la red por la transmisión de la información de las pérdidas de propagación puede ser excesiva.

#### A.2.4 Asignación distribuida No Cooperativa

Como se ha comentado anteriormente Fractional Frequency Reuse (FFR) es una solución para reducir la interferencia en sistemas macrocelulares, especialmente para los usuarios del borde de la celda. Este esquema también ayuda a lograr un factor de reuso frecuencial igual a la unidad. Bajo esta condición queremos minimizar la interferencia del despliegue de femtoceldas, centrándonos en la gestión de interferencias entre macrocelda y femtoceldas usando FFR. En [5] y [15] proponen un esquema de gestión de recursos para redes heterogéneas basado en FFR.

A modo de recordatorio, en el esquema FFR la celda se divide en dos zonas, una zona interior y una zona exterior, de tal forma que una parte de los recursos se reserva para la parte interior y otra para la parte exterior (en los recursos reservados para la zona exterior se transmitirá con mayor potencia para alcanzar a los usuarios localizados en los bordes de la celda). Resultados de simulación presentes en la literatura muestran que la solución óptima es que el radio de la zona interior sea 0.63 veces el radio de la macrocelda. Por ejemplo, para una celda de radio 1000m, el radio de la zona interior serían 630m. Las macroceldas están divididas en 3 sectores y cada sector utiliza una subbanda frecuencial diferente dentro de la banda reservada a la zona exterior.



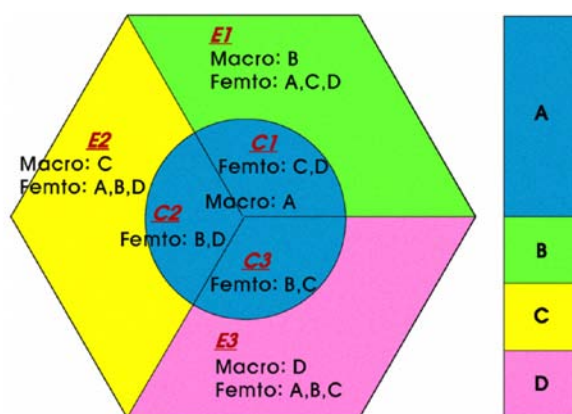
**Figura A7.** Distribución frecuencial en un esquema FFR

En la Figura A7, podemos observar la distribución de un sistema FFR. Por ejemplo, un usuario situado en el sector 1, en la zona exterior (E1) de la macrocelda 1, tiene como conjunto de celdas interferentes las marcadas en la figura, que son: {2,7,8,9,17,18,19}. Mientras que un usuario situado en la zona central, tiene como conjunto de celdas interferentes las 18 macroceldas vecinas. Mediante el esquema FFR, los usuarios del borde de la macrocelda pueden lograr altas tasas de datos debido al reducido número de celdas interferentes.

Lo que hemos comentando anteriormente puede observarse a través de la expresión de la SINR para un usuario  $k$  de la macrocelda  $m$  mostrada en la ecuación (A1). Para el caso de un usuario situado en la zona exterior E1 de la macrocelda, en vez de recibir la interferencia de todas las celdas vecinas, solo recibe interferencia de las celdas {2,7,8,9,17,18,19}, con lo que el numerador de la expresión será menor y por lo tanto la SINR obtenida por los usuarios del exterior será más alta.

El esquema de gestión de la interferencia propuesto en el artículo se basa en que las femtoceldas utilicen los recursos frecuenciales que no son usados en la zona de la macrocelda en la que está desplegada. Como ya se ha comentado, la macrocelda se divide en 6 zonas, las tres zonas centrales (C1, C2 y C3) y las tres exteriores (E1, E2 y E3). En la Figura A7, hemos visto que la subbanda A es usada en la zona central, mientras que las subbandas B, C y D son usadas en las regiones E1, E2 y E3 respectivamente.

Bajo estas condiciones las femtoceldas eligen las subbandas no utilizadas en esa zona de la macrocelda. El esquema propuesto se visualiza muy bien en la Figura A8.



**Figura A8.** Esquema de coordinación de interferencias propuesto

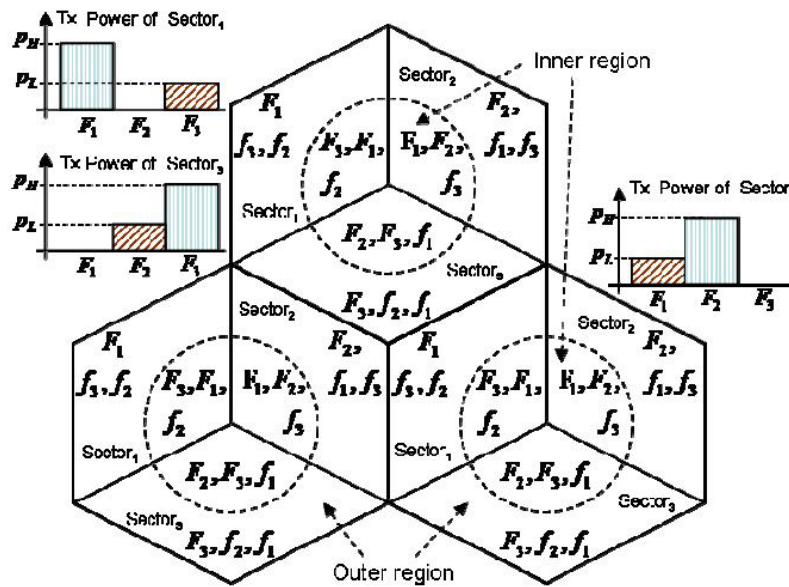
Por ejemplo, si una femtocelda está situada en una zona exterior, E1, puede utilizar las subbandas A, C y D. Mientras que la macrocelda en esa zona solo puede utilizar la subbanda B y eventualmente A si el nivel de SINR lo permite. Si la femtocelda está situada en una zona central, C1, puede utilizar las subbandas C y D, mientras que la macro utilizará la subbanda A. En realidad, la macrocelda podría utilizar también la subbandas B, independientemente de que esta banda esté preferentemente reservada para los usuarios de la zona exterior. La femtocelda evita la subbanda B, ya que es la utilizada por la macrocelda para la zona exterior, E1, de ese mismo sector. Por lo tanto le llegará a la femtocelda mucha potencia interferente en esa banda.

Debido a las características de OFDMA, la macrocelda es interferida por otras macroceldas vecinas y con FFR somos capaces de mitigar esa interferencia. Las femtoceldas utilizan diferentes subbandas para evitar la interferencia de las macroceldas. Las subbandas son reutilizadas en la macrocelda tanto como es posible, ya que la potencia transmitida por las femtoceldas es bastante pequeña. De esta forma, la interferencia entre las macroceldas y las femtoceldas es minimizada. Además, a las femtoceldas situadas en zonas exteriores se les

asigna mayor cantidad de recursos, para mejorar el comportamiento de los usuarios del borde de las celdas.

Siguiendo en la misma línea de emplear como esquema de coordinación de interferencias en las macroceldas FFR, en [9] proponen configurar adaptativamente el patrón del esquema FFR para gestionar las interferencias introducidas por las femtoceldas sobre las macroceldas. Para investigar el impacto de las femtoceldas co-canal en las macroceldas, en este trabajo se centran en observar la degradación que sufre la SINR de los usuarios de la macrocelda cuya expresión puede verse en la ecuación (A1).

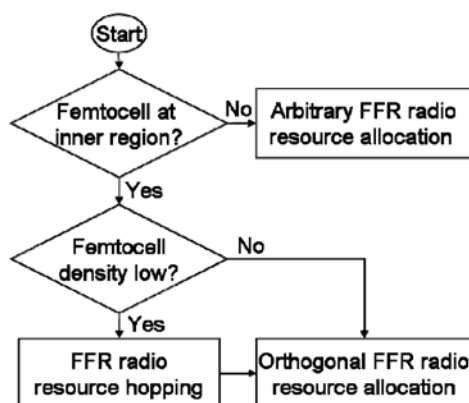
El principal esquema de coordinación de interferencias que proponen en el artículo es el mostrado en la Figura A9. Podemos observar que las femtoceldas desplegadas en la zona interior pueden emplear las bandas  $F_2$ ,  $F_3$  y  $F_1$  en los sectores 1, 2 y 3 respectivamente. Por lo tanto, en cada sector estamos reservando una banda para uso exclusivo de las femtoceldas desplegadas en la zona interior. Para el caso de las femtoceldas desplegadas en la zona exterior, pueden emplear las dos bandas que no son empleadas en ese sector para la zona exterior. Por ejemplo, una femtocelda desplegada en la zona exterior del sector 1 puede emplear las bandas  $F_2$  y  $F_3$ , mientras que la macrocelda empleará en esa zona la banda  $F_1$ .



**Figura A9.** Esquema de coordinación de interferencias propuesto basado en FFR

En el artículo comparan este esquema con otras dos alternativas. La primera consiste en que las femtoceldas desplegadas en la zona interior utilicen las bandas  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$ , mientras que las femtoceldas desplegadas en la zona exterior empleen la misma banda que la que emplea la macrocelda en ese determinado sector, es decir, que una femtocelda desplegada en la zona exterior del sector 1 puede emplear la banda  $F_1$ . La segunda alternativa consiste en que las femtoceldas escojan aleatoriamente una subbanda para transmitir, y después de un cierto tiempo salten a otra subbanda. Con esta estrategia se consigue aleatorizar la interferencia que ven los usuarios de las macroceldas.

Mediante simulaciones determinan que el comportamiento de los UEs del exterior de las macroceldas viene determinado por la interferencia de las macroceldas vecinas, debido a los bajos requisitos de potencia de transmisión de las femtoceldas situadas en los bordes de las macroceldas. Por el contrario, las femtoceldas situadas en las zonas interiores de las macroceldas tienen un gran impacto sobre los usuarios de las macroceldas. De tal forma que el diagrama de flujo del esquema de mitigación de interferencias propuesto finalmente en el artículo es el mostrado en la Figura A10.



**Figura A10.** Diagrama de flujo del esquema FFR propuesto

Si la femtocelda se encuentra en la zona exterior, como los resultados de sus simulaciones han mostrado que la interferencia de las macroceldas vecinas es la que domina el comportamiento de los usuarios de los bordes de las macroceldas, las femtoceldas pueden simplemente emplear la alternativa de ir saltando de una subbanda a otra para aleatorizar la interferencia. Para el caso de femtoceldas situadas en las zonas interiores, la alternativa aplicada dependerá de la densidad de femtoceldas. De tal forma que para situaciones de baja densidad, bastará con que las femtoceldas salten de una subbanda a otra para minimizar el efecto de la interferencia sobre los usuarios de las macroceldas. Mientras que para situaciones de mayor densidad, las femtoceldas emplearán la alternativa de utilizar recursos ortogonales a los empleados por la macrocelda visto en la Figura A9.

Este procedimiento mostrado en la Figura A10 se ejecuta cada vez que se despliega una nueva femtocelda o cuando la red necesita configurar el patrón FFR debido a variaciones en la densidad de las femtoceldas. En este artículo solo se centran en mitigar la interferencia en el DL originada por las femtoceldas sobre las macroceldas ya existentes. Sin embargo no se ocupan de analizar la interacción entre las diferentes femtoceldas, es decir, como afecta la interferencia originada por una femtocelda sobre las femtoceldas cercanas. Este aspecto es bastante relevante, especialmente en situaciones de alta densidad de femtoceldas.

En [6] y [7] proponen un algoritmo de gestión de recursos radio para el downlink capaz de mitigar la interferencia media y minimizar la potencia total de transmisión basado en un esquema de asignación de recursos aleatorio. Se asume una red macrocelular, con celdas hexagonales y con un factor de reúso frecuencial igual a la unidad. Se asume que las femtoceldas están uniformemente desplegadas sobre las macroceldas y que emplean los mismos recursos frecuenciales que las macroceldas.

Para que los usuarios de las femtoceldas alcancen altas tasas de datos se puede pensar en que las femtoceldas empleen todos los RBs disponibles en la macrocelda. Además como el número de usuarios que se conectan a una femtocelda es menor que los que se conectan a una macrocelda, el número de RBs asignados a un usuario de una femtocelda puede ser mayor. Como además los usuarios de una femtocelda estarán más cercanos a la femtocelda, estos usuarios podrán obtener altos niveles de QoS con potencias de transmisión bajas. Sin embargo, si las femtoceldas pueden utilizar todos los RBs para tratar de soportar altas tasas de datos, los usuarios de las macroceldas sufren mucha interferencia co-canal.

Para tratar de evitar esa interferencia y evitar que el rendimiento de los usuarios de la macrocelda se vea muy degradado, las femtoceldas deben ceder parte de esos RBs, especialmente los utilizados por los usuarios de la macrocelda que se encuentran cerca de la femtocelda. Sin embargo, que la femtocelda detecte o estime la asignación de RBs de los usuarios de la macrocelda es bastante complicado. Por lo tanto, ellos proponen un algoritmo de asignación de RBs aleatorio para reducir la probabilidad de que se produzcan colisiones entre usuarios de las femtoceldas y de la macrocelda.

Se define un índice de ocupación de RB,  $b_f^{(n)}$ , de tal forma que cuando el RB  $n$  es usado por la femtocelda  $f$ ,  $b_f^{(n)}=1$  y en el resto de casos  $b_f^{(n)}=0$ . Se define un factor  $\alpha$ , que representa la fracción de RBs que puede utilizar una femtocelda:

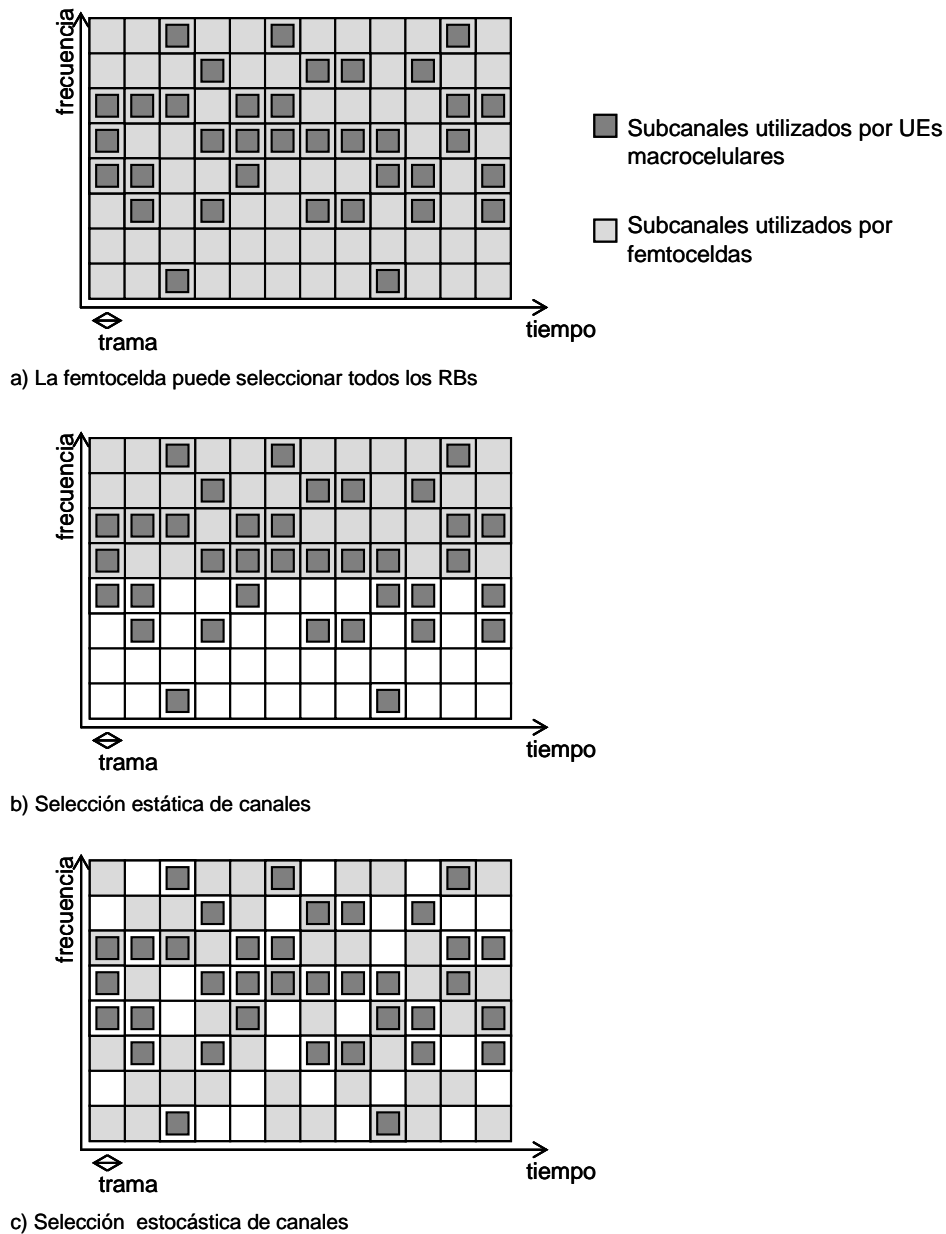
$$\alpha = \frac{Nf}{N} \quad (A10)$$

donde  $Nf$  es el número de RBs que pueden emplear las femtoceldas. Por ejemplo, si  $\alpha=0.5$ , quiere decir que la femtocelda escogerá aleatoriamente un 50% de los RBs. Esta selección aleatoria de los RBs promedia la interferencia co-canal de los usuarios de la macrocelda a lo largo de las tramas. Para una implementación sencilla, el valor de  $\alpha$  lo podemos mantener para todas las femtoceldas. Una implementación más optimizada podría tener en cuenta aspectos como el número de usuarios que sirve cada femtocelda, la interferencia que introduce cada una, etc. para calcular un valor de  $\alpha$  diferente para cada femtocelda.

En la Figura A11 podemos ver los efectos del algoritmo de selección de RBs propuesto. La parte (a) muestra el caso en el que la femtocelda utiliza todos los RBs. Al utilizar los mismos canales que los usuarios de la macrocelda se genera mucha interferencia co-canal, degradándose de esta forma las prestaciones del sistema. En las partes (b) y (c) de la figura la femtocelda utiliza un cierto porcentaje de los RBs. Estos esquemas evitan la interferencia en ciertos RBs utilizados por usuarios de la macrocelda. Con una selección estática de RBs, la femtocelda utiliza una porción de RBs fijos a lo largo de las subtramas, y los RBs específicos que utilizan los usuarios de la macrocelda son constantemente interferidos. Si el resto de RBs libres de interferencias tienen malas condiciones para un usuario de la macrocelda, su rendimiento se ve drásticamente disminuido.

Por otra parte el esquema propuesto mostrado en la parte (c) de la figura, causa interferencia co-canal en diferentes RBs trama a trama. Por lo tanto, todos los RBs del sistema tienen la misma probabilidad de evitar la interferencia co-canal de la femtocelda y el efecto de la interferencia se dispersa en todo el ancho de banda. Después de la selección de RBs, la

femtocelda asigna los RBs disponibles a sus usuarios. Tampoco debemos olvidar la interferencia co-canal que se produce entre femtoceldas vecinas. Para minimizarla proponen integrar una fase de asignación de potencia, en la que las femtoceldas minimizan la potencia transmitida para mitigar la interferencia co-canal generada a las femtoceldas vecinas.



**Figura A11.** Ejemplos de selección de subcanales

### A.3 Técnicas de control de potencia para femtoceldas

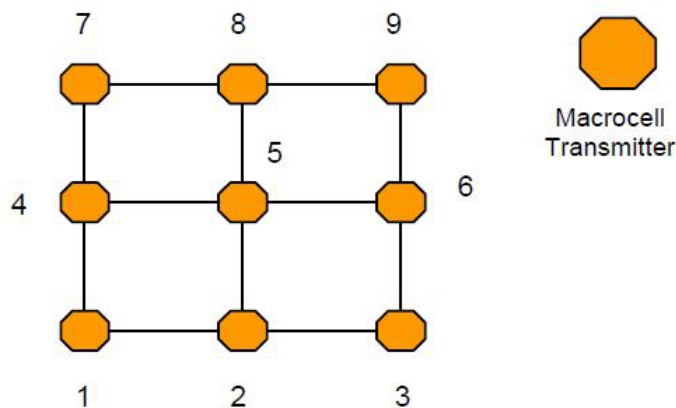
Una vez comentados varios esquemas de asignación de recursos radio para redes con despliegues de femtoceldas, nos vamos a centrar en algunas técnicas de control de potencia que aparecen en la literatura. Generalmente estas técnicas se centran en minimizar todo lo posible la potencia de transmisión de las femtoceldas para ser capaces de ofrecer un buen servicio a los usuarios de las femtoceldas, a la vez que minimizamos la interferencia que

introducen las femtoceldas sobre las macroceldas o sobre las femtoceldas vecinas. Estas técnicas de control de potencia se emplean de forma conjunta con esquemas de asignación de recursos para mitigar lo máximo posible la interferencia.

Como se ha mostrado anteriormente en [4] proponen que las femtoceldas empleen una subbanda para la zona interior y otra subbanda para la zona exterior, de tal forma que en la subbanda reservada para la zona interior se transmite con una potencia inferior y adaptable, mientras que en la subbanda reservada para la zona exterior se transmite con una potencia superior y fija. Ya se ha visto que este control de potencia está bastante extendido en los esquemas de coordinación de interferencias en redes macrocelulares.

En este control de potencia se permite adaptar dinámicamente la potencia de transmisión de la subbanda reservada a la zona interior, en función de la densidad de femtoceldas cercanas, ya que todas las femtoceldas desplegadas en un mismo sector de la macrocelda emplearán esa subbanda. Para la subbanda reservada para la zona exterior la potencia es fija, ya que mediante el esquema de asignación de recursos ya se escoge dinámicamente la subbanda a emplear para mitigar las interferencias. Manteniendo la potencia fija y en un valor superior permitimos que los usuarios con malas condiciones de canal puedan obtener una buena calidad de servicio. Además de esta forma conseguimos que la interferencia vista en esa subbanda por las femtoceldas cercanas sea más estable al mantener la potencia constante.

En [10] proponen un algoritmo iterativo para determinar la potencia de transmisión de las femtoceldas, maximizando la SINR mínima obtenida por los usuarios de las femtoceldas teniendo como datos una SINR mínima a garantizar para los usuarios de las macroceldas y una potencia de transmisión de la macrocelda. El escenario sobre el que realizan las simulaciones es el mostrado en la Figura A12 y está formado por una macrocelda sobre la que se despliega una rejilla de 9 femtoceldas. Si situamos el centro de coordenadas en la femtocelda 5, la macrocelda estaría situada en el punto (300,300) y cada femtocelda está a 30 metros de distancia en cualquiera de los ejes.



**Figura A12.** Escenario de simulación propuesto

Las ecuaciones que sugieren para el algoritmo iterativo son las siguientes:



$$P^{(k+1)} = \frac{M[HP^{(k)} + u]}{z^T [HP^{(k)} + u]} \quad (A11)$$

$$T_F^{(k)} = \frac{M}{z^T [HP^{(k)} + u]} \quad (A12)$$

donde  $P=[P_1, \dots, P_9]$  es el vector que contiene las potencias de transmisión de las nueve femtoceldas,  $u=[u_1, \dots, u_9]^T$  con  $u_f=(G_{f,m}P_m+N_0W_{RB})/(G_{f,f})$  siendo  $P_m$  la potencia de transmisión de la macrocelda,  $H(h_{ff'})$  es la matriz simétrica dada por  $h_{ff'}=h_{f'f}=G_{f,f'}/G_{f,f}$  con  $f, f' \in F$ ,  $f \neq f'$  y  $h_{ff}=0$ ;  $M=(P_m/T_m)-(N_0W_{RB})/(G_{m,m})$ ;  $z=[z_1, \dots, z_9]$  y  $z_f=(G_{m,f}/G_{m,m})$ .  $G_{f,f'}$  es la ganancia de canal entre la femtocelda  $f$  y el punto crítico de la femtocelda vecina  $f'$ ; De la misma manera  $G_{f,m}$  es la ganancia de canal entre la femtocelda  $f$  y el punto crítico de la macrocelda  $m$  y  $G_{f,f}$  es la ganancia de canal entre la femtocelda  $f$  y el punto crítico de la propia femtocelda  $f$ .  $T_F$  es la mínima SINR obtenida para los usuarios de las femtoceldas y  $T_m$  es la mínima SINR obtenida para los usuarios de la macrocelda.

Tanto para las femtoceldas como para las macroceldas se escogerían un conjunto de puntos críticos, en los que se aseguraría que se cumplen los valores mínimos de SINR. Sin embargo por simplicidad, en los cálculos realizados en el artículo escogen un punto crítico en cada femtocelda y un punto crítico en la macrocelda. Se entiende por punto crítico aquel punto dentro de la cobertura de la femtocelda o de la macrocelda donde la SINR vista por sus usuarios será mínima.

Las ecuaciones (A11) y (A12) se derivan del planteamiento matemático del problema de escoger las potencias para las 9 femtoceldas maximizando la SINR mínima obtenida por los usuarios de las femtoceldas teniendo como datos una SINR mínima a garantizar para los usuarios de las macroceldas y una potencia de transmisión de la macrocelda. El desarrollo completo no se incluye ya que no es el objetivo de la revisión del estado del arte.

El algoritmo iterativo está formado por los siguientes pasos:

1. Se inicializa  $k=0$  y  $P^{(0)}=0$ .
2. Para el punto crítico de la macrocelda se calcula  $M$ :

$$M = \frac{P_m}{T_m} - \frac{N_0 W_{RB}}{G_{m,m}}$$

3. Para  $k \geq 0$  se obtiene:

$$T_F^{(k)} = \frac{M}{z^T [HP^{(k)} + u]}$$

4. Se calcula las potencias para las femtoceldas:

$$P^{(k+1)} = T_F^{(k)} [HP^{(k)} + u]$$

5. Si se cumple que:  $|T_F^{(k+1)} - T_F^{(k)}| \leq \epsilon$  y  $|P_f^{(k+1)} - P_f^{(k)}| \leq \epsilon$  para todo  $f \in F$ , se para de ejecutar el algoritmo y la solución óptima es  $T_F^{opt} = T_F^{(k+1)}$  y  $P^{opt} = P^{(k+1)}$ .

6. Actualizar  $k=k+1$  y volver al paso 3.

Este algoritmo nos permite determinar las potencias de transmisión de las femtoceldas desplegadas dentro del radio de cobertura de una macrocelda. Hay que tener en cuenta, que para llevar a cabo el algoritmo es necesario realizar un estudio de la red para poder determinar los puntos críticos de las femtoceldas y de la macroceldas sobre las que están desplegadas las femtoceldas. Por lo tanto este algoritmo debe realizarse desde un nodo central, por ejemplo la macrocelda, que conozca las posiciones de las femtoceldas y de la macrocelda. Una vez realizado el algoritmo se deberán transmitir las potencias de transmisión a todas las femtoceldas. Por lo tanto cada vez que se encienda o apague una femtocelda, o se varíe la posición de una femtocelda, se debería llevar a cabo este algoritmo de forma dinámica para adaptar las potencias de transmisión de las femtoceldas a las condiciones cambiantes del escenario.

Para modelar el problema del control de potencia distribuido en despliegues femtocelulares, en la literatura pueden encontrarse artículos en los que emplean modelos de la teoría del juego. Concretamente en [12] modelan el problema del control de potencia en el enlace descendente mediante el juego de Stackelberg, también conocido como el juego del líder-seguidor, donde el throughput de cada estación se maximiza bajo unas ciertas restricciones de potencia. En este juego, las macroceldas son consideradas las líderes y las femtoceldas las seguidoras. El juego se divide en dos subjuegos, el subjuego superior que engloba el conjunto de líderes y el subjuego inferior que engloba el conjunto de seguidores.

Los “jugadores”, que en este caso son las macroceldas y las femtoceldas, compiten con el resto de “jugadores” de forma no cooperativa para alcanzar el equilibrio de Stackelberg, que es la solución del control de potencia. Obtener el equilibrio de Stackelberg requiere un algoritmo matemático complejo y además hay que tener en cuenta ciertas restricciones para que ese equilibrio exista.

## A.4 Resumen

En el ANEXO A se han presentado varios esquemas de asignación de recursos radio y gestión de la interferencia en redes celulares heterogéneas formadas por macroceldas y femtoceldas, las cuales comparten el mismo ancho de banda. Estos esquemas están pensados para el enlace descendente en redes basadas en OFDMA. También se han mostrado algunas propuestas encontradas en la literatura para el control de potencia de las femtoceldas.

Según el escenario concreto en el que se vayan a desplegar las femtoceldas nos puede ser más beneficioso un tipo de esquema que otro. Por ejemplo si las femtoceldas van a ser desplegadas por el operador, para evitar posibles congestiones de tráfico en determinadas zonas, lo más interesante sería emplear un esquema de asignación centralizado. De tal forma que un nodo central controlado por el operador sea el encargado de realizar el reparto del ancho de banda entre macrocelda y femtoceldas.

Mientras que si por el contrario son los propios usuarios los que van a desplegar las femtoceldas en sus hogares, oficinas, etc. lo más interesante sería pensar en un esquema de asignación distribuido. De tal forma que son las propias femtoceldas las que deciden los

recursos frecuenciales que van a utilizar, ya sea de una forma cooperativa entre femtoceldas vecinas o no cooperativa.

Parece que el despliegue que más se va a extender es que sean los propios usuarios los que coloquen las femtoceldas. Por esta razón, en la literatura los esquemas que más abundan son los que proponen esquemas distribuidos, ya que el operador no puede realizar una planificación frecuencial típica, al no conocer la localización de las femtoceldas. De tal forma, que a partir de un esquema distribuido sean las propias femtoceldas las que escojan de una forma inteligente los recursos a utilizar en cada instante de transmisión.

Si utilizamos planteamientos distribuidos cooperativos, además del esquema de asignación de recursos que implementamos tenemos que pensar cuál va a ser el mecanismo para permitir la comunicación entre femtoceldas. Podemos pensar en establecer la comunicación a través del medio radio, para que una femtocelda pueda comunicarse con las otras. Sin embargo, esta opción supondría una reducción del throughput al utilizar recursos radio para señalización. Otra opción sería que se comunicasen a través del enlace backhaul, que al ser un enlace cableado, se supone que dispondrá de capacidad suficiente y no empeorará el rendimiento del sistema.

Por otra parte, si escogemos esquemas no cooperativos, nos evitamos tener que establecer un mecanismo para habilitar las comunicaciones entre femtoceldas. Sin embargo, como contra partida, tenemos el hecho de que como las femtoceldas tienen que ser completamente autónomas, desde el punto de vista de que sin comunicaciones entre femtoceldas deben ser capaces de escoger los recursos dentro del ancho de banda disponible en los que exista poca interferencia y tratar de no interferir en exceso.

Está claro que adaptar el control de potencia al esquema de coordinación de interferencias empleado en el sistema es lo más óptimo, ya que si diseñamos el control de potencia correctamente nos permitirá una mayor reutilización del espectro y una mejor coordinación de las interferencias. En este ANEXO se han revisado varias propuestas de la literatura y cabe destacar por su sencillez el empleo de máscaras de potencia con una potencia de transmisión mayor para los recursos empleados en la zona exterior y una potencia de transmisión menor para los recursos empleados en la zona interior y con un mayor reúso. Además el empleo de máscaras de potencia es una estrategia bastante extendida en el ámbito de las redes macrocelulares convencionales. Es obvio que este tipo de estrategia es adecuada para esquemas de asignación de recursos que contemplen dividir el ancho de banda disponible por la femtocelda en dos subbandas, una para la zona interior y otra para la exterior.