

Agentes Distribuidos para la Asignación de Frecuencias Hopping en Redes Celulares

Francesc Comellas, Javier Ozón

Resumen— La licencia de explotación del espectro radioeléctrico es uno de los principales costes que debe soportar un operador de telefonía móvil. En estos casos, la reducción del número de frecuencias en el diseño de una red puede suponer un ahorro considerable. Igualmente, una vez contratada la licencia y determinado el número máximo de frecuencias disponibles, la capacidad del tráfico de la red puede ser incrementada mediante un mejor aprovechamiento del espectro, en el sentido de reutilizar frecuencias en distintas celdas de la red y poder transmitir simultáneamente desde distintos puntos con una misma portadora. En el presente trabajo se describe un algoritmo de agentes distribuidos llamado Hormigas (más simple que otros algoritmos del mismo nombre y naturaleza similar) que ha demostrado ser eficiente en la asignación de frecuencias en redes celulares de telefonía móvil y se ofrecen los resultados de aplicar tanto Hormigas como Simulated Annealing (y asimismo una combinación de ambos) en distintas redes telefónicas con empleo de conmutación de frecuencias o frequency hopping.

Palabras clave— Agentes distribuidos, algoritmo hormigas, coloreado de grafos, asignación de frecuencias, redes celulares.

I. REPRESENTACIÓN DE UNA RED CELULAR DE TELEFONÍA MÓVIL

En un sistema de telefonía celular la zona de cobertura se divide en distintas áreas denominadas celdas. En cada celda se encuentra una estación base provista de uno o varios transmisores, encargados de enlazar los terminales móviles con la red telefónica. Esta división de la zona de cobertura, que permite de un lado reducir la potencia de emisión y de otro reutilizar frecuencias en celdas diferentes (con el objeto de aumentar el número de canales disponibles), acostumbra a provocar sin embargo, según factores de proximidad, potencia de emisión y tráfico cursado, la aparición de interferencias entre celdas.

Una red celular puede ser representada de este modo mediante un grafo simple con pesos en las aristas, donde los vértices se corresponden con las frecuencias que deben asignarse a cada celda y las aristas unen vértices correspondientes a celdas interferentes (figura 1). El peso de una arista representa la distancia que han de guardar las frecuencias asignadas a cada una de las celdas con el fin de no sufrir interferencias. El problema así planteado puede traducirse finalmente en un problema de coloreado de grafos, donde las frecuencias se representan con colores o números enteros, de manera que la separación entre colores de vértices adyacentes ha de ser como mínimo el peso de la arista que los une.

En una red celular existe normalmente más de un

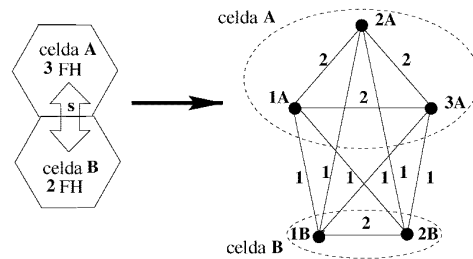


Fig. 1. Modelado de una red celular. El número de frecuencias hopping en cada celda es 2 y 3 respectivamente.

transmisor por celda siendo el número de frecuencias asignadas a cada celda mayor o igual al número de transmisores. Cada transmisor emite en cada intervalo en una frecuencia determinada pudiendo cursar con cada frecuencia (a través de un multiplexado en el tiempo) un total de hasta ocho llamadas.

Un transmisor puede emitir asimismo con arreglo a una pauta de cambio o salto de frecuencia. Esto quiere decir que cada transmisor puede hacer uso de las distintas frecuencias disponibles en la celda de forma sucesiva, transmitiendo en cada intervalo de tiempo a una frecuencia distinta con el objeto de reducir las interferencias de la red. Esta técnica se conoce con el nombre de *frequency hopping* o *conmutación de frecuencia*. De este modo, en una celda en la que hubiera dos transmisores y cuatro frecuencias disponibles cada uno de los transmisores podría transmitir, por ejemplo, según las secuencias $f_1 f_2 f_3 f_4$ y $f_3 f_4 f_1 f_2$. Para evitar interferencias en la propia celda dos transmisores pertenecientes a una misma estación base no pueden emitir en un mismo intervalo de tiempo a la misma frecuencia. Finalmente, la asignación frecuencial debe indicar las frecuencias disponibles en cada celda, desdoblándose cada celda en un número de vértices igual al número de frecuencias asignadas. Dos vértices son adyacentes si las celdas de las que proceden interfieren, correspondiéndose el peso de las aristas con el valor respectivo de la matriz de restricciones.

Por otro lado, los vértices correspondientes a una misma celda deberán guardar una distancia de dos unidades. En primer lugar, y dado que los distintos transmisores de una celda deben conmutar las frecuencias disponibles, no tiene sentido repetir una frecuencia en una misma celda. Podría darse además el caso de que dos transmisores emplearan simultáneamente la misma frecuencia (en la misma celda), interfiriéndose mutuamente. De otro lado, y debido al control dinámico de potencia, dos terminales móviles emplazados en una misma celda pueden transmitir simultáneamente a potencias dis-

tintas (en función de su distancia a la estación base) pudiendo de este modo los lóbulos laterales del móvil de mayor potencia interferir el lóbulo principal del móvil de potencia menor. Debe evitarse así el uso en una misma celda de frecuencias a distancia uno, siendo de este modo el peso de las aristas correspondientes igual o mayor que 2.

II. ESPECIFICACIONES PARA LA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

El problema de la asignación de frecuencias puede caracterizarse, según se ha descrito, mediante una matriz de restricciones, un vector de requerimientos, un vector de número de transmisores por celda y un vector de índice de ocupación de la celda.

La **matriz de restricciones** es una matriz cuadrada de n filas y n columnas (siendo n el número de celdas de la red) cuyos elementos recogen la separación frecuencial que ha de existir entre la celda fila y la celda columna correspondientes. Un 0 significa que las dos celdas no interfieren y que, por tanto, pueden utilizar la misma frecuencia. Un valor de 1 indica que existen interferencias cocanal y que por lo tanto las frecuencias entre las celdas han de situarse, cuando menos, a una distancia igual a 1. Finalmente un valor igual a 2 indica la presencia de interferencias de canal adyacente (los lóbulos laterales interfieren la señal principal) de tal modo que la separación frecuencial ha de ser como mínimo de dos unidades.

El **vector de requerimientos** indica el número de frecuencias que deben asignarse a cada celda. Este número, como se ha visto, determina el número de vértices asociados a cada celda. El número de frecuencias ha de ser siempre mayor o igual al número de transmisores de la celda y puede ser el mismo para todas las celdas de la red o variar en función del número de transmisores y del tráfico de la celda.

El **vector de transmisores** registra el número de transmisores presentes en cada celda, escogido en función del tráfico que ha de cursar la celda que, a su vez, depende del índice de población, del número total de abonados, del tráfico en la hora punta y del grado del servicio ofrecido por el operador de red.

El **vector de ocupación** indica el porcentaje temporal de ocupación de cada celda. Las restricciones incumplidas entre frecuencias pertenecientes a celdas más ocupadas (porcentajes mayores) tienen una mayor influencia en la interferencia global del sistema.

En los siguientes apartados se describe el proceso de asignación de frecuencias en distintas redes celulares con conmutación de frecuencias. En las redes analizadas el número de frecuencias disponibles ha sido normalmente reducido de modo que no ha sido posible obtener diseños con un número nulo de violaciones. En estos casos se ha intentado minimizar los efectos de las interferencias considerando la influencia del hopping en la calidad de la transmisión y definiendo asimismo una función de coste que, además de la protección introducida por el hopping, tiene también en cuenta la influencia del tráfico

de cada celda en la calidad de la transmisión. Finalmente se han aplicado los algoritmos Hormigas y Simulated Annealing (también en modo combinado) obteniéndose resultados similares en ambos casos y consiguiéndose no sólo una reducción del nivel teórico de interferencias (calculado a través de la función de coste) sino asimismo una disminución considerable (medida en redes reales) del número de llamadas perdidas y de los trasposos intracelda (cambio de canal en el curso de una misma llamada) lo cual significa en la práctica una mejora considerable de la calidad de servicio de la red.

III. FUNCIÓN DE COSTE O INTERFERENCIA

Como se ha dicho, el empleo del frequency hopping permite variar la frecuencia portadora en cada intervalo o unidad de tiempo (llamada *trama* de aquí en adelante). En este caso, para que se produzca una interferencia cocanal en un instante dado, no bastará que dos celdas interferentes tengan disponible una misma frecuencia, sino que además la frecuencia portadora asignada a cada trama en ese instante deberá ser la misma.

Sean dos celdas i y j cualesquiera y sean N_i y N_j el número de frecuencias hopping asignadas a cada celda y T_i y T_j el número de transmisores. Sea f una frecuencia asignada a ambas celdas, la probabilidad de que en un instante determinado la frecuencia escogida en ambas celdas sea f es el producto:

$$P_i(f) \cdot P_j(f) = \frac{T_i}{N_i} \cdot \frac{T_j}{N_j}$$

De esta forma la técnica del frequency hopping permite atenuar las interferencias gracias a la conmutación de la frecuencia portadora en cada trama, siendo la atenuación mayor a medida que aumenta el número de frecuencias hopping de cada celda. En todo caso, la protección presenta un límite dado que a partir de un cierto número de frecuencias asignadas en cada celda el número de frecuencias interferentes tiende a aumentar progresivamente. De este modo, aunque el blindaje por hopping pueda ser mayor, también aumentará el número de frecuencias interferentes (al haber aumentado el número de frecuencias asignadas en cada celda) debiéndose establecer una solución de compromiso.

Debido a restricciones en el diseño es frecuente encontrar, como se ha dicho, problemas de asignación de frecuencias en los cuales no es posible alcanzar con el número de frecuencias disponible un nivel de interferencia nulo. En estos casos intentará minimizarse los efectos de las interferencias teniendo en cuenta la protección ofrecida por el hopping y la ocupación de tráfico de cada celda. De este modo, la función de coste definida como medida de calidad de la red deberá evaluar el porcentaje de interferencias en cada celda, pudiendo ser este porcentaje mayor que la unidad (una celda puede cursar diversas llamadas simultáneamente). En el presente trabajo se ha considerado la siguiente función de coste:

$$I_{ij} = T_i T_j P_i P_j F_{ij} / (N_i N_j) \quad (1)$$

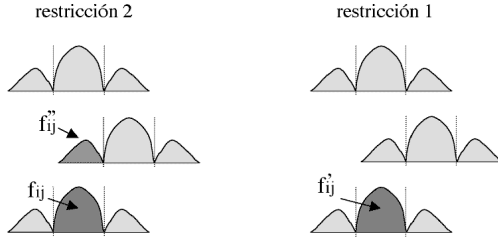


Fig. 2. Interferencias entre celdas en función de la restricción impuesta por el operador.

donde I_{ij} indica el nivel de interferencias que la celda j provoca sobre la celda i , T_i es el número de transmisores presentes en la celda i y N_i el número de frecuencias hopping asignadas a dicha celda. El porcentaje de uso temporal de la celda i viene representado por P_i mientras que $F_{ij} = f_{ij} + w_1 f'_{ij} + w_2 f''_{ij}$ pondera los tres tipos posibles de interferencia según el esquema de la figura 2. Así f_{ij} indica la existencia de una frecuencia compartida cuando la matriz de restricciones impone una diferencia igual a 2 (más exactamente f_{ij} indica el número de frecuencias en común entre las celdas i y j en caso de que la matriz de restricciones requiera una diferencia mayor o igual a 2). El término f''_{ij} indica el número de frecuencias compartidas cuando la matriz de restricciones obliga a una diferencia entre frecuencias igual a 1. Finalmente, f'_{ij} indica el número de frecuencias a distancia uno cuando la restricción impuesta es igual a 2.

Dependiendo del tipo de interferencia la función de coste definida sufre más o menos penalizaciones. Es por ello que se emplean los parámetros w_1 y w_2 . Tomando como referencia el peor caso f_{ij} , ponderaremos la interferencia cocanal cuando la restricción es igual a 1 con $w_1 = 0.5$. Análogamente se ha tomado en la práctica un valor de $w_2 = 0.3$.

IV. ALGORITMO HORMIGAS PARA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

El algoritmo Hormigas consta de una serie de agentes u hormigas que se desplazan a lo largo del grafo en paralelo, actuando cada una de las hormigas de forma restringida y con arreglo a una función de coste local. En una iteración dada, cada hormiga se desplaza del vértice actual hasta el vértice adyacente con peor función de coste (esto es, al vértice con mayor nivel de interferencias) y cambia su frecuencia por otra (escogida de entre las frecuencias disponibles por el operador) con el fin de minimizar la interferencia con las celdas adyacentes [1], [3], [5].

La *memoria* de un algoritmo puede considerarse (contrariamente al modelo clásico) no desde la perspectiva de una matriz de datos que registra informaciones explícitas de la evolución del algoritmo, sino como una estrategia capaz de beneficiarse de la historia reciente del algoritmo (y, como se ha dicho, sin manejar con ello registros explícitos de información). El algoritmo Hormigas, contrariamente a otros algoritmos paralelos del mismo nombre [4], funciona con arreglo a este segundo esquema de memoria que

no reproduce los acontecimientos pasados en listas explícitas de información (que consideraran el rastro acumulado de feromonas y su sucesiva y posterior evaporación). Este empleo implícito de una memoria de carácter dinámico se traduce, en el caso del coloreado de grafos, en un considerable ahorro computacional y el consiguiente aumento de la eficiencia del algoritmo.

Todo esto no significa, sin embargo, que en el algoritmo Hormigas aquí presentado no pueda hablarse de un “rastro” dejado por los agentes u hormigas. Lo que sucede es que ese “rastro” no hay que buscarlo ahora en la acumulación de feromonas sino en la propia evolución del coloreado del grafo (o asignación frecuencial en este caso). De este modo, el rastro dejado por una hormiga se refleja (en nuestro algoritmo) en el propio estado del grafo en cada instante de tiempo. A este mapa invisible de información se le conoce en la bibliografía como *stigmergy*.

Inicialmente el grafo se colorea (i.e. se asignan frecuencias a los distintos vértices) de forma aleatoria, distribuyéndose asimismo sobre los vértices un número determinado de agentes. En el presente apartado, cada vértice representa una frecuencia hopping asignada a la celda correspondiente. A continuación, las hormigas se desplazan a lo largo de la red y cambian las frecuencias de los distintos vértices dentro de un margen determinado y de acuerdo con un criterio de optimización local.

Considerando el nivel de interferencias que una celda i provoca sobre otra j calculado en el anterior apartado, se define la función de coste local $n(i)$ del vértice i de la siguiente forma:

$$n(i) = \sum_j I_{ij} = \frac{T_i P_i}{N_i} \sum_j \frac{T_j P_j F_{ij}}{N_j} \quad \forall j \text{ adyacente a } i$$

La función de coste $I(j)$ de la celda j se calcula como

$$I(j) = \sum_i n(i) \quad \forall i \in \text{celda } j$$

De este modo puede calcularse la función de coste de la red (siendo n el número de celdas) como

$$f_t = \sum_{j=1}^n I(j)$$

En cuanto al funcionamiento de los agentes del algoritmo, cabe tener en cuenta que: las hormigas han de actuar de forma restringida modificando parámetros locales del coloreado del grafo; que dichas acciones, aunque encaminadas a la mejora de la solución final, han de poder introducir empeoramientos con una cierta probabilidad (con el objeto de no caer en extremos locales); y que las diferentes hormigas han de actuar con independencia las unas de las otras, afectándose únicamente a través de las modificaciones producidas sobre el coloreado del grafo.

De acuerdo con estos puntos cada hormiga se mueve en cada iteración desde el vértice actual al

vértice adyacente con peor función de coste con una probabilidad p_v (en caso contrario, se desplaza a cualquier vértice adyacente de forma equiprobable) y cambia su frecuencia (con probabilidad p_f) por otra que minimice dicha función (en el caso de que exista más de una frecuencia óptima el algoritmo escoge, con probabilidad uniforme, una de entre las frecuencias óptimas encontradas). En caso contrario, es decir, con probabilidad $1 - p_f$, el algoritmo asigna cualquier frecuencia al vértice, manteniendo siempre una distancia de 2 con los demás vértices de la celda (como se ha dicho, no se permite ningún tipo de interferencia entre frecuencias de una misma celda). Después de cambiar la frecuencia de un vértice debe actualizarse la función de coste local del vértice y sus vértices adyacentes.

Esta acción se repite para cada hormiga, escoginose en cada iteración una hormiga al azar. Debido a que la función de coste global minimizada es la suma lineal de la $n(i)$ de cada uno de los vértices, pueden producirse picos de interferencia en celdas aisladas. Es por ello que se ha considerado asimismo una función de coste cuadrática que, sin afectar la política de movimiento de las hormigas, puede modificar la elección de la mejor asignación frecuencial final

$$f_c = \left(\sum_{j=1}^n I(j)^2 \right)^{1/2}$$

De este modo es posible escoger los mejores resultados obtenidos tanto con la función lineal como con la función cuadrática, consiguiéndose en el segundo caso una interferencia residual de distribución más uniforme y evitando en consecuencia picos de interferencias en determinadas celdas. El algoritmo, que va iterando sucesivamente, puede ejecutarse hasta que la función de coste global sea cero o, en caso contrario, ir convergiendo hasta un cierto instante final fijado por el usuario. Igualmente se han empleado técnicas heurísticas para el cálculo de cotas del número cromático con el objeto de mejorar la eficiencia del algoritmo [1], [2], [3], [6].

Inicio

colorea aleatoriamente el grafo
distribuye aleatoriamente las hormigas

escoge hormiga al azar

si probabilidad p_v mueve al peor vértice adyacente
si no mueve a otro vértice adyacente
si probabilidad p_f asigna mejor frecuencia
si no asigna cualquier frecuencia
actualiza función de coste
si nueva solución menor que mejor solución
guarda nueva solución como mejor solución

fin escoge

hasta máximo número de iteraciones
o solución encontrada

Fig. 3. Estructura básica del algoritmo Hormigas.

El funcionamiento del algoritmo Hormigas depende fundamentalmente de tres parámetros: el número de hormigas, la probabilidad p_v de desplazamiento al peor vértice y la probabilidad p_f de asignar la mejor frecuencia. Por un lado, si se utiliza un

número reducido de hormigas puede necesitarse un mayor número de iteraciones para colorear el grafo, mientras que un número excesivo puede provocar “colisiones” entre las distintas hormigas. En las redes analizadas ha sido suficiente un máximo de 5 hormigas. Por otra parte, las probabilidades p_v y p_f se incluyen, como se ha dicho, con el objeto de evitar mínimos locales de la función de coste. Por un lado, si sus valores son demasiado elevados disminuye la probabilidad de un eventual empeoramiento de la función de coste, y en consecuencia aumenta la probabilidad de estancamiento en un mínimo local. De otro lado, si sus valores son muy bajos el algoritmo puede oscilar lejos de los valores óptimos. De este modo, tanto la probabilidad de desplazamiento al peor vértice p_v como la probabilidad de asignar la mejor frecuencia p_f se han definido en un rango entre 0.5 (en término medio ha de suceder una mejora) y 0.95. Como primer valor orientativo se aconsejan probabilidades cercanas a 0.9.

Además de estos parámetros, el algoritmo empleado ha considerado (en cada iteración): la probabilidad p_r de redistribuir aleatoriamente las hormigas (o todas o ninguna) a lo largo del grafo; la probabilidad p_i de recolorear aleatoriamente el grafo; y la probabilidad p_e de fijar interferencia. Los dos primeros parámetros se incluyen como una forma de contribuir a la convergencia del algoritmo y de evitar la posibilidad de estancamiento en mínimos locales (se han empleado valores en torno al uno por ciento). El tercer parámetro muestra el grado de interés por fijar un nivel de interferencia en una celda determinada.

V. RESULTADOS

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos por los algoritmos Hormigas y Simulated Annealing en la asignación de frecuencias hopping en redes celulares. Estos algoritmos han sido probados en distintas redes próximas a la ciudad de Barcelona, con las que se ha intentado caracterizar los diferentes entornos urbanos y semiurbanos que pueden encontrarse en un proceso de planificación. En todos los casos el número de frecuencias ha sido menor que el número cromático del grafo correspondiente, no habiendo sido posible obtener diseños sin incompatibilidades. Asimismo, se ha dispuesto en cada caso de una planificación frecuencial anterior con la que se han establecido comparaciones.

La red 1 está compuesta por 85 celdas y 116 transmisores. En el antiguo diseño se han asignado un total de 423 frecuencias hopping a lo largo de toda la red, resultando un grafo de orden (i.e. número de vértices) 423, grado medio 112.54 y grado máximo 179 (se define el grado de un vértice como el número de vértices a los que es adyacente). El diseño se ha implementado con un número de frecuencias igual a 38. La tabla I muestra los resultados obtenidos con un antiguo criterio de asignación, así como con los algoritmos de asignación Hormigas y Simulated Annealing (manteniendo el mismo número de frecuencias por celda que el diseño original), y tam-

TABLA I
COMPARACIÓN DE INTERFERENCIAS EN LA RED 1.

Red 1	Antig	Horm	SA	Conc	Reduc
Lin	0.459	0.195	0.193	0.190	58.61%
Cuad	0.555	0.232	0.231	0.231	58.36%

TABLA II
ASIGNACIÓN ADAPTADA DE FRECUENCIAS HOPPING.

T_i	$P_i < 0.5$	$0.5 \leq P_i < 0.8$	$P_i \geq 0.8$
1	2/2	2/2	2/3
2	3/3	4/4	4/5
3	4/5	5/6	6/7
4	5/6	6/7	7/8
5	6/7	7/8	8/10

TABLA III
INTERFERENCIAS EN LA RED 1 CON DISTINTAS TABLAS DE ASIGNACIÓN.

	Horm	SA
Tabla II	0.01569	0.01330
Tabla II (+1 frec)	0.09865	0.08743
Tabla II (+2 frec)	0.17122	0.16575

bin los resultados obtenidos mediante la combinación de ambos métodos. En este caso, se empieza asignando frecuencias con Simulated Annealing, que en general converge más rápidamente, y a partir de una cierta iteración se aplica Hormigas retomando la última solución obtenida por Simulated Annealing. En todos los casos se dan los resultados obtenidos de aplicar tanto la función de coste lineal como la función de coste cuadrática.

Posteriormente se ha definido la tabla II (que es doble) con el fin de calcular para cada celda el número de frecuencias hopping que debe recibir en función del tráfico P_i cursado y del número T_i de transmisores (que como se ha visto son dos parámetros que intervienen directamente en el cálculo del nivel de interferencias de la red). En cada casilla se indica el número de frecuencias hopping que ha de recibir cada celda (dos posibilidades en cada caso) en función del tráfico P_i y del número de transmisores T_i de la celda. En este caso se habla de una *asignación adaptada* de frecuencias. En la tabla III se observa el aumento de interferencias debido al aumento del número de frecuencias por celda (al cambiar los valores de las casillas de la tabla II) lo que supone un aumento del número de vértices del grafo y una mayor complejidad del coloreado (en el segundo caso se ha sumado una unidad a cada casilla de la tabla II -partiendo del primero de los dos valores descritos- y en el tercero dos unidades). A pesar de que esta variación se tiene en cuenta tanto en el denominador como en el numerador de la función de coste, la interferencia final ha aumentado al aumentar el número de frecuencias.

Una planificación adecuada debe de este modo buscar una solución de compromiso que considere las consecuencias reales que sobre la red tiene el aumento teórico de la interferencia. Como se ha visto, un aumento de la interferencia (calculada de forma

TABLA IV
COMPARACIÓN DE INTERFERENCIAS EN LAS REDES 2 Y 3.

Red 2	Antig	Horm	SA	Conc	Reduc
Lin	0.433	0.165	0.161	0.145	66.36%
Cuad	0.648	0.283	0.269	0.269	58.44%

Red 3	Antig	Horm	SA	Conc	Reduc
Lin	3.035	1.466	1.452	1.437	53.63%
Cuad	3.667	1.721	1.722	1.711	53.33%

TABLA V
INTERFERENCIAS Y PARÁMETROS DE LA RED 1 CON DISTINTAS TABLAS DE ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS.

	frec	ord	gra	Gra	dens	Inter
Sin hop	1	116	30.57	49	0.2658	0
Tab	1.73	201	53.17	84	0.2659	0.013
Tab (+1)	2.46	286	75.83	119	0.2661	0.087
Tab (+2)	3.19	371	98.51	155	0.2662	0.166
Antig	3.64	423	112.54	179	0.2667	0.193

teórica) puede resultar conveniente con objeto de obtener una mayor protección frente a la propagación multicamino (gracias a los efectos del hopping). De este modo, aunque al aumentar en una unidad cada una de las casillas de la tabla II el nivel teórico de interferencia se ha multiplicado por un factor de 6, el número de frecuencias hopping habrá aumentado y asimismo la protección frente a la degradación del servicio.

Finalmente, la tabla V muestra la variación de los parámetros que describen la red al variar la tabla de asignaciones, así como el nivel de interferencias obtenido en cada uno de los procesos de asignación. Los parámetros estudiados son: el número medio de frecuencias hopping por celda, el orden del grafo resultante, el grado medio y el grado máximo de la red y también la densidad (que se calcula como el cociente entre el número de aristas del grafo y el máximo número de aristas que puede tener un grafo del mismo orden).

La red 2, compuesta por 105 celdas y 166 transmisores, ha sido inicialmente diseñada sobre un número de frecuencias hopping igual a 395. En este caso el grafo resultante tiene orden 395, grado medio 49.27 y grado máximo 114. El diseño se ha implementado con un número de frecuencias igual a 36. Finalmente, la red 3 es la mayor de las redes analizadas, disponiendo de 203 celdas y 504 transmisores y habiendo sido inicialmente diseñada con un número de frecuencias hopping igual a 1007. El grafo resultante de orden 1007 tiene grado medio 128.09 y grado máximo 257. Como se observa en las tablas I y IV la concatenación de ambos algoritmos (primero se ejecuta Simulated Annealing y a partir del mejor resultado se prosigue con Hormigas) mejora ligeramente los resultados. Asimismo, las interferencias obtenidas con cada algoritmo por separado son bastante parecidas, aunque un poco menores en el caso de Simulated Annealing.

Los resultados presentados hasta ahora ofrecen (como medida de la calidad de una red) los niveles teóricos de interferencia calculados a través de

la función de coste. El funcionamiento real de una red celular se evalúa sin embargo en función de otros parámetros (más estrechamente relacionados con el servicio de red) como por ejemplo el número de traspasos intracelda y el número de conexiones (o llamadas) interrumpidas en curso. Se ha analizado así la variación de estos parámetros en una red celular situada en la comarca del Vallés (Barcelona) comparándose para este fin una antigua asignación con dos nuevos diseños realizados según un plan fijo de frecuencias y un plan adaptado que, tal y como se ha dicho, asigna a cada celda un número de frecuencias hopping en función del tráfico cursado y del número de transmisores. En este caso y debido a las características de la red analizada, se han considerado los segundos valores recogidos en la tabla II.

El primero de los parámetros tomado como referencia de la calidad de servicio de la red es el número de traspasos intracelda, promediado en intervalos de 100 minutos. Estos traspasos se producen cuando la red detecta que en una trama y frecuencia portadora determinadas la comunicación sufre un nivel de interferencia por encima de cierto umbral, conmutando entonces a otra frecuencia portadora. Dos redes con el mismo porcentaje de traspasos intracelda pueden tener no obstante comportamientos distintos dependiendo del índice de ocupación. Así, dadas dos redes con el mismo porcentaje de traspasos, la red que soporta menos tráfico (es decir, recibe menos llamadas) tiene en promedio un número mayor de canales degradados.

De otro lado, se ha considerado como segundo parámetro de calidad el número de conexiones perdidas. Este valor también es un parámetro relativo puesto que dadas dos celdas con un mismo promedio de conexiones perdidas la calidad del canal de radio será peor en la zona en que las llamadas sean más breves en general. Debe considerarse además que las conexiones perdidas no se deben exclusivamente al nivel de interferencias del canal radio sino que dependen de otros factores como la presencia de errores en la transmisión por deficiencias del hardware y también por agotamiento de la batería de los terminales.

Las tablas VI y VII muestran los parámetros de las redes resultantes y el nivel teórico de interferencias al

TABLA VI

GRAFOS RESULTANTES DE APLICAR DISTINTOS PLANES SOBRE LA RED DEL VALLÉS.

	orden	gra	Gra	dens
Plan antiguo	957	51.10	129	0.053
Plan estático	1408	81.24	213	0.058
Plan adaptado	765	62.33	135	0.082

TABLA VII

COMPARACIÓN DE INTERFERENCIAS EN LA RED DEL VALLÉS.

Plan	Antig	Estat	Reduc	Adap	Reduc
Lin	1.7690	0.7089	59.92%	0.6045	65.82 %
Cuad	2.4303	0.9660	60.25%	0.9092	62.58 %

TABLA VIII

REDUCCIÓN DEL PORCENTAJE DE CONEXIONES PERDIDAS Y TRASPASOS INTRACELDA.

Plan	Perd	Reduc	Perd Int	Reduc
Antig	1.42%	-	0.72%	-
Estat	1.37%	3.52%	0.67%	6.94%
Adap	1.31%	7.74%	0.61%	15.27%

Plan	Trasp	Reduc
Antig	1.70	-
Estat	1.48	12.94%
Adap	1.25	26.47%

aplicar distintos planes frecuenciales sobre la misma red. Finalmente la tabla VIII recoge la traducción de las distintas asignaciones en porcentaje de traspasos intracelda y conexiones perdidas, descontando en este último caso aquellas caídas por causas ajenas a las interferencias (los traspasos se han promediado sobre intervalos de cien minutos, mientras que para las conexiones perdidas se da el porcentaje absoluto y el porcentaje que considera sólo las pérdidas debidas a interferencias). Destacan la mejora obtenida en el porcentaje de conexiones perdidas, que ha sido del 15% en el caso del plan adaptado, así como la disminución del porcentaje de traspasos intracelda, que ha superado el 26%.

VI. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han descrito y desarrollado una serie de herramientas heurísticas para el problema de asignación de frecuencias en redes celulares de telefona mvil. Con este fin se ha definido en primer lugar una función de coste y se han considerado en ella un conjunto de parámetros relacionados con la calidad de la transmisión. Esta función ha sido aplicada posteriormente sobre un algoritmo de agentes distribuidos llamado Hormigas (que a diferencia de otros programas de características parecidas, define en el curso de su funcionamiento un mapa "invisible" de información) así como sobre una versión estándar del Simulated Annealing, habiéndose alcanzado con esta combinación (aplicada sobre un conjunto heterogéneo de redes celulares reales) una reducción de los niveles de interferencia en factores de hasta un cincuenta por ciento.

Finalmente, y como resultado práctico de aplicar tanto la función de coste descrita como los algoritmos Hormigas y Simulated Annealing, se han estudiado los efectos que la disminución teórica de la interferencia (medida sobre el papel a través de la función de coste) ha tenido en parámetros reales de servicio, habiéndose comprobado tanto un incremento de la calidad de las llamadas como una considerable disminución del porcentaje de comunicaciones interrumpidas.

REFERENCIAS

- [1] J. Abril, F. Comellas, A. Cortés, J. Ozón, M. Vaquer, A multi-agent system for frequency assignment in cellular radio networks, *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 49 (No. 5), pp. 1558-1565, 2000.
- [2] S.M. Allen, D.H. Smith, S. Hurley, Lower bounding techniques for frequency assignment, *Discrete Mathematics*, vol. 197/198, pp. 41-52, 1999.

- [3] F. Comellas, J. Ozón, Graph Couloing Algorithms for Assignment Problems in Radio Networks, *Proceedings of the International Workshop on Aplications of Neural Networks to Telecommunications*, pp. 49-56, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1995.
- [4] D. Costa, A. Hertz, Ants can colour graphs, *Journal of the Operational Research Society*, vol.48, pp. 295-305, 1997.
- [5] J. Ozón, Contribución al coloreado de grafos y las redes pequeño-mundo, Tesis Doctoral, Programa de Doctorado de Matemática Aplicada, Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- [6] D.H. Smith, S. Hurley, Bounds for the frequency assignment problem, *Discrete Mathematics*, vol. 167/168, pp. 571-582, 1997.