Asignación Automatizada de Frecuencias Fijas en una Red GSM Mediante un Algoritmo de Optimización

José Bermeo Andrade [(1)], Juan P. Verdezoto Celi [(1)], Carlos Monsalve Arteaga [(2)]
Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones [(1)], MSc. en Ing. en Eléctrica e Ing. en Computación [(2)]
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Campus "Gustavo Galindo V.", Km 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador
jbermeo@fiec.espol.edu.ec, pverdezo@espol.edu.ec, monsalve@espol.edu.ec

Resumen

En este documento se propone una metodología automatizada para la asignación de frecuencias fijas en una red celular GSM, con el objetivo de mejorar la calidad del enlace de radio en las capas BCCH y Regular, reduciendo la interferencia entre celdas provocada por el reuso de frecuencias. La metodología propuesta consiste en la implementación del algoritmo de un árbol de búsqueda aproximadamente no determinístico (ANTS) para crear una macro en un libro de Microsoft Excel que realice la asignación de frecuencias fijas a cada transceptor de la red que así lo requiera. La herramienta toma como variables de entrada principales la configuración física de la red, e información acerca de los niveles de interferencia entre celdas, con las cuales puede generar planes óptimos de frecuencias fijas. Los planes que genere la herramienta implementada serán evaluados con la ayuda de un simulador de redes GSM/EDGE, el cual permitirá obtener los indicadores de desempeño de los mismos. Con fines comparativos, se elaborarán planes de frecuencias mediante un método tradicional de asignación de frecuencias. Al comparar el método tradicional con el método automatizado desarrollado en este trabajo, se demostrará que este último logra ganancias en términos de calidad y capacidad.

Palabras Claves: *GSM, Asignación de frecuencias fijas, plan de frecuencias, Algoritmo ANTS, BCCH, capa regular.*

Abstract

This document shows an automated methodology to solve the fixed frequency assignment problem in a GSM cellular network. The objective of this methodology is to improve the radio link quality in the BCCH and regular layers, reducing in this way the interference between cells due to frequency reuse. The developed methodology consists on the implementation of the Approximate Non-deterministic Tree Search (ANTS) algorithm, to create a Microsoft Excel macro, which makes the fixed frequency assignment to each transceiver in the network that requires it. This tool takes as main input variables the network physical configuration and information about interference levels between cells. With those variables, the tool is able to generate fixed frequency optimal plans. Plans generated by the implemented tool will be evaluated with the help of a GSM/EDGE network simulator, which allows us to obtain the performance indicators for these plans. In order to make a comparison, frequency plans will be made by means of traditional frequency assignment methods. The comparison between traditional and automated frequency assignment will demonstrate the automated frequency assignment get capacity and quality gains.

1. Introducción

El crecimiento acelerado de las comunicaciones móviles ha dado como resultado una cobertura extensa de servicios celulares en áreas pobladas. Esto ha conducido a que la telefonía celular se haya convertido en la tecnología dominante de comunicaciones inalámbricas bidireccionales en la actualidad, siendo GSM el estándar de telefonía móvil empleado por la mayoría de operadores en todo el mundo.

En una red GSM, una tarea crucial para su desempeño es el proceso de asignación de frecuencias, denominado también planeamiento de frecuencias, que consiste en proveer a cada transceptor de la red con el número requerido de frecuencias, asegurándose a la vez de minimizar la interferencia entre las celdas.

El planeamiento de frecuencias en una red celular es un tema que ha sido estudiado ampliamente en los últimos años, en parte debido a las repercusiones económicas que tiene para las compañías operadoras de telefonía móvil y también debido a que cada operador se enfoca en obtener el máximo rendimiento de su red con el espectro del que dispone. Uno de los principales costos que una operadora celular debe afrontar es el pago de la licencia para el uso del espectro radioeléctrico. De este modo, la reducción del número de frecuencias en el tendido de una red puede suponer un ahorro de inversión considerable. Por otro lado, asumiendo que se tiene un espectro fijo, la capacidad de tráfico de una red puede ser aumentada si se realiza una reutilización óptima de las frecuencias disponibles.

Actualmente existen herramientas comerciales de planeamiento de red que sirven para asignar frecuencias de manera óptima; sin embargo, requieren de personal con cierto grado de experiencia en su operación. Además tales herramientas suelen emplear tiempos de procesamiento extensos, elevando así el costo del proceso. Es por esta razón que en este trabajo se desarrolla una alternativa para la asignación automatizada de frecuencias fijas en una red GSM. Se propone elaborar una herramienta que sea sencilla de usar y que obtenga resultados en tiempos de procesamiento bastante razonables. Para lograr tal fin, se implementará un algoritmo de optimización denominado ANTS (Algoritmo de Árbol de Búsqueda Aproximadamente No Determinística) en una macro dentro de un libro de Excel, la cual tomará como variables de entrada principales la configuración física de la red e información acerca de los niveles de interferencia entre celdas.

En la próxima sección se revisan conceptos básicos acerca de redes celulares GSM y su distribución del espectro, en la sección 3 se describe como se implementó el algoritmo ANTS para realizar la asignación automatizada de frecuencias, en la sección 4 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para evaluar el desempeño de los planes de frecuencia obtenidos con la herramienta, y por último se incluyen las conclusiones y referencias bibliográficas.

2. Redes celulares GSM

Una red celular se forma al dividir el territorio, al que un operador pretende dar servicio, en áreas más pequeñas llamadas células o celdas, cada una de las cuales es atendida por una Estación Base Transmisora-Receptora (ver Figura 1). Es posible instalar una o más Estaciones Base en el mismo espacio físico, al cual se denomina sitio. Cada Estación Base está compuesta de uno o más transceptores, entonces una celda corresponde a un área cubierta por los transceptores de una Estación Base. El tamaño de la celda depende de la potencia de transmisión de los transceptores, banda de frecuencia utilizada, altura, posición y tipo de la antena, además de la topografía del área [1].

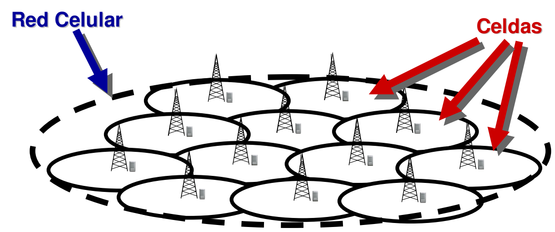

Figura 1. Esquema de una red celular

GSM es un estándar de telefonía móvil para redes celulares usado por la mayoría de operadores en todo el mundo. Es un sistema digital, abierto, no propietario y evolutivo. Fue desarrollado en un inicio por el Groupe Special Mobile con el propósito de crear un sistema de telefonía móvil que se pudiera usar en toda Europa [2]. Esta tecnología provee el servicio móvil de voz y datos, pudiendo lograr una transferencia de datos de hasta 9.6 kbits/s. Para los últimos días del 2006, la cuarta parte de la población mundial era parte de este sistema, lo que corresponde al 80% del mercado de telefonía móvil [3].

Una red GSM está compuesta por tres entidades funcionales: la Estación Móvil (MS), el Subsistema de Estación Base (BSS) y el Subsistema de Conmutación (NSS), tal como se muestra en la Figura 2 [4].

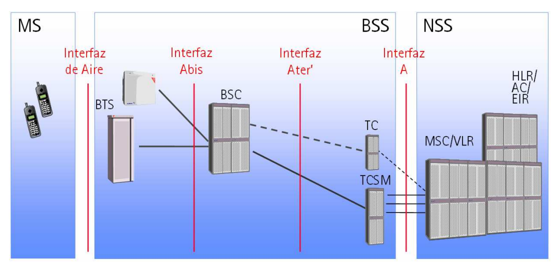

Figura 2. Arquitectura de una red GSM

2.1. Distribución del espectro en capas

Uno de los elementos más importantes del Subsistema de Estación Base es el transceptor, el cual se encarga tanto de la transmisión como de la recepción, usando ocho canales de tráfico de alta velocidad. A cada uno de estos ocho canales físicos se le asocia canales lógicos, tales como: Canal de Control Común de Difusión (BCCH), Canal de Control Especializado Autónomo (SDCCH), Canales de Datos, Canales de Tráfico (TCH). De acuerdo al tipo de canales lógicos que aloje un transceptor queda definido o en la capa BCCH o en la capa de saltos.

La capa de BCCH está conformada por todos los transceptores que alojan los canales lógicos BCCH, los cuales generalmente se encuentran ubicados en la primera ranura de tiempo. La particularidad de estos transceptores es que trabajan con frecuencias fijas, es decir, mantienen su frecuencia constante a lo largo del tiempo.

La capa de saltos está conformada por los transceptores que no son parte de la capa BCCH. Sus canales manejan principalmente tráfico de voz, aunque también pueden manejar señalización y datos. Las frecuencias de estos transceptores utilizan la técnica de espectro ensanchado conocida como Saltos de Frecuencia. En la actualidad, las redes celulares están empezando a utilizar una nueva técnica para los transceptores de esta capa, denominada DFCA (Asignación Dinámica de Frecuencias de Canales), la cual consiste en un software de asignación dinámica de canales de radio óptimos para cada nueva conexión. Hace uso de estimaciones de interferencia derivadas de los Reportes de Mediciones que realiza la terminal móvil en combinación con información de uso de frecuencias y ranuras de tiempo [5].

Bajo el esquema DFCA, se hace necesaria la creación de una nueva capa, conocida como Capa Regular. Esta capa se crea, cuando los canales de señalización y de datos que se encuentran en el transceptor de BCCH no pueden alojar todo ese tipo de tráfico. En redes sin DFCA, la capa de saltos sería la encargada de ayudar a transportar este tipo de carga, pero como este algoritmo restringe la capa de saltos a sólo soportar canales de voz, entonces se hace necesario crear una nueva capa [5].

En la Figura 3 se puede observar claramente la disposición de los canales entre las capas y además se indica también el tipo de tráfico que soportan.

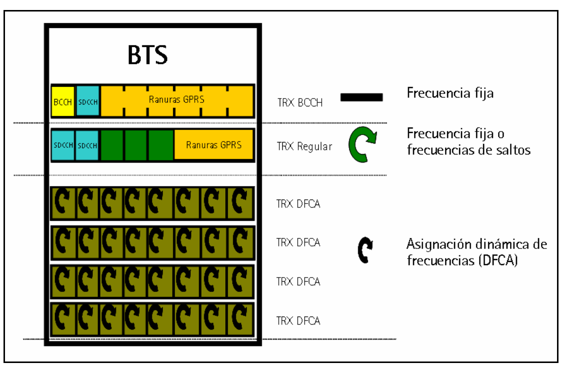

Figura 3. Configuración de los transceptores en una Estación Base

3. Metodología de asignación automatizada de frecuencias

La metodología para la asignación de frecuencias fijas en una red GSM propuesta en este trabajo, consiste en el empleo del algoritmo de optimización combinatoria denominado ANTS (Arbol de Búsqueda Aproximadamente No Determinística) [6]. Este algoritmo fue diseñado originalmente para el problema de coloreado de grafos. Sin embargo, el uso de este algoritmo puede generalizarse para cualquier clase de problema de asignación con restricciones, y más aun para cualquier tipo de problemas combinatorios.

En la asignación de frecuencias mediante el uso de algoritmos de optimización combinatoria, en primer lugar se debe considerar el hecho de que una red celular puede modelarse matemáticamente mediante un grafo. Es decir, un conjunto de nodos unidos entre sí por aristas. Cada arista puede tener asociado un peso o etiqueta. Los nodos del grafo representan, en el contexto de la telefonía celular, las celdas o los transceptores de la red (en el caso de que cada celda disponga de más de un transceptor). Mientras que los pesos o aristas indican la separación que deben guardar, por motivos de interferencias, las frecuencias de los transceptores que conectan dicha arista.

Desde este punto de vista, el problema de asignación de frecuencias puede ser tratado como un problema de coloreado de grafos, el cual consiste en asignar colores (esto es, frecuencias) a los distintos nodos de un grafo. Esta asignación debe ser tal que la separación entre los colores de cualquier par de nodos, definida como el valor absoluto de su diferencia, es al menos el peso de la arista que los une. [6].

Un problema de asignación de frecuencias puede caracterizarse a través de tres elementos: una matriz de restricciones, un vector de requerimientos y un plan de frecuencias fijas. Cada elemento de la matriz de restricciones indica la separación que debe existir entre las frecuencias asignadas a la celda fila y a la celda columna. Esta separación es representada por un número natural con valores 0, 1, 2, etc. El vector de requerimientos indica el número de frecuencias requerido en cada celda. Un plan de frecuencias fijas consiste de un conjunto predeterminado de celdas cuyas frecuencias no pueden ser modificadas dentro del grupo total de celdas para las que se va a realizar la asignación de frecuencias.

3.1. Algoritmo ANTS

El algoritmo ANTS es un algoritmo basado en la idea de búsqueda paralela. Inicialmente el algoritmo distribuye aleatoriamente un cierto número de agentes llamados “hormigas” a lo largo de los nodos del grafo. Luego, cada una de las hormigas modifica el coloreado del grafo conforme a un criterio de optimización local. En cada iteración, cada una de las hormigas se desplaza desde el nodo actual al nodo adyacente que incumple más restricciones (ver Figura 4). Una vez desplazada, la hormiga sustituye la antigua frecuencia, o color, del nuevo nodo por una nueva frecuencia que minimiza el número de violaciones cometidas. Este número de violaciones es cuantificado mediante una función de costos, la cual tomará un valor más alto mientras mayor sea el número de violaciones cometidas.

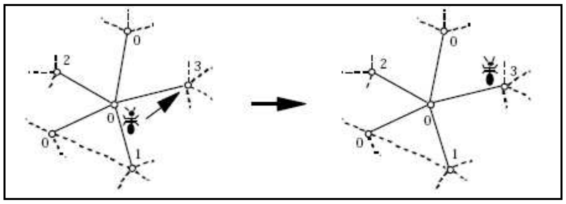

Figura 4. Movimiento de una hormiga en el coloreado de un grafo

En la Figura 5 se presenta el pseudocódigo del algoritmo ANTS. Es importante observar que el movimiento de una hormiga al peor nodo adyacente, y el cambio de color del nodo al mejor posible, son acciones que están determinadas por las probabilidades: P_{cambio} y $P_{movimiento}$ respectivamente. Este carácter probabilístico permite al algoritmo escapar de mínimos locales y obtener cotas próximas al mínimo absoluto [4].

1. Inicialización
Situar cada hormiga en un nodo elegido al azar
Colorear todos los nodos al azar
Para todas las hormigas
Inicializar la *función_de_coste_local*
Final para
Inicializar la *función_de_coste_global*
mejor_coste = función_de_coste_global

2. Asignación
Mientras (*mejor_coste* > 0)
Para todas las hormigas
Si (*random* < P_{cambio})
Ir al peor nodo adyacente
En otro caso
Ir aleatoriamente a un nodo adyacente
Final si
Si (*random* < $P_{movimiento}$)
Cambiar el color del nodo al mejor posible
En otro caso
Cambiar el color del nodo a uno aleatorio
Final si
Para el nodo y sus adyacentes
Actualizar la *función_de_coste_local*
Actualizar la *función_de_coste_global*
Final para
Si (*función_de_coste_global* < *mejor_coste*)
mejor_coste = función_de_coste_global
Final si
Final para
Final mientras

Figura 5. Pseudocódigo del Algoritmo ANTS

3.2. Implementación de la solución

La metodología que se llevó a cabo consistió en hacer uso del algoritmo ANTS descrito en la sección anterior, a fin de poder implementar una macro dentro de un libro de Microsoft Excel para realizar la asignación de frecuencias. El algoritmo toma como variables de entrada los siguientes parámetros: configuración física de las celdas en la red, tanto de aquellas que van a participar en la asignación, como aquellas que van a permanecer sin cambios en sus frecuencias, el tráfico promedio que maneja cada una de ellas, la matriz de probabilidades de interferencia co-canal entre todas las celdas, la lista de celdas adyacentes a cada celda, el número de frecuencias disponibles y el número de iteraciones a procesar por el algoritmo.

La macro toma la información de las variables de entrada al algoritmo en las hojas dentro del libro de Excel. La razón por la que se implementó el algoritmo en un libro de Microsoft Excel fue la de lograr sencillez de uso en comparación con otras herramientas que sirven para el mismo fin. Además, este macro tiene la ventaja de mostrar resultados en tiempos de procesamiento relativamente cortos.

El algoritmo servirá específicamente para elaborar planes de frecuencias fijas, los cuales incluirían solamente a la capa de BCCH y a la Regular, que fueron descritas en la sección 2.1. El uso que se le dará a la herramienta es la de elaborar planes de frecuencia o también la de asignar nuevas frecuencias a planes ya existentes en una red.

En el algoritmo ANTS, al igual que la mayoría de algoritmos de optimización combinatoria, se plantea una función de costos y un conjunto de restricciones. En el problema de asignación de frecuencias fijas las restricciones vienen a ser las separaciones mínimas que deben tener las frecuencias que vayan a ser asignadas en cada una de las celdas de la red. La función de costos cuantifica, en un número real, todas las restricciones no cumplidas para cierto plan de frecuencias dado. Así, el valor de la función de costos depende directamente del plan de frecuencias utilizado en la red. El objetivo que se persigue con la implementación del algoritmo es encontrar un plan de frecuencias que logre minimizar el valor de la función de costos. Al minimizar la función de costos lo que se logra es obtener un plan de frecuencias que elimine, o al menos reduzca, la interferencia co-canal y de canal adyacente que puedan causarse cualquier par de celdas en la red.

3.2.1. Matriz de Interferencia. A fin de poder asignar frecuencias correctamente, se requiere determinar con exactitud la interacción entre las celdas de una red en términos de interferencia. Las mediciones de los niveles de interferencia entre celdas se conocen como Matriz de Interferencia o Matriz de Dependencia Inter-celda. El elemento x_{ij} en la matriz es un indicador de la interferencia producida por la celda j en móviles conectados a la celda i, asumiendo que ambos usan la misma frecuencia.

La Matriz de Interferencia que se usó en el desarrollo de este proyecto está basada en las mediciones reportadas por los teléfonos móviles. Este método hace uso de las mediciones de los niveles de señal que reportan las estaciones móviles continuamente a la red mientras están en modo dedicado o activo. Las mediciones reportadas son enviadas en intervalos regulares de 480ms, las cuales contienen el nivel de señal de la celda servidora y de hasta seis celdas vecinas cuya información de BCCH-BSIC[1] pudo ser decodificada. En base a esta información, es posible crear una Matriz de Interferencia más precisa que la que se podría obtener usando herramientas de predicción.

En forma práctica, la Matriz de Interferencia tal y como se la ingresa al algoritmo de asignación de frecuencias, está compuesta por un arreglo de números, en donde el elemento x_{ij} de la matriz es la probabilidad de que la relación de portadora a interferencia sea menor a 12dB, en donde el índice i representa a la celda servidora y el índice j representa a la celda interferente. Siendo así, un valor del 100% representa que la celda j interfiere en gran medida a la celda i, mientras que un valor de 0% indica que la celda j no interfiere a la celda i en lo absoluto

En base a la Matriz de Interferencia, es posible inferir la mínima separación en frecuencias que se necesita entre cualquier par de celdas a fin de evitar la interferencia. Con esto, surge la necesidad de definir umbrales para los valores de la matriz, con el objetivo de decidir que separación de frecuencias deben de tener cualquier par de celdas. Tales umbrales se detallan en la Tabla 1. Una vez definidos esos umbrales es posible construir la matriz de separaciones de frecuencias.

Tabla 1. Relación entre probabilidad de interferencia y mínima separación de frecuencias

Intervalo	Separación
$PI < 1\%$	0
$1\% \leq PI < 13\%$	1
$PI \geq 13\%$	2

3.2.2. Función de Costos. El cálculo de la función de costos es una parte muy importante dentro del algoritmo, ya que sirve para decidir si se efectúan o no los cambios de frecuencia que realiza el algoritmo continuamente en cada iteración.

La función de costos en esencia es una forma de cuantificar, en un número real, las restricciones no cumplidas durante la asignación de frecuencias. Mientras mayor sea el número de restricciones no cumplidas, mayor será el costo. De esta forma, se penaliza a cada transceptor solamente cuando la frecuencia que tenga asignada haga que incumpla con las separaciones de frecuencias especificadas en la matriz respectiva, los valores de penalización se muestran en la Tabla 2.

El valor de $PI'_{A\rightarrow B}$ es la probabilidad ponderada de que un transceptor perteneciente a la celda A interfiera a uno perteneciente a la celda B.

[1] *BSIC*: Código identificador para una Estación Base, compuesto de dos dígitos.

Tabla 2. Tabla de penalizaciones

Mínima separación requerida	Separación existente	Penalización
2	2 o mayor	0
	1	$2\times PI'_{A\rightarrow B}$
	0	$3\times PI'_{A\rightarrow B}$
1	1 o mayor	0
	0	$2\times PI'_{A\rightarrow B}$

El valor de $PI'_{A\rightarrow B}$ se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$PI'_{A\rightarrow B} = PI_{A\rightarrow B} \times FactorTrf_A \qquad (1)$$

en donde:

$PI'_{A\rightarrow B}$ es la probabilidad ponderada de que la celda A interfiera a la celda B.

$PI_{A\rightarrow B}$ es la probabilidad de que la celda A interfiera a la celda B.

$FactorTrf_A$ es el factor de ponderación de la interferencia que causa A.

El factor de ponderación de tráfico para la celda A se calcula como indica la siguiente ecuación:

$$FactorTrf_A = \frac{Trf_A}{Trf_{MAX}} \qquad (2)$$

en donde:

Trf_A es el tráfico promedio que cursa la celda A.

Trf_{MAX} es el tráfico promedio máximo de entre todas las celdas.

Para encontrar el valor de la función de costos en primer lugar se realizan los cálculos de las penalizaciones por cada transceptor. El costo local en el transceptor A es igual a la suma de productos entre la probabilidad de que un transceptor cualquiera de la red interfiera al transceptor A, por su constante de penalización que depende de las separaciones de frecuencias estos mantengan. Este producto se realiza para todos los transceptores de la red. La fórmula de la función de costos local es la siguiente:

$$\text{Costo Local} = \sum_{i=1}^{N, i\neq j} k.PI'_{i\rightarrow A} \qquad (3)$$

en donde:

k es la constante de penalización.

$PI'_{i\rightarrow A}$ es la probabilidad ponderada de que el transceptor i interfiera al transceptor A.

N es el número total de transceptores en la red.
i representa a cada transceptor de la red.

La función de costos total o global viene a ser la sumatoria de los costos locales para todos los transceptores de la red. Su expresión esta dada por:

$$\text{Costo Total} = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{N, i \neq j} k.PI'_{i \rightarrow j} \tag{4}$$

La función de costos es la guía para que el algoritmo logre obtener un buen plan de frecuencias, ya que depende en lo absoluto del mismo. El caso ideal en el que todas las restricciones en separaciones de frecuencias son cumplidas, generaría un valor de cero en la función de costos. Esto no siempre se podrá lograr, pero siempre el algoritmo tratará de obtener el menor valor de la misma lo que resulta en la obtención de un plan de frecuencias que reduzca al máximo la interferencia entre las celdas. Todas las ecuaciones descritas anteriormente, se las obtuvo durante el análisis del problema.

4. Evaluación de Resultados

Antes de explicar la forma de evaluación de los resultados, es preciso introducir los conceptos de Ganancia en Capacidad (GiC) y en Calidad (GiQ) que se pueden obtener de una gráfica de desempeño de configuraciones de Redes GSM, la misma que relaciona un índice de calidad en función de la carga efectiva de frecuencia. Estos conceptos se los puede apreciar en la siguiente figura:

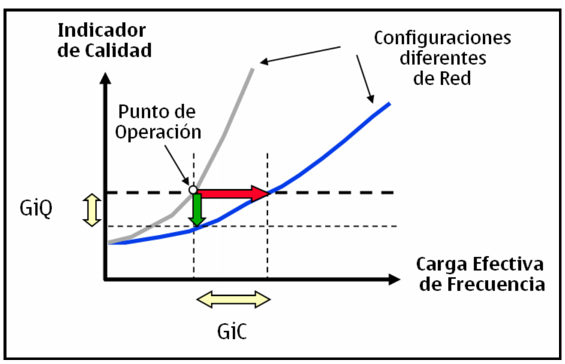

Figura 6. Ganancia en Calidad y en Capacidad.

Suponiendo que se tenga dos configuraciones de red, una de referencia y otra a ser evaluada, como se muestra en la Figura 6. Se define como ganancia en capacidad al porcentaje de carga de tráfico adicional que para un mismo nivel de calidad la configuración a ser evaluada logra transportar en comparación a la de referencia. En tanto que la Ganancia en Calidad es el porcentaje que para una determinada carga de tráfico la configuración a ser evaluada logra mejorar el rendimiento de la Red en comparación con la configuración de referencia.

La forma de evaluación de resultados es a través de la obtención de los porcentajes de Ganancias en Calidad y en Capacidad entre dos configuraciones. La primera de ellas, que se toma como referencia, es obtenida a través de una técnica tradicional de asignación de frecuencias que es la de Patrones de Reuso. La segunda es la obtenida con la metodología que se propone en este documento. El índice de calidad usado en las gráficas es la Tasa de Llamadas Caídas, que representa al porcentaje de conexiones que repentinamente se interrumpen y se pierden. Generalmente en redes con un buen rendimiento este indicador oscila entre 1 y 2% [7]. Se usó un simulador de Redes GSM para obtener las estadísticas de ambas configuraciones.

Además, en este documento se analizan dos escenarios. El primero de ellos se trata de un plan de frecuencias para la Capa BCCH, usando 12 canales de frecuencia distribuidos entre 112 transceptores de un esquema de red real. Luego de la simulación se obtuvo la siguiente gráfica de desempeño en términos de Tasa de Llamadas Caídas.

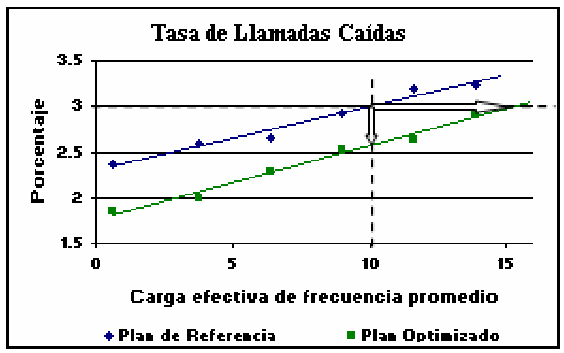

Figura 7. Gráfica de Tasas de Llamadas caídas para el primer escenario.

En la Figura 7 se logra apreciar que el método de asignación de frecuencias propuesto crea un mejor plan, denotado por la ganancia en calidad y en capacidad que se obtiene. A continuación se calculan esas ganancias:

$$\text{G. Capacidad} = 100 \times \frac{15.18 - 10.05}{10.05} = 51.04\%$$

$$\text{G. Calidad} = 100 \times \frac{3.00 - 2.58}{3.00} = 14.00\%$$

En un segundo escenario, se crea un plan de frecuencias ya no solamente para la Capa BCCH, sino también para la Capa Regular. Se hace uso de 19 frecuencias distribuidas entre 132 transceptores. Posterior a la simulación de la configuración de referencia y a la obtenida con la metodología, se obtuvo la siguiente gráfica de desempeño en términos de Tasa de Llamadas Caídas:

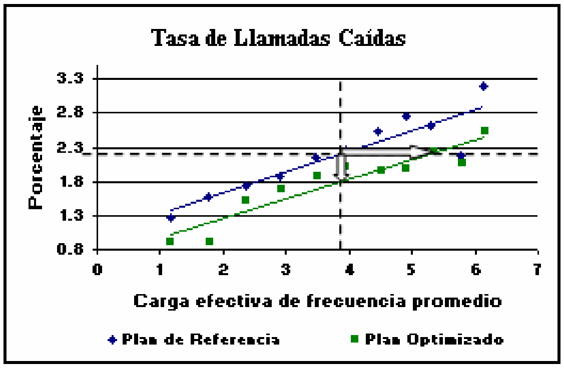

Figura 8. Gráfica de Tasas de Llamadas caídas para el segundo escenario.

En la Figura 8 se puede notar también que el método propuesto hace una mejor asignación de frecuencias en comparación a la técnica tradicional, se obtienen ganancias en calidad y en capacidad, cuyos porcentajes son los siguientes:

$$\text{G. Capacidad} = 100 \times \frac{5.29 - 3.86}{3.86} = 37.05\%$$

$$\text{G. Calidad} = 100 \times \frac{2.20 - 1.79}{2.20} = 18.64\%$$

Ambos escenarios demuestran que la Matriz de Interferencia entre celdas es una buena referencia cuando se intenta asignar frecuencias fijas en una red GSM.

5. Conclusiones

Según la evaluación de resultados que se hace en la sección 4, podemos destacar más aún la importancia de contar con un método automatizado para la asignación de frecuencias fijas en la Red. Básicamente por dos razones, la primera es la facilidad con la que se puede obtener un buen plan, y la segunda es que nos permite reducir los niveles de interferencia y por ende garantizar un mejor rendimiento de la Red.

El uso de la Matriz de Interferencia como variable de entrada al algoritmo es crucial a la hora de determinar los mejores arreglos de frecuencias para minimizar la probabilidad de interferencia entre transceptores. Esta variable implícitamente, nos da una idea real de cómo es el comportamiento de la Red; dicho comportamiento generalmente no concuerda con la geometría de un mapa de localización de los transceptores, por lo que a simple vista diera la impresión de que un plan que toma en cuenta esta Matriz incluye ciertas violaciones en términos de separación de frecuencia. Sin embargo, al probar la efectividad de los planes con una aproximación a la realidad, como lo es una simulación, es posible obtener ganancias, tal como se vio en a sección anterior. Para los escenarios evaluados, se obtuvo una ganancia de 51.04% en capacidad y 14.00% en calidad para el caso de 12 frecuencias; mientras que para el escenario de 19 frecuencias en donde se elaboró un plan de frecuencias para las capas BCCH y Regular se obtuvo una ganancia en capacidad de 37.05% y en capacidad del 18.64%.

La metodología desarrollada permite encontrar un buen plan de frecuencias fijas, utilizando una aplicación sencilla en uso, con tiempos de respuesta cortos y que se adapta a los recursos disponibles para el planeamiento. Además, ciertos parámetros del algoritmo pueden ser calculados por la herramienta o a su vez se deja a libertad de quién use este método para que los ajuste de acuerdo a su conveniencia.

Este algoritmo es flexible, por cuanto puede crear planes de frecuencias fijas asignando más de una frecuencia por celda. Esta ventaja hace posible, que esta herramienta se la pueda usar también en funcionalidades nuevas de GSM, como lo es DFCA.

Se podría seguir trabajando sobre este método, dándole algunas otras funcionalidades, o cambiando de cierta manera su estructura para que se adapte a nuevos esquemas que se creen para GSM. Por ejemplo, se pudiera añadir una nueva entrada al algoritmo, que consistiría en las estadísticas por celda del plan de referencia, para dar preferencia a las zonas con un bajo nivel de calidad y que la optimización empiece desde ahí. Inclusive se podría correr algunas veces el algoritmo ingresando estadísticas nuevas por celda cada vez que se crea un plan óptimo.

El algoritmo de optimización ANTS, puede ser usado en otras aplicaciones dentro del mundo de las Telecomunicaciones, ya que permite, en tiempos de respuesta cortos, encontrar una solución efectiva a un problema presentado, basta adaptar el problema bajo este esquema y ponerlo a trabajar.

6. Referencias

[1] Mare Renzo, "Introducción a la Telefonía Celular," *Apuntes de Tecnología de Banda Angosta,* Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Rosario, pp. 6-9, Año 2003.

[2] Enciclopedia Libre Wikipedia, "GSM," <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM>, Año 2000.

[3] GSM Association, "The GSM Association Brochure 2007," <http://www.gsmworld.com/documents/gsm_brochure.pdf>, pp. 6, Año 2007.

[4] Nokia, "GSM SYSTRA: Training Material," en *Nokia Telecommunications documentation*, pp. 14-15, 123, 163, Año 1998.
[5] Nokia, "Dynamic Frequency and Channel Allocation in BSC", en *Nokia Telecommunications documentation*, pp 11-12, 17-18, Año 2005.
[6] Comellas Francesc y Ozón Javier, "Sistemas Multiagente para la asignación de frecuencias en redes celulares," en *Departamento de Matemática Aplicada y Telemática, Universidad Politécnica de Cataluña*, pp. 1-5, Año 2004.
[7] Halonen Timo, Romero Javier, Melero Juan, "GSM, GPRS and EDGE performance evolution towards 3G/UMTS," 2nd Edition, John Wiley and Sons Ltd, pp 164, Año 2003.