

# Asignación de unidades de banda base en redes de acceso radio centralizadas por teoría de grafos

Matías Toril Genovés, Carolina Gijón Martín, Salvador Luna Ramírez, Mariano Fernández Navarro  
{mtoril, cgm, sluna, mariano}@ic.uma.es  
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, 29010, Málaga.

**Resumen**—In this work, several methods are proposed for defining the best assignment of remote radio heads (RRHs) to baseband processing units (BBUs) in a centralized radio access network comprising macrocellular base stations and indoor small cells. For this purpose, the assignment process is formulated as a graph partitioning problem, which is then solved by heuristic algorithms. The solution methods considered here include state-of-the-art graph partitioning approaches, namely multilevel refinement or multistart schemes. Performance assessment is carried out with a radio network planning tool by checking interference statistics obtained with the assignment from each method in a real Long Term Evolution (LTE) heterogeneous network scenario. Results shown that, in this particular problem, adaptive multistart approaches outperform other well-known classical approaches.

## I. INTRODUCCIÓN

Las futuras redes móviles 5G aplicarán diferentes técnicas para agilizar la puesta en marcha de nuevos servicios. Entre estas técnicas se encuentran la densificación de la red, la inclusión de nuevos tipos de nodos y la virtualización de funciones de red. La combinación de estas técnicas ha permitido desarrollar una nueva arquitectura de red, conocida como red radio en la nube (*Cloud RAN*, C-RAN), caracterizada por la agrupación de las funciones de procesado en banda base de todas las estaciones base en un mismo emplazamiento [1].

Las ventajas de C-RAN son: a) la eficiencia para afrontar la densificación de la red, al reducir los costes de inversión/operación y el tiempo de despliegue por la compartición de infraestructura, y b) la facilidad para implementar mecanismos de coordinación entre celdas por la centralización de funciones (p. ej., agregación de portadoras - CA, transmisión multipunto - CoMP, control de interferencia intercelda - ICIC) [2]. Entre sus retos pendientes está el agrupamiento óptimo de unidades de procesado en banda base (*BaseBand Units*, BBUs) en grupos (*BBU pools*), que dan servicio a un conjunto de cabezales remotos (*Remote Radio Heads*, RRHs). En la asignación de RRHs a grupos de BBUs, debe asegurarse que RRHs estrechamente ligadas (p. ej., por proximidad) se asignan al mismo grupo de BBUs para reducir el intercambio de señalización, a la vez que no se supera el número máximo de RRHs por grupo de BBUs. Para resolver este problema de optimización combinatoria, se han propuesto algoritmos heurísticos que aprovechan la información de mapas [3] o estadísticas de rendimiento de la red (p. ej., traspasos, niveles de interferencia...) [4]. Sin embargo, ningún estudio ha planteado técnicas avanzadas de partición de grafos, que vienen aplicándose en otros problemas de estructuración de la red celular (p. ej., asignación de celdas a controladores de paquetes, controladores de estación base o áreas de localización). Además, las funciones objetivo que vienen guiando

el agrupamiento son excesivamente simples (p. ej., suma de traspasos entre grupos de BBUs), de forma que no reflejan el impacto de los mecanismos de coordinación sobre el rendimiento de la red (p. ej., calidad de señal).

En este trabajo, se proponen diversos métodos para definir la mejor asignación de RRHs a grupos de BBUs en escenarios de red heterogénea, donde se combinan macroceldas con celdas pequeñas para la provisión de capacidad en entornos urbanos. El problema de asignación se formula como un problema de partición de grafos, que se resuelve con algoritmos heurísticos inspirados en la teoría de grafos. Los métodos considerados abarcan los principales algoritmos de partición de grafos descritos en la bibliografía. Los algoritmos se comparan evaluando su comportamiento en un escenario real de red LTE heterogénea. A diferencia de estudios anteriores [3] [4], la evaluación combina métricas de grafos y métricas relacionadas con la interferencia del sistema, obtenidas con una herramienta de planificación radio. El resto del artículo se estructura de la siguiente forma. La sección II formula el problema mediante teoría de grafos. La sección III revisa los algoritmos de partición de grafos considerados. La sección IV presenta las pruebas de los métodos en un escenario real y la sección V presenta las conclusiones del trabajo.

## II. FORMULACIÓN

El área de red planificada puede modelarse con un grafo pesado dirigido,  $G = (V, E)$ , cuyos vértices,  $V$ , representan las celdas (RRHs) y cuyas aristas,  $E$ , representan las relaciones de adyacencia entre celdas.

El peso de una arista,  $\gamma_{ij}$ , describe las relaciones de interferencia entre cada pareja de celdas. Como en otros estudios, esta relación se cuantifica a partir de la matriz de interferencia del sistema, que refleja la calidad de señal (medida en términos de relación señal a interferencia más ruido, SINR, o su inversa, la relación interferencia más ruido a señal, INSR) de los usuarios de la celda  $i$  debida solo a la interferencia de la celda  $j$ , suponiendo que la probabilidad de colisión en la interfaz radio es 1 (caso peor de que la celda interferente esté cargada al 100%). En este trabajo, se utilizan alternativamente dos matrices de interferencia, según el proceso de agregación de usuarios en la celda interferida  $i$ , origen de la adyacencia. La opción por defecto considera la INSR media de los usuarios de la celda  $i$  por la interferencia de la celda  $j$ , como reflejo de la calidad de señal promedio en la celda interferida. Como alternativa, se considera el percentil del 5% de la distribución de INSR de los usuarios de la celda  $i$  causada por la interferencia de la celda  $j$ , como reflejo de la calidad de señal en borde de celda. Por convenio, todos los valores de INSR se expresan en unidades naturales (veces). Si

se asume que la celda servidora es siempre la de mayor nivel de señal, se cumple que  $\text{INSR} \in [0, 1]$  (i.e.,  $\gamma_{ij} \in [0, 1]$ ).

Por su parte, el peso de un vértice,  $\omega_i$ , representa la contribución de la celda a la carga del grupo de BBUs. La capacidad de un grupo de BBUs viene determinado por el número máximo de puertos de entrada. Según el fabricante, las macroceldas requieren 1 puerto y las celdas pequeñas 1/3 de puerto, de forma que  $\omega_i = 1$  para macroceldas y  $\omega_i = 1/3$  para celdas pequeñas.

La partición del grafo, realizada asignando los vértices a un número de subdominios  $k$ ,  $V_1, V_2, \dots, V_k$ , refleja la asignación de RRHs a grupos de BBUs (plan de BBUs). Dicha partición define un conjunto de aristas que unen vértices asignados a diferentes subdominios,  $\delta(V_1, \dots, V_k)$ , denominado *corte de aristas*. Este subconjunto de aristas está formado por las parejas de celdas vecinas que no pueden coordinarse entre sí (es decir, sin ICIC), al pertenecer a distintos grupos de BBUs. En consecuencia, la suma de pesos de estas aristas cuantifica los problemas de calidad de señal que ocasiona la falta de coordinación. A partir de esta observación, el problema de la asignación de RRHs a grupos de BBUs puede formularse como

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{(i,j) \in \delta(V_1, \dots, V_k)} \gamma_{ij} \quad (1)$$

$$\text{sujeto a} \quad \|V_n\| = \sum_{i \in V_n} \omega_i \leq B_{aw}, \quad \forall n = 1 : k. \quad (2)$$

La ecuación (1) refleja el objetivo de minimizar los problemas de calidad de señal causados por la interferencia entre celdas vecinas no coordinadas, mientras (2) refleja la restricción de capacidad del grupo de BBUs por el número máximo de puertos. En este trabajo, se asume un modelo de BBU con 6 puertos, por lo que  $B_{aw} = 6$ . Las variables de decisión son la pertenencia (o no pertenencia) de cada celda a los distintos grupos de BBUs. Nótese que, a diferencia del problema clásico de partición de grafos, el número de subdominios,  $k$ , no está prefijado. Se intuye que las mejores soluciones suelen tener un número menor de subdominios, porque así se consigue que los grupos de celdas coordinadas sean más grandes, lo que redundaría en un mayor grado de coordinación entre celdas. En último término, el número mínimo de subdominios viene determinado por la restricción  $k \geq \frac{\sum_{i \in V} \omega_i}{B_{aw}}$ . Además, para reducir la infraestructura de la red de retorno, se suele forzar que las celdas del mismo emplazamiento pertenezcan al mismo grupo de BBUs.

### III. ALGORITMOS DE PARTICIÓN DE GRAFOS

Esta sección describe brevemente los algoritmos de partición de grafos estudiados. Para mayor detalle, puede consultarse [5].

#### A. Refinamiento local (RL)

La forma trivial de realizar una partición es comenzar con una asignación aleatoria de los vértices a subdominios, que luego se refina progresivamente. Ese proceso de refinamiento, que mejora el corte de aristas sin violar la restricción de peso de los subdominios, suele realizarse iterativamente. En cada iteración, se comprueban todos los posibles cambios

de subdominio de todos los vértices, escogiendo aquél que reduce más el corte de arista, entre los que cumplen la restricción de peso. El proceso continúa hasta que no exista ningún cambio que mejore el corte de arista. Para dotar de diversidad al método, pueden realizarse múltiples intentos con particiones iniciales distintas, denominado aquí como método RL multiarranque (RLM). En este trabajo, se adopta la variante del algoritmo de refinamiento local de Fiduccia-Mattheyses. Este proceso de refinamiento es una pieza básica de los métodos más sofisticados descritos a continuación.

#### B. Paseo de grafos (PG)

Este algoritmo selecciona inicialmente un vértice semilla por subdominio, para después añadir por turnos un nuevo vértice a cada subdominio (región de crecimiento). En cada turno, el vértice seleccionado es el que tiene un mayor peso de aristas incidentes en los vértices que forman la región de crecimiento. El proceso continúa hasta que todos los vértices del grafo pertenecen a alguna región de crecimiento. En este trabajo, la selección de vértices semilla se realiza maximizando la distancia entre ellos en el grafo, medida en saltos.

#### C. Refinamiento multinivel (RM)

Este algoritmo simplifica el grafo original agrupando vértices para reducir el tamaño del grafo. Sobre el grafo simplificado, se construye una partición inicial de manera eficiente, que se proyecta posteriormente sobre el grafo original. Esta proyección se realiza desplegando progresivamente las agrupaciones de vértices efectuadas durante el proceso de simplificación. Tras cada acción de despliegue, se aplica un algoritmo de refinamiento local sobre partes del grafo próximas al borde de la partición.

#### D. Búsqueda evolutiva

En los algoritmos evolutivos, se parte de una población inicial de particiones, que se mejora a lo largo de sucesivas generaciones. En cada generación, se crean nuevas particiones combinando soluciones anteriores. En este trabajo, se consideran dos métodos evolutivos. El método de sesgo evolutivo (SE) [6] permite generar diferentes particiones creando versiones ligeramente distintas del grafo original cambiando los pesos de las aristas. La población de grafos evoluciona generando cambios en los pesos del grafo de forma aleatoria (mutación) o por combinación de varios grafos entre sí (cruce). En cada grafo modificado, se aplica un método de partición tradicional y la solución obtenida se evalúa sobre el grafo original. Los grafos que dan lugar a las soluciones de menor corte de aristas perviven a lo largo de las generaciones. Como alternativa, el método multiarranque adaptativo por agrupamiento (MAA) [7] mejora la eficacia del proceso de búsqueda aprovechando que las mejores particiones suelen compartir la misma asignación de grandes grupos de vértices. Para ello, partiendo de un conjunto inicial de particiones, genera nuevas particiones modificando el proceso de agrupamiento de vértices en un algoritmo de refinamiento multinivel.

### IV. PRUEBAS

A continuación, se describe la metodología seguida para evaluar los distintos métodos de planificación y los resultados obtenidos.

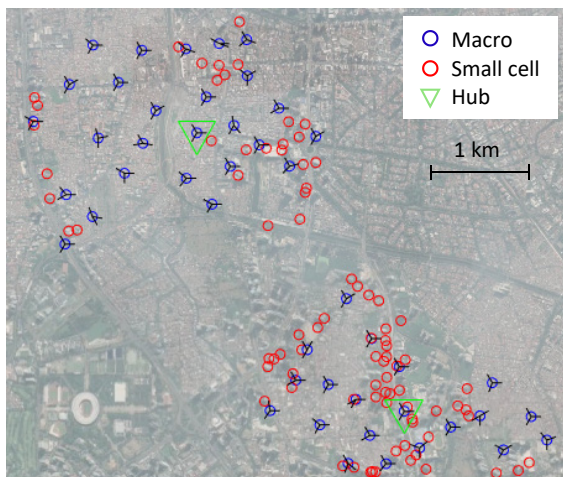


Fig. 1. Escenario de red LTE heterogénea.

### A. Metodología experimental

La Fig. 1 muestra el escenario real considerado, que abarca un área geográfica de  $20 \text{ km}^2$  que cubre una mezcla de áreas urbanas y residenciales. En ella, se despliegan 318 RRHs de LTE (138 macroceldas para asegurar cobertura continua en la zona y 180 celdas pequeñas de interior para ofrecer capacidad en edificios de negocios). Todas las celdas trabajan en la banda de frecuencia 1800+. El análisis presentado a continuación se centra en el enlace descendente, cuya frecuencia central es de 1816 MHz. Para facilitar las tareas de mantenimiento, las BBUs se alojan en 2 nodos concentradores (*hubs*) existentes en la zona. Por criterios de latencia, el fabricante recomienda una distancia máxima entre RRH y BBU de 2 km para LTE.

El escenario se implementa en una herramienta de planificación radio, basada en un simulador estático de nivel de red que divide el escenario en una malla de puntos. Dicha herramienta se usa para calcular la matriz de interferencia entre celdas vecinas, con la que se construye el grafo de red. Este grafo se divide a su vez en 2 subgrafos (1 por nodo concentrador), aprovechando que la asignación de celda a nodo ya está decidida atendiendo al criterio de distancia referido antes. De esta forma, se dispone de 2 instancias del problema sobre las que evaluar los métodos de planificación de BBUs. En cada instancia, se evalúan 7 planes de asignación de RRHs a BBU. Cinco se obtienen con los métodos de partición de grafos RLM, PG, RM, SE y MAA, descritos en la sección III. Para ello, se implementan los algoritmos de partición en Matlab, fijando el número de particiones intermedias construidas en los métodos RLM, SE y MAA en 1000, 100 y 30, respectivamente. Los dos planes restantes corresponden a la solución sin coordinación entre celdas (SC, caso peor) y la coordinación perfecta (CP, caso mejor, ausencia completa de interferencia), que se modelan como una partición con tantos subdominios como vértices y una partición que asigna todos los vértices a 1 único subdominio. Ambas soluciones se usan solo como referencia de comparación.

La principal cifra de mérito para valorar un método es el factor de geometría global del escenario, definido como el promedio de la SINR media de celda de todas las estaciones base. Promediando celdas y no puntos, se evita el sesgo introducido por las celdas más grandes. Ese indicador se

TABLA I  
RENDIMIENTO DE PLANES DE ASIGNACIÓN DE BBU

Método	SC	PG	RLM	RM	SE	MAA	CP
Corte de aristas							
Nodo 1	40.52	30.45	29.26	28.83	28.83	15.85	0
Nodo 2	22.69	19.38	17.15	16.07	15.86	9.40	0
Factor de geometría global [dB]							
Nodo 1	8.62	17.99	17.73	17.12	17.14	19.55	55.98
Nodo 2	13.64	26.52	26.01	25.17	25.21	27.43	63.18

obtiene con el simulador de la herramienta de planificación, mallando el escenario con una resolución de 40 metros. Para los cálculos de propagación, se adopta el modelo de propagación COST 231 Hata para exteriores, espacio libre en interiores y unas pérdidas de penetración exterior-interior de 20 dB. En el cálculo de SINR, se suma la interferencia recibida de todas las celdas que no se coordinan con la celda servidora. Para reducir los efectos de borde del escenario, se descartan los puntos cuya distancia a la estación base más cercana supera la mitad de la distancia media entre emplazamientos (en el escenario considerado, 500 metros). Como indicadores secundarios, se utilizan el corte de aristas, que refleja la calidad de la partición desde el punto de vista de la teoría de grafos, y el tiempo de ejecución, como medida de la carga computacional del método.

### B. Resultados

La Tabla I muestra, en su parte superior, el corte de aristas de las particiones construidas con los diferentes algoritmos sobre el grafo de cada uno de los dos nodos concentradores. Las cantidades reflejan de forma indirecta los niveles de interferencia que se obtendrían en la red con cada plan; así, las soluciones mejores son las que tienen menor corte de aristas. Para facilitar la comparación, los métodos SC y CP, que reflejan los casos extremos, se sitúan en la primera y última columna, respectivamente. En concreto, el valor de la columna SC representa la suma de pesos de todas las aristas del grafo. Se aprecia que el mejor método desde la teoría de grafos es MAA, ya que reduce el corte de aristas respecto a la solución sin coordinación, SC, en los nodos 1 y 2 en un 61 y 58 %, respectivamente. Por contra, RM, utilizado como referencia en muchos estudios, solo consigue reducir el corte de aristas en un 29 % en ambos nodos. Este resultado pone de manifiesto la dificultad del problema analizado.

La Tabla I también cuantifica el impacto de la asignación de BBUs sobre los niveles de interferencia mostrando el factor de geometría global obtenido con los planes construidos por los diferentes métodos. Por consistencia, los resultados se desglosan de nuevo por nodo concentrador. Se observa cómo MAA mejora la SINR respecto a SC en 11 y 14 dB en el área del nodo 1 y 2, respectivamente. También se aprecia cómo el resto de métodos obtienen incrementos ligeramente inferiores (1-2 dB menos).

Del resultado anterior, podría concluirse erróneamente que todos los métodos tienen un rendimiento parecido. Un análisis más detallado demuestra que el factor de geometría global está sesgado por la buena SINR experimentada en las celdas pequeñas de interior. Para mostrar dicho sesgo, la Fig. 2 desglosa

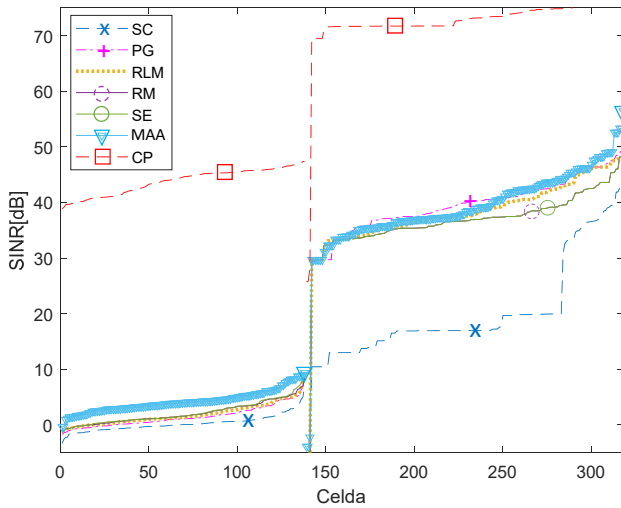


Fig. 2. Valores de SINR media de celda.

la SINR media de cada una de las celdas del escenario. Para facilitar el análisis, se separan macroceldas (celdas 1-138) y celdas pequeñas (celdas 139-318), y dentro de cada clase se ordenan según el valor de SINR media experimentado. En la figura, se aprecia que la SINR en las macroceldas es sensiblemente inferior que en las celdas pequeñas. Obviamente, se debe a que las macroceldas mantienen un elevado grado de solapamiento, mientras que, en las celdas pequeñas de interior, las pérdidas de penetración del edificio reducen los niveles de interferencia recibida de otras celdas. Si se analizan por separado ambos tipos de celda, se aprecian diferencias significativas entre los métodos. En las macroceldas, MAA consigue valores de SINR 2-3 dB superiores a los del siguiente método (SE). Concretamente, el valor promedio de SINR media de celda en macroceldas es 4.2 dB para MAA y 2.2 dB para SE (recuérdese que esos valores tan bajos corresponden a la situación extrema en que la carga de red es del 100%). Esa mejora de SINR permitiría aumentar la eficiencia espectral del sistema en esta situación en un 30% (según el teorema de Shannon). En las celdas pequeñas, MAA es también el mejor método, con un promedio de SINR media de celda de 38.94 dB frente a los 38.92 dB del siguiente método (PG). Además, conviene llamar la atención de que los valores de SINR en las celdas pequeñas superan en la mayoría de los casos los 30 dB, muy por encima del valor típico de 20-25 dB a partir del que no es posible aprovechar la capacidad teórica del canal por el juego limitado de esquemas de modulación y codificación desplegado actualmente en LTE. Con estos resultados, se concluye que el plan construido con MAA es el mejor.

La Fig. 3 muestra el mapa del factor de geometría obtenido con el plan de MAA en el área del nodo 1 del escenario. En él, se distinguen los edificios que albergan celdas pequeñas por sus elevados valores de SINR (>30 dB).

Para finalizar, se mide el tiempo de ejecución de los diversos métodos en un ordenador de sobremesa con 2.6 GHz de frecuencia de reloj y 16 GB de RAM. Los tiempos para planificar el escenario completo son 0.8 s PG, 872 s RLM, 0.8 s RM, 134 s SE y 28 s MAA. Como era previsible, los métodos que construyen 1 única partición (PG y RM) son más

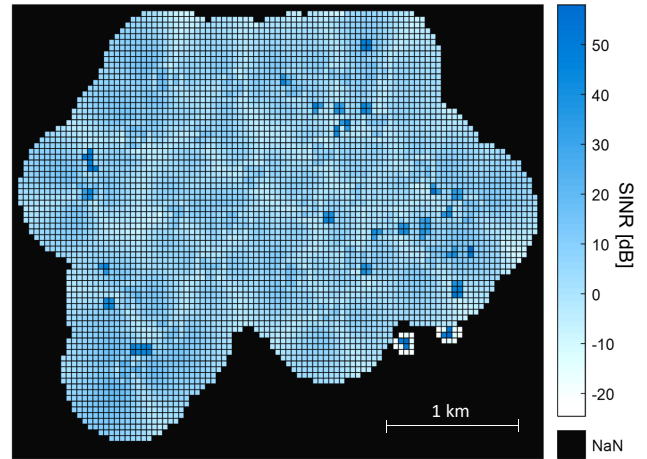


Fig. 3. Mapa del factor de geometría en el nodo 1.

rápidos que los basados en poblaciones (RLM, SE y MAA). Más importante, MAA logra encontrar mejores soluciones antes que RLM y SE. En cualquier caso, todos los tiempos son aceptables, teniendo en cuenta la periodicidad semanal con la que se actualizan los planes de BBU.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se han presentado algoritmos de partición de grafos para la asignación de celdas a BBUs en redes móviles heterogéneas. Los métodos se han validado con una herramienta de planificación radio en un escenario LTE real. Los resultados han demostrado la superioridad del método multiarreglo adaptativo por agrupamiento, tanto en macroceldas como en celdas pequeñas, obteniendo mejoras de SINR de 11-14 dB gracias a la coordinación de interferencia entre celdas. En el futuro, se extenderán los métodos de asignación para considerar las restricciones de latencia y capacidad de cómputo en C-RAN, que dependen de las condiciones de canal experimentadas y las tasas de error exigidas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el proyecto 5GPLAN, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (RTI2018-099148-B-I00). Los autores agradecen el soporte ofrecido por el Dr. José Outes (Ericsson Spain).

## REFERENCIAS

- [1] Telefonica, Ericsson, *Cloud RAN architecture for 5G, white paper*, 2016.
- [2] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, et al., "Cloud RAN for mobile networks - a technology overview," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405-426, 2014.
- [3] U. Karneyenka, K. Mohta, M. Moh, "Location and mobility aware resource management for 5G cloud radio access networks," *Proc. 2017 Int. Conf. on High Perf. Computing & Simulation*, 2017.
- [4] K. Thaalb, M. T. Missaoui, N. Tabbane, "Performance analysis of clustering algorithm in a C-RAN architecture," *13th Int. Wireless Comm. and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2017.
- [5] K. Schloegel, G. Karypis, V. Kumar, "Graph partitioning for high performance scientific simulations," *CRPC Parallel Computing Handbook*, J. Dongarra, I. Foster, G. Fox, K. Kennedy, and A. White, Eds. Morgan Kaufmann, 2000.
- [6] A. J. Soper, C. Walshaw, M. Cross, "A combined evolutionary search and multilevel optimisation approach to graph-partitioning," *Journal of Global Optimization*, vol. 29, no. 2, pp. 225-241, 2004.
- [7] M. Toril, V. Wille, I. Molina, C. Walshaw, "An adaptive multi-start graph partitioning algorithm for structuring cellular networks," *Journal of Heuristics*, vol. 17, pp. 615-635, Oct 2011.