

## Posicionamiento óptimo de estaciones base áreas en redes móviles

BORDON-LOPEZ, Raikel \* †, LOPEZ-MONTEAGUDO, F. Eneldo y OLVERA-OLVERA, Carlos

*Universidad Autónoma de Zacatecas Francisco García Salinas (UAZ)*

Recibido Octubre 11, 2017; Aceptado Diciembre 5, 2017

### Resumen

En este trabajo se presenta un sistema para el posicionamiento óptimo de múltiples estaciones base áreas en una red móvil. Las posiciones de las estaciones base se actualizan en tiempo real en función de la distribución de los usuarios en el área de la red. Se emplea un algoritmo genético como método de optimización y se consideran dos métricas de desempeño: la tasa de transmisión total y el índice de equidad de la asignación de recursos. Las estaciones base aéreas mapean en tiempo real las pérdidas de trayecto de los enlaces inalámbricos y emplean los datos recolectados para optimizar su posición. Se demuestra mediante simulaciones la eficiencia del uso de drones como estaciones base aéreas en redes móviles y se evalúa el desempeño del esquema propuesto. Los resultados obtenidos muestran que, para el escenario bajo estudio, con cinco estaciones base áreas y una estación base estática es posible alcanzar una tasa de transmisión total equivalente a la que se obtiene con diez estaciones base estáticas.

**Algoritmo genético, estación base aérea, índice de equidad, optimización, tasa de transmisión**

### Abstract

This paper presents a system for the optimal positioning of multiple aerial base stations in a mobile network. The positions of the base stations are updated in real time according to the distribution of the users in the network area. We use a genetic algorithm as optimization method and we consider two performance metrics: the total transmission rate and the fairness index of resource allocation. The aerial base stations map in real-time the path loss of the wireless links and then use the collected data to optimize their position. By means of simulations we demonstrate the efficiency of the use of drones as aerial base stations in mobile networks and evaluate the performance of the proposed scheme. The results show that, in the scenario under study, with five base stations and one static base station it is possible to achieve a total transmission rate equivalent to that obtained with ten static base stations.

**Aerial base station, fairness index, genetic algorithm, optimization, transmission rate**

**Citación:** BORDON-LOPEZ, Raikel, LOPEZ-MONTEAGUDO, F. Eneldo y OLVERA-OLVERA, Carlos. Posicionamiento óptimo de estaciones base áreas en redes móviles. Revista de Investigación y Desarrollo. 2017, 3-10:23-30

\* Correspondencia al autor (Correo electrónico: colvera@uaz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El crecimiento continuo en los volúmenes de tráfico en las redes celulares actuales demanda nuevas tecnologías y diseños para los servicios de telecomunicaciones comerciales. Entre las innovaciones propuestas, se prevé que con el nuevo estándar de redes celulares 5G se despliegue una densa red de estaciones base (BS) de corto alcance para ofrecer un mejor servicio y tarifas de datos adecuadas a los usuarios [1]. Se ha planteado que las tendencias en el crecimiento de las demandas de tráfico y el despliegue de dispositivos podrían continuar más allá de las redes 5G [2]. Esta densificación celular, aunque en última instancia dará lugar a mayores tasas de datos como resultado de una mayor eficiencia en el uso del espectro, se espera sea costosa e ineficiente en muchos casos, debido a la sub-utilización de las BS desplegadas [3].

Conjuntamente con la evolución de las redes móviles, los avances recientes en el desarrollo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) han posibilitado su explotación en múltiples áreas, tales como agricultura, mapeado 3D, detección remota, operaciones de búsqueda y rescate, monitoreo de desastres naturales, entre otras [4]. Recientemente, se ha propuesto la integración de drones como estaciones base aéreas en las redes de comunicaciones móviles [5]-[7], con el objetivo de complementar las pico-celdas ya desplegadas, extender la cobertura y mejorar la conectividad en áreas densamente pobladas o donde la construcción de una nueva infraestructura para una red móvil es económicamente infactible [8].

Una de las ventajas clave del uso de UAV como estaciones bases aéreas (BSa) en las futuras redes móviles es la mejora esperada la eficiencia espectral y la cobertura de red. Los UAV pueden modificar su posición en tiempo real en función de las localizaciones de los usuarios y sus requerimientos de tráfico [9].

Por tanto, se puede esperar una mejora significativa en la calidad de servicio en comparación con las BS estáticas (BSe), las cuales se despliegan teniendo en cuenta únicamente las localizaciones esperadas de los usuarios [10]. Además, debido a su punto de vista aéreo, los UAV tienen más posibilidades de establecer enlaces con línea de vista con los usuarios que las BSe.

En este trabajo se presenta un sistema para el posicionamiento óptimo de múltiples BSa en una red móvil donde operan de manera conjunta con BSe. Para el posicionamiento óptimo de las BSa se emplea un algoritmo genético considerando dos métricas de desempeño: la tasa de transmisión total de la red y el índice de equidad de la asignación de recursos. Las posiciones de las BSa se actualizan en tiempo real en función de la distribución de los usuarios en el área de la red.

Como novedad con respecto a trabajos precedentes, se propone explotar las capacidades de movilidad de los UAV para realizar un mapeado de las pérdidas de trayecto reales de los enlaces, en lugar de emplear un modelo teórico del canal. El conocimiento de las pérdidas de trayecto función de las posiciones de los UAV y de los usuarios es fundamental para realizar el posicionamiento óptimo de las BSa y por tanto es importante su determinación precisa para garantizar un adecuado desempeño del algoritmo de posicionamiento de las BSa. Mediante simulaciones se demuestra la eficiencia del uso de drones como estaciones bases aéreas en redes móviles y se evalúa el desempeño del esquema propuesto.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se presenta el modelo del sistema. El problema de optimización se formula en la sección III y en la sección IV se describe la implementación del algoritmo genético. Los resultados obtenidos se discuten en la sección V y, finalmente, la sección VI concluye el trabajo.

## Modelo del sistema

En este trabajo se considera una arquitectura de red similar a la descrita en [9]. Se asume que las BSa operan en vuelos de baja altura, con el objetivo de reducir la pérdida de trayecto de los enlaces con los usuarios. Se asume además que las posiciones de los usuarios son conocidas en tiempo real por el sistema de posicionamiento. Esta asunción resulta razonable, ya que se espera que las BSa operen sirviendo a usuarios en exteriores donde típicamente la localización por GPS está disponible.

Las posiciones de los usuarios son recolectadas por las BSe o las BSa, y son enviadas a una unidad de control, implementada de manera lógica mediante recursos computacionales distribuidos en el borde del área de cobertura de la red. La trayectoria del movimiento del dron es generada en la unidad de control de manera dinámica en función del movimiento de los usuarios y los requerimientos de la red. Los puntos de control de esta trayectoria son actualizados y enviados continuamente al dron, el cual se mueve de manera autónoma hacia cada nuevo punto de la trayectoria comandada.

La red consiste en  $M$  estaciones base estáticas y  $N$  estaciones base aéreas que brindan servicio a  $K$  usuarios móviles, los cuales se desplazan dentro del área de la red. El área de la red es un rectángulo de dimensiones  $L_1 \times L_2$ . La  $i$ -ésima BS y el  $j$ -ésimo usuario se denotan como  $\mathcal{B}_i$  y  $\mathcal{U}_j$ , respectivamente, donde  $i \in \mathcal{B}$  y  $j \in \mathcal{U}$ , con  $\mathcal{B} = \{1, \dots, M, M + 1, \dots, M + N\}$  y  $\mathcal{U} = \{1, \dots, K\}$ . Nótese que los  $M$  primeros subíndices de las BS denotan las BS estáticas, mientras que los últimos  $N$  denotan las BS aéreas.

Las posiciones de  $\mathcal{B}_i$  y  $\mathcal{U}_j$  se denotan como  $X_{B,i}$  y  $X_{U,j}$ , respectivamente. Las BSe se encuentran ubicadas a una altura  $h_{BSe}$  sobre el suelo, mientras que las BSa vuelan a una altura  $h_{BSa}$ .

Se asume que los usuarios móviles se desplazan dentro del área de la red siguiendo el modelo descrito en [11], a una velocidad media  $v_u$ . Las BSa actualizan su posición periódicamente, en intervalos de duración  $\tau_s$  y se desplazan a cada nueva posición a una velocidad  $v_b$ .

Todas las BS comparten el mismo canal de ancho de banda  $W$  a la frecuencia  $f$ . La relación señal a interferencia más ruido (SINR) del enlace entre  $\mathcal{B}_i$  y  $\mathcal{U}_j$ , la cual denotamos como  $\delta_{ij}$ , se puede calcular como

$$\delta_{ij} = \frac{\Omega_{ij} P_i}{\sum_{k \in \mathcal{B}, k \neq i} \Omega_{kj} P_k + N_o W}, \quad (1)$$

Donde  $P_i$  y  $P_k$  representan la potencia de transmisión de  $\mathcal{B}_i$  y  $\mathcal{B}_k$ , respectivamente,  $\Omega_{ij}$  es la ganancia de potencia promedio del canal y  $N_o$  es la densidad espectral de ruido.

## Modelo del canal inalámbrico

Un elemento esencial en el sistema de posicionamiento óptimo de las BSa es la estimación precisa de las ganancias de potencia de los canales en función de las posiciones de los usuarios y las BSa. En la literatura se han propuesto varios modelos para estimar la pérdida de trayecto en función de la distancia, las características del entorno de propagación y los parámetros del sistema tales como la frecuencia de operación y altura de las antenas.

Sin embargo, en la mayoría de los casos se trata de modelos que se pueden agrupar dentro de dos categorías:

1. modelos desarrollados para entornos de propagación con características muy específicas, lo cual limita su rango de aplicabilidad;
2. modelos muy generales, aplicables en gran variedad de entornos, pero con los cuales se obtienen estimaciones muy alejadas de los valores reales.

En este trabajo se propone explotar las capacidades de movilidad de las BSa para realizar un mapeado de las pérdidas de trayecto reales de los enlaces, en lugar de emplear un modelo de propagación. A medida que las BSa se desplazan y reciben las señales de los usuarios, el sistema va creando un mapa de las pérdidas de trayecto en el área de la red a través de mediciones de la potencia de la señal recibida.

Con cada medición  $n$ -ésima, un vector de la forma  $\mathbf{z}_n = \{\tilde{X}_B^n, \tilde{X}_U^n, \tilde{\Omega}^n\}$  se almacena en la memoria de la unidad de control. Cada vector  $\mathbf{z}_n$  contiene las posiciones del usuario y de la BSa en el instante que se tomó la muestra, y la ganancia de potencia promedio del canal medida,  $\tilde{\Omega}^n$ . Las muestras almacenadas se emplean para predecir el valor de  $\Omega_{ij}$  dados  $X_{B,i}$  y  $X_{U,j}$  mediante un método de interpolación, esto es,

$$\Omega_{ij} = f_{\Omega}(X_{B,i}, X_{U,j}, \{\mathbf{z}_n\}) \quad (2)$$

Donde  $f_{\Omega}$  es la función de interpolación y  $\{\mathbf{z}_n\}$  es el conjunto de todas las muestras almacenadas en memoria. Es necesario tener en cuenta que las muestras tomadas no garantizan que se pueda estimar  $\Omega_{ij}$  para todos los posibles valores de  $X_{B,i}$  y  $X_{U,j}$ , debido a la posible ausencia de muestras para algunas regiones del área de la red.

Para determinar cuándo se puede estimar  $\Omega_{ij}$  mediante interpolación, se emplea como criterio que las distancias del vector  $\{X_{B,i}, X_{U,j}\}$  a los cinco vectores  $\{\tilde{X}_B^n, \tilde{X}_U^n\}$  más cercanos se encuentren por debajo de una distancia umbral. Es decir,  $\Omega_{ij}$  se obtiene empleando el método de interpolación solo si se cumple que

$$\|\{\tilde{X}_B^n, \tilde{X}_U^n\} - \{X_{B,i}, X_{U,j}\}\| < \epsilon_d, n \in \mathbf{Z}_{ij} \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{Z}_{ij}$  es el conjunto de índices de las cinco muestras más cercanas a  $\{X_{B,i}, X_{U,j}\}$  y  $\epsilon_d$  es una distancia umbral.

En los casos en los que no se puede estimar  $\Omega_{ij}$  por el método de interpolación, se utiliza un modelo de propagación general [12], según el cual la ganancia de potencia promedio del canal entre  $\mathcal{B}_i$  y  $\mathcal{U}_j$ , se estima como

$$\Omega_{ij} = \Omega_o / \|X_{B,i} - X_{U,j}\|^{\alpha} \quad (4)$$

Donde  $\|X_{B,i} - X_{U,j}\|$  es la distancia entre la BS y el usuario,  $\alpha$  es el exponente de pérdida de trayecto y  $\Omega_o$  es una constante. Los parámetros  $\alpha$  y  $\Omega_o$  son estimados por el sistema en tiempo real a partir del conjunto de muestras  $\{\mathbf{z}_n\}$  mediante regresión lineal.

### Problema de optimización

Se considera un esquema de asignación de recursos en el cual cada usuario  $\mathcal{U}_j$  se conecta a la estación base  $\mathcal{B}_i$  tal que  $\delta_{ij} = \max_{k \in \mathcal{B}} \{\delta_{kj}\}$ . La tasa de transmisión asignada a  $\mathcal{U}_j$  puede estimarse empleando la fórmula de la capacidad del canal de Shannon,

$$\mathcal{R}_j = W_j \log_2(1 + \delta_{ij}), \delta_{ij} = \max_{k \in \mathcal{B}} \{\delta_{kj}\} \quad (5)$$

Donde  $W_j = W/K_i$  es el ancho de banda asignado a  $\mathcal{U}_j$  y donde  $K_i$  es el número de usuarios conectados a  $\mathcal{B}_i$ . El posicionamiento óptimo de las BSa se lleva a cabo teniendo en cuenta dos métricas del desempeño de la red: la tasa de transmisión total  $\mathcal{R}_T = \sum_{j \in \mathcal{U}} \mathcal{R}_j$  y el índice de equidad Jain [13], definido como

$$\mathcal{J} = \frac{(\sum_{j \in \mathcal{U}} \mathcal{R}_j)^2}{K \sum_{j \in \mathcal{U}} \mathcal{R}_j^2} \quad (6)$$

El valor de  $\mathcal{J}$  puede variar desde  $1/K$  en el peor de los casos (cuando todos los recursos se asignan a un único usuario) hasta el valor máximo  $\mathcal{J} = 1$ , cuando los recursos se asignan a todos los usuarios por igual. La maximización de  $\mathcal{R}_T$  permite realizar un uso eficiente del ancho de banda, pero al mismo tiempo puede resultar en una distribución desigual de los recursos entre los usuarios.

La equidad en la asignación de los recursos es un requisito importante que debe tenerse en cuenta para garantizar un rendimiento satisfactorio a los usuarios que experimentan las peores condiciones del canal (por ejemplo, los usuarios ubicados en el borde de la celda).

Sea  $\mathbf{X}_{BSa} = \{X_{B,M+1}, \dots, X_{B,M+N}\}$  el conjunto de vectores de posición de las BSa. El posicionamiento óptimo de las BSa tiene como objetivo maximizar la función de utilidad

$$f_o(\mathbf{X}_{BSa}) = \frac{\mathcal{R}_T}{1 + \kappa_f/\mathcal{T}} \quad (7)$$

Donde  $\kappa_f \geq 0$  es el parámetro de control de la equidad de asignación de recursos. Para  $\kappa_f = 0$  se maximiza únicamente  $\mathcal{R}_T$ , sin tener en cuenta la equidad. La equidad en la asignación de recursos se puede controlar incrementando el valor de  $\kappa_f$ . A partir de estas consideraciones, el problema del posicionamiento óptimo de las BSa se puede formular como

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{BSa}^* &= \arg \max_{\mathbf{X}_{BSa}} f_o(\mathbf{X}_{BSa}) \\ \text{sujeto a: } X_l &\leq X_{B,M+j} \leq X_u, j \in \{1, \dots, N\} \end{aligned} \quad (8)$$

Donde  $\mathbf{X}_{BSa}^*$  es la solución del problema de optimización (conjunto de vectores de posición óptima de las BSa),  $X_l = [0, 0, h_{BSa}]$  y  $X_u = [L_1, L_2, h_{BSa}]$ .

### Implementación del algoritmo genético

En este trabajo se propone emplear un algoritmo genético para encontrar la solución del problema de optimización (8). El algoritmo genético es un método de optimización meta-heurístico que se inspira en la evolución de los seres vivos para encontrar la mejor solución a un problema, evaluando de manera iterativa un conjunto de soluciones candidatas [14]. Al conjunto de soluciones candidatas se le denomina población y cada solución candidata de denomina individuo. En nuestro caso, cada individuo de la población representa un posible conjunto de vectores de posición de las BSa ( $\mathbf{X}_{BSa}$ ).

A lo largo de generaciones sucesivas, una población inicial evoluciona hasta que se cumple cierto criterio de parada. En cada iteración se seleccionan los mejores individuos de la población actual y se utilizan para producir la descendencia de la siguiente generación. La descendencia se obtiene mediante dos procesos: cruzamiento y mutación.

El cruzamiento de dos progenitores busca explotar los mejores genes de la generación previa para crear nuevas soluciones. La mutación evita que el GA se quede atrapado en óptimos locales mediante la introducción de pequeñas variaciones aleatorias. En cada generación un grupo de individuos, denominados individuos de élite, pasan a la siguiente generación sin ninguna modificación.

Denotando  $\lambda_c$ ,  $\lambda_m$  y  $\lambda_e$  como el número de individuos de cruzamiento, mutación y élite, respectivamente, el tamaño de la población viene dado por  $\lambda = \lambda_c + \lambda_m + \lambda_e$ . Fijando los valores de  $\lambda$  y  $\lambda_e$ , el número de individuos de cruzamiento y mutación se controla mediante la fracción de cruzamiento, definida como  $\xi_c = \lambda_c / (\lambda_c + \lambda_m)$ . La aptitud de cada individuo para la selección de los progenitores se evalúa empleando la función de utilidad (7).

### Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados numéricos obtenidos en la evaluación del desempeño del sistema propuesto, en términos de tasa de transmisión total y de equidad en la asignación de recursos. Las simulaciones se llevaron a cabo considerando un escenario como el que se muestra en la figura 1. Las  $M$  estaciones base estáticas se encuentran distribuidas uniformemente en un segmento de longitud  $L_1$ , alineado a lo largo de la mayor dimensión del área de la red y a una distancia  $D$  del borde de la misma. Todas las edificaciones que se encuentran dentro del área tienen una altura de  $6 m$  sobre el suelo.

El tiempo de operación de la red durante la simulación fue de  $T = 7200$  s. El resto de los valores para los parámetros de la simulación se muestran en la tabla 1. Los resultados obtenidos en los instantes de muestreo de la simulación se promediaron, con el objetivo de evaluar el desempeño medio de la red.

Para simular el entorno de radiopropagación se empleó el software *Wireless Insite* [15]. Dicho software emplea una técnica de trazado de rayos para modelar la propagación de las señales inalámbricas, con lo cual se pueden lograr estimaciones de las condiciones de propagación bastante cercanas a las que se dan en entornos reales. Estas estimaciones se emplearon para simular las mediciones de la ganancia de potencia de los canales que las BSa utilizan para optimizar su posicionamiento.

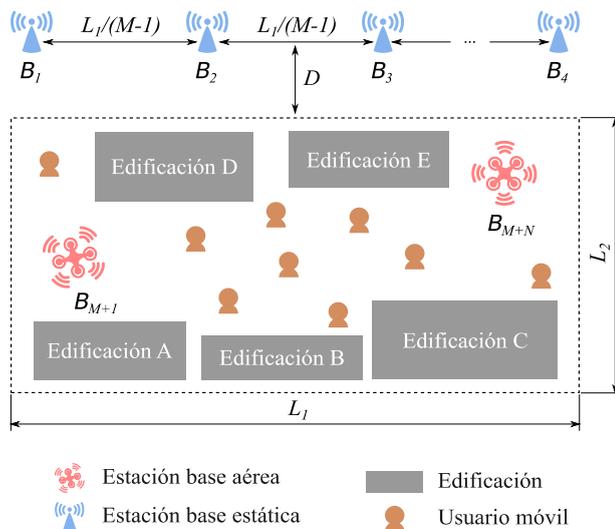


Figura 1 Escenario de simulación

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$M$	$\leq 10$	$W$	10 MHz
$N$	$\leq 10$	$N_o$	-174 dBm/Hz
$K$	20	$f$	28 GHz
$L_1$	500 m	$\epsilon_d$	5 m
$L_2$	250 m	$P_{i,i \in \mathcal{B}}$	15 dBm
$h_{BS_e}$	12 m	$\kappa_f$	$\geq 0$
$h_{BS_a}$	10m	$\lambda$	8N
$v_u$	1 m/s	$\lambda_e$	2
$v_b$	15 m/s	$\xi_c$	0.8
$\tau_s$	5 s		

Tabla 1 Valores de los parámetros de la simulación

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 1 se muestra la tasa de transmisión total media en función del número total de estaciones base ( $M + N$ ), para  $D = 0$  y  $\kappa_f = 0$  (se maximiza  $\mathcal{R}_T$  sin tener en cuenta  $\mathcal{T}$ ). Para la gráfica donde  $N = 0$  todas las BS son estáticas, mientras que en la gráfica donde  $M = 1$  solo hay una BSe. Como es de esperarse, en ambos casos el valor de  $\mathcal{R}_T$  se incrementa con el número de BS presentes en la red, ya que se incrementa la cobertura a los usuarios. Sin embargo, nótese como se alcanza un desempeño significativamente mayor cuando se emplean BSa. Como puede observarse, con dos BSa y una BSe es posible obtener un desempeño equivalente al que se obtiene con cuatro BSa. De manera similar, con una BSe y cinco BSa la tasa de transmisión es mayor que cuando se emplean diez BSa.

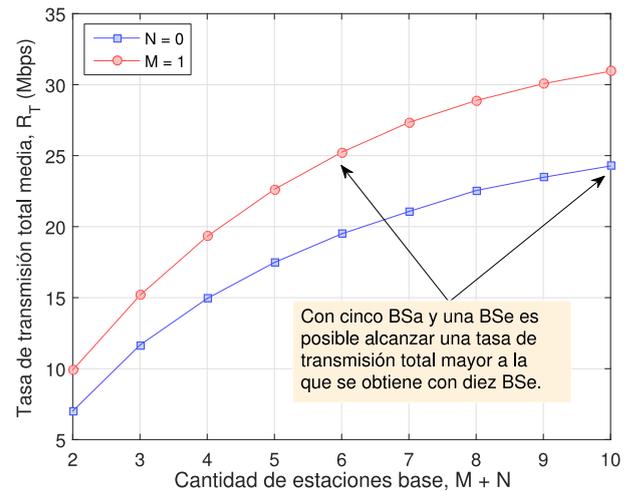
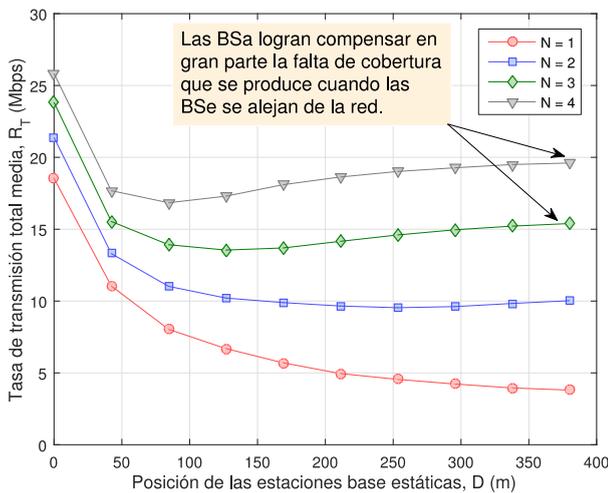


Gráfico 1 Tasa de transmisión total media en función del número total de estaciones base, para  $D = 0$  y  $\kappa_f = 0$ .

Fuente: Elaboración propia

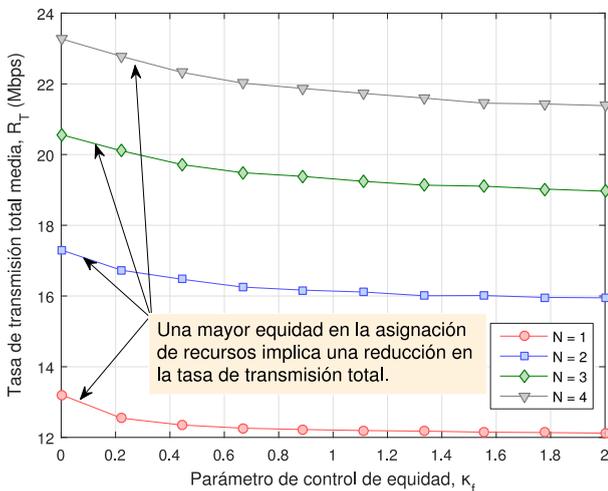
En el gráfico 2 se muestra la tasa de transmisión total media en función de la distancia de las BSa al borde del área de la red ( $D$ ), para  $M = 4$ ,  $\kappa_f = 0$  y un número variable de BSa ( $1 \leq N \leq 4$ ). Como puede notarse, a medida que las BSa se alejan de la red disminuye la cobertura y por tanto disminuye el valor de  $\mathcal{R}_T$ . Este decrecimiento en  $\mathcal{R}_T$  es monótono en el caso de la gráfica para la cual  $N = 1$ .

Sin embargo, ya para  $N = 2$  el valor de  $R_T$  decrece solo hasta la mitad de su valor original y ya para  $N = 3$  y  $N = 4$ , puede notarse como las BSA logran compensar la falta de cobertura que se produce cuando las BSe se alejan de la red.



**Gráfico 2** Tasa de transmisión total media en función de la distancia de las BSe al borde del área de la red ( $D$ ), para  $M = 4$ ,  $\kappa_f = 0$  y  $1 \leq N \leq 4$ .

Fuente: Elaboración propia.

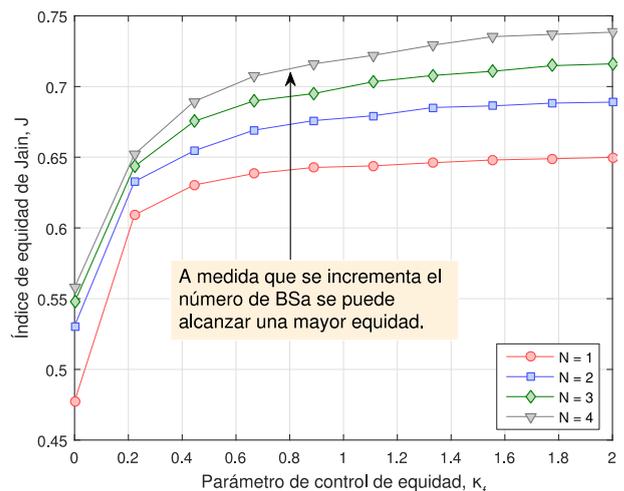


**Gráfico 3** Tasa de transmisión total media en función del parámetro de control de equidad ( $\kappa_f$ ), para  $D = 0$ ,  $M = 2$  y  $1 \leq N \leq 4$ .

Fuente: Elaboración propia.

La tasa de transmisión total media y el índice de equidad en función del parámetro de control de equidad, para  $D = 0$ ,  $M = 2$  y un número variable de BSA ( $1 \leq N \leq 4$ ), se muestran en los gráficos 3 y 4, respectivamente. Como puede notarse, una mayor equidad en la asignación de recursos implica una reducción en la tasa de transmisión total.

Sin embargo, esta reducción es menor del 10 % en todos los casos, mientras que la equidad se incrementa en más de un 30 %. Como es de esperarse, a medida que se incrementa el número de BSA se puede alcanzar una mayor equidad, ya que las BSA pueden distribuirse más uniformemente en el área de la red y brindar cobertura a los usuarios de forma más equitativa.



**Gráfico 4** Índice de equidad en función del parámetro de control de equidad ( $\kappa_f$ ), para  $D = 0$ ,  $M = 2$  y  $1 \leq N \leq 4$ .

Fuente: Elaboración propia

**Agradecimiento**

Este trabajo ha sido realizado al amparo del Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

## Conclusiones

El sistema presentado permite optimizar la red en tiempo real de acuerdo a las demandas de tráfico de los usuarios móviles. Debido a la proximidad entre las estaciones bases aéreas y los usuarios, el sistema permite la explotación masiva de las bandas de alta frecuencia para las futuras redes móviles. Como se demostró mediante simulaciones, las estaciones base aéreas introducen una ganancia significativa en términos de tasa de transmisión y pueden reemplazar a las estaciones base estáticas con un menor número de estaciones base.

Los resultados obtenidos demuestran el potencial de las estaciones bases aéreas para su integración e implementación en las futuras redes móviles como alternativa a un despliegue ultra denso de celdas pequeñas. En futuros trabajos se realizará una implementación práctica del sistema propuesto y se evaluará su desempeño en comparación con los resultados obtenidos mediante simulaciones. Una posible extensión de nuestro trabajo es la inclusión de un análisis del costo de la solución propuesta y su comparación con el costo de soluciones existentes basadas en estaciones base estáticas. Otra posible extensión es la optimización del posicionamiento de las estaciones base aéreas desde el punto de vista energético, con el objetivo de extender el tiempo de operación de la red.

## Referencias

- [1]. Ge, X., Tu, S., Mao, G., Wang, C. X., & Han, T. (2016). 5G ultra-dense cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 23(1), 72-79.
- [2]. Hossain, E., & Hasan, M. (2015). 5G cellular: key enabling technologies and research challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 18(3), 11-21.
- [3]. Chin, W. H., Fan, Z., & Haines, R. (2014). Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 21(2), 106-112.
- [4]. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2014). *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [5]. Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2016). Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1123-1152.
- [6]. Hayat, S., Yanmaz, E., & Muzaffar, R. (2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: a communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2624-2661.
- [7]. Wang, J., Jiang, C., Han, Z., Ren, Y., Maunder, R. G., & Hanzo, L. (2016). Cooperative distributed unmanned aerial vehicular networks: Small and mini drones. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 1-18.
- [8]. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36-42.
- [9]. Chandrasekharan, S., Gomez, K., Al-Hourani, A., Kandeepan, S., Rasheed, T., Goratti, L., ... & Allsopp, S. (2016). Designing and implementing future aerial communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 26-34.
- [10]. Bor-Yaliniz, I., & Yanikomeroglu, H. (2016). The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells. *IEEE Communications Magazine*, 54(11), 48-55.