


# Asignación de espectro basado en inteligencia de enjambre empleando un algoritmo metaheurístico híbrido bioinspirado

Spectrum assignment allocation based on artificial swarm intelligence using a bioinspired hybrid metaheuristic algorithm

<sup>a</sup>Jorge Edison Mora-Arroyo, <sup>b</sup>Víctor Fabián Miramá-Pérez, <sup>c</sup>Olger Ferledy Erazo-De la Cruz

 <sup>a</sup> Estudiante de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones, jorgemora@unicauca.edu.co, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

 <sup>b</sup> Magister en Electrónica y Telecomunicaciones, vmirama@unicauca.edu.co, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

 <sup>c</sup> Estudiante de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones, olger@unicauca.edu.co, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

**Recibido:** Julio 20 de 2019 **Aceptado:** Diciembre 22 de 2019

**Forma de citar:** J.E. Mora-Arroyo, F.V. Miramá-Pérez, O.F Erazo-de la Cruz, "Asignación de espectro basado en inteligencia de enjambre empleando un algoritmo metaheurístico híbrido bioinspirado", *Mundo Fesc*, vol. 10, no. 19, pp. 20-39, 2020

## Resumen

---

El crecimiento exponencial de los nuevos servicios móviles e inalámbricos, inherentes a las necesidades de una sociedad hiperconectada, demandan cada vez más el acceso casi inmediato y permanente de diferentes recursos radio, lo que implica atender de manera cuidadosa, aspectos de estudio como la prevista escasez del espectro electromagnético y su considerable subutilización en las radiocomunicaciones actuales, motivando así la investigación de modelos emergentes para la asignación dinámica de espectro. De esta manera, el Acceso Dinámico de Espectro se presenta como una solución eficiente para la reutilización resiliente de canales inalámbricos de comunicación en un esquema compartido de bandas de frecuencia. El reto principal de la asignación dinámica de espectro es poder garantizar a todos los usuarios de una red protección contra la interferencia que se pudiera generar durante la ocupación simultánea de un canal de comunicación. Por lo tanto, se considera pertinente restringir el acceso a una cantidad sobrecargada de usuarios, con el fin de conseguir una coexistencia pacífica en un área de cobertura dada, considerando que el uso simultáneo de un canal por uno o más usuarios será posible siempre y cuando, no excedan el umbral de interferencia impuesto por el sistema. En consecuencia, en este trabajo se emplea Inteligencia Artificial basada en un algoritmo metaheurístico híbrido bioinspirado, denominado Optimización por Cúmulo de Partículas Socio-Cognitivo, con el fin de dar solución al problema de Acceso Dinámico de Espectro en una Red Heterogénea, teniendo como función de utilidad multi-objetivo las métricas asociadas a la asignación de usuarios y a la maximización de la tasa de datos, logrando mitigar así el impacto nocivo de la interferencia y asignando espectro de manera exitosa en promedio al 80% de los usuarios considerados en el escenario de análisis.

**Palabras clave:** Asignación de espectro, inteligencia de enjambre, algoritmo metaheurístico, red heterogénea.

---

Autor para correspondencia:

\*Correo electrónico: jorgemora@unicauca.edu.co



## Abstract

---

The exponential growth of the new mobile and wireless services, inherent to the needs of a hyperconnected society, demands more and more the almost immediate and permanent access of different radio resources, which implies attending in a careful way, aspects such as the expected shortage of the electromagnetic spectrum and its considerable underutilization in current radiocommunications, thus motivating the investigation of emerging models for dynamic spectrum allocation. In this way, Dynamic Spectrum Access is presented as an efficient solution for the resilient reuse of wireless communication channels in a shared scheme of frequency bands. The main challenge of dynamic spectrum allocation is to be able to guarantee to all the users of a network, protection against the interference that could be generated during the simultaneous occupation of a communication channel. Therefore, it is considered pertinent to restrict access to an overloaded number of users, in order to achieve peaceful coexistence in a given coverage area, taking into account that the simultaneous use of a channel by one or more users will be possible as long as they do not exceed the interference threshold imposed by the system. Consequently, this work uses Artificial Intelligence based on a bio-inspired hybrid metaheuristic algorithm, called Optimization by Swarm of Socio-Cognitive Particles, in order to solve the problem of Dynamic Spectrum Access in a Heterogeneous Network, having as a multi-objective utility function the metrics associated with user assignment and data rate maximization, thus mitigating the harmful impact of interference and successfully assigning spectrum to an average of 80 % of the users considered in the analysis scenario.

**Keywords:** Spectrum allocation, swarm intelligence, metaheuristic algorithm, heterogeneous network..

## Introducción

Para atender las demandas de Ancho de Banda (*BW-Bandwidth*) y Calidad de Servicio (*QoS -Quality of Service*) surgen las nuevas generaciones de redes móviles e inalámbricas, las cuales requieren del trabajo conjunto de múltiples redes y tecnologías de acceso de radio (*RATs - Radio Access Technologies*), como por ejemplo aquellas redes compuestas principalmente por una combinación de celdas de gran tamaño (macro-celdas) y celdas pequeñas (micro-celdas, pico-celdas o femto-celdas), coexistiendo en un mismo espacio de Radiofrecuencia (*RF-Radiofrequency*) o traslapándose en su zona de cobertura, lo que se define en la literatura como Redes Heterogéneas (*HetNets - Heterogeneous Networks*).

De esta forma, el incremento en el desarrollo de aplicaciones y su tiempo de uso, así como de nuevas tecnologías, han generado una mayor cantidad de transmisión de datos y demanda

de los recursos finitos espectrales [1]. Lo anterior, causa una percepción equivocada de escasez de espectro, sin embargo; diversos estudios han concluido que se trata de un problema de acceso, administración, control y uso del recurso, puesto que se ha podido observar que mientras ciertas bandas se encuentran contaminadas por una excesiva polución debida a altos niveles de piso de ruido por interferencias, otras presentan un desaprovechamiento significativo, propiciando así una coexistencia radioeléctrica heterogénea inequitativa [1], [2], [3], [4], [5]. Así, el desafío principal de las técnicas empleadas para el Acceso Dinámico de Espectro (*DSA-Dynamic Spectrum Access*), reside en establecer como una posible solución el reúso del mismo, bien sea, compartiéndolo concurrentemente entre diferentes tecnologías inalámbricas o reciclándolo cuando se encuentre disponible [1]. Lo anterior permite definir una forma de administración que tiene una estructura de acceso al espectro priorizada, en la que se

distinguen claramente dos tipos de usuarios, aquellos con prioridad baja de acceso a un canal de comunicaciones, denominados Usuarios Secundarios (SU-*Secondary Users*), los cuales analizan el comportamiento de los usuarios con prioridad alta de acceso al canal, denominados Usuarios Primarios (PU - *Primary Users*), con el fin de explotar sus canales de comunicación; para ello, los SU deben ajustar sus parámetros de transmisión para no interrumpir la comunicación de los PU [1] y [3].

Una de las estrategias más destacadas del uso de DSA, es el aprovechamiento simultáneo del canal radioeléctrico, tanto por el PU, y por uno o más SU, siempre y cuando, estos últimos no sobrepasen un umbral de Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR-*Signal to Interference Plus Noise Ratio*) impuesto por el PU. Lo anterior implica el acceso limitado a una cantidad excesiva de SU a la red, de tal forma que se logre una coexistencia mutualista y pacífica con los PU que se encuentran presentes en el ecosistema de RF bajo análisis. Por lo tanto, es importante el estudio de algoritmos de control de admisión y asignación de canal para establecer el compromiso entre la tasa máxima de datos y el número máximo de SU que pueden compartir concurrentemente un canal primario bajo ciertas restricciones de funcionamiento, es ahí en donde la combinación adecuada de herramientas basadas en Inteligencia Artificial (*AI-Artificial Intelligence*) permiten una aproximación eficiente en la búsqueda de la solución óptima al problema en mencn.

En la literatura especializada se pueden consultar varias propuestas de esfuerzos relacionados con DSA aplicado al control y administración de RATs, cada uno con objetivos particulares de optimización, empleandodiferentestcnicasyherramientas matemáticas para su modelamiento; de esta manera se realiza a continuación una breve

descripción de los trabajos más relevantes a nivel internacional que en menor o mayor proporción cimientan la base de esta investigación. En [2] y [6] se plantea que la mayoría de los avances en investigación en redes con capacidades cognoscitivas han llevado a la sinergia de metodologías y técnicas en las teorías de la información, cuyo objetivo principal se enmarca en garantizar que los procesos de transmisión y recepción de información estn regidos por criterios de eficiencia y calidad, teniendo como insumo el estudio del comportamiento de los usuarios y de los parámetros de la red, para adaptación, gestión y asignación adecuada del espectro electromagnético. Entre las metodologías más destacadas para el allanamiento de la DSA, se encuentran las ciencias de la computación, específicamente, la AI, la cual ha permitido que los campos de acción de la tecnología se extiendan a subáreas del conocimiento, como los algoritmos metaheurísticos, los algoritmos bioinspirados, la lógica difusa, los algoritmos genéticos, los algoritmos evolutivos, los algoritmos híbridos, las redes neuronales, entre otras.

Ahora, teniendo en cuenta que en la mayoría de los esfuerzos realizados se busca principalmente la minimización de los efectos nocivos de la interferencia (SINR) hacia la red primaria, en [7] se propone un algoritmo de control de acceso que maximiza la cantidad de SU admitidos al sistema, considerando como restricción la Calidad de Servicio (*QoS-Quality of Service*) de las redes primaria y secundaria, medida en términos de la interferencia presente en el sistema. Básicamente, controla la potencia de transmisión de los SU, mediante un algoritmo de Control de Potencia Distribuido con Protección de QoS para SU Activos (*DCP-AQP-Distributed Control Power with Active SU QoS Protection*). Para lo anterior, se distribuyen en el sistema primario múltiples puntos de medición (MP) de interferencia

presente en el sistema. Cada MP cuenta con una alarma, de tal forma que mientras la interferencia se mantenga por debajo de un nivel pre-establecido, el algoritmo informa a los SU que pueden incrementar su potencia de transmisión para garantizar la calidad de su enlace durante el tiempo que dure su transmisión. Por el contrario, si la medición de la interferencia no cumple con el nivel de alarma, los MP le indican a los SU que disminuyan su potencia de transmisión a un nivel mínimo que permita mantener la QoS del sistema primario, pero al mismo tiempo garantice el éxito de la transmisión de los SU.

En [8] y [9], se presentan propuestas basadas en un grupo de PU que comparten un receptor primario y un grupo de SU pueden utilizar uno o varios canales simultáneamente con ellos, sólo si satisfacen su SINR, manteniéndose dentro del rango de potencia permitida y su interferencia acumulada en el receptor primario está por debajo del umbral establecido. El problema se divide en dos objetivos independientes de optimización: 1) maximizar el número de SU admitidos y, 2) maximizar la tasa de datos de los SU admitidos. Para el primer caso, se utiliza un algoritmo de control de potencia, sin embargo, necesita un gran número de operaciones para manejar la ocurrencia de diversos eventos para seleccionar el grupo de SU que pueden coexistir con los PU. Para el segundo caso, se aplica programación geométrica secuencial, una técnica que consiste en resolver secuencialmente el problema original a través de una aproximación a la función objetivo. Buscando así maximizar la tasa de transmisión de los SU sujeta a restricciones de SINR tanto en los PU como SU, y un umbral de interferencia en los PU. El modelo se evalúa bajo dos criterios: asignación de igual tasa de datos y asignación de tasa de datos proporcional. Considerando el modelo presentado en [9], el trabajo en [10] muestra un esquema de

eliminación de SU cuando la interferencia en la estación base primaria supera el límite de interferencia establecido. Sin embargo, este algoritmo de eliminación no mejora la tasa de datos de la red secundaria comparada con los resultados de [6]. Aunque un SU logre un buen nivel de SINR, éste no se tomará en cuenta en el cálculo de la tasa de datos, porque genera interferencia dañina hacia la estación base primaria y, con esto, se mantiene el nivel de QoS requerido por los PU [1].

A diferencia de los trabajos anteriores, existen otras propuestas que modelan el problema de espectro compartido como un problema multi-objetivo. Por ejemplo, en [11] los autores determinan la capacidad en un sistema de comunicación móvil de futura generación, como el máximo número de SU con demanda de QoS, y la máxima razón de reuso de canales. El criterio que utilizan para decidir sobre el reuso del espectro, se basa en la distancia que existe entre dos femto-celdas, definida como umbral de distancia (DI), si esta distancia es menor que DI, éstas no podrán compartir el recurso espectral. El problema se redimensiona a un modelo mono-objetivo, en donde se realiza una transformación por ponderación para disminuir el número de iteraciones y aplicar el método exacto de Branch and Bound, para su resolución. Sin embargo, en el sistema propuesto no se considera protección contra la interferencia de los PU, es decir, minimizar la interferencia hacia la macrocelda, la cual es provocada por la ocupación simultánea de los canales de comunicación en las femto-celdas [1].

En los referentes antes mencionados, además del método de solución del problema, se requiere la implementación de algoritmos de eliminación de SU, para buscar el grupo de ellos que pueden coexistir con el PU, removiendo parcialmente SU hasta lograr que la interferencia se mantenga a

un nivel tolerable para el PU. Lo anterior implica que se realicen un mayor número de operaciones, generando complejidad adicional al problema, existiendo también la posibilidad de que a los SU con niveles aceptables de SINR no se les asigne un canal de comunicación. De esta manera, en [1], [3], y [11] se relacionan esfuerzos enfocados tanto a la eficiencia espectral de los SU como de los PU, con el fin de mejorar la densidad de usuarios admisibles en una HetNet, abordando también el problema de maximización de tasa de datos; teniendo en cuenta que la obtención de la máxima tasa de transferencia efectiva, no representa necesariamente el máximo número de SU con canal asignado.

En este contexto, la asignación de espectro mediante el control de interferencia se propone como una solución para optimizar el uso de dicho recurso, compartiendo bandas de frecuencia entre las tecnologías y servicios inalámbricos que así lo requieran, teniendo en cuenta que se considera que la interferencia es danina cuando es lo suficientemente significativa como para desencadenar una interrupción en el servicio a cualquiera de los usuarios de la red, comprendiendo que para garantizar la transmisión exitosa entre los diferentes usuarios que comparten simultáneamente un canal de RF, es imperativo mantener el nivel de interferencia del sistema por debajo de un valor umbral inofensivo predeterminado.

### Materiales y métodos

El trabajo presentado en este artículo se desarrolló bajo la metodología de simulación propuesta por Onur Ulgen descrita en [12], la cual se relaciona en la Fig. 1 y se compone de las siguientes fases: 1) Definin y descripción del algoritmo implementado para dar solución al problema de espectro compartido en una HetNet. 2) Definin de la HetNet como escenario de comunicación

inalámbrico de nueva generación bajo análisis. 3) Definin del modelo de SINR como parámetro de control de las métricas evaluadas en el desempeño del algoritmo implementado. 4) Evaluación mediante simulación a nivel de sistema de la capacidad alcanzada por la HetNet definida empleando el algoritmo Optimización por Cúmulo de Partículas Socio-Cognitivo (SCPSO- *Socio Cognitive Particle Swarm Optimization*), mediante el establecimiento de diferentes parámetros y condiciones de restricción en el esquema de comunicaciones planteado. A continuación, se describen detalladamente cada una de ellas.

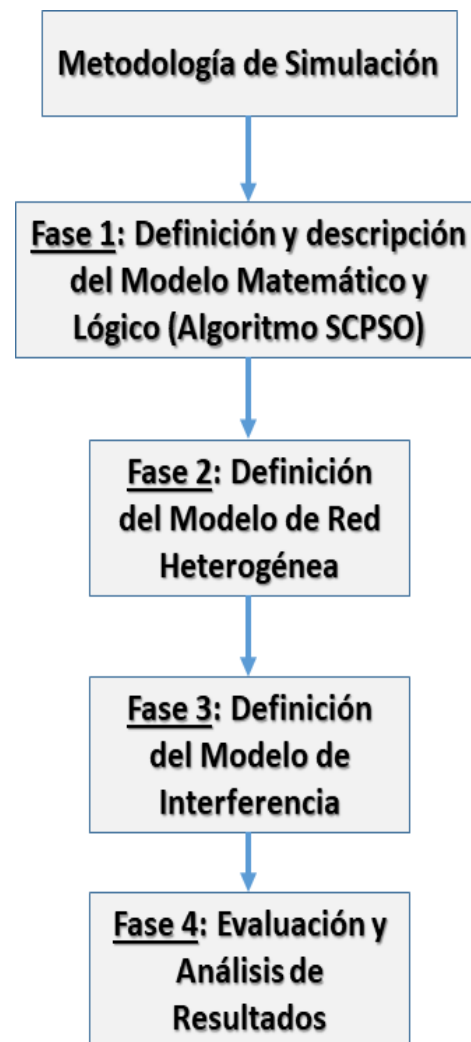


Figura. 1. Metodología de Simulación.

## Definición y descripción del algoritmo implementado.

El algoritmo SCPSO a implementar en esta investigación es una modificación del algoritmo denominado Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO- Particle Swarm Optimization) [13], el cual es un algoritmo metaheurístico bioinspirado, que se basa en una analogía con el comportamiento social de ciertas especies, reconociendo en él, dos influencias básicas de inspiración, que son: 1) El movimiento de bandadas de aves, en las que cada individuo se desplaza mediante reglas simples de ajuste de su velocidad en función de las observaciones que realiza sobre los individuos próximos en la bandada. Y 2) Un modelo social, en el que cada partícula representa una creencia, y las influencias entre individuos, basadas en la aproximación de unos individuos a otros por difusión de dichas creencias [14]. Para encontrar una solución, cada individuo, llamado "partícula", actualiza su velocidad de vuelo y posición iterativamente de acuerdo a su propia experiencia y la de otras partículas. La versión original de la técnica PSO encuentra soluciones en el espacio continuo. Sin embargo, muchos problemas de optimización están definidos en el espacio discreto, por ejemplo, los problemas de decisión, para ello se realizan algunas modificaciones del algoritmo original de acuerdo a las condiciones y restricciones que sean necesarias. En la Tabla I se describe el Algoritmo 1, el cual representa el modelo general de PSO implementado en este trabajo de investigación.

TABLA I  
Algoritmo 1: Pseudocódigo del algoritmo PSO

---

```

1: Inicializa aleatoriamente vectores de posición  $X$ , velocidad  $V$  y estado del
   Espectro  $SS$ 
2: Para  $i = 1$  hasta número de partículas
3:   Mapea  $X_i$  con  $SS$  y calcula niveles de SINR en  $PU$ 's y  $SU$ 's
4:   Mapea  $P_i$  con  $SS$  y calcula niveles de SINR en  $PU$ 's y  $SU$ 's
5:   Calcula tasas de datos  $U(X_i)$  y  $U(P_i)$ 
6:   Si  $U(X_i) > U(P_i)$  entonces
7:     Para  $j = 1$  hasta número de dimensiones
8:        $P_{ij} = X_{ij}$ 
9:     Siguiendo  $j$ 
10:    Fin si (6)
11:     $g = i$ 
12:  Para  $j = 1$  hasta número de partículas
13:    Mapea  $P_j$  con  $SS$  y calcula niveles de SINR en  $PU$ 's y  $SU$ 's
14:    Mapea  $P_g$  con  $SS$  y calcula niveles de SINR en  $PU$ 's y  $SU$ 's
15:    Calcula tasas de datos  $U(P_j)$  y  $U(P_g)$ 
16:    Si  $U(X_i) > U(P_i)$  entonces
17:       $g = j$ 
18:    Fin si (16)
19:  Siguiendo  $j$ 
20: Actualiza vectores de velocidad  $V$  y posición  $X$ 
21:   Si  $X_{ij} = 1$ 
22:     Asignar nuevo canal a  $X_{ij}$ 
23:   Fin si (21)
24: Siguiendo  $i$ 
25: Retorna conjunto usuarios seleccionados  $P_g$  Tasa máxima de datos  $U(P_g)$ 

```

---

Para el Algoritmo 1:

- $X_i$  se define como la cadena de bits que representa una solución candidata de la partícula  $i$ .
- $X_{ij}$  representa la dimensión  $j$  de la cadena de bits  $X_i$  de la partícula  $i$ .
- $P_i$  es cadena de bits que indica la mejor solución encontrada por la partícula  $i$ .
- $P_{ij}$  representa la dimensión  $j$  de la cadena de bits  $P_i$  de la partícula  $i$ . Valdrá 1 si el mejor valor encontrado por la partícula ocurrió cuando:

- $X_{ij}=1$ , de lo contrario,  $X_{ij}=0$ .  $g$  es el índice de la partícula que presenta la mejor solución encontrada en el enjambre.
- $P_g$  es una cadena de bits que indica la mejor solución encontrada por la partícula  $g$ .

En otra variación del algoritmo PSO denominada: Optimización Binaria por Cúmulo de Partículas (*BPSO-Binary Particle Swarm Optimization*) el movimiento de una partícula se basa en dos tipos de distancias, es decir, la distancia de la posición actual y la mejor posición ( $pbest$ ) de la partícula; pero no se utiliza información sobre la distancia entre  $pbest$  y  $gbest$ . Por otra parte en el algoritmo PSO, el peso de inercia  $w$  se emplea para controlar el impacto del historial anterior de velocidades en el actual. Ambos factores fueron introducidos en la arquitectura del algoritmo BPSO convencional para la generación de un nuevo modelo llamado SCPSO [15], el cual es más eficiente y efectivo en el proceso de evaluación de las métricas de optimización bajo análisis (maximización de tasa de datos de la HetNet y densidad de SU asignados).

En la Tabla II se presenta el Algoritmo 2, el cual relaciona la lógica que describe el modelo general de SCPSO desarrollado en este trabajo de investigación, haciendo referencia al proceso de actualización de los vectores de velocidad  $V$  y de posición  $X$ , descritos en la línea 20 del Algoritmo 1. Lo anterior se propone como solución al problema de DSA y mitigación de interferencia planteado.

TABLA II  
Algoritmo 2: Pseudocódigo del algoritmo SCPSO

---

1:	<i>Actualiza vectores de velocidad <math>V</math> y posición <math>X</math></i>
2:	<i>Para <math>d = 1</math> hasta número de dimensiones</i>
3:	<i>Actualiza velocidad</i>
4:	$V_{id} = W(V_{id} + f_c r_1 (P_{id} - X_{id}) + f_s r_2 (P_{gd} - X_{id})) + f_{sc} (gbest - pbest)$
5:	<i>Actualiza posición</i>
6:	$X_{id} = X_{id} + V_{id}$
7:	$X_{id} = X_{id} \bmod(2)$
8:	<i>Siguiente <math>d</math></i>
9:	<i>Retorna <math>X_i</math></i>

---

Para el Algoritmo 2:

- $V_{id}$  se define como una medida de la predisposición de la partícula  $i$  o la probabilidad actual de decidir 1 o 0 en  $X_{id}$ .
- $W$  es el peso de inercia empleado por el algoritmo
- $f_c$  y  $f_s$  se definen como los factores cognitivo y social, respectivamente.
- $r_1$  y  $r_2$  son números aleatorios uniformemente distribuidos en el rango  $[0,1]$ .
- $P_{id}$  es la dimensión  $d$  de un vector de números aleatorios generados con una distribución uniforme en el rango  $[0,1]$ .
- $X_{id}$  es la dimensión  $d$  de la cadena de bits  $X_i$  para la partícula  $i$ .
- $P_{gd}$  es la dimensión  $d$  de la cadena de bits  $P_g$  de la partícula  $g$ .

Con base en lo anterior la predisposición que tiene una partícula para decidir por 1 o 0, en  $V_{id}$ , se determina a través de un umbral de probabilidad en el rango  $[0.0,1.0]$  empleando la función sigmoide relacionada en la ecuación (1):

$$S(V_{id}) = \frac{1}{1 + e^{-V_{id}}}, \quad (1)$$

Ya definido y descrito el algoritmo SCPSO, y teniendo en cuenta que el problema a resolver se considera como multi-objetivo debido a que se pretende lograr un balance adecuado entre la tasa de datos y el número de usuarios secundarios asignados, con base en los requisitos de QoS necesarios, los cuales están intrínsecamente restringidos por los umbrales de SINR admisibles en la HetNet, se considera pertinente emplear el método de Suma Ponderada (*WS-Weighted Sum*), el cual permite transformar varias funciones objetivo en una sola función de utilidad y resolver el problema de optimización como si fuera mono-objetivo. Esto se logra multiplicando cada objetivo por un peso que refleja las preferencias del usuario [16]. En consecuencia, el método no sólo es capaz de proveer varios puntos de solución al modificar los pesos consistentemente, sino también de proveer un punto de solución seleccionando un único grupo de pesos [17]. De esta manera para usar el método multi-objetivo de WS en el redimensionamiento de un problema multi-objetivo a un problema mono-objetivo es necesario construir una función de utilidad  $U(x)$ , como se indica en la siguiente expresión (2).

$$U(x) = \sum_{m=1}^M \lambda_m f_m(X) \quad (2)$$

Donde M corresponde al número de funciones objetivo,  $\lambda_m \in [0,1]$  es el peso o ponderación, y X es el vector de variables de decisión.

### Definición del modelo de HetNet

Para resolver el problema de DSA objeto de estudio, se consideró, como escenario de evaluación, una HetNet como la relacionada en la Figura 2.

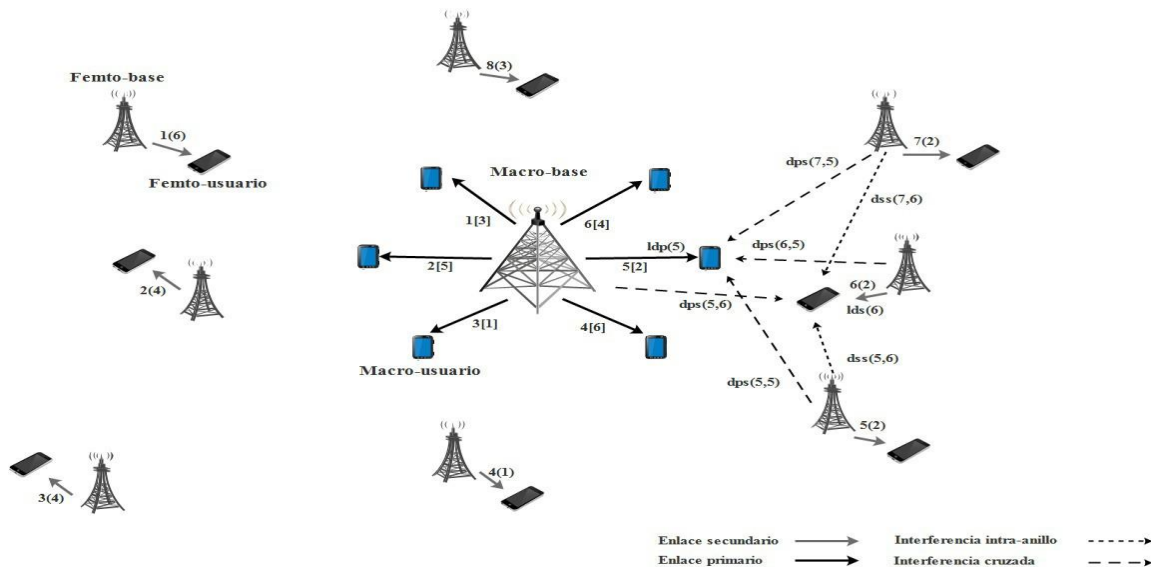


Figura 2. Modelo del sistema, Fuente: Modificada de [1].



El modelo de sistema presentado en la Figura 2, se compone principalmente de una combinación de macro-celdas convencionales de tamaño considerable, conocida como red primaria, que operan en una banda regulada; y de celdas de menor tamaño, en donde se incluyen micro-celdas, pico-celdas y femtoceldas, conocida o denominada como red secundaria, que puede funcionar en la misma banda de operación de la red primaria o en otra distinta. Dicha combinación de redes, permite lograr el incremento de la capacidad de todo el sistema en las zonas de mayor demanda de recursos, redistribuyendo el trfico entre las celdas más pequenas para no generar un drástico descenso en la transferencia de datos de las macro-celdas. Por otra parte, la operación en un esquema de espectro compartido de las HetNet requiere la implementación de diferentes estrategias de acceso y asignación de recursos radio (canal) que les permita el aprovechamiento adecuado de porciones espectrales (bandas de frecuencia) asignadas a la red. La concepción de espectro compartido hace referencia a que tanto los PU que pertenecen a las macro-celdas, como los SU que son atendidos por las femtoceldas o microceldas,

tienen igual oportunidad de utilizar las mismas bandas de frecuencia simultáneamente, y la única restricción para su uso es que no generen interferencia dañina entre ellos (control de umbrales de SINR), garantizando así un mínimo grado de QoS en ambas redes [1].

### Definición del modelo de SINR

Teniendo en cuenta el modelo de sistema expuesto en la Figura 2, es necesario comprender que la selección de los enlaces secundarios depende básicamente de la interferencia que éstos causen a los enlaces primarios, y además a los enlaces secundarios que hagan uso del mismo canal primario. En la Figura 3 se presenta el modelo esquemático básico de interferencia para la HetNet previamente definida, el cual se emplea para la determinación de los niveles de interferencia experimentados por cualquiera de los enlaces del sistema, teniendo en cuenta que el valor de SINR observado por el receptor del enlace secundario u se define matemáticamente por la expresión (3) y el del enlace primario v por la expresión (4), respectivamente.

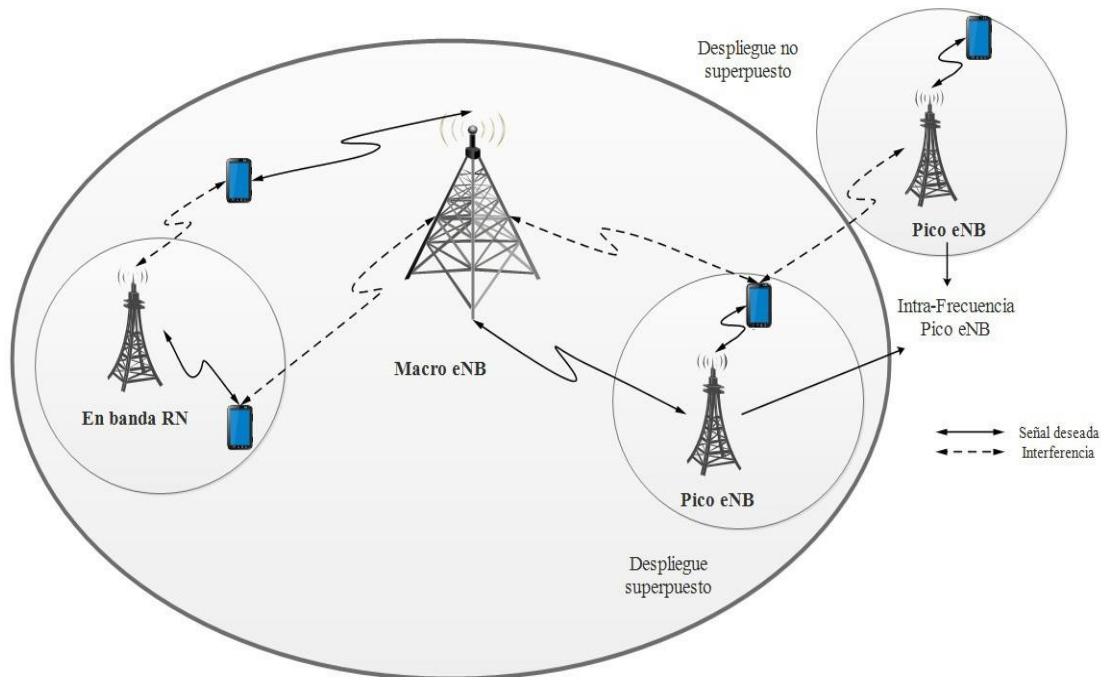


Figura 3. Modelo básico de SINR, Fuente: Modificada de [17].

$$SINR_u = \frac{P_u / lds(u)^n}{\sum_{k \in \Phi} P_k / dss(k, u)^n + P_v / dps(v, u)^n} ; 1 \leq u \leq SL \quad (3)$$

$$SINR_v = \frac{P_v / ldp(v)^n}{\sum_{k \in \Phi} P_k / dps(k, v)^n} ; 1 \leq v \leq PL \quad (4)$$

En (3), se puede observar que en el denominador existen dos términos que representan el nivel de interferencia que observa el receptor del enlace secundario  $u$ ; el primero de ellos se refiere a la interferencia producida por aquellos enlaces secundarios que utilizan el mismo canal que el enlace secundario que se está analizando (interferencia intra-anillo donde el agresor y la víctima pertenecen al mismo anillo); mientras que el segundo término representa la interferencia producida por el enlace primario que comparte su canal con los enlaces secundarios antes mencionados (interferencia cruzada donde el agresor y la víctima pertenecen a diferentes anillos) [1].

Para el caso de la expresión (3), se tienen las siguientes definiciones:

- $P_u$  es la potencia de transmisión del transmisor del enlace secundario  $u$ .
- $P_k$  es la potencia de transmisión del transmisor interferente del enlace secundario  $k$ .
- $P_v$  es la potencia de transmisión del transmisor interferente del enlace primario  $v$ .
- $lds(u)$  representa la distancia que existe entre el transmisor y receptor en el enlace secundario  $u$  que se desea analizar.
- $dss(k,u)$  es la distancia entre el transmisor interferente del enlace secundario  $k$  al receptor del enlace secundario  $u$ .
- $dps(v,u)$  es la distancia entre el transmisor primario interferente del enlace primario  $v$  al receptor del enlace secundario  $u$ .
- $k$ , se refiere al índice de sólo aquellos transmisores secundarios que tienen asignado un mismo canal.
- $\Phi$  es el conjunto de transmisores secundarios que utilizan el mismo canal primario.
- $n$  representa el factor de atenuación que sufre la señal en el enlace de comunicación que toma cualquier valor entre 2 y 4.

- SL número de enlaces secundarios desplegados en el sistema.

De manera análoga para la expresión (4), se tiene que:

- $P_v$  es la potencia de transmisión del transmisor del enlace primario  $v$ .
- $P_k$  es la potencia de transmisión del transmisor interferente del enlace secundario  $k$ .
- $ldp(v)$  representa la distancia entre el transmisor y receptor en el enlace primario  $v$  actual.
- $dps(k,v)$  es la distancia entre el transmisor secundario del enlace secundario  $k$  al receptor primario del enlace primario  $v$ .
- PL número de enlaces primarios desplegados en el sistema

En (4) sólo se considera la interferencia que generan los enlaces secundarios que utilizan el mismo canal que el enlace primario (interferencia cruzada), ya que se asume que no existe reuso de bandas espectrales en la red primaria.

### **Evaluación mediante simulación a nivel de sistema de la capacidad alcanzada por la HetNet definida empleando el algoritmo SCPSO**

Se definen como métricas de evaluación del sistema, su eficiencia espectral, mediante la evaluación de la tasa de datos y la densidad de SU permisibles a transmitir en la HetNet, ambas métricas intrínsecamente relacionadas con los niveles de SINR existentes en la red. Así, la tasa de datos alcanzada por cualquiera de los enlaces depende del ancho de banda  $B$  del canal que utilizan, y de las condiciones del entorno de propagación de cada enlace (interferencia y atenuación). Por lo tanto, la tasa de datos para un enlace secundario y primario, respectivamente, se definen en las

ecuaciones (5) y (6).

$$c'_u = B \log_2 (1 + \text{SINR}_u) \quad (5)$$

$$c''_v = B \log_2 (1 + \text{SINR}_v) \quad (6)$$

En consecuencia, se procede a definir la función multi-objetivo a utilizar como estrategia de compartición de canal, como se relaciona a continuación.

$$\text{Maximizar } f_1(X) = \sum_{u=1}^{SL} x_u ; \quad \text{Maximizar } f_2(X) = \sum_{u=1}^{SL} c'_u x_u + \sum_{v=1}^{PL} c''_v$$

Para lo cual se debe tener en cuenta las siguientes condiciones de restricción, así:

$$\begin{aligned} & \text{SINR}_u \geq \alpha ; \quad \text{SINR}_v \geq \beta \\ & c'_u > 0, \quad u = 1, 2, \dots, SL \\ & c''_v > 0, \quad v = 1, 2, \dots, PL \\ & c'_u, c''_v, \in R^+ \\ & x_u = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{SINR}_u \geq \alpha \text{ y } \text{SINR}_v \geq \beta \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \end{aligned}$$

Donde la función  $f_1$  hace referencia al número máximo de enlaces secundarios seleccionados que el sistema puede atender con un mínimo nivel de QoS, esto es, mantener la interferencia en la red primaria y secundaria a un nivel tolerable para ambas. La función  $f_2$  representa la máxima tasa de datos en la HetNet, esto es, considerando los enlaces secundarios seleccionados y los enlaces primarios presentes en el área de cobertura.

Por otro lado,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_{SL}]$  es un vector binario en el que cada una de sus posiciones simboliza si el  $u$ -ésimo enlace secundario es seleccionado ( $x_u = 1$ ), o no es seleccionado ( $x_u = 0$ ), como parte de la solución candidata [1]. Por ende y teniendo en cuenta el método multi-objetivo de SW, se procede a redimensionar el problema de optimización expuesto en (7), transformándolo en un problema de optimización mono-objetivo y conservando las mismas condiciones de

restricción previamente relacionadas, como se indica seguidamente.

$$\max U(X) = \lambda \cdot f_1(X) + (1 - \lambda) \cdot f_2(X) \quad (8)$$

Donde  $U(X)$  se entiende como la función de utilidad o función objetivo, y  $\lambda \in [0, 1]$  indicando la importancia relativa de cada objetivo.

### Definición de los parámetros del escenario de simulación

Para el proceso de simulación se considera únicamente los enlaces descendentes, es decir, de estación base a usuarios. Cada uno de los experimentos realizados, se diferencian entre sí, por el valor de QoS utilizado, con el fin de lograr una determinada aptitud o utilidad, tanto en la red primaria como en la red secundaria. Además, se establece un valor de umbral SINR (parámetro de control), para cada uno de los experimentos independientes, donde  $\alpha = \beta$ . Cada una de las simulaciones consiste en la ubicación aleatoria de enlaces secundarios, mientras que la ubicación de los enlaces primarios permanece siempre fija.

Las anteriores consideraciones se deben tener en cuenta para evitar que el algoritmo SCPSO no encuentre alguna solución candidata debido a una excesiva atenuación por la distancia del enlace.

Por otra parte, se consideró también una potencia de transmisión aleatoria tanto para los Tx primarios como secundarios, en el rango de 17 a 22 dBm; y se asume que todos los enlaces requieren el mismo ancho de banda por canal, puesto que transmiten trfico homogéneo, la atenuación de potencia debida a fenómenos multitrayectoria y sombreado no se considera para el cculo de SINR.

Finalmente en cada ejecución del algoritmo se evalúan las combinaciones de la asignación

de canales a enlaces secundarios y la máxima tasa de datos alcanzada de acuerdo a la función objetivo definida en (8), que dependen de la cantidad de partículas que se utilice en el enjambre, y de las iteraciones consideradas en el modelo.

Los parámetros de configuración considerados para el algoritmo SCPSO y para los diferentes experimentos realizados se relacionan en las tablas III y IV respectivamente.

**Tabla III.** Parámetros del algoritmo SCPSO

Parámetros	Valores Asignados
Tamaño del cúmulo $S$	40
Número de iteraciones $T_{max}$	100
Factores cognitivo, social y socio-cognitivo $c_1, c_2, c_3$	2, 2, 12
Peso de inercia $w$	0.721
Velocidad máxima $V_{max}$	$[-6, 6]$

**Tabla IV.** Parámetros de los experimentos realizados

Parámetros	Valores Asignados
Número de enlaces secundarios $SL$	20
Número de enlaces primarios $PL$	6
Canales primarios para compartir	1, 2, 3, 4, 5, 6
Umbral de SINR $\alpha, \beta$ [dB]	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14
Ancho de banda de canal primario [MHz]	20
Ponderación $\lambda$	0, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8, 1

## Resultados y análisis

En esta sección se describe el análisis de los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas, teniendo en cuenta que, para el caso específico de un operador, el valor de  $\lambda$  permite establecer un balance flexible entre la tasa de datos y el número de SU seleccionados de acuerdo a los niveles de SINR y QoS requeridos.

Con el fin de ilustrar el proceso cognoscitivo basado en inteligencia colectiva de enjambre, empleada como base para la solución propuesta al problema de investigación planteado, en la Figura 4 se relaciona una secuencia de imágenes asociada al proceso de asignación de canales para SU, en donde se puede observar la evolución dinámica para cada uno de ellos, en búsqueda de la mejor solución posible para la ocupación de un canal primario, cumpliendo siempre las condiciones de restricción previamente definidas en el esquema de espectro compartido; en ella se expone a manera de ejemplo cuatro estadios temporales iterativos de una simulación, en donde los puntos rojos representan los SU en búsqueda de un canal primario de acuerdo al comportamiento del enjambre de partículas, y las equis de color azul representan los SU con canal asignado, siempre y cuando se encuentren marcadas en uno de los ejes de los seis canales primarios; así, en el escenario uno se encuentran solo seis SU con canal asignado; en el escenario dos once; en el escenario tres trece; y en el escenario cuatro dieciocho; evidenciando como el algoritmo es capaz de aproximarse a un máximo global de la función objetivo.

De esta manera, después de realizar las simulaciones correspondientes para un valor específico de  $\lambda$ , se seleccionó el mejor valor de aptitud encontrado para la función de utilidad definida en (8). Por ejemplo, para  $\lambda=0$ , la función objetivo establecida corresponde al problema de maximización

de la tasa de datos, la mejor solución candidata encontrada se expone en la Figura 5. Por otra parte, cuando el factor de ponderación  $\lambda=1$ , la función objetivo representa el problema de maximización del número de SU asignados, el mejor valor encontrado para  $U(X)$  en este caso se puede apreciar en la Figura 6.

Cabe mencionar que el incremento de los valores en los umbrales de SINR ( $\alpha$  y  $\beta$ ) representa que la HetNet propuesta requiere mayores demandas de QoS para servicios que así lo ameriten, como por ejemplo un servicio de streaming de video en comparación con un servicio de voz.

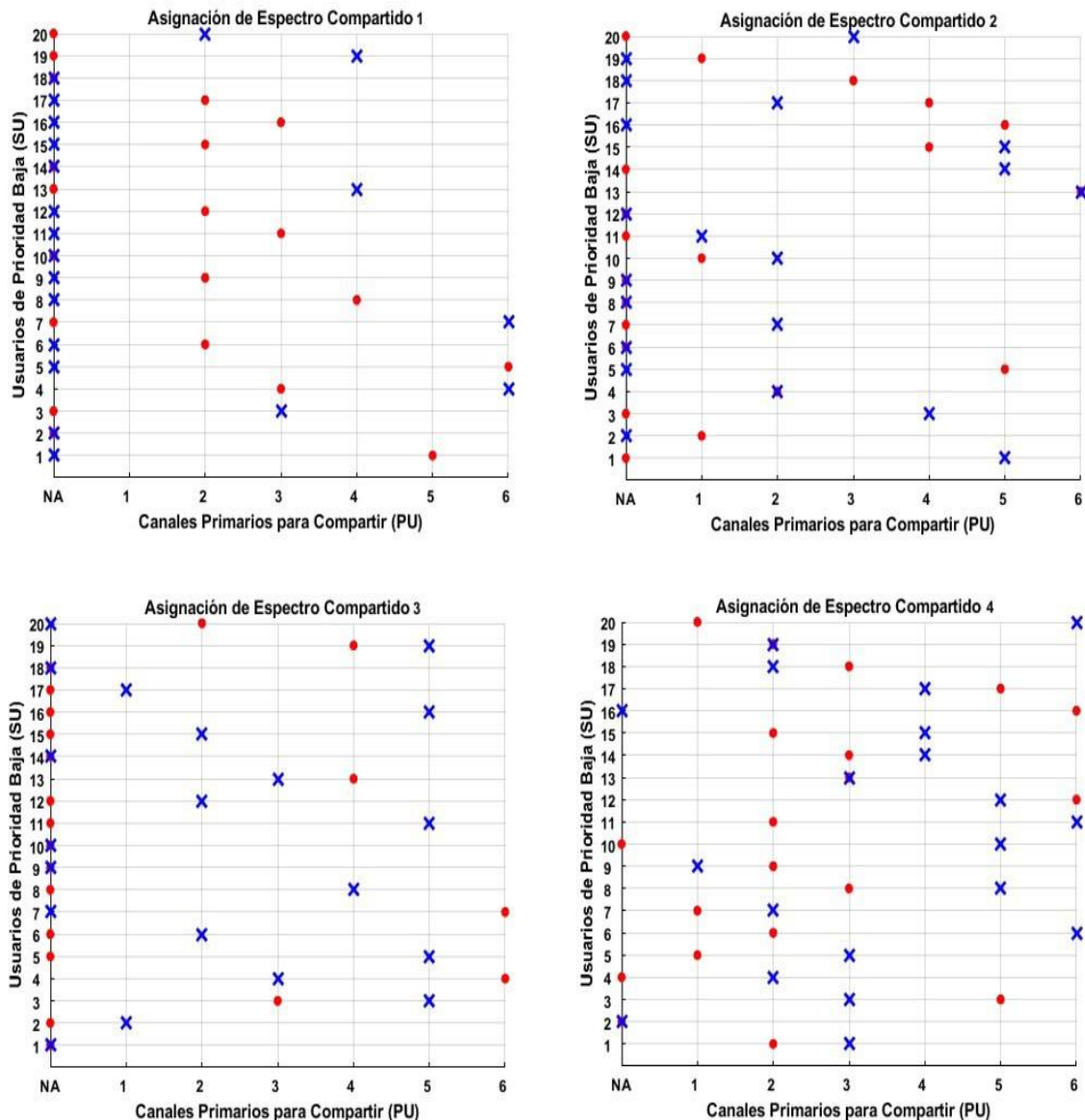


Figura. 4. Secuencia evolutiva (de izquierda a derecha, de arriba abajo) del proceso de asignación de usuarios secundarios compartiendo espectro en la HetNet objeto de evaluación.

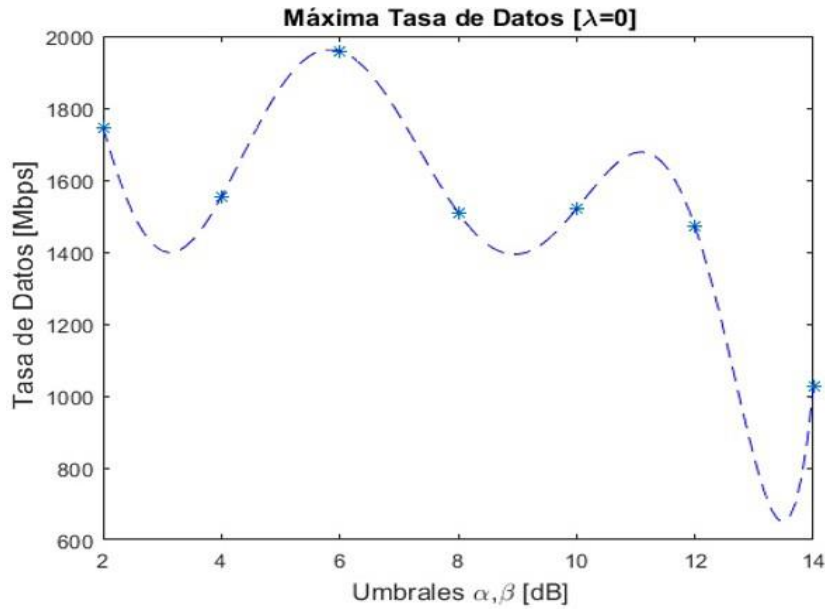


Figura 5. Mejores valores obtenidos para la función de utilidad con  $\lambda=0$ .

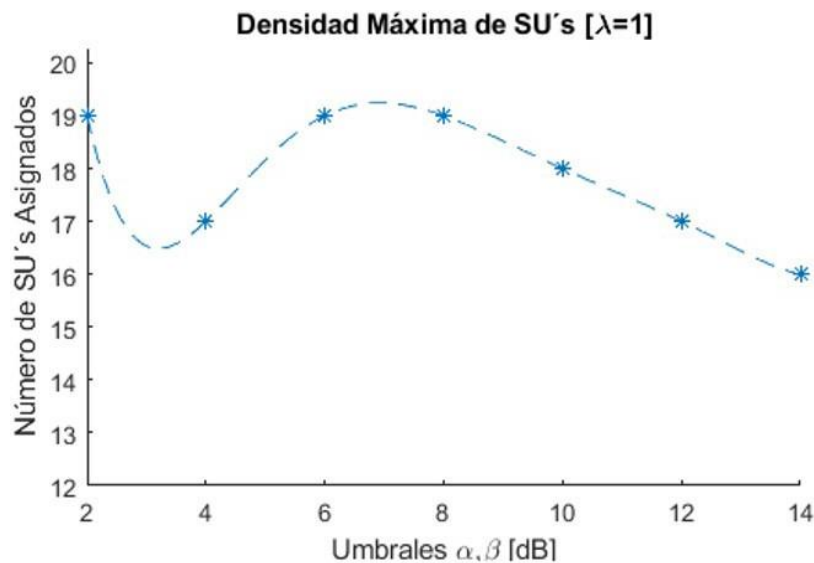


Figura 6. Mejores valores obtenidos para la función de utilidad con  $\lambda=1$ .

Del análisis de la Figura 5 se puede inferir que altos niveles de tasas de datos se alcanzan con umbrales bajos de SINR. En contraparte la Fig. 6 sugiere que para poder mantener altos niveles de SINR, es necesario disminuir el número de SU asignado, puesto que una densidad menor de SU genera una menor interferencia en la HetNet, permitiendo así mantener altas demandas de QoS.

En las Figura 7 a 10 se exponen los resultados obtenidos para los balances de las métricas bajo análisis, cuando  $\lambda=0.3$ ,  $\lambda=0.5$ ,  $\lambda=0.6$ , y  $\lambda=0.8$ .

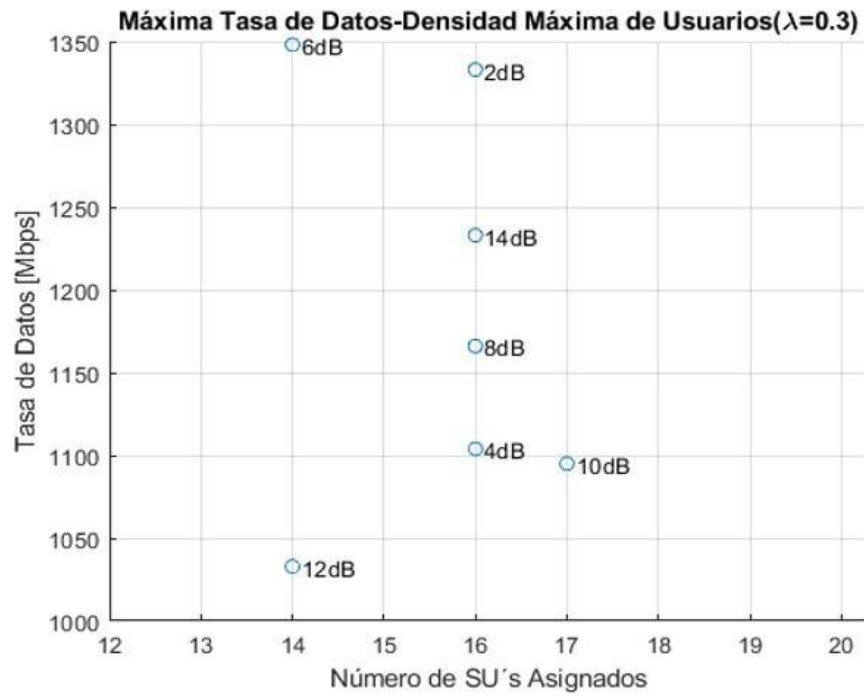


Figura 7. Balance entre tasa de datos y densidad de usuarios secundarios para  $\lambda=0.3$ .

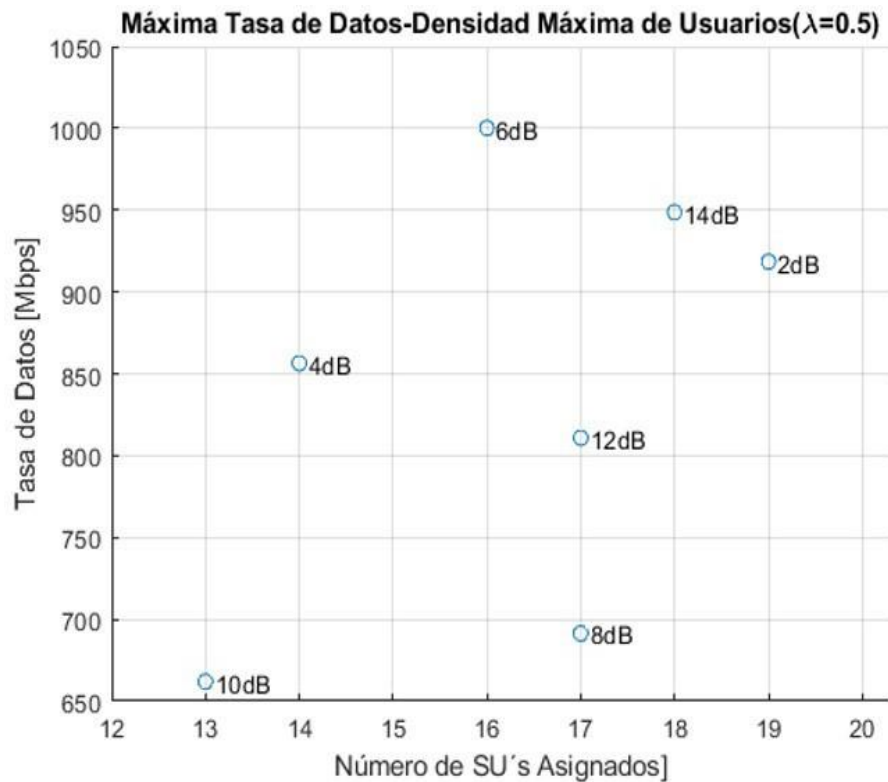


Figura 8. Balance entre tasa de datos y densidad de usuarios secundarios para  $\lambda=0.5$ .

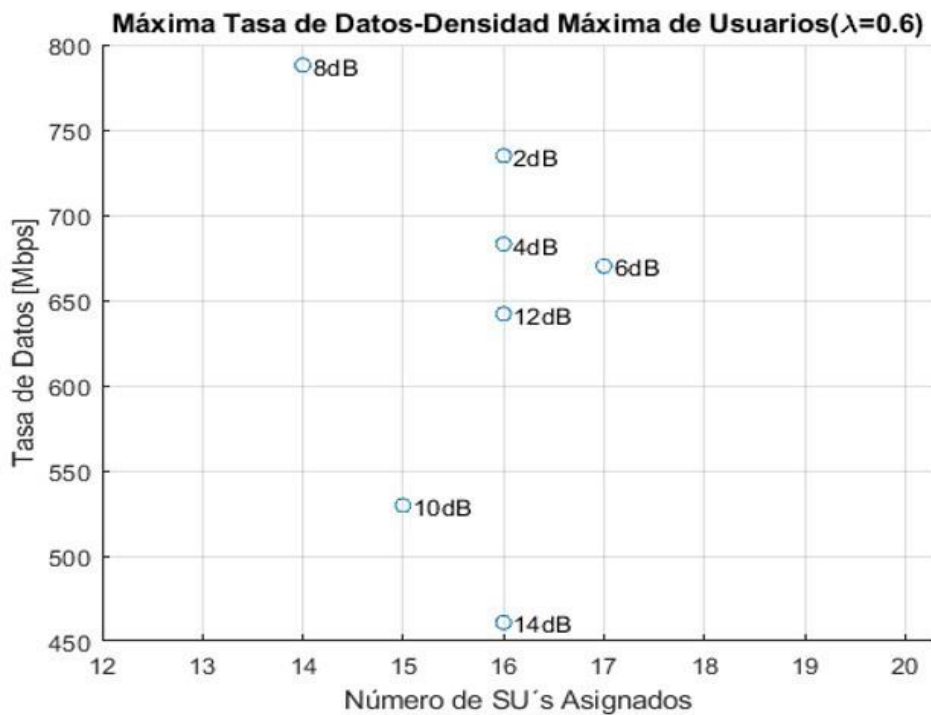


Figura 9. Balance entre tasa de datos y densidad de usuarios secundarios para  $\lambda=0.6$ .

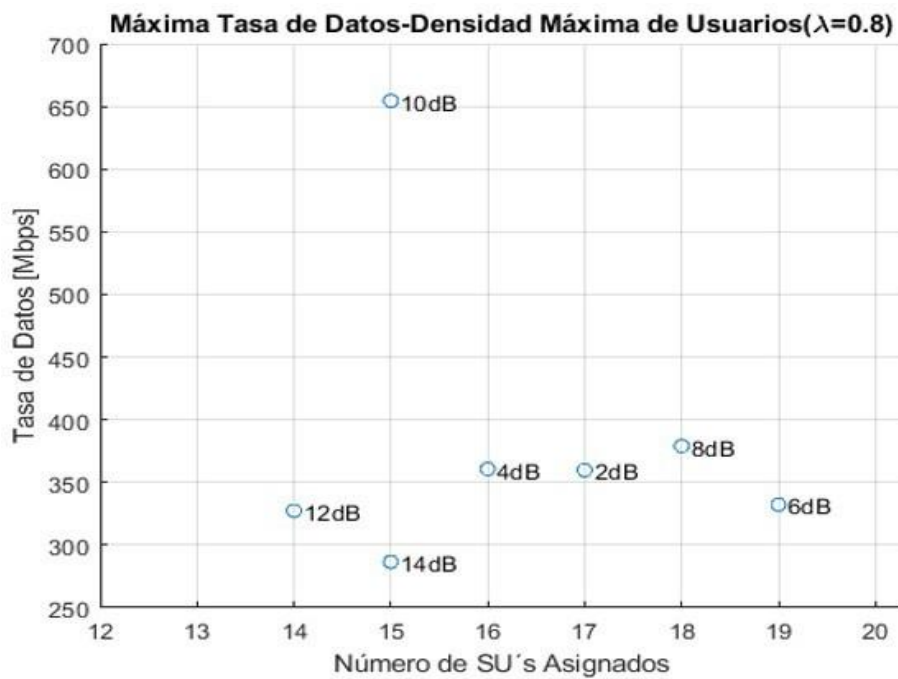


Figura 10. Balance entre tasa de datos y densidad de usuarios secundarios para  $\lambda=0.8$ .



De los diferentes resultados expuestos en las Figura 7 a 10 como los mejores balances encontrados para los diversos experimentos realizados, se infiere como balance óptimo para las métricas propuestas los valores alcanzados cuando  $\lambda=0.5$ ; aún cuando se pueda observar una alta preferencia en el criterio de tasa de datos cuando  $\lambda=0.3$ .

Por otra parte, de la Figura 10 se puede afirmar que su comportamiento presenta una preferencia en la asignación de una alta densidad de SU, sin embargo, no alcanza altos niveles de tasas de datos como los expuestos en la Figura 8.

Otra observación general de los resultados obtenidos, es que para alcanzar los umbrales de control SINR, niveles altos de este, requieren en la mayoría de los casos para los experimentos

realizados, el sacrificio de la tasa de datos y la densidad permitida de SU atendidos.

Finalmente, en la Figura 11 se presenta la curva de desempeño para el algoritmo SCPSO cuando se obtienen los mejores balances (factor  $\lambda=0.5$ ), en ella se relacionan los diferentes valores de aptitud asociados a las iteraciones temporales para cada uno de los umbrales de SINR ( $\alpha, \beta$ ) empleados en el proceso de experimentación y simulación. En general, se puede concluir que a partir de la iteración 80 no existen cambios en los valores de aptitud de la función de utilidad asociada a la convergencia de la máxima tasa de datos alcanzada para cada valor umbral de SINR, adicionalmente, se observa que a medida que el requerimiento de SINR aumenta en la HetNet la máxima tasa de datos alcanzada disminuye.

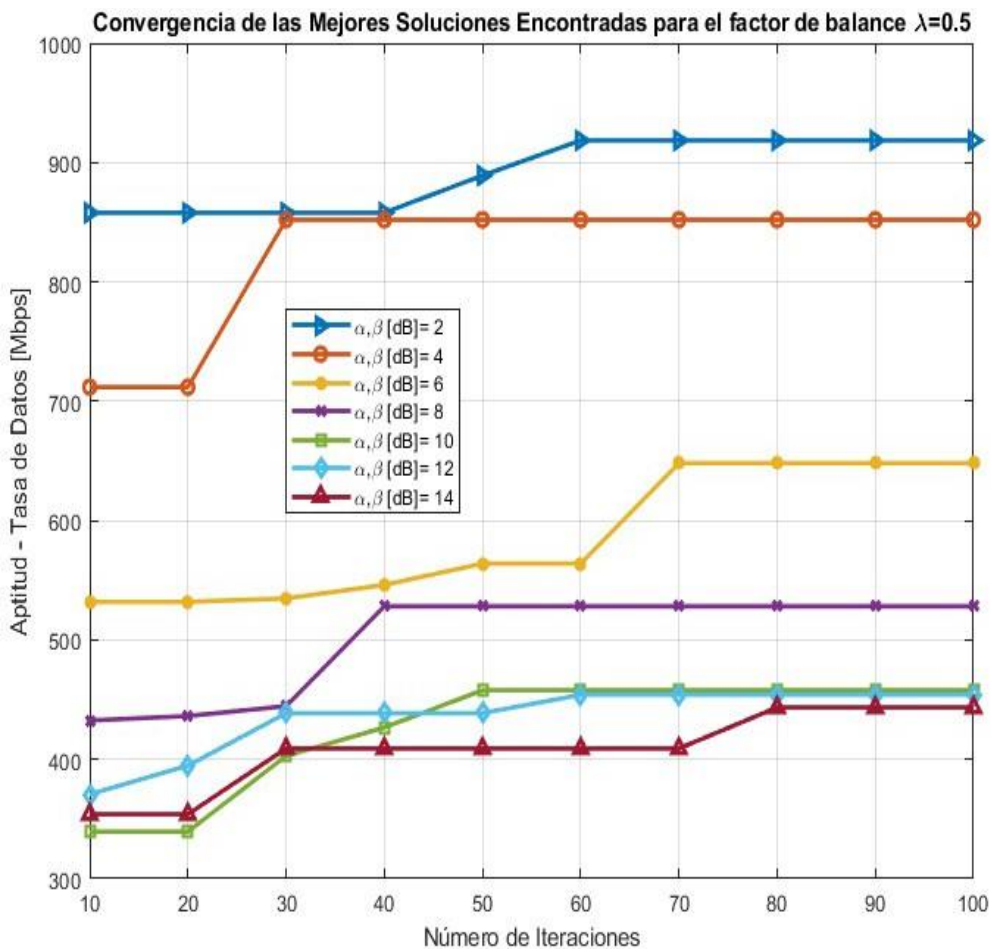


Figura 11. Curva de desempeño del algoritmo SCPSO en función de la convergencia de la tasa de datos para  $\lambda=0.5$ .

## Conclusiones

De acuerdo a la experimentación realizada se concluye que el algoritmo SCPSO es capaz de garantizar el uso concurrente promedio de un canal primario de comunicación a mínimo 16 y máximo 19 usuarios secundarios, lo que representa una disponibilidad de acceso al espectro en la red secundaria entre el 80 y 95%, respectivamente.

El algoritmo SCPSO implementado como propuesta de solución al problema de investigación planteado, permitió la evaluación de la eficiencia espectral en una HetNet conformada por una red primaria y una red secundaria con capacidades cognoscitivas, facilitando así el reuso concurrente de un canal primario o licenciado, por uno o más SU, siempre y cuando no exista degradación de los niveles de funcionamiento demandados por toda la HetNet y controlados por los umbrales de SINR del sistema.

Los resultados obtenidos en esta investigación son comparativamente equiparables a los obtenidos en los trabajos presentados en [18] y [19], lo que permite validar la pertinencia del modelo de espectro compartido desarrollado como estrategia de acceso dinámico e inteligente a un canal de comunicaciones primario.

En el caso del algoritmo SCPSO evaluado se puede concluir que el desempeño de la HetNet depende directamente de la tasa de datos que se requiera en todo el sistema, y recíprocamente de los niveles de SINR tolerables de toda la red, teniendo en cuenta las demandas de recursos radio tanto de PU como de SU.

El desarrollo e implementación de técnicas de control de admisión y asignación de espectro para la distribución y ocupación de canales secundarios, permite lograr un

estado de equilibrio entre el número máximo de SU coexistiendo de una manera pacífica y resiliente con los PU en un ecosistema RF dinámico.

## Referencias

- [1] A. Martínez. "Control de admisión y asignación de canal para acceso dinámico de espectro usando cómputo multi-objetivo". *Computación y Sistemas*, Vol. 19, No. 2, pp. 337-355, 2015.
- [2] C. Salgado. "Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas". *TECNURA*, Vol. 20, No. 49, 2016.
- [3] A. Martinez y Á. Andrade. "Comparing particle swarm optimization variants for a cognitive radio network". *Applied Soft Computing*, Vol. 13 No. 2, pp. 1222-1234, 2013.
- [4] A. Galvis y R. Márquez. "Simulación y Análisis de Alternativas para la Asignación Dinámica de Espectro en ambientes TDMA". *Proceedings IEEE de Sistemas de Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional/IEEE ComSoc, Quito-Ecuador, 2008.*
- [5] D.A. Roberson, C.S. Hood, y J.L. LoCicero. "Spectral Occupancy and Interference Studies in support of Cognitive Radio Technology Deployment". *1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks (SDR)*, Reston, USA, pp. 26-35, 2006.
- [6] N. Abbas, Y. Nasser, y K. El Ahmad. "Recent advances on artificial intelligence and learning techniques in cognitive radio networks". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1, 1-20, 2015.

- [7] Y. Zhang, Z. Zhang, Luo y H. Wang. "Initial spectrum access control with QoS protection for active users in cognitive wireless networks". *International Journal of Communication Systems*, Vol. 25, No. 5, pp. 636–651, 2012.
- [8] J. Tadrous, A. Sultany, M. Nafie. "Admission and Power Control for Spectrum Sharing Cognitive Radio Networks". *IEEE Transactions on Wireless*, Vol. 10, No. 6, pp. 1945–1955, 2011. DOI: 10.1109/TWC.2011.040411.101571.
- [9] S.D. Roy y S. Kundu. "Gradual removal of secondary user in cognitive-CDMA spectrum underlay network". *International Conference on Devices and Communications (ICDeCom)*, Mesra, Algeria, pp. 1–4, 2011.
- [10] B. Wang y D. Zhao. "Performance analysis in CDMA-based cognitive wireless networks with spectrum underlay". *IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)*, New Orleans, USA, pp. 1–6, 2008.
- [11] P. Liu, J. Li y H. Li. "An Iteration Resource Allocation Method to Maximize Number of Users with QoS Demand in Femtocell Networks". *2nd IEEE/CIC Conference on Communications in China*, pp. 554–558, 2013.
- [12] O. Ulgen, B. John, y J. Betty. "Simulation Methodology – A Practitioner’s Perspective", University of Michigan – Dearborn and Production Modeling Corporation. 2006.
- [13] J. Kennedy y R. Eberhart. "Particle swarm optimization". In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [14] A. Cervantes. "Clasificacin mediante enjambre de prototipos". Tesis Doctoral. Departamento de Informática. Universidad Carlos III de Madrid. 2016.
- [15] K. Deep y J.C. Bansal. "A Socio-Cognitive Particle Swarm Optimization for Multi-Dimensional Knapsack Problem". *Emerging Trends in Engineering and Technology Conference (ICETET)*, pp. 355–360, 2008.
- [16] K. Deb. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. New York: John Wiley & Sons. 2001.
- [17] R.T. Marler y J.S. Arora. "The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 41 No. 6, pp. 853–862, 2010.
- [18] A. Martínez y A. Andrade. "Deployment analysis and optimization of heterogeneous networks under the spectrum underlay strategy". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 1, pp. 1–15, 2015.
- [19] A. Martínez y A. Andrade. "Comparing particle swarm optimization variants for a cognitive radio network". *ELSEVIER*, pp. 1222–1234, 2012.
- [20] Z. Haibo, Y. Quan, S. Xuemin, W. Shaohua y Z. Qinyu. "Dynamic Sharing of Wireless Spectrum". Springer, 2017.
- [21] A. Karandikar, N. Akhtar y M. Mehta. *Mobility Management in LTE Heterogeneous Networks*. Singapore: Springer. 2017.
- [22] T. Erpek, M.A. Mchenry y A. Stirling. "Dynamic spectrum access operational parameters with wireless microphones". *IEEE Communications Magazine*, Vol.

49, No. 3, pp. 38–45, 2011. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5723798.

[23]M. Esteban. “Optimización Binaria por Cúmulo de Partículas con Memoria (MBPSO) para Resolver un Problema de Espectro Compartido”. *Computación y Sistemas*, vol. 20, No. 1, pp. 153-168, 2016.

[24]M. Ali, S. Qaisar y M. Naeem. "Resource allocation for licensed and unlicensed spectrum in 5G heterogeneous networks". *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, e3299, 2018.