

Control de admisión y asignación de canal para acceso dinámico de espectro usando cómputo multi-objetivo

Anabel Martínez-Vargas¹, Ángel G. Andrade², Roberto Sepúlveda¹, Oscar Montiel-Ross¹

¹ Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI-IPN), Tijuana,
México

² Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Mexicali,
México

{anmartinezv, rsepulvedac, orross}@ipn.mx, aandrade@uabc.edu.mx

Resumen. 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. Ello ha formado una idea errónea de que existe una escasez de espectro, sin embargo; diversos estudios han concluido que se trata de un problema de acceso al espectro ya que se ha observado que mientras ciertas bandas se encuentran saturadas otras presentan un uso escaso. En este contexto, el Acceso Dinámico de Espectro (DSA, por sus siglas en inglés Dynamic Spectrum Access) se propone como una solución para reciclar el espectro, compartiendo bandas de frecuencia entre las tecnologías y servicios inalámbricos que así lo requieran. El principal reto de la tecnología DSA, radica en que se les debe garantizar a los usuarios primarios (PU, usuarios con prioridad alta de acceso a un canal) protección contra la interferencia que pudieran generar los usuarios secundarios (SU, usuarios con prioridad baja de acceso a un canal). Una de las estrategias del DSA es la explotación simultánea de un canal tanto por el PU y por uno o más SU's, siempre y cuando, estos últimos no sobrepasen un umbral de la potencia de interferencia impuesto por el PU. Lo anterior limita el acceso a una cantidad excesiva de SU's a la red, de forma tal que se logre una coexistencia pacífica con los PU's presentes en el área de cobertura. Este trabajo propone un algoritmo multi-objetivo (MO) de control de admisión y asignación de canal para establecer el compromiso entre la máxima tasa de datos y el número máximo de SU's que pueden compartir concurrentemente un canal primario bajo restricciones de Calidad de Servicio (QoS, por sus siglas en inglés Quality of Service). Para resolver el problema de optimización se utiliza una estrategia híbrida consistente en la Optimización por Cúmulo de Partículas

(PSO, por sus siglas en inglés Particle Swarm Optimization) y el Método MO de Suma Ponderada.

Palabras clave. Optimización multi-objetivo, acceso dinámico de espectro, optimización por cúmulo de partículas, método de suma ponderada.

Admission Control and Channel Allocation for Dynamic Spectrum Access using Multi-objective Optimization

Abstract. The growing development of applications, utilization time, technologies, and data rates are increasing the demands for and value of the finite spectral resources. It creates an idea of spectrum scarcity; however, several studies concluded that the shortage of the spectrum is a spectrum access problem since certain bands are used sporadically while in others the spectrum resource is scarce. In this context, dynamic spectrum access (DSA) is proposed as a solution to reuse spectrum sharing spectrum bands. Its main challenge is to guarantee protection against interference to primary users (PU, users with high priority to access a channel), when a frequency band is shared with secondary users (SU, users with low priority to access a channel). To achieve this, a DSA strategy is that a SU transmits simultaneously with the PU as long as the resulting interference is constrained. The aforementioned involves controlling the number of selected SUs to the network to assure a peaceful coexistence with the PUs in the area. This work proposes a multi-objective admission control and channel allocation algorithm to determine the tradeoff between the maximum data rate and the maximum

number of selected SUs to concurrently share a spectral resource considering Quality of Service (QoS) constraints. To figure out the solution that considers the two conflicting objectives, Particle Swarm Optimization (PSO) and the Weighted Sum Method are applied.

Keywords. Multi-objective optimization, dynamic spectrum access, particle swarm optimization, weighted sum method.

1. Introducción

En los últimos años las tecnologías inalámbricas se han convertido en un recurso invaluable para promover el desarrollo humano y económico —desde la provisión de servicios confiables de comunicación y emergencias, pasando por el acceso a información sobre salud y la realización de pagos en efectivo, hasta el impulso en la generación de empleos y, en algunos países, el estímulo de la participación ciudadana en procesos democráticos. Esta proliferación de tecnologías inalámbricas está acompañada de mayores exigencias de QoS por parte de los usuarios, incrementando, con ésto, la demanda y el costo de los recursos espectrales. Algunas estimaciones prevén que para el 2017, el tráfico de dispositivos inalámbricos y móviles excederá en un 55% al generado por los dispositivos cableados [1]. Por lo tanto, la administración del espectro y el uso mismo que las tecnologías inalámbricas hacen de éste, lo ha vuelto un tema de interés.

Hoy en día, en la mayoría de los países, las redes y aplicaciones inalámbricas están reguladas mediante una política de asignación de espectro fija [2]. El Estado regula, administra y asigna la utilización de las diferentes bandas de frecuencia a distintos usuarios y servicios mediante una autorización, permiso o licencia a largo plazo. Con esta forma de administrar el espectro se les garantiza a las distintas tecnologías inalámbricas, protección contra la interferencia pero, por otro lado, ha provocado que cada vez sea más difícil encontrar bandas libres para el despliegue de nuevos sistemas de comunicación inalámbrica, especialmente en las bandas por debajo de los 3 GHz (valiosas por sus características favorables para la propagación). Dada la creciente demanda

por recursos espectrales, se ha generado una idea errónea de escasez de espectro, ya que como diversos estudios han demostrado, gran parte del espectro asignado bajo esta política se encuentra subutilizado la mayor parte del tiempo, observándose variaciones temporales y geográficas en su uso, con rangos de utilización desde el 15% al 85% [3]. Lo anterior motiva a que las entidades regulatorias revisen su política actual de administración del espectro con el fin de reformar su acceso y uso a una forma más eficiente y flexible. En este contexto, se propone el DSA como una solución para reusar el espectro, ya sea, compartiéndolo concurrentemente entre distintas tecnologías inalámbricas o reciclando el espectro cuando se encuentre disponible. Esta forma de administración tiene una estructura de acceso al espectro priorizada, en la que los usuarios con prioridad baja (SU's) rastrean las actividades de los usuarios con prioridad alta (PU's) para explotar sus canales de comunicación; para lo anterior, el SU ajusta sus parámetros de transmisión con el fin de no interrumpir la comunicación de los PU's. La tecnología de Radio Cognoscitiva (CR) [4] provee a los SU's con la capacidad de adaptar de manera óptima sus parámetros de operación de acuerdo a las interacciones con el entorno de radio circundante.

Lo anterior permite que usuarios que pertenecen a una red inalámbrica utilicen canales de comunicación de otras redes y que distintos usuarios puedan utilizar el mismo canal [5]. Sin embargo, el riesgo que se corre es que los usuarios estarán expuestos a la interferencia que generan los mismos usuarios que participan en la compartición del espectro [6].

A diferencia de predefinir la cantidad de canales y sus anchos de banda, los dispositivos habilitados con tecnología de CR seleccionarán su propia frecuencia central y modificarán el ancho de banda de acuerdo al espectro disponible y a sus necesidades de transmisión.

Con DSA se incrementa la eficiencia espectral al aprovechar la subutilización que existe del espectro, es decir, utiliza aquellas bandas de frecuencia que los PU's no usan en un tiempo o espacio determinado. La eficiencia espectral se mide en términos de la máxima tasa de datos que se logra transmitir en la red, y en el número de SU's que pueden compartir simultáneamente con

los PU's los recursos espirituales, siempre y cuando se respete el nivel de QoS impuesto en las redes primaria y secundaria. Este último aspecto es crítico, ya que se debe establecer un balance entre los recursos disponibles y el número de SU's que demandan por esos recursos, ya que otorgar permisos de transmisión a pocos SU's, cuando en realidad hay recursos para atender a una mayor cantidad, provocaría que el sistema sea ineficiente debido a que no se aprovecharían las porciones espirituales. Por otro lado, considerar demasiada autonomía, es decir, que una gran cantidad de SU's tengan acceso a un canal de comunicación provocaría un sistema autodestructivo, por el incremento de interferencia y colisiones entre los SU's al tratar de acceder a una misma porción espiritual. Además, la tasa de datos que puede lograrse en la red está relacionada con las contribuciones de los SU's admisibles en el sistema. El problema de compartición de espectro se puede dividir en dos subproblemas: la maximización de SU's que cumplan con los requerimientos para utilizar un canal primario y, la maximización de los datos transmitidos en el sistema. En este contexto, el presente trabajo resuelve el problema de espectro compartido implementando una estrategia que controla la transmisión de SU's mediante la asignación de un canal de comunicación. Para ello, se toman en cuenta múltiples objetivos que permiten determinar el compromiso entre la máxima tasa de datos y el número máximo de SU's seleccionados en el sistema inalámbrico para utilizar un canal de transmisión. El problema de optimización se puede catalogar del tipo NP-duro, debido al gran consumo en recursos computacionales necesarios para encontrar una solución óptima, los cuales crecen de forma exponencial con respecto al tamaño del problema. Los algoritmos metaheurísticos tratan con esta clase de problemas y, a diferencia de las técnicas de optimización clásicas (método de gradiente, programación lineal, entre otros), éstos no exploran todo el espacio de búsqueda asociado, por lo que son capaces de encontrar soluciones "buenas" (e incluso en algunos casos la solución óptima) con un tiempo y consumo de recursos aceptables. Muchos de los algoritmos metaheurísticos están inspirados en procesos naturales [7]: Algoritmos Evolutivos y Sistemas

Inmunes Artificiales de la biología; Optimización por Colonia de Hormigas, Colonias de Abejas, y Optimización por Cúmulo de Partículas de la inteligencia colectiva en diferentes especies; y el Recocido Simulado de la física. A diferencia de que el operador seleccione directamente una solución apropiada del conjunto óptimo de Pareto, en este trabajo, esta solución se obtiene directamente incorporando sus preferencias en los objetivos a través del Método MO de suma ponderada, y la metaheurística de PSO para su búsqueda.

Este artículo está organizado de la siguiente manera, en la sección 2 se presenta el estado del arte en control de admisión y asignación de canal en redes inalámbricas bajo un esquema de espectro compartido. En sección 3 se describe la metaheurística PSO y el método MO de suma ponderada, para enseguida, en sección 4 mostrar su integración en la estrategia de control de admisión y asignación de canal propuesta. El análisis de resultados es presentado en la sección 5. Finalmente, la sección 6 muestra las conclusiones y contribuciones del trabajo de investigación.

2. Trabajo relacionado

En la literatura se han propuesto diversas estrategias para resolver el problema de control de admisión y asignación de canal en redes inalámbricas bajo un esquema de espectro compartido. Todas ellas en busca de minimizar la interferencia hacia la red primaria principalmente. Por ejemplo, en [8] se propone un algoritmo de control de acceso que maximiza la cantidad de SU's admitidos al sistema, considerando como restricción la QoS 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's, mediante un algoritmo de Control de Potencia Distribuido con Protección de QoS para SU Activos (Distributed Control Power with Active SU QoS Protection, DCP-AQP). 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's 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's le indican a los SU's 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's. Aunque en este trabajo se logra incrementar la eficiencia espectral del sistema, esto es, un mayor número de SU's coexisten con los PU's utilizando los mismos canales de comunicación de forma simultánea, la propuesta requiere de un despliegue adicional de MP's para medir continuamente la interferencia presente en el sistema, además del desarrollo de un protocolo de comunicación entre los MP's y los SU's, el cual no se describe en este trabajo.

En [9], un grupo de PU's comparten un receptor primario y un grupo de SU's pueden utilizar uno o varios canales simultáneamente con ellos, sólo si satisfacen su relación señal-interferencia (SINR), se mantienen 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's admitidos y, 2) maximizar la tasa de datos de los SU's 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's que pueden coexistir con los PU's. 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. Por otro lado, los autores en [10] buscan maximizar la tasa de transmisión de los SU's sujeta a restricciones de SINR tanto en los PU's como SU's, y un umbral de interferencia en los PU's. El modelo se evalúa mediante programación geométrica bajo dos criterios: asignación de igual tasa de datos y asignación de tasa de datos proporcional. Considerando el modelo presentado en [10], el trabajo en [11] muestra un esquema de

eliminación de SU's cuando la interferencia en la estación base primaria (BS) 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 [10]. 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 BS primaria y, con ésto, se mantiene el nivel de QoS requerido por los PU's.

En [12], se modela el problema de espectro compartido en una red celular como un problema de calendarización. El objetivo es lograr una tasa de datos justa para todos los SU's de la red secundaria. Se proponen dos heurísticas de calendarización: por utilidad multi-usuario y por umbral de interferencia multi-usuario. En la primera, las prioridades de transmisión de los SU's se determinan por sus contribuciones a la función de utilidad, mientras que en la segunda las prioridades de transmisión se establecen considerando la interferencia de la red primaria. Lo anterior permite establecer radios de protección a los SU's donde las transmisiones de otros SU's no son permitidas dentro de esta zona, evitando las transmisiones simultáneas que puedan ocasionar interferencia mutua. Los resultados muestran que establecer radios de protección a los SU's mejora significativamente su tasa de datos.

A diferencia de los trabajos anteriores, existen otras propuestas que modelan el problema de espectro compartido como un problema MO. Por ejemplo, en [13] los autores determinan el compromiso en un sistema de comunicación móvil de futura generación, entre el máximo número de SU's (llamados femto-celdas) con demanda de QoS y la máxima razón de reuso del recurso espectral. 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 D_i , si esta distancia es menor que D_i , éstas no podrán compartir el recurso espectral.

El problema MO se convierte en un problema mono-objetivo en el que su transformación incluye una ponderación que disminuye con las iteraciones y se resuelve aplicando el método exacto de Branch and Bound. Sin embargo, en el modelo MO propuesto no se considera la

protección contra la interferencia de los PU's, es decir, minimizar la interferencia hacia la macrocelda, la cual es provocada por el reuso del mismo recurso en las femto-celdas.

Otro esfuerzo en este sentido se propone en [14]. En este trabajo se maximiza la tasa de datos de los SU's y se considera un mecanismo de control de potencia sobre éstos. Para esto se utiliza un enfoque de teoría de juegos. No obstante, si un PU experimenta un valor de interferencia mayor al límite permitido, la BS primaria selecciona aleatoriamente a alguno de los SU's activos en el sistema forzándolo a detener su transmisión, ésto se repite hasta que ningún PU reporte este conflicto. El proceso de apagado de SU's selecciona a un SU o grupo de SU's sin importar si éstos mantienen niveles aceptables de SINR, lo que repercute directamente en la tasa de datos de la red secundaria.

A diferencia de los trabajos anteriores, en esta propuesta consideramos, además de la eficiencia espectral de los SU's, la eficiencia espectral de los PU's para el cálculo de la eficiencia espectral de la red heterogénea. Asimismo, se reduce el consumo de recursos computacionales, ya que la mayoría de los trabajos anteriormente descritos, además del método de solución del problema, requieren implementar algoritmos de eliminación de SU's para buscar el grupo de SU's que pueden coexistir con el PU, removiendo parcialmente SU's 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, además de que existe la posibilidad de que SU's con niveles aceptables de SINR no se les asigne un canal de comunicación. Finalmente, otra diferencia de la presente propuesta con las discutidas en esta sección, es que aborda el compromiso entre la máxima densidad de SU's permisible y la máxima tasa de datos en el sistema heterogéneo.

La importancia de abordar este compromiso se menciona en [15], ya que obtener la máxima tasa de datos en el sistema heterogéneo no representa necesariamente el máximo número de SU's seleccionados.

3. Metaheurística PSO y método MO de suma ponderada

3.1. PSO binario

La optimización por cúmulo de partículas tiene sus orígenes en los trabajos de James Kennedy y Russell C. Eberhart, en los cuales describen el modelo de conducta social del vuelo de las bandadas de aves y el movimiento de los bancos de peces [16]. PSO es una técnica metaheurística basada en poblaciones (es decir trabaja con un conjunto de soluciones en cada iteración) que se fundamenta en los factores que influyen en la toma de decisión de un agente que forma parte de un conjunto de agentes similares. Las reglas se formulan de tal forma que dichos agentes funcionen sin la necesidad de una estructura de control centralizada, de manera que interacciones locales entre cada agente y el ambiente permitan la emergencia de comportamientos globales inteligentes.

Para encontrar una solución, cada individuo, llamado "partícula", actualiza su velocidad de vuelo y posición iterativamente de acuerdo a su propia experiencia de vuelo 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. El primer intento de PSO que se desarrolló para problemas discretos se le conoce como PSO binario (BPSO) [17], éste se basa en un esquema de codificación binaria, conservando la misma ecuación de velocidad de la versión continua y forzando los cambios de bits en la solución candidata de una partícula a través de la función sigmoide.

La idea general del algoritmo BPSO [18] se basa en un ser simple y con un conjunto de decisiones por tomar, si/no o cierto/falso. Así mismo, este ser simple se encuentra rodeado por otros seres simples, de las mismas características, quienes también deben tomar una decisión. Para tomar la mejor decisión estos seres solamente cuentan con información de su propia experiencia (ya evaluaron las alternativas y conocen el mejor estado hasta el momento) y la de los otros seres. Estos dos componentes de información, el

Algoritmo 1: Pseudocódigo del algoritmo BPSO

```

1: Repite
2:   Para i = 1 a número de partículas
3:     Si f(Xi) > f(Pi) entonces
4:       Para d = 1 a número de dimensiones
5:         pid = Xid
6:         Siguiente d
7:       Fin Si
8:       g = i
9:     Para j = 1 a número de partículas
10:      Si f(Pj) > f(Pg) entonces g = j
11:      Siguiente j
12:    Para d = 1 a número de dimensiones
13:      vid = vid + c1r1( pid - Xid ) + c2r2 ( pgd - Xid )
14:      vid ∈ ( -Vmax, +Vmax )
15:      Si pid < s(vid) entonces xid = 1;
        de otra manera xid = 0;
16:      Siguiente d
17:    Siguiente i
18: Hasta que se alcance la condición de paro
19: Retornar (Pg, f(Pg))

```

conocimiento adquirido por los sentidos a través de la experiencia en el mundo y el conocimiento adquirido de los otros, es la fuente de la inteligencia humana.

BPSO tiene una estructura casi idéntica a PSO, en la que la velocidad sigue definida para el espacio continuo, sin embargo, en BPSO no se considera la velocidad como tal, sino que la utiliza para definir la probabilidad de que ocurra un cambio de bit. Otra diferencia con respecto a PSO es que el vector posición X_i es ahora un vector de dígitos binarios en lugar de un vector de valores continuos [19]. El Algoritmo 1 muestra la implementación de BPSO [18].

En el Algoritmo 1:

- X_i es la cadena de bits que representa una solución candidata de la partícula i .
- x_{id} es la dimensión d de la cadena de bits X_i de la partícula i .
- P_i o $pbest$ es una cadena de bits que representa la mejor solución encontrada por la partícula i .
- p_{id} es la dimensión d de la cadena de bits P_i de la partícula i . Es 1 si el mejor encontrado por la partícula ocurrió cuando $x_{id} = 1$, en caso contrario, $x_{id} = 0$.

- V_i es un vector que representa los cambios de probabilidad en la partícula i para decidir por 1 ó 0.
- v_{id} es una medida de la predisposición de la partícula i o probabilidad actual de decidir 1 ó 0 en x_{id} .
- c_1 y c_2 son los factores cognitivo y social respectivamente.
- g es el índice de la partícula que tiene la mejor solución encontrada en el cúmulo.
- P_g o $gbest$ es una cadena de bits que representa la mejor solución encontrada por la partícula g .
- p_{gd} es la dimensión d de la cadena de bits P_g de la partícula g .
- r_1 y r_2 son números aleatorios uniformemente distribuidos en el rango [0,1].
- ρ_{id} la dimensión d de un vector de números aleatorios generados de una distribución uniforme en el rango de [0.0, 1.0].

La predisposición de una partícula para decidir por 1 ó 0, v_{id} , es medida a través de un umbral de probabilidad en el rango de [0.0, 1.0] usando la función sigmoidal (1):

$$s(v_{id}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id})}. \quad (1)$$

Para valores altos de v_{id} , la partícula tiende a favorecer la elección de 1, mientras que si los valores son bajos la partícula tiende a favorecer la elección de 0 [18].

3.2. Método MO de suma ponderada

Uno de los métodos más comunes utilizados para tratar con problemas MO es el método de suma ponderada, el cual transforma varias funciones objetivo en una sola función de utilidad y resuelve el problema de optimización como si fuera mono-objetivo. Esto se logra multiplicando cada objetivo por un peso que refleja las preferencias del usuario [20]. Con ello, 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 [21].

Los métodos que incorporan preferencias del usuario en sus objetivos se clasifican en *a priori* y

a posteriori [21]. En el primer caso, el usuario indica sus preferencias antes de ejecutar el algoritmo de optimización obteniendo con ello una sola solución que reflejará tales preferencias. En el segundo caso, el usuario directamente selecciona un sólo punto de una representación de un conjunto óptimo de Pareto. En particular, este trabajo se concentra en el uso del método de suma ponderada por articulación *a priori*.

Usar el método MO de suma ponderada para convertir un problema MO a un problema mono-objetivo requiere formar una función de utilidad $U(X)$, como se muestra en (2) [22]:

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

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

Es una práctica común seleccionar pesos que en conjunto su suma sea 1, es decir, $\sum_{m=1}^M \lambda_m = 1$.

En este trabajo se considera el argumento de que si los pesos son vistos como la representación de un compromiso entre las funciones objetivo, entonces es una ventaja mantener las unidades originales de los objetivos, sin aplicar alguna transformación [21].

El método MO de suma ponderada es sencillo de implementar y reduce el consumo de recursos computacionales en comparación con los métodos basados en frente de Pareto. Esto es porque el método MO de suma ponderada obtiene directamente el mejor compromiso a diferencia de los métodos basados en frente de Pareto que proporcionan un conjunto de soluciones óptimas para posteriormente seleccionar una de ellas guiados por la experiencia del experto o a través de la aplicación de un método de toma de decisiones.

4. Acceso dinámico de espectro basado en BPSO y método MO de suma ponderada

4.1. Descripción del modelo de evaluación

Para resolver el problema de espectro compartido, se consideró, como escenario de

evaluación, una red heterogénea como la que se muestra en la Figura 1. En una red heterogénea distintas tecnologías inalámbricas coexisten para brindarle al usuario final una experiencia inalámbrica transparente. Las redes heterogéneas se componen principalmente por una combinación de macro-celdas tradicionales de gran tamaño (conocida como la red primaria), que operan en una banda regulada, y de celdas más pequeñas, incluyendo micro-celdas, pico-celdas y femto-celdas (denominada la red secundaria) que puede operar, ya sea, en la misma banda de frecuencia que la red primaria o en otra distinta.

Esta combinación de redes primaria y secundaria incrementa la capacidad de todo el sistema en aquellas zonas de mayor demanda de recursos y distribuye el tráfico entre las celdas pequeñas para no generar cuellos de botella en las macro-celdas [23]. Al operar en un esquema de espectro compartido, las redes heterogéneas requieren de una estrategia de control de acceso y asignación de canal que les permita aprovechar la banda de frecuencias asignada a la red.

Por compartir espectro nos referimos a que tanto los PU's que pertenecen a las macro-celdas como los SU's, que son atendidos por las femto o micro-celdas, 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, garantizando con ello una mínima Calidad de Servicio (QoS) en ambas redes.

Entre mayor sea la cantidad de usuarios que utilicen el mismo canal concurrentemente, mayor será la eficiencia en el uso del espectro, pero también mayor será la interferencia que se genere en el sistema. Por lo que, una forma de controlar el acceso de usuarios es mediante una asignación efectiva de canales, y en el momento de que alguno de ellos provoque que la interferencia supere un umbral de interferencia predefinido, será bloqueado y no podrá transmitir. Aunque esta estrategia asegura un nivel de QoS en el sistema, no asegura un incremento en la capacidad de la red, ya que es posible que a un usuario no se le asigne un canal de comunicación aun cuando su condición particular de SINR sea adecuada.

Con base a la Figura 1, se considera un área de cobertura A , en el que se despliegan aleatoriamente un número de enlaces secundarios

SI y primarios *PI*. Un enlace, ya sea secundario o primario se representa por la unión de un transmisor y un receptor, identificándose por un número único e irrepetible. Los enlaces primarios forman la red primaria, mientras que la red secundaria la forman los enlaces secundarios. La asignación de canales a los enlaces secundarios no depende de si éstos se encuentran libres o desocupados, sino de que una vez asignados, la interferencia presente no cause una congestión instantánea o interrupción tanto en la red primaria como en la secundaria. Por simplicidad, se considera que en la red primaria no se presenta el problema de bloqueo, dado que a cada enlace primario le corresponde un canal único el cual es potencial a compartirse con un enlace secundario. Como se observa en la Figura 1, varios enlaces secundarios tienen asignado un mismo canal (referenciado con el número entre paréntesis), mientras que, para el caso de los enlaces primarios les corresponde un canal único (referenciado por el número entre corchetes).

La selección de enlaces secundarios depende de la interferencia que éstos generen a los enlaces primarios y a aquellos enlaces secundarios que utilicen el mismo canal primario. Para determinar el nivel de interferencia que experimenta cualquiera de los enlaces en el sistema, con las expresiones (3) y (4) se determina el valor de SINR que observa el receptor del enlace secundario *u* y del enlace primario *v* respectivamente:

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

para $1 \leq u \leq SI$

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). Además, en (3) se define que:

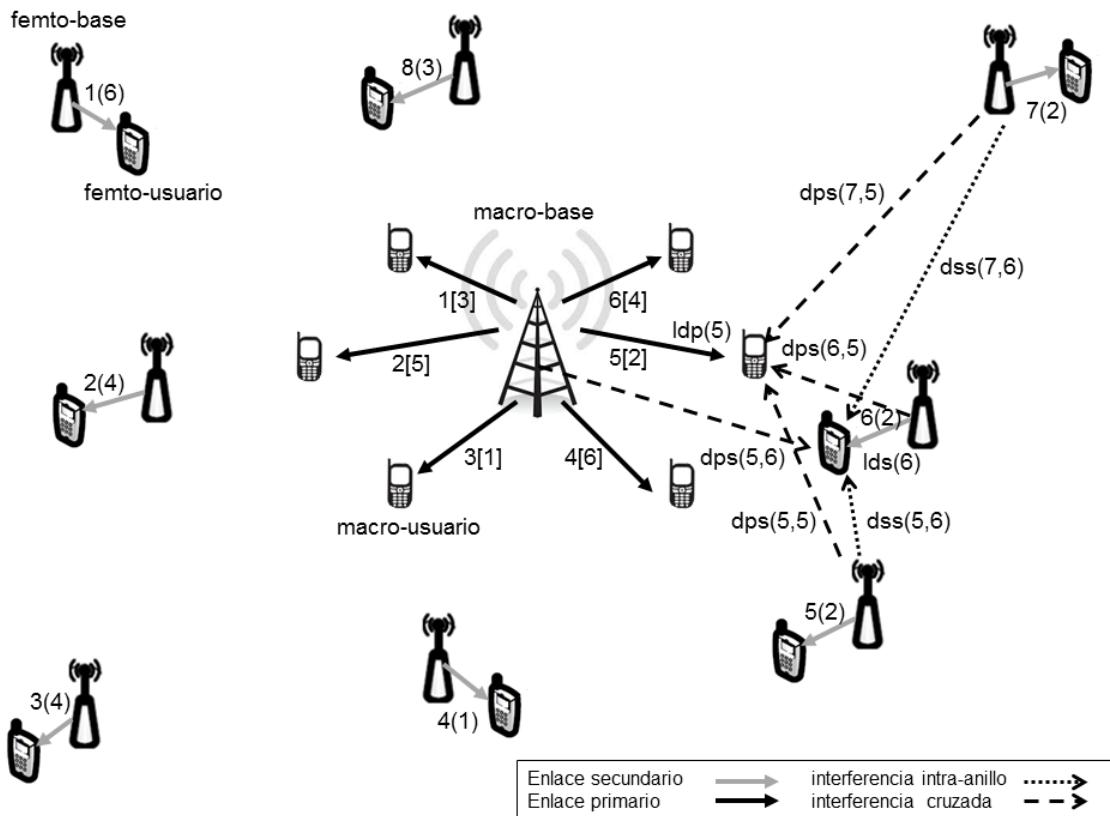
- P_u es la potencia de transmisión del transmisor del enlace secundario *u*.
- P_k es la potencia de transmisión del transmisor interferente del enlace secundario *k*.
- P_v es la potencia de transmisión del transmisor interferente del enlace primario *v*.
- $lds(u)$ representa la distancia que existe 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.
- Φ 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.

De forma similar, el valor de S/NR que observa el receptor primario en el enlace primario *v* se calcula mediante la siguiente expresión:

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

donde:

- 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.

**Fig. 1.** Modelo del sistema

- $dps(k,v)$ es la distancia entre el transmisor secundario del enlace secundario k al receptor primario del enlace primario v .

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.

Las métricas utilizadas para evaluar la eficiencia espectral del sistema son la tasa de datos transmitidos en el sistema y la densidad de SU's permisibles a transmitir en la red. La tasa de datos que cualquiera de los enlaces ofrece depende del ancho de banda B del canal que utilizan y de las condiciones del entorno de propagación de cada enlace (interferencia y atenuación). Las expresiones (5) y (6) calculan la

tasa de datos para un enlace secundario y enlace primario respectivamente:

$$\overset{'}{c_u} = B \log_2 (1 + SINR_u), \quad (5)$$

$$\overset{''}{c_v} = B \log_2 (1 + SINR_v) \quad (6)$$

Con base a lo anterior se define la función MO para la estrategia de compartición de canal de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } f_1(X) = \sum_{u=1}^{Sl} x_u, \quad (7)$$

$$\text{Maximizar } f_2(X) = \sum_{u=1}^{Sl} \overset{'}{c_u} x_u + \sum_{v=1}^{Pl} \overset{''}{c_v},$$

$$\begin{aligned}
 & \text{s.a.} \quad \text{SINR}_u \geq \alpha, \text{ SINR}_v \geq \beta, \\
 & c_u' > 0, u=1, 2, \dots, SI, \\
 & c_v'' > 0, v=1, 2, \dots, PI, \\
 & c_u', c_v'', \in R^+, \\
 & x_u = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{SINR}_u \geq \alpha \text{ y } \text{SINR}_v \geq \beta, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}
 \end{aligned}$$

donde la función f_1 representa el 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 red heterogénea, esto es, considerando los enlaces secundarios seleccionados y los enlaces primarios presentes en el área. Por otro lado, $X=[x_1, x_2, \dots, x_S]$ 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 ($x_u=0$) como parte de la solución candidata.

Finalmente, el problema de optimización MO en (7) se transforma en otro de optimización monoobjetivo usando el método MO de suma ponderada, planteándose de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \max U(X) = \lambda \cdot f_1(X) + (1 - \lambda) \cdot f_2(X) \quad (8) \\
 & \text{s.a.} \quad \text{SINR}_u \geq \alpha, \text{ SINR}_v \geq \beta, \\
 & c_u' > 0, u=1, 2, \dots, SI, \\
 & c_v'' > 0, v=1, 2, \dots, PI, \\
 & c_u', c_v'', \in R^+, \\
 & x_u = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{SINR}_u \geq \alpha \text{ y } \text{SINR}_v \geq \beta, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}
 \end{aligned}$$

donde $U(X)$ es la función de utilidad (la función objetivo) y $\lambda \in [0,1]$ indica la importancia relativa de cada objetivo. Nótese que cuando $\lambda=1$, (8) es transformado a un problema de maximización de densidad permisible de SU's en la red heterogénea. Por otro lado, cuando $\lambda=0$, (8) es transformado a un problema de maximización de tasa de datos en el sistema heterogéneo. Por lo tanto, ajustando el valor de λ , el operador puede establecer un balance flexible entre la densidad permisible de SU's y la tasa de datos en la red heterogénea.

4.2. Algoritmo de control de admisión y asignación de canal

La compartición de espectro es uno de los principales desafíos para lograr un acceso dinámico de espectro pues establece las condiciones de coexistencia para que SU's y PU's puedan reusarlo, garantizando protección contra la interferencia a estos últimos. En una red heterogénea cuando un transmisor secundario solicita permiso para iniciar una comunicación, el sistema debe decidir si será capaz de seguir proporcionando la QoS que demanda la red al momento de asignarle un canal, de tal forma que si se asigna un canal de comunicación a este nuevo usuario, el sistema debe determinar la nueva situación de interferencia que se generará. La interferencia presente en la red varía con respecto al tiempo y no es posible predecir su valor en un futuro próximo, de manera que la decisión de aceptación o rechazo de dicho usuario está sujeta a error. Si se rechaza la solicitud de canal cuando en realidad la red tiene capacidad de asignarlo, la red reduce su eficiencia espectral. En cambio, si se asigna el canal al SU, y con esta acción se genera demasiada interferencia, habrá usuarios que sufrirán una degradación de su QoS.

Para lograr el uso concurrente de un canal entre el PU y los SU's se describe a continuación la estrategia de control de admisión y asignación de canal para la compartición de espectro utilizando una versión mejorada de BPSO llamada PSO Socio-Cognitivo (SCPSO) [24] y el método MO de suma ponderada:

El vector X_i se inicializa aleatoriamente con valores binarios (1 ó 0) mientras que el vector V_i lo

Algoritmo 2: Pseudocódigo para control de admisión y asignación de canal

```

1: Repite
2:   Para i = 1 a número de partículas
3:     Hacer mapeo de  $X'_i$  y Spectrum Status para
       calcular niveles de SINR en usuarios
       primarios y secundarios.
4:     Hacer mapeo de  $P'_i$  y Spectrum Status para
       calcular niveles de SINR en usuarios
       primarios y secundarios.
5:     Si  $U(X'_i) > U(P'_i)$  entonces
6:       Para d = 1 a número de dimensiones
7:          $p_{id} = X_{id}$ 
8:          $p'_{id} = X'^{id}$ 
9:       Siguiente d
10:      Fin Si
11:       $g = i$ 
12:      Para j = 1 a número de partículas
13:        Hacer mapeo de  $P'_j$  y Spectrum Status para
           calcular niveles de SINR en usuarios
           primarios y secundarios.
14:        Hacer mapeo de  $P'_g$  y Spectrum Status para
           calcular niveles de SINR en usuarios
           primarios y secundarios.
15:        Si  $U(P'_j) > U(P'_g)$  entonces  $g = j$ 
16:        Siguiente j
17:        Para d = 1 a número de dimensiones
18:           $v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(p_{id} - X_{id}) + c_2r_2(p_{gd} - X_{id})$ 
19:           $v'_{id} = w^1v_{id} + c_3(gbest - pbest)$ 
20:           $v_{id} \in (-V_{max}, +V_{max})$ 
21:           $x_{id} = X_{id} + v_{id}$ 
22:           $x_{id} = X_{id} \bmod (2)$ 
23:          Si  $x_{id}=1$  entonces asignar aleatoriamente
             un nuevo canal a  $x'^{id}$ 
24:        Siguiente d
25:      Siguiente i
26:    Hasta que se alcance la condición de paro
27:  Retornar ( $P_g$ ,  $U(P_g)$ )

```

hace con valores en el intervalo $[-V_{max}, +V_{max}]$. El vector P_i , en esta fase inicial, será igual al vector de soluciones candidatas X_i , esto es, $P=X_i$.

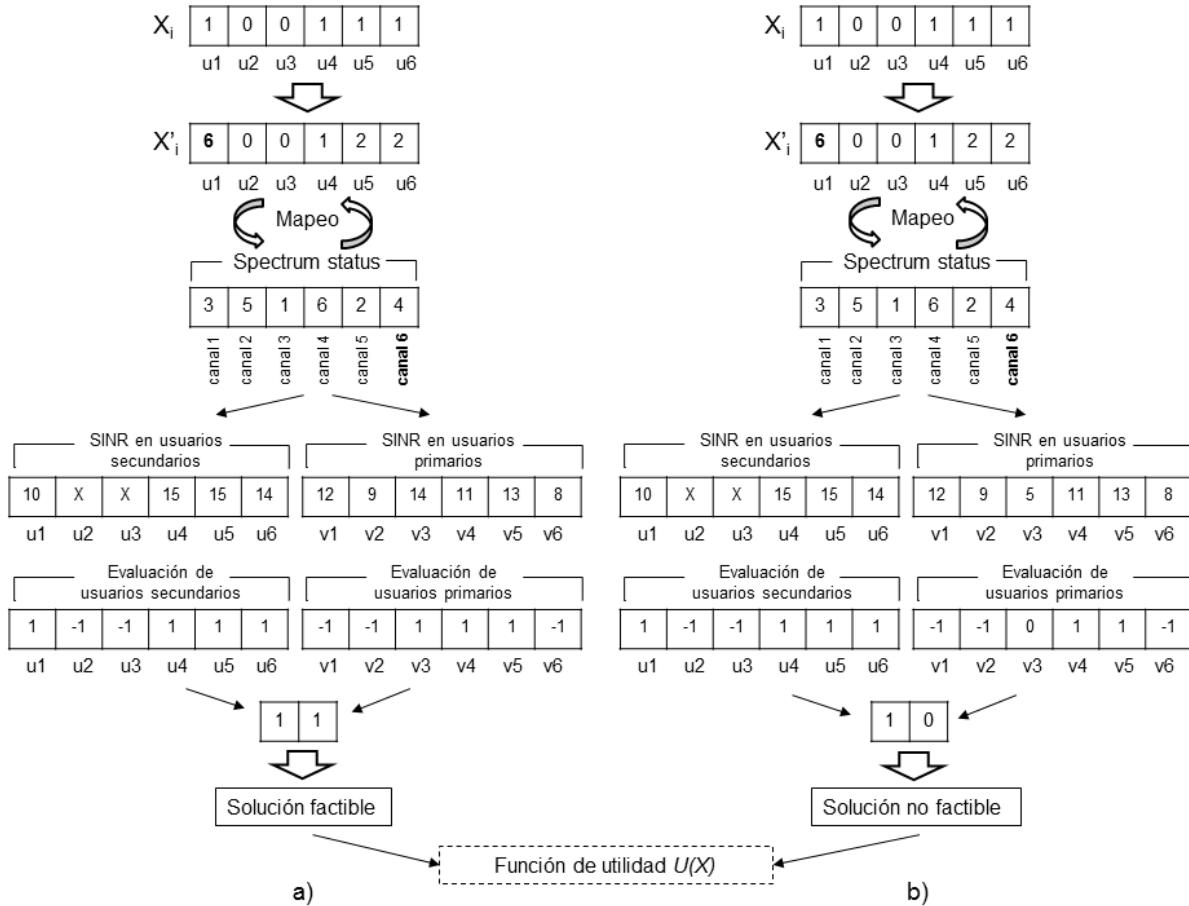
Se proponen tres nuevos vectores: *Spectrum Status*, P'_i , y X'_i . Los vectores P'_i y X'_i están asociados de manera adicional a la partícula i . El vector *Spectrum Status* contiene información acerca del canal que está utilizando cada enlace primario. Este vector se inicializa aleatoriamente y su tamaño depende de la cantidad de enlaces primarios que se consideren en el problema. Por simplicidad, en este trabajo se considera que la

cantidad de enlaces primarios es igual a la cantidad de canales primarios y este conjunto de canales para compartir se representa por PC . El vector X'_i contiene información acerca del canal asignado al u -ésimo enlace secundario, en el que los canales se toman de forma aleatoria del conjunto de canales para compartir PC . En cambio, P'_i es el vector en el que se almacenan las mejores asignaciones de canales a los enlaces secundarios encontradas por la partícula i .

Cuando se analiza el desempeño de una red heterogénea considerando el Algoritmo 2, una solución candidata X_i representa el grupo de posibles enlaces secundarios que podrían coexistir con los enlaces primarios. En la Figura 2a y 2b, X_i especifica que los enlaces secundarios 1, 4, 5 y 6 son seleccionados como parte de la solución; por lo tanto, X'_i contiene la asignación de canales para estos enlaces secundarios. El mapeo de X'_i y *Spectrum Status* proporcionan información acerca del canal o los canales que son explotados, simultáneamente, por los usuarios secundarios y primarios.

Por ejemplo, en la Figura 2a, el enlace secundario 1 tiene asignado el canal 6, verificando el vector *Spectrum Status* se observa que canal 6 también lo utiliza el enlace primario 4, por lo tanto el canal 6 puede explotarse simultáneamente por el enlace primario 4 y enlace secundario 1 siempre y cuando las restricciones en (8) se satisfagan.

Para establecer si una solución candidata X_i es factible, se implementó un vector de nombre “*SINR en usuarios secundarios*” que contiene todos los valores de SINR obtenidos de cada enlace secundario seleccionado por la partícula X_i . Si el valor de $SINR_u$ supera el valor de umbral, α , establecido en el problema entonces el u -ésimo enlace secundario se considerará en *estado verdadero, o estado 1*, tal y como se observa en el vector “*Evaluación de usuarios secundarios*” de la Figura 2a. Si se establece, como ejemplo, un $\alpha=10$ dB, entonces todos los enlaces secundarios tendrían asignado estado 1, como se observa en la Figura 2a, lo que implica que el grupo de enlaces secundarios seleccionados por la partícula i cumple con la restricción $SINR_u \geq \alpha$. Análogamente, se aplica el mismo procedimiento para los enlaces primarios. Únicamente para distinguir a aquellos enlaces primarios o secundarios que la partícula no consideró como

**Fig. 2.** Mapeo de los vectores X_i , X'_i y Spectrum Status

parte de la solución candidata, éstos se marcan con un valor de -1, lo que permite ignorarlos al momento de analizar los vectores de evaluación de usuarios secundarios y primarios. El valor final del vector “evaluación de usuarios secundarios” se fija en estado 1 si todos los enlaces secundarios seleccionados cumplen con $SINR_u \geq \alpha$. El mismo proceso se aplica en “evaluación de usuarios primarios” si sus enlaces primarios cumplen con $SINR_v \geq \beta$.

Si tanto “evaluación de usuarios secundarios” y “evaluación de usuarios primarios” tienen estado 1 como valor final, entonces las condiciones $SINR_u \geq \alpha$ y $SINR_v \geq \beta$ se satisfacen lo que indica que X_i es una solución factible como se muestra en Figura 2a. Siendo X_i una solución factible, su

aptitud total es el resultado de multiplicar cada objetivo por un peso que representa las preferencias del operador, este resultado se suma para obtener la función de utilidad $U(X)$ definida en (8).

Cuando una o ambas restricciones en (8) no se satisfacen, se debe a que la interferencia presente en el sistema es mayor a la potencia de la señal del enlace evaluado. Lo anterior representa que la solución candidata X_i es una solución no factible. En este sentido y según sea el caso, cualesquiera de los vectores “evaluación de usuarios secundarios” y/o “evaluación de usuarios primarios”, se califican como estado 0, como se muestra en la Figura 2b. Las soluciones no factibles, se penalizan asignándole a la partícula i

Tabla 1. Parámetros de SCPSO

Parámetros	Valores
Tamaño de 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 2. Parámetros de los experimentos

Parámetros	Valores
Número de enlaces secundarios SI	20
Número de enlaces primarios PI	6
Canales primarios para compartir PC	1, 2, 3, 4, 5, 6
Número de corridas	500
Umbrales de SINR α, β (dB)	4, 6, 8, 10, 12, 14
Ancho de banda de canal primario (MHz)	20
Ponderación λ	0, 1, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8

un valor de aptitud total igual a cero, con esto, se descarta del cúmulo al no poder competir con el resto de las partículas.

5. Análisis de resultados

Los resultados que se presentan en esta sección se obtuvieron a partir del escenario descrito en la Figura 1. La red heterogénea se caracteriza por la ubicación de un número de enlaces primarios PI y un número de enlaces secundarios SI . Para el análisis se consideran únicamente los enlaces descendentes, es decir, de estación base a usuarios. Cada uno de los experimentos que se llevaron a cabo, se diferencian entre ellos por el valor de QoS que se utilizó, esto es, para lograr un determinado QoS tanto en la red primaria como en la red secundaria se establece un valor de umbral de SINR para cada una, donde, $\alpha=\beta$. Cada valor de SINR representa la QoS necesaria para que el sistema ofrezca servicios tipo multimedia o de cuarta generación (4G). Por cada experimento se

realizan 500 corridas independientes y cada una de ellas consiste de una ubicación aleatoria de enlaces secundarios, mientras que la ubicación de los enlaces primarios permanece siempre fija. Se asume que cada enlace secundario se ubica en un área de 25 km² y está formado por un par transmisor-receptor cuya distancia está limitada a 30 m, mientras que para el caso de los enlaces primarios está limitada a 1000 m. Lo anterior para evitar que el algoritmo no encuentre alguna solución debido a una atenuación excesiva por la distancia del enlace. Además, por simplicidad, se consideró la misma potencia de transmisión para los transmisores primarios y secundarios, todos los enlaces requieren el mismo ancho de banda por canal ya que transmiten el mismo tráfico (tráfico homogéneo), la atenuación de potencia debida a los fenómenos multirayectoria y sombreo no se consideran para el cálculo del SINR. En cada corrida se evalúan las combinaciones de la asignación de canales a enlaces secundarios, que dependen de la cantidad de partículas e iteraciones consideradas en el algoritmo de optimización SCPSO. Los parámetros de

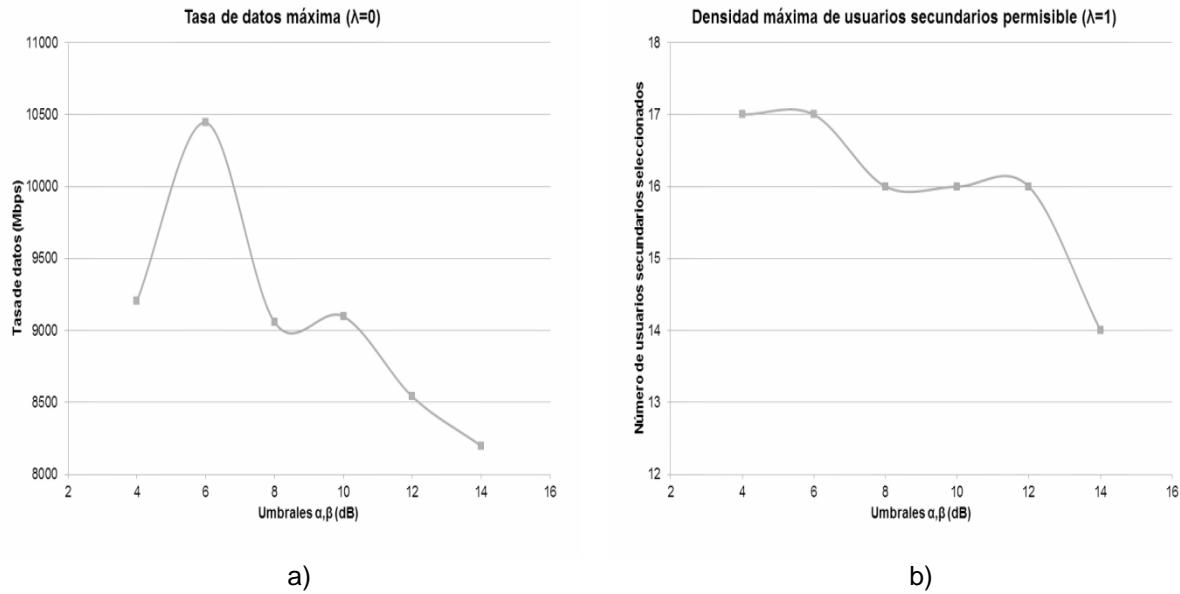


Fig. 3. Mejores valores encontrados de $U(X)$ en cada experimento y valor de λ

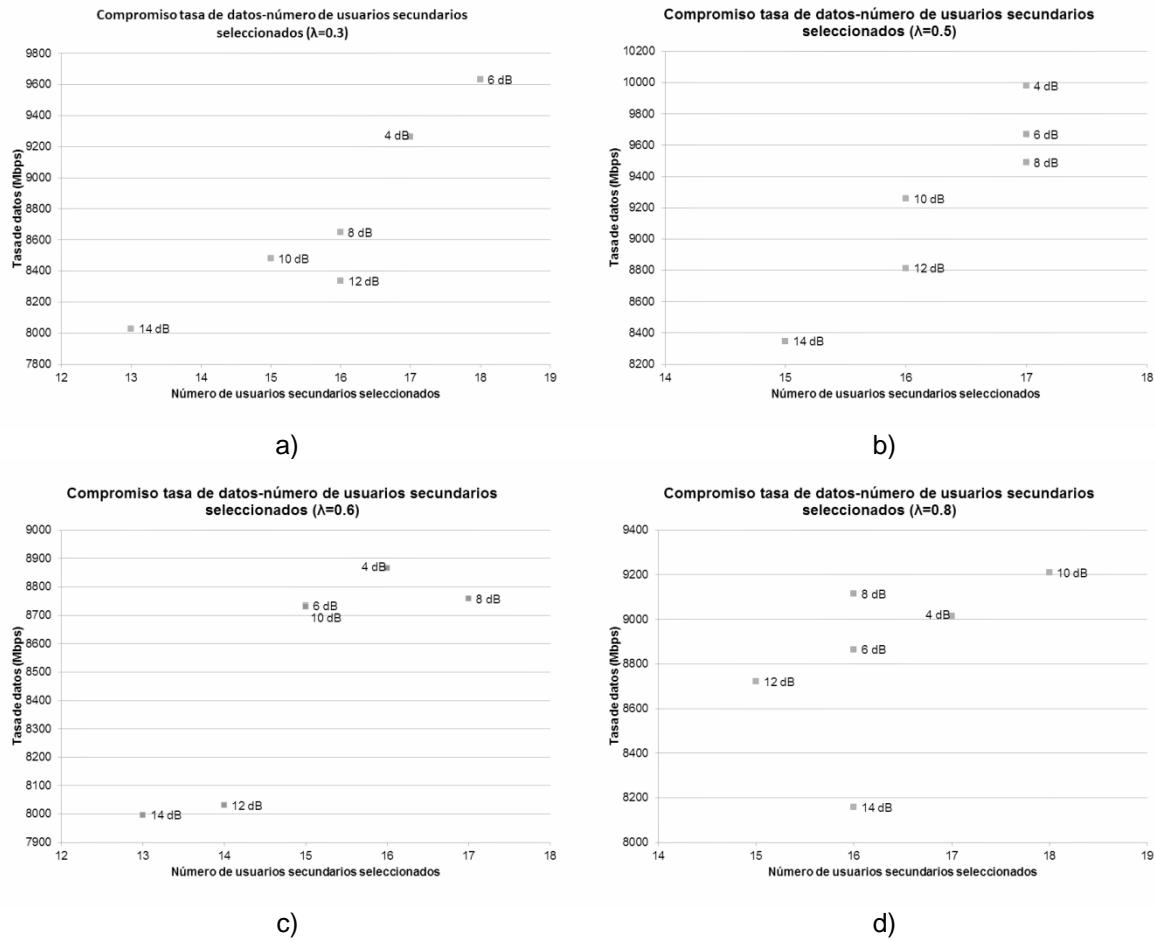
evaluación considerados para SCPSO y experimentos se muestran en Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

Por medio del ajuste del valor de λ , el operador establece un balance flexible entre la tasa de datos y el número de SU's seleccionados en la red heterogénea. Después de ejecutar 500 corridas para un experimento y un valor específico de λ , se selecciona la corrida que contiene el mejor valor encontrado $U(X)$ definida en (8). Por ejemplo, cuando $\lambda = 0$, (8) representa el problema de maximización de la tasa de datos; el mejor valor encontrado $U(X)$ se muestra en la Figura 3a. Por otro lado, cuando $\lambda = 1$, (8) representa el problema de maximización de número de SU's seleccionados, el mejor valor encontrado $U(X)$ se muestra en la Figura 3b. Incrementar los valores de los umbrales de SINR (α y β) representa que la red heterogénea requiere una mayor QoS para servicios que así lo demanden (un servicio de video requiere una mayor QoS en comparación con un servicio de voz). Así para umbrales de SINR altos, la Figura 3b sugiere que para mantenerlos, se debe disminuir el número de SU's seleccionados. Una densidad menor de SU's

genera una menor interferencia en la red heterogénea lo que permite mantener requerimientos altos de QoS. En contraste, la Figura 3a sugiere que altas tasas de datos solo pueden alcanzarse en umbrales de SINR bajos.

La Figura 4 muestra los balances encontrados en $\lambda = 0.3$, $\lambda = 0.5$, $\lambda = 0.6$ y $\lambda = 0.8$. El mejor balance encontrado entre los criterios se alcanza cuando $\lambda = 0.5$. Aun cuando se considere una preferencia alta en el criterio de la tasa de datos como lo es el caso $\lambda = 0.3$ en la Figura 4a, esas soluciones no superan las presentadas en la Figura 4b en términos del criterio de la tasa de datos. La Figura 4d, para $\lambda = 0.8$, representa el caso contrario, esto es, se asigna una preferencia alta a la densidad permisible de SU's. Sin embargo en términos del criterio de la densidad permisible de SU's, en general, las soluciones mostradas en la Figura 4d no superan las mostradas en la Figura 4b.

Otra observación de la Figura 4 se refiere al compromiso para alcanzar los umbrales de SINR: umbrales de SINR altos requieren el sacrificio de tasa de datos y densidad permisible de SU's.

Fig. 4. Mejores valores encontrados de $U(X)$ en cada experimento y valor de λ

Asumiendo que el DSA tiene un mayor impacto en las redes celulares de futura generación, el proveedor requerirá una guía de despliegue para este tipo de sistemas con el fin de garantizar transmisiones exitosas entre los usuarios que participan en la compartición de una banda en particular. Por ejemplo, si el proveedor despliega una red heterogénea en un área geográfica en donde la prioridad es mantener el mayor número de abonados, dado que a un mayor número de ellos, mayores serán las ganancias económicas obtenidas, el proveedor podría optar por la guía presentada en la Figura 3b. Considerando la información de la Figura 3b, el proveedor podría desplegar un máximo de 17 femto-celdas a un umbral de SINR = 4 dB en el área, lo que permitiría

proveer solo servicios de voz; con esto garantiza que la interferencia generada entre PU's y SU's no se incremente a tal nivel que sus transmisiones no sean exitosas. Por otro lado, si se considera otra área geográfica en la que los usuarios demanden un alto nivel de QoS (un umbral de SINR = 14 dB para proveer servicios de video) el proveedor sacrificaría la densidad de femto-celdas desplegadas como se muestra en la Figura 3b.

Otras relaciones importantes se desprenden de los resultados mostrados en la Figura 4. Si se toman en cuenta ambos objetivos, privilegiando uno de ellos, por ejemplo la tasa de datos en un área geográfica como es el caso de la Figura 4a ($\lambda=0.3$). Para este caso, si el proveedor requiere ofrecer servicios de voz, se considera la solución

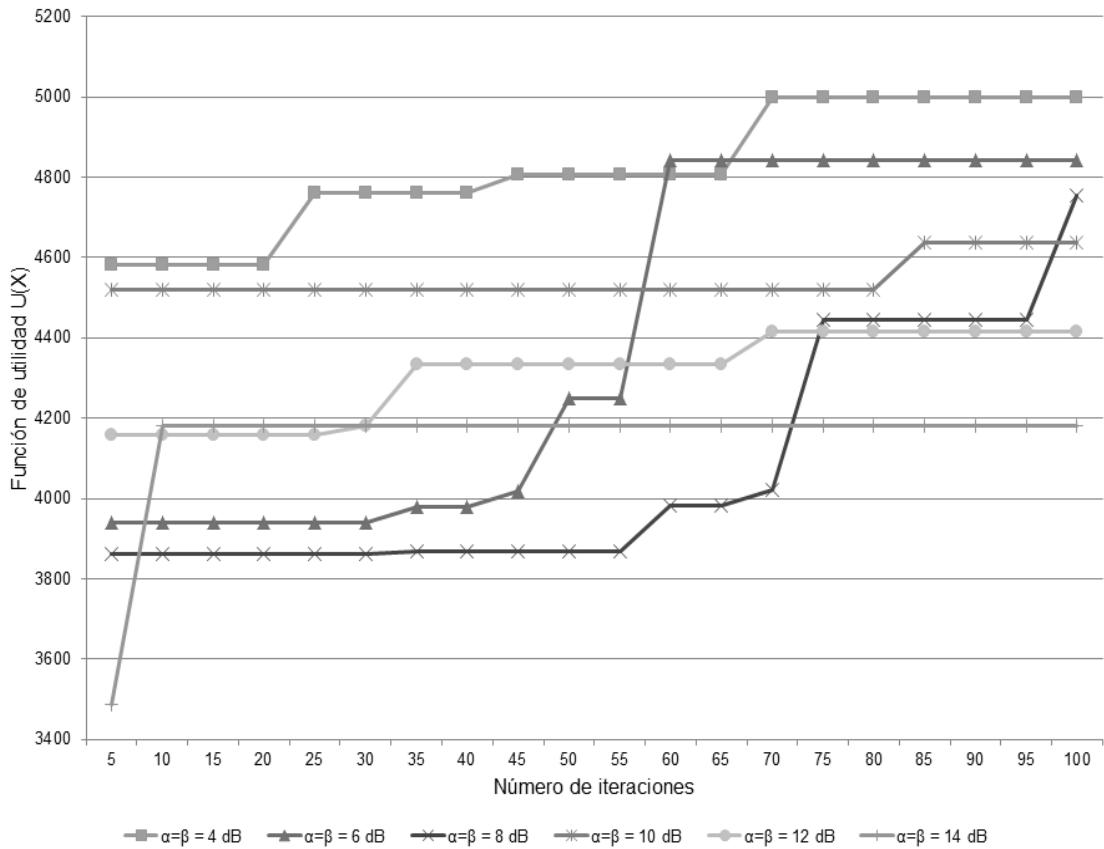


Fig. 5. Convergencia de los mejores valores encontrados de $U(X)$ con $\lambda=0.5$

para 4 dB; con ésta se ofrece el servicio a un máximo de 17 SU's a una tasa total de datos máxima de 9300 Mbps. En contraste, si se privilegia el criterio de la densidad de usuarios como se muestra en la Figura 4d ($\lambda=0.8$) y, se requiere proveer servicios de video, la solución de 14 dB sería la opción, lo que representa atender a un máximo de 16 SU's a una tasa total de datos máxima cercana a los 8200 Mbps. Sin embargo, como se describió anteriormente, el mejor balance para este problema y para todos los casos de SINR, se alcanza cuando se privilegia por igual a ambos objetivos ($\lambda=0.5$).

Finalmente, en la Figura 5 se muestra la convergencia a través de las iteraciones de los valores de aptitud de la función de utilidad $U(X)$ cuando se obtienen los mejores balances, esto es,

cuando $\lambda=0.5$. En general, se observa que a partir de la iteración 85 no se presentan cambios en los valores de aptitud de $U(X)$.

6. Conclusiones

En este trabajo se evaluó la eficiencia espectral en una red heterogénea formada por una red primaria y una red con capacidades cognoscitivas o red secundaria. Con la idea de incrementar la eficiencia espectral, los PU's permiten que los SU's utilicen concurrentemente su espectro, siempre y cuando no se degrade la QoS de toda la red heterogénea. Se asume que los PU's están activos todo el tiempo, lo que contrasta con los modelos existentes dominantes en los que los

SU's primero detectan los canales disponibles, permitiendo que los PU's o SU's (pero no ambos) utilicen el canal común en cualquier momento. Se desarrolló una estrategia de control de admisión y asignación de canal que distribuye y asigna canales a SU's, permitiendo obtener el compromiso entre el número máximo de SU's coexistiendo pacíficamente con los PU's y la máxima tasa de datos en el sistema a partir de las condiciones del entorno de propagación. Para ello, el algoritmo de control de admisión y asignación de canal propuesto se basa en una versión mejorada de BPSO llamada SCPSO y el método MO de suma ponderada.

De los resultados se observa que el desempeño de la red heterogénea depende directamente del valor de QoS que se deseé en todo el sistema tomando en cuenta las exigencias y requerimientos de PU's y SU's. Se identificó que el mejor balance se alcanza cuando se indica preferencias iguales en ambos objetivos.

Las contribuciones originales de este trabajo son: una función MO que considera métricas de eficiencia espectral. Un algoritmo de control de admisión y asignación de canal que permite el aprovechamiento del mismo por más de un usuario (PU y uno o más SU's). Así mismo, la combinación de la metaheurística SCPSO como método de búsqueda de una solución y el método MO de suma ponderada para incorporar en esa solución el compromiso entre los objetivos, permite reducir la complejidad del problema.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo.

Referencias

1. **CISCO (2013).** *The zettabyte Era - Trends and Analysis.*
2. **Cave, M., Doyle, C., & Webb, W. (2007).** *Essentials of Modern Spectrum Management* (1a ed.). New York: Cambridge University Press.
3. **Roberson, D. A., Hood, C. S., LoCicero, J. L., & MacDonald, J. T. (2006).** 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.
4. **Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999).** Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, Vol. 6, No. 4, pp. 13–18.
5. **Zhao, Q., & Sadler, B. M. (2007).** A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 24, No. 3, pp. 79–89. DOI: 10.1109/MSP.2007.361604
6. **Jankulovska, B., Pavloski, M., Zahariev, M., Atanasovski, V., & Gavrilovska, L. (2010).** Efficient spectrum utilization: A cognitive approach. *8th International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, Romania, pp. 527–530.
7. **Talbi, E.G. (2009).** *Metaheuristics: from design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
8. **Zhang, Y., Zhang, Z., Luo, H., Wang, W., & Yu, G. (2012).** 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.
9. **Tadrous, J., Sultan, A., & Nafie, M. (2011).** Admission and power control for spectrum sharing cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 10, No. 6, pp. 1945–1955. DOI: 10.1109/TWC.2011.040411.101571
10. **Wang, B. & Zhao, D. (2008).** Performance analysis in CDMA-based cognitive wireless networks with spectrum underlay. *IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)*, New Orleans, USA, pp. 1–6.
11. **Roy, S. D. & Kundu, S. (2011).** Gradual removal of secondary user in cognitive-CDMA spectrum underlay network. *International Conference on Devices and Communications (ICDeCom)*, Mesra, Algeria, pp. 1–4.
12. **Wang, B. & Zhao, D. (2010).** Scheduling for long term proportional fairness in a cognitive wireless network with spectrum underlay. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 9, No. 3, pp. 1150–1158. DOI: 10.1109/TWC.2010.03.090802
13. **Liu, P., Li, J., Li, H., & Wang, K. (2013).** An iteration resource allocation method to maximize number of users with QoS demand in femtocell networks. *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Xi'an, China, pp. 554–558.
14. **Liu, Y., Cai, L.X., Shen, X., & Luo, H. (2013).** Deploying cognitive cellular networks under dynamic resource management. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 2, pp. 82–88. DOI: 10.1109/MWC.2013.6507398

15. **Martínez-Vargas, A. & Andrade, Á. G. (2013).** Comparing particle swarm optimization variants for a cognitive radio network. *Applied Soft Computing*, Vol. 13 No. 2, pp. 1222–1234. DOI: doi:10.1016/j.asoc.2012.10.016
16. **Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995).** Particle swarm optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 4, pp. 1942–1948. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8_630
17. **Kennedy, J. & Eberhart, R. C. (1997).** A discrete binary version of the particle swarm algorithm. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Orlando, USA, 5, pp. 4104–4108.
18. **Kennedy, J. F., Kennedy, J., Eberhart, R. C. (2001).** *Swarm intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
19. **Pampara, G., Franken, N., & Engelbrecht, A. P. (2005).** Combining particle swarm optimisation with angle modulation to solve binary problems. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Edinburgh, UK, 1, pp. 89–96.
20. **Deb, K. (2001).** *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. New York: John Wiley & Sons.
21. **Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010).** The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 41 No. 6, pp. 853–862. DOI: 10.1007/s00158-009-0460-7
22. **Marler, R.T., & Arora, J. S. (2004).** Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 26, No. 6, pp. 369–395. DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6
23. **Andrews, J. G., Claussen, H., Dohler, M., Rangan, S., & Reed, M. C. (2012).** Femtocells: past, present, and future. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 30, No. 3, pp. 497–508. DOI: 10.1109/JSAC.2012.120401
24. **Deep, K. & Bansal, J. C. (2008).** A socio-cognitive particle swarm optimization for multi-dimensional knapsack problem. *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET)*, Nagpur, India, pp. 355–360.

Anabel Martínez-Vargas realizó estudios de Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, México. Tiene Maestría en Computación con especialidad en Redes y Conectividad por la Universidad de Colima, México. Es Doctora en Ciencias por la Universidad Autónoma de Baja California, México. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores

(SNI) de CONACYT. Sus líneas de interés son metaheurísticas, optimización y acceso dinámico de espectro.

Ángel G. Andrade obtuvo su Doctorado y Maestría en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México. Actualmente es profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de CONACYT. Sus líneas de investigación se centran en el análisis y desarrollo de técnicas para lograr la compartición de espectro en sistemas móviles.

Roberto Sepúlveda recibió el grado de Maestro en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de Tijuana (México) y el grado de Doctor en Ciencias de la Computación por la Universidad Autónoma de Baja California (México). Es investigador en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (CITEDI-IPN), México. Sus líneas de interés son sistemas difusos tipo 2, sistemas inteligentes, y robótica. Es co-fundador y miembro activo de HAFSA (Hispanic American Fuzzy Systems Association) e IEEE-CIS-Chapter Mexico (IEEE Computational Intelligence Society Chapter Mexico). Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de CONACYT.

Oscar Montiel Ross obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Sistemas Digitales por el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (CITEDI-IPN), México. Es también Maestro en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de Tijuana, México. Recibió el grado de Doctor en Ciencias de la Computación por la Universidad Autónoma de Baja California, México. Es investigador en el CITEDI-IPN, México. Sus líneas de interés son optimización, sistemas inteligentes, y robótica. Es co-fundador y miembro activo de HAFSA (Hispanic American Fuzzy Systems Association) e IEEE-CIS-Chapter Mexico (IEEE Computational Intelligence Society Chapter

Mexico). Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de CONACYT.

*Artículo recibido el 07/02/2014; aceptado el 17/04/2015.
Autor de correspondencia es Anabel Martínez Vargas.*