

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**CONTROL DE ADMISIÓN Y ASIGNACIÓN DE CANAL BASADO EN
OPTIMIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTÍCULAS (PSO) PARA
REDES COGNOSCITIVAS**

TESIS

**que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el
grado de DOCTOR EN CIENCIAS presenta:**

ANABEL MARTÍNEZ VARGAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA

Mexicali, Baja California, México

Diciembre 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**CONTROL DE ADMISIÓN Y ASIGNACIÓN DE CANAL BASADO EN
OPTIMIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTÍCULAS (PSO) PARA
REDES COGNOSCITIVAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de DOCTOR
EN CIENCIAS presenta:

ANABEL MARTÍNEZ VARGAS

APROBADA POR:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga
Director de tesis

Dra. Larysa Burtseva
Miembro del comité

Dr. Arturo Serrano Santoyo
Miembro del comité

Dr. Israel Marck Martínez Pérez
Miembro del comité

Dr. José Ángel González Fraga
Miembro del comité

Mexicali, Baja California, México

Diciembre 2012

RESUMEN de la Tesis de Anabel Martínez Vargas, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS. Mexicali, Baja California, México. Diciembre de 2012.

CONTROL DE ADMISIÓN Y ASIGNACIÓN DE CANAL BASADO EN OPTIMIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTÍCULAS (PSO) PARA REDES COGNOSCITIVAS

Resumen aprobado por:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga
Director de tesis

RESUMEN

El espectro electromagnético es un recurso necesario para el desarrollo exitoso de sistemas de comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, el aumento en el desarrollo de aplicaciones y su tiempo de uso, así como de tecnologías y tasas de datos incrementan la demanda y el valor de los recursos finitos espectrales, generando una idea errónea de escasez de espectro. Diversos estudios concluyen que es un problema de acceso al espectro, provocado, en gran medida, por la actual *administración fija del espectro*, ya que ciertas bandas se encuentran saturadas mientras que otras se subutilizan por largos periodos de tiempo. Lo anterior motiva a que las entidades regulatorias revisen su política de administración de espectro con el fin de reformar su acceso y uso a una forma más eficiente y flexible. En este contexto, se propone el *acceso dinámico de espectro* como una solución para reusar el espectro regulado disponible y lograr la coexistencia de usuarios regulados (primarios) y usuarios no regulados (secundarios). La tecnología habilitadora del acceso dinámico de espectro es la *radio cognoscitiva* que provee a los usuarios secundarios con la capacidad de adaptar de manera óptima sus parámetros de operación de acuerdo a las interacciones con el entorno de radio circundante. Para garantizar que los usuarios secundarios no generen interferencia dañina a los usuarios primarios, cuando una red de radio cognoscitiva es desplegada, se debe controlar el acceso y la distribución de canales en los usuarios secundarios, así como algunos otros parámetros tales como: zonas primarias de exclusión (radio de protección en el receptor primario), límites de potencia de transmisión, número de usuarios secundarios, y relación señal a interferencia (SINR). En este sentido, en este trabajo de tesis se propone un algoritmo de control de admisión y asignación de canal considerando restricciones de SINR en las redes primaria y secundaria con el objetivo de maximizar la tasa de datos total y Calidad de Servicio (QoS) del sistema. Para lograr la mejor solución, es decir, aquel conjunto de usuarios secundarios que maximicen la tasa de datos en el sistema manteniendo la interferencia mutua a un nivel tolerable en las redes primaria y secundaria se utiliza una estrategia de inteligencia colectiva conocida como *optimización por cúmulo de partículas*. El algoritmo propuesto permite determinar requerimientos de diseño para desplegar una red cognoscitiva y analizar los compromisos que ayudará a los reguladores en el desarrollo de políticas que garanticen protección a los usuarios primarios.

Palabras clave: Acceso dinámico de espectro, radio cognoscitiva, spectrum underlay, optimización por cúmulo de partículas.

ABSTRACT of the thesis, presented by Anabel Martínez Vargas, in order to obtain the DOCTOR OF SCIENCES degree. Mexicali, Baja California, México. December, 2012.

AN ADMISSION CONTROL AND CHANNEL ALLOCATION ALGORITHM BASED ON PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) FOR COGNITIVE RADIO

Approved by:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga
Thesis Advisor

ABSTRACT

The electromagnetic spectrum is an important resource to develop successfully wireless communications systems. However, the growing deployment of applications, utilization time, technologies and data rates are increasing the demands for, and value of, the finite spectral resources creating an idea of spectrum scarcity. Several studies conclude that the shortage of spectrum is a spectrum access problem due to the static spectrum allocation policy. It has been observed that certain bands are used sporadically while in others the spectrum resource is scarce. This situation encourages the regulatory agencies to reform its existing policy to promote efficient access to and use of the radio spectrum. In this context, *dynamic spectrum access* is proposed as a solution to reuse licensee available spectrum through the coexistence of regulated users (primary users) and unregulated users (secondary users). The enabling technology is the *cognitive radio* that provides secondary users capabilities to adapt optimally their operating parameters according to interactions with the surrounding radio environment. To guarantee that secondary users do not generate harmful interference to the primary user, when constructing cognitive radio networks, some parameters of secondary users should be controlled, examples are: primary exclusion zones, transmission power, number of secondary users and signal to noise ratio (SINR). In this context, the present doctoral dissertation develops an admission control and channel allocation algorithm considering SINR constraints in primary and secondary networks in order to maximize the data rate and Quality of Service of the system. To figure out the best solution, that is, the set of secondary users to maximize the data rate on the system a swarm intelligence strategy named *particle swarm optimization* is used. The proposed algorithm subject to the aforementioned constraints suggests design requirements for deploying cognitive networks and analyzing the tradeoffs which will help regulators to develop policies to guarantee protection to primary users.

Keywords: Dynamic spectrum access, cognitive radio, spectrum underlay, particle swarm optimization

DEDICATORIA

A mi papá Beto, mamá Tita, Luz María, y Verónica

A mi tía Chuy, papá Lupe y Toñita

A mi compañera de viaje Mary

AGRADECIMIENTOS

A mi papá Beto por darme alas para volar. A mi mamá Tita por su comprensión. A Luz María y Verónica por su apoyo.

A mi tía Chuy por su apoyo, y acompañarme siempre en mi camino hacia el aeropuerto y cada domingo por la tarde.

A Toñita por sus muestras de cariño.

A tía Tere y tío Sebas por tenerme presente en sus oraciones.

A mi compañera de viaje Mary con quién compartí los momentos buenos y malos de esta travesía.

Al Dr. Ángel G. Andrade por su apoyo, consejos y guía a lo largo de estos años.

A mis amigos cachanillas Eli, José, César, Juan Pablo, Daniela, y Rubén por su apoyo, ayuda y solidaridad.

A Luis y Armando por su disponibilidad y compromiso.

A los miembros del comité de tesis: Dra. Larysa Burtseva, Dr. Arturo Serrano Santoyo, Dr. Israel Marck Martínez Pérez y Dr. José Ángel González Fraga por sus sugerencias y apoyo.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y profesores de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme una beca para realizar mis estudios de doctorado.

ÍNDICE

Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1 Contexto del problema	1
1.2 Radio Cognoscitiva: Estrategia que mejora la eficiencia espectral	3
1.3 Retos de la Asignación Dinámica de Espectro	5
1.5 Objetivos.....	9
1.5.1 Objetivo General	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Contribuciones	10
1.7 Organización del documento	10
Capítulo 2	12
Radio Cognoscitiva y retos en la administración del espectro	12
2.1 Administración fija del espectro	12
2.2 Acceso dinámico de espectro: Reformas de las políticas de espectro	14
2.3 Radio Cognoscitiva: Tecnología habilitadora de espectro compartido	17
2.3.1 Capacidades de un CRS	18
2.3.2 Elementos de un CRS	20
2.3.3 Estandarización	20
2.3.4 Casos de aplicación de CR	22
2.4 Importancia de identificar requerimientos para definir políticas de espectro	23
Capítulo 3	26
Algoritmos de optimización por cúmulo de partículas	26
3.1 Introducción a las técnicas metaheurísticas de optimización.....	26
3.2 Optimización por cúmulo de partículas (PSO)	28
3.3 Descripción del algoritmo PSO.....	30
3.3.1 Topologías del cúmulo de partículas	33
3.4 PSO para codificación binaria.....	34
3.5 Otras versiones de BPSO.....	37
3.6 Resumen	38
Capítulo 4	41
Algoritmo de control de acceso y asignación de canal	41
4.1 Introducción	41

4.2 Modelo del sistema.....	42
4.3 Algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en la heurística SCPSO.....	48
4.4 Resumen	56
Capítulo 5	58
Evaluación del algoritmo de control de acceso y asignación de canal.....	58
5.1 Descripción del escenario de simulación.....	58
5.2 Evaluación del algoritmo de control de acceso y asignación de canal	62
5.2.1 Discusión de resultados.....	69
5.3 Evaluación de la red cognoscitiva usando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO	70
5.4 Resumen	74
Capítulo 6	76
Diseño de la red cognoscitiva considerando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal	76
6.1 Antecedentes	76
6.2 Descripción del escenario de evaluación.....	78
6.3 Requerimientos de diseño de una red cognoscitiva.....	81
6.3.1 Zona primaria de exclusión.....	82
6.3.2 Múltiples usuarios secundarios	87
6.4 Métricas de desempeño: resultados.....	91
6.5 Resumen	95
Capítulo 7	96
Conclusiones	96
7.1 Resumen de la investigación.....	98
7.2 Contribuciones	99
7.2.1 Publicación de resultados.....	100
7.3 Trabajo futuro	101
Referencias	103

Índice de figuras

Figura 2.1. Estrategia de acceso: (a) spectrum overlay, y (b) spectrum underlay	16
Figura 2.2. Evolución de la administración de espectro.....	17
Figura 2.3. Resumen del concepto de CRS [37].....	19
Figura 3.1. Vecindarios de PSO [54]	33
Figura 4.1. Modelo del sistema.....	44
Figura 4.2. Cálculo de $SINR_u$ y $SINR_v$	47
Figura 4.3. Mapeo de los vectores X_i , X'_i y <i>Estado del Espectro</i>	51
Figura 4.4. Administración de vectores para el cálculo de aptitud: CASO 1	54
Figura 4.5. Administración de vectores para el cálculo de aptitud: CASO 2	55
Figura 5.1. Ejemplo de un escenario de evaluación.....	60
Figura 5.2. Metodología de la simulación	62
Figura 5.3. Convergencia de soluciones para una estrategia de peso de inercia w constante.....	66
Figura 5.4. Convergencia usando una estrategia de peso de inercia w variable	67
Figura 5.5. Tiempo promedio para encontrar una solución (peso de inercia w constante)	68
Figura 5.6. Tiempo promedio para encontrar una solución (peso de inercia w variable).....	69
Figura 5.7. Tasa de datos promedio en el sistema	71
Figura 5.8. Promedio del máximo número de enlaces secundarios seleccionados	71
Figura 5.9. Probabilidad de bloqueo del escenario de evaluación	72
Figura 5.10. Ejemplo de una solución obtenida por el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO para $Pl=6$, $Sl=10$ y $SINR_L=6$ dB	74
Figura 6.1. Escenario de evaluación	79
Figura 6.2. Zona primaria de exclusión.....	83
Figura 6.3. Cálculo de la distancia mínima en escenario con el mejor encontrado	85
Figura 6.4. Resultados de la distancia mínima y distancia promedio obtenidas para cada experimento	85
Figura 6.5. Radios de zonas primarias de exclusión	86
Figura 6.6. Distribución de los valores de $SINR$ obtenido del escenario de evaluación	89
Figura 6.7. Número máximo y promedio de enlaces secundarios seleccionados	90
Figura 6.8. Tasa de datos máxima y promedio	92
Figura 6.9. Probabilidad de interrupción: (a) $SINR_L=4$ dB, y (b) $SINR_L=14$ dB.....	93
Figura 6.10. Evaluación de la probabilidad de interrupción para diferentes valores de $SINR_L$	95

Índice de tablas

Tabla 5.1. Parámetros de las variantes de PSO para espacios discretos.....	60
Tabla 5.2. Parámetros de los experimentos	61
Tabla 5.3. Mejores soluciones considerando una estrategia de peso de inercia w constante	64
Tabla 5.4. Mejores soluciones considerando una estrategia de peso de inercia w variable.....	65
Tabla 5.5. Mejores soluciones encontradas en los experimentos	73
Tabla 6.1. Parámetros de SCPSO	81
Tabla 6.2. Parámetros de los experimentos	81

Capítulo 1

Introducción

“El Dividendo Digital” se refiere al espectro que queda libre como consecuencia del proceso de transición de los sistemas analógicos a una tecnología digital. Cuando los canales analógicos se transfieren a plataformas solamente digitales, se libera parte del espectro que había sido utilizado para la transmisión ya que los sistemas digitales utilizan un espectro más reducido que los analógicos. Como consecuencia de la transición tecnológica, una gran cantidad de gobiernos planifican la utilización de dividendos digitales o su asignación [1].

El dividendo digital y su reasignación plantean tanto desafíos como oportunidades para los organismos reguladores y para los actores de la industria [2]. Existen implicaciones que se deben tomar en consideración para maximizar los beneficios que surjan de este proceso. La escasez de espectro en la actualidad posiblemente se transforme en una crisis de espectro en el futuro cercano, a menos que se asigne al mercado más espectro armonizado. Si se aborda correctamente, la oportunidad del dividendo digital puede dar forma a las condiciones de mercado de manera positiva a lo largo de la región. Por el contrario, un proceso de asignación con retrasos o con un diseño pobre podría reducir las inversiones en banda ancha móvil e inhibir la implementación de redes de nueva generación.

1.1 Contexto del problema

En los últimos años las comunicaciones móviles 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. Actualmente existen a nivel mundial más de un trillón de dispositivos móviles que cuentan con algún tipo de interfaz inalámbrica y con ello el consumo de datos de banda ancha está aumentando vertiginosamente, y algunas estimaciones prevén una

demanda mundial total que crecerá 25 veces entre 2012 y 2016 (Fuente: Informa Telecoms & Media).

El espectro es el recurso que permite que se puedan efectuar las comunicaciones inalámbricas. En la actualidad, en la mayoría de los países, las redes y aplicaciones inalámbricas están reguladas mediante una política de asignación de espectro fija [3]. El Estado regula, administra y asigna la utilización de las diferentes bandas de frecuencia a distintas empresas, usuarios y/o servicios mediante autorización, permiso o licencia a largo plazo. Con esta administración fija del espectro se garantiza, a las distintas tecnologías inalámbricas, protección contra la interferencia pero, por otro lado, provoca que cada vez sea más difícil encontrar bandas libres para el despliegue de nuevos sistemas, especialmente en las bandas por debajo de los 3 GHz, particularmente valiosas para los sistemas inalámbricos gracias a sus características de propagación favorables.

Sin embargo, estudios recientes indican que esta escasez es virtual y han demostrado que gran parte del espectro regulado asignado 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% [4][5][6]. Desde esta perspectiva, que muestra la ineficiencia de las actuales políticas de asignación de espectro, diferentes organismos han considerado la necesidad de introducir reformas, no sólo para mejorar su utilización sino también para proveer nuevo espectro disponible para las nuevas aplicaciones de banda ancha móvil. Como resultado de estos estudios, se han propuesto tecnologías de comunicación innovadoras que permiten que un dispositivo inalámbrico utilice su espectro de una forma más inteligente y flexible. Un ejemplo de ello es la tecnología de *Radio Cognoscitiva (CR)* [7], la cual provee a los dispositivos inalámbricos con la capacidad de adaptar de manera óptima sus parámetros de transmisión de acuerdo a la interacción con el entorno en el que opera [8].

Al igual que se deben lograr tecnologías y políticas energéticas orientadas al futuro, no hay elección con respecto a las señales de radio; también se debe hacer un uso mejor y más eficaz del espectro.

1.2 Radio Cognoscitiva: Estrategia que mejora la eficiencia espectral

La *concesión de licencia*, es actualmente la estrategia en la cual se confiere el uso exclusivo de una banda de frecuencia a un operador a través de la compra de una licencia, cabe mencionar que a causa de las garantías de no interferencia y exclusividad comprometidas, la utilización del espectro regulado es altamente costoso. Ofrece la ventaja de proporcionar protección a sus usuarios contra la interferencia que generan usuarios de otros sistemas y/o operadores inalámbricos.

Sin embargo, en la literatura se proponen otras estrategias con el fin de aprovechar el uso del espectro. Por ejemplo, *compartir* bandas espectrales, ya sean entre sistemas con bandas reguladas o entre sistemas con bandas reguladas y no-reguladas. Los sistemas no-regulados o que operan sin licencia, no cuentan con garantías de exclusividad, no tienen costo y existen reglas de operación preestablecidas que ayudan a minimizar la interferencia (por ejemplo: control de potencia y métodos de acceso al medio). Por lo que compartir bandas de frecuencia promueve la coexistencia de diferentes sistemas de radio en la misma porción espectral, sin importar la banda de frecuencia de operación que tienen asignada originalmente. Una aplicación de esto son las redes heterogéneas, en las que distintas tecnologías inalámbricas funcionan juntas para brindarle al usuario final una experiencia inalámbrica transparente. Las redes heterogéneas les ofrecen a los operadores la oportunidad de incrementar la cobertura, capacidad y soporte a la demanda creciente de banda ancha. Se compone principalmente por una combinación de macro-celdas tradicionales de gran tamaño y celdas más pequeñas, incluso micro-celdas, pico-celdas y femto-celdas.

Lo anterior permite que usuarios que pertenecen a una red inalámbrica utilicen canales de comunicación de otras redes y que varios usuarios utilicen el mismo canal al mismo tiempo [3]. 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 y los de otros sistemas inalámbricos comerciales ya existentes que operan en bandas de frecuencia vecinas [9] y [10].

Dado que actualmente la mayor parte del espectro está asignado, cualquier iniciativa para la utilización compartida del espectro ha de tener como premisa fundamental que los usuarios no regulados o secundarios (SU) no interfieran a los usuarios regulados o Usuarios Primarios (PU) [11], por lo que resulta evidente que para el desarrollo de futuros dispositivos, aplicaciones o sistemas de espectro compartido basados en Radio Cognitiva es necesaria la detección de todo tipo de señales.

Radio Cognoscitiva se define como aquel sistema de radio que utiliza las bandas espectrales en forma dinámica de tal forma que contribuye en mejorar la utilización del espectro [8]. Implementar en la práctica esta técnica implica que los dispositivos deben buscar o detectar constantemente, sin equivocarse, un canal regulado o primario disponible en una porción amplia del espectro. Decidir erróneamente que dicho canal está libre cuando en realidad lo está utilizando PU generará interferencia en la red y, resolver que el canal está ocupado cuando no lo está, resultará en consecuencia en una disminución de la eficiencia espectral. A esta nueva forma de explotar el espectro utilizando la tecnología de CR se le conoce como *Acceso Dinámico de Espectro* (DSA).

DSA se define como “Un mecanismo que adapta el uso del recurso espectral en respuesta a los cambios que se presentan en el entorno” [12]. Existe una tendencia errónea de conceptualizar a DSA como una forma de "retribución de espectro"; que beneficia a la "comunidad pobre de espectro" a costa de la "comunidad rica de espectro". DSA es una tecnología cuyo propósito es mejorar la administración del espectro y automatizar la toma de decisiones, no el de sustituir a la actual gestión del espectro.

DSA propone dos estrategias para compartir el espectro [13]. La primera, conocida como *Overlay*, no impone restricciones en la potencia de transmisión de los SU's, ya que éstos pueden utilizar solamente aquellos canales disponibles en la banda regulada. Esta técnica puede aplicarse en el dominio temporal o espacial, en el primer caso, los SU's explotan los espacios temporales del espectro (hoyos espectrales) que no se utilizan, los cuales resultan del tráfico a ráfagas de los PU's. En el segundo caso, utilizan las bandas de frecuencia de una región geográfica en particular que no utilizan los PU's. Por otro lado, la estrategia *Underlay*, permite que SU's coexistan simultáneamente con PU's en la misma banda de frecuencia con mínima o nula interferencia. Es decir, usuarios primarios y

secundarios pueden hacer uso del mismo canal al mismo tiempo. Lo anterior se logra limitando la potencia de transmisión de los SU's con el fin de mantener los niveles de interferencia por debajo de un umbral máximo establecido.

En cualquiera de los dos casos los SU's deben identificar y utilizar en forma oportuna bandas de frecuencia adecuadas para su uso. Además deben estar dispuestos a interrumpir su comunicación y buscar algún otro canal disponible para completar su transmisión en caso de que los PU's desean hacer uso de sus propios canales (para el caso overlay) o por la generación de un excedente en los niveles de interferencia que degradarían la calidad de la transmisión tanto para el PU como para el SU (caso underlay).

1.3 Retos de la Asignación Dinámica de Espectro

Las técnicas DSA utilizan información de su entorno (como por ejemplo; interferencia, ubicación, cantidad de canales disponibles, entre otros) para adaptar su operación de forma dinámica con la intención de mejorar su capacidad. A pesar de que algunas tecnologías inalámbricas ya utilizan algunas técnicas adaptivas (como por ejemplo las redes WLAN 802.11g utilizan identificación de canal, selección de frecuencia dinámica y modulación adaptiva) para incrementar el desempeño de la red, siguen siendo reguladas por un estándar que limita su capacidad. A diferencia de establecer canales y anchos de banda predefinidos, los dispositivos que utilizarían técnicas DSA podrían seleccionar su propia frecuencia central y modificar su ancho de banda de acuerdo al espectro disponible y a las necesidades de la red. A través de este proceso de tomar decisiones inteligentes las distintas redes que participan en una aplicación pueden cooperar y hacer un mejor uso del espectro tanto en la presencia de otros dispositivos con técnicas DSA como de terminales que no cuenten con esta característica. Por lo anterior, los operadores y diseñadores se enfrentarán a dos retos principales al momento de diseñar e implantar una red cognoscitiva: reducir la interferencia dañina hacia los usuarios primarios y el control de acceso y asignación de canal que incremente la capacidad total de la red.

Buscando una nueva forma de medir la interferencia con mayor eficacia en un contexto de espectro compartido, la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones en Estados Unidos) propone la métrica "temperatura de interferencia" [14]. Esta medida considera la

interferencia solo de los receptores y no de los transmisores, esto es, establece la cantidad de energía no deseada que experimentan los receptores, y no la cantidad de energía emitida por los transmisores [15]. Sin embargo, en mayo del 2007 la FCC abandona la idea del concepto de temperatura de interferencia, debido a que los proponentes ignoraron el hecho de que el establecer una métrica nueva, necesita también el desarrollo de un estándar de interferencia permisible [15][16]. La métrica establece la cantidad de energía presente en una cierta frecuencia, en un instante de tiempo y lugar, pero no es determinante en si esta cantidad de energía es aceptable o no en términos regulatorios. En este contexto, los trabajos presentados en [17] y [18] consideraron la temperatura de interferencia como restricción para determinar el número permisible de usuarios secundarios en una red CR. Los trabajos presentados en [19], [20], [21], y [22] establecen un umbral de interferencia, en lugar de imponer una temperatura de interferencia, para controlar la interferencia que generan los usuarios secundarios sobre el receptor primario. La interferencia percibida en el receptor primario se obtiene a partir de la suma de las potencias de transmisión y ganancias de todos los enlaces secundarios. En estos trabajos se asume que un grupo de usuarios secundarios tratan de compartir canales simultáneamente con un receptor primario común, y la única restricción que se establece es que se cumpla con un valor mínimo de SINR (Relación Señal-Interferencia) en la red primaria. En este sentido, el problema se divide en dos objetivos; 1) controlar el acceso de enlaces secundarios y con ello minimizar la interferencia en el sistema y, 2) asignar canales primarios a usuarios secundarios de tal forma que se maximice la capacidad del sistema. Para lo anterior, es posible considerar un mecanismo de control de potencia [19] para reducir la interferencia, sin embargo esto afecta a todos los usuarios el sistema (primarios y secundarios) lo que también reduce la capacidad total de la red. La asignación de canales se puede lograr mediante dos criterios; considerando la misma tasa de datos para todos los usuarios (ERA, por sus siglas en inglés *Equal Rate Allocation*) o una asignación de tasa de datos proporcional (PRA, por sus siglas en inglés *Proportional fair Rate Allocation*) [20]. Sin embargo, ninguno de los dos esquemas asegura una Calidad de Servicio (QoS) aceptable tanto para las redes primaria como secundaria y solamente asigna los canales de tal forma que se incremente la capacidad de la red. La QoS se define por la cantidad de interferencia que percibe cada una de las redes y, ésta debe estar por debajo de un umbral predefinido. Entre mayor sea la

cantidad de usuarios secundarios que utilicen el mismo canal concurrentemente, mayor será la interferencia. Por lo que, una forma de controlar el acceso de usuarios secundarios es mediante la asignación efectiva de canales primarios, y en el momento de que alguno de ellos provoque que la interferencia supere el umbral predefinido (debido a su movilidad o incremento en la potencia de transmisión) será bloqueado [21]. Aunque esta estrategia asegura una QoS en el sistema al controlar la interferencia, no asegura un incremento en la capacidad de la red, dado que es posible que a un usuario secundario no se le asigne un canal de comunicación, a pesar de lograr un buen SINR, con tal de no incrementar la interferencia en la red primaria.

En principio, las técnicas DSA tienen como prioridad proteger a los usuarios primarios, pero esta premisa no garantiza un incremento en la eficiencia espectral o en la utilización efectiva de los recursos espectrales. Para que se logre ésta maximización en el uso del espectro, se debe asegurar que un máximo número de usuarios secundarios utilicen un mismo canal primario con el compromiso de que exista un nivel de QoS en las redes primaria y secundaria [23]. Una forma de lograrlo es estableciendo zonas de protección o de exclusión para los nodos primarios en las que ningún usuario secundario podrá hacer uso de un canal primario, con la finalidad de evitar la interferencia mutua.

Los algoritmos de DSA permiten que se aprovechen las bandas de frecuencia, ya sea que estén disponibles en un tiempo determinado o que sean utilizadas con mínima interferencia en caso de estar ocupadas. Sin embargo, si se considera demasiada regulación, es decir, limitar el número de usuarios secundarios provocaría que el sistema sea ineficiente, debido a que no se aprovecharían las porciones espectrales que se encuentran desocupadas. Por otro lado, considerar demasiada autonomía, es decir, aceptar muchos usuarios secundarios volvería al sistema autodestructivo, debido a la interferencia que se generaría y al incremento de colisiones entre los usuarios secundarios al tratar de acceder a una misma porción espectral. Este problema de optimización es posible dividirlo en dos subproblemas. El primero consiste en maximizar la cantidad de usuarios secundarios admitidos en la red tomando en cuenta las restricciones antes mencionadas (potencia de transmisión, ubicación espacial, QoS) y, el segundo es maximizar la cantidad de datos transmitidos (throughput) por parte de estos usuarios secundarios seleccionados.

1.4 Preguntas de Investigación

En este proyecto se propone desarrollar un algoritmo de control de acceso y asignación de canal con base a las características de espectro compartido, en la cual usuarios primarios (con licencia) comparten simultáneamente el uso de su banda espectral con usuarios secundarios (sin licencia). El buen desempeño de la red estará limitado por la tolerancia a la interferencia y los límites de sensado que presenten los usuarios primarios y secundarios. Limitar la interferencia por debajo de un valor de umbral, permite mantener un compromiso entre la tasa de dato del sistema y la cantidad de usuarios secundarios que pueden hacer uso simultáneo de los canales primarios. En otras palabras, el límite de interferencia es una medida de la tolerancia que pueden ofrecer los usuarios debido a la interferencia de acceso múltiple. Por otro lado, establecer límites de sensado para detectar la mínima relación señal-Interferencia (SINR) en el usuario secundario permite determinar la cantidad de protección que cada usuario secundario es individualmente capaz de proporcionar al usuario primario. En este sentido, se debe establecer un balance y compromiso entre minimizar la interferencia en la red primaria y maximizar el desempeño de toda la red inalámbrica. Por lo que las preguntas de investigación que surgen son;

- ¿Cuál es la cantidad máxima de usuarios secundarios a los que se les debe permitir coexistir, con la mínima interferencia, con usuarios primarios de tal forma que se maximice la eficiencia del uso espectral en el sistema medido en términos de la cantidad de datos transmitidos?
- ¿Cuál es la mínima distancia (o zona de exclusión) a la que se deben ubicar espacialmente los usuarios secundarios de los usuarios primarios?

Para la primera pregunta, se considera en la literatura como un problema NP-duro cuando no todos los usuarios secundarios pueden ser atendidos con los requerimientos de QoS que ellos demandan [19], mientras que para segunda pregunta es un problema no-convexo [24], [25]. Sin embargo, no necesariamente utilizar métodos de programación No-Lineal (NLP) para resolver el problema de optimización permitirá obtener una solución confiable o convergerá a un valor óptimo absoluto. En [19] los autores proponen maximizar la cantidad de datos transmitidos (throughput) por los usuarios secundarios en una red heterogénea de espectro compartido utilizando una técnica basada en la programación

geométrica secuencial. En [25], los autores generan un millón de distintos escenarios de diferentes combinaciones en un área de 1 Km², utilizan el método Montecarlo para determinar la ubicación espacial de usuarios secundarios y los umbrales de sensado que se requieren para detectar canales disponibles en bandas reguladas de televisión. Sin embargo, en estos trabajos es excesiva la complejidad computacional que se requiere para encontrar el óptimo global al momento de asignar el espectro disponible. Otros trabajos proponen utilizar técnicas de inteligencia computacional para la búsqueda de soluciones óptimas en el contexto de DSA tales como; Algoritmos Genéticos (GA), Optimización por Cumulo de Partículas (PSO) y, Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) [26], [27]. Estas técnicas son independientes del problema, lo cual los hace algoritmos robustos, por ser útil para cualquier problema, pero a la vez débil, pues no está especializado en ninguno. Las soluciones codificadas compiten entre sí para ver cuál constituye la mejor solución (aunque no necesariamente la mejor de todas las soluciones posibles). La principal ventaja de estos métodos radica en su sencillez y en que se requiere poca información sobre el espacio de búsqueda ya que se trabaja sobre un conjunto de soluciones o parámetros codificados.

1.5 Objetivos

Con el fin de dar respuesta a las preguntas de investigación, se plantearon los siguientes objetivos de investigación.

1.5.1 Objetivo General

Proponer requerimientos de diseño que deben considerarse en el despliegue de una red cognoscitiva de tal forma que se incremente la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrico heterogéneo.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad máxima y ubicación espacial de los usuarios secundarios que pueden utilizar concurrentemente un canal primario.
- Determinar el compromiso existente entre la máxima tasa de transferencia de datos del sistema y la zona de exclusión primaria, considerando requerimientos de calidad de servicio (QoS).

1.6 Contribuciones

- Una estrategia de control de admisión y asignación de canal para compartir bandas de frecuencia primarias en redes heterogéneas.
- Una metodología para analizar el compromiso entre el entorno de propagación y la calidad de servicio en una red heterogénea.
- Una herramienta computacional basada en la Optimización por Cúmulo de Partículas que permite determinar requerimientos óptimos de diseño de una red cognoscitiva.

1.7 Organización del documento

El documento de tesis está estructurado en siete capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 2, proporciona los fundamentos, términos, técnicas y tecnología utilizados en esta tesis. Se describe la política actual para la administración del espectro y la estrategia de acceso dinámico de espectro. Se finaliza con una breve descripción de las características principales de la radio cognoscitiva; concepto, capacidades, elementos, retos, estandarización y algunas de sus aplicaciones.

Capítulo 3, describe la operación básica del algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO por sus siglas en inglés, *Particle Swarm Optimization*). Se presenta la filosofía que origina esta técnica y las características principales que diferencian esta técnica con otras versiones del algoritmo PSO para espacios continuos y para espacios discretos. Además, se describen las diferentes variantes del algoritmo PSO para espacios discretos, tales como SCPSO (del inglés *Socio Cognitive Particle Swarm Optimization*) y Derivation 0.

Capítulo 4, presenta la propuesta del modelo de control de acceso y asignación de canal bajo el esquema de espectro compartido, basado en la técnica de Optimización por Cúmulo de Partículas. Aquí se describen las condiciones necesarias para lograr la máxima tasa de datos en el sistema mediante el uso concurrente de canales primarios.

Capítulo 5, presenta la evaluación del desempeño del algoritmo de asignación de control de acceso y asignación de canal propuesto tomando en cuenta distintas versiones de optimización por cúmulo de partículas para espacios discretos, BPSO (del inglés *Binary Particle Swarm Optimization*), SCPSO y Derivation 0. Además se presenta un análisis comparativo de la propuesta al considerar las estrategias de peso inercia w constante y peso de inercia w variable, donde el peso de inercia w es un parámetro propio de la optimización por cúmulo de partículas.

Capítulo 6, considera el algoritmo propuesto en esta tesis para determinar requerimientos de diseño necesario para el despliegue de una red cognoscitiva. Se presenta una evaluación de las zonas primarias de protección, capacidad del sistema y cantidad de enlaces secundarios, considerando protección contra la interferencia tanto en la red primaria como en la red secundaria.

Capítulo 7, presenta las conclusiones y contribuciones del trabajo de investigación, así como el trabajo futuro derivado de esta investigación.

Capítulo 2

Radio Cognoscitiva y retos en la administración del espectro

Es reconocido que la política actual de administración fija del espectro usada en distintos países ha creado un uso ineficiente del espectro. Ello significa que ciertas porciones del espectro se encuentran saturadas mientras que en otras se observa un uso escaso. En este sentido, el acceso dinámico de espectro es propuesto como una solución para reciclar el espectro y usarlo de manera más eficiente. La tecnología clave habilitadora del acceso dinámico de espectro es la radio cognoscitiva. Así, un dispositivo con tales características es capaz de cambiarse de una porción del espectro saturada a otra menos cargada, o incrementar sus capacidades de corrección de errores en presencia de la interferencia, todo esto considerando decisiones de análisis predictivos que se hacen dando un seguimiento a las acciones del usuario y su localización.

Este capítulo proporciona la base necesaria para los términos, las técnicas y tecnología utilizados en esta tesis. Se describe la política actual de administración fija del espectro y la operación de la estrategia de acceso dinámico de espectro. Se concluye con la definición de radio cognoscitiva incluyendo capacidades, elementos, estandarización y algunas de sus aplicaciones.

2.1 Administración fija del espectro

El espectro electromagnético es un recurso necesario para el desarrollo exitoso de sistemas de comunicaciones inalámbricas [28]. En los inicios de las comunicaciones inalámbricas, la densidad de usuarios era poca de tal forma que no había necesidad de reglas para controlar las transmisiones, sin embargo, con el incremento del número de usuarios se incrementaron también los problemas debido a la interferencia producida entre los distintos sistemas inalámbricos [29]. Lo anterior originó la creación de entidades regulatorias, las cuales dividieron el espectro en distintas bandas de frecuencia, cada una de ellas se asignaron a diversos servicios de radiocomunicaciones controlando de esta manera la interferencia. Desde hace casi 100 años esta ha sido la forma de administrar los recursos espectrales, comúnmente conocida como administración fija del espectro [3].

Actualmente el espectro se extiende en el rango de frecuencias de los 10 KHz a los 300 GHz. Cada país cuenta con sus entidades de regulación de espectro como la *Oficina de Comunicaciones (OFCOM)* en Inglaterra, la *Comisión Federal de Comunicaciones (FCC)* en Estados Unidos de América, la *Agencia Federal de Redes (BNetzA)* en Alemania y la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)* en México, quienes deciden el uso y aplicación de una banda espectral en particular. En general, se reconocen dos tipos de bandas espectrales: reguladas y no reguladas. En una banda regulada, el administrador de espectro otorga una licencia al usuario que le da el derecho a transmitir en una frecuencia en particular. Las licencias se otorgan por un largo plazo cubriendo extensas zonas geográficas. Por el contrario, el administrador de espectro puede exentar a otros usuarios del uso de una licencia y asignarlos a la banda no regulada del espectro. Los usuarios de una banda no regulada deben respetar los límites de potencia de transmisión, generalmente son niveles de potencia bajos de tal manera que la interferencia que generen sea mínima [28][3].

Este control riguroso de la administración fija del espectro le permite al regulador [3]:

1. Asegurar que no se genere interferencia excesiva, ya que tendrá la capacidad de modelar cuidadosamente la interacción entre servicios vecinos y adaptar las condiciones de la licencia adecuadamente.
2. Imponer requerimientos de cobertura para lograr la ubicuidad de los servicios.
3. Decidir sobre las reglas de operación de un dispositivo inalámbrico, por ejemplo, cuanto espectro y cual banda de frecuencia debe reservarse para su operación.

Sin embargo, el aumento en el desarrollo de aplicaciones y su tiempo de uso así como de tecnologías y tasas de datos han incrementado la demanda y el valor de los recursos finitos espectrales generando la idea de escasez de espectro [5]. Diversos estudios como en [5] y [4] concluyen que la idea de escasez de espectro es errónea y en su lugar se establece que es un problema de acceso al espectro [30], provocado, en gran medida, por su administración fija. Se ha detectado que ciertas bandas se encuentran saturadas mientras que otras no se utilizan por largos periodos de tiempo. Lo anterior motiva a las entidades

regulatorias a revisar su política de administración fija de espectro con el fin de reformar su acceso y uso de una forma más eficiente y flexible [31].

2.2 Acceso dinámico de espectro: Reformas de las políticas de espectro

La forma de administración fija del espectro presenta propiedades deseables en términos de control de interferencia, armonización internacional de asignación de frecuencia, estandarización de nuevos productos y roaming internacional. Sin embargo, no evalúa la asignación de los recursos espectrales con base en los criterios económicos de oferta y demanda, no permite el comercio de la licencia y no responde flexiblemente a nuevos desarrollos de productos y su tecnología asociada. Además, las licencias otorgadas para utilizar el espectro no proporcionan ningún derecho de propiedad a su titular, sino que solo le confiere derechos exigibles con respecto a la banda de frecuencia, potencia de transmisión y ubicación [32].

Regímenes flexibles y tecnologías que hacen el uso del espectro más accesible a empresas nuevas y otros operadores innovadores pequeños ofrecen el potencial para reducir el tiempo de aparición de los productos de comunicación y abordar el problema de acceso al espectro [29][32]. A principios de la década de los 90's inició el proceso de eliminar, progresivamente, la administración fija del espectro en países anglo-americanos y algunos países en desarrollo como Guatemala y El Salvador [32][33]. Esta nueva reforma se centró básicamente en dos enfoques [32]: *uso exclusivo* y *uso colectivo*. El primer enfoque consiste en conferir propiedad privada a las bandas espectrales y permitirles a los dueños comerciar sus bandas a mercados secundarios. El segundo, asume acceso abierto o poca regulación en el acceso a bandas espectrales, siempre y cuando los usuarios utilicen equipos acreditados y se tomen en cuenta los lineamientos que se establecen. Sin embargo, estas reformas iniciaron un debate entre los defensores de uno y otro enfoque. Los defensores del enfoque de uso exclusivo, muchos de ellos economistas, advierten sobre el caos esperado bajo una administración de uso colectivo, ya que el cambio de un control total a una libertad total generaría, en consecuencia, una constante interferencia. En este sentido, argumentan que el uso exclusivo conserva la naturaleza de derechos exclusivos de la administración fija pero que la economía y el mercado dictan en que se va a usar el espectro. En contraste, los defensores del uso colectivo, en su mayoría ingenieros y

estudiantes de derecho, condenan la inmadurez de los mercados del espectro y argumentan que el problema por resolver es el acceso al espectro y no la fijación de precios del espectro.

Las reformas antes mencionadas lejos de ser antagónicas son complementarias y dan lugar a un tercer enfoque de reforma espectral denominado uso *semi-exclusivo* [32][34]. Este es un modelo híbrido en el que se combinan las mejores características del uso exclusivo y colectivo del espectro, originando una estructura jerárquica en la que su principal característica es la compartición de espectro entre *usuarios primarios o regulados* y *usuarios secundarios o no-regulados*. Los usuarios primarios tienen licencia permanente para operar en una banda de frecuencia y pueden compartirla con terceros bajo ciertas restricciones. Por otro lado, los usuarios secundarios, generalmente son usuarios que operan en una banda no regulada, aunque también pueden ser usuarios regulados [29], se caracterizan por utilizar las bandas de frecuencia que los usuarios primarios comparten.

En esta forma de acceso compartido del espectro, los usuarios primarios tienen prioridad de utilizar su espectro, por lo que no existen conflictos entre ellos dado que tienen sus propios canales. Los usuarios secundarios requieren ajustar sus parámetros de transmisión para no interrumpir la comunicación de los usuarios primarios al utilizar sus canales al momento de enviar su información. De acuerdo a la estrategia de acceso a los canales primarios que utilizan los usuarios secundarios, ésta se puede dar de dos formas; *Underlay* y *Overlay* [34][35], como se muestra en la Figura 2.1. El enfoque *underlay* les permite a los usuarios secundarios seleccionar un canal de comunicación aún cuando el usuario primario lo está utilizando, por lo que se requieren mecanismos para controlar la interferencia generada en el sistema y, con ello, proteger la comunicación del usuario primario. El segundo enfoque establece la posibilidad de que un usuario secundario aproveche el uso de un canal primario disponible (espacio en blanco) siempre y cuando el usuario primario no lo esté utilizando, este esquema también recibe el nombre de *acceso oportunista al espectro*. La detección de bandas de frecuencia libres por parte de los usuarios secundarios es una de las tareas con mayor complejidad que se presenta en este esquema.

Como se observa en la Figura 2.1, con la estrategia underlay un canal primario puede aprovecharse por más de un usuario, esto es, por el usuario primario y un grupo de usuarios secundarios. En cambio, en el esquema overlay, solamente se puede aprovechar un canal primario por un usuario a la vez, ya sea primario o secundario.

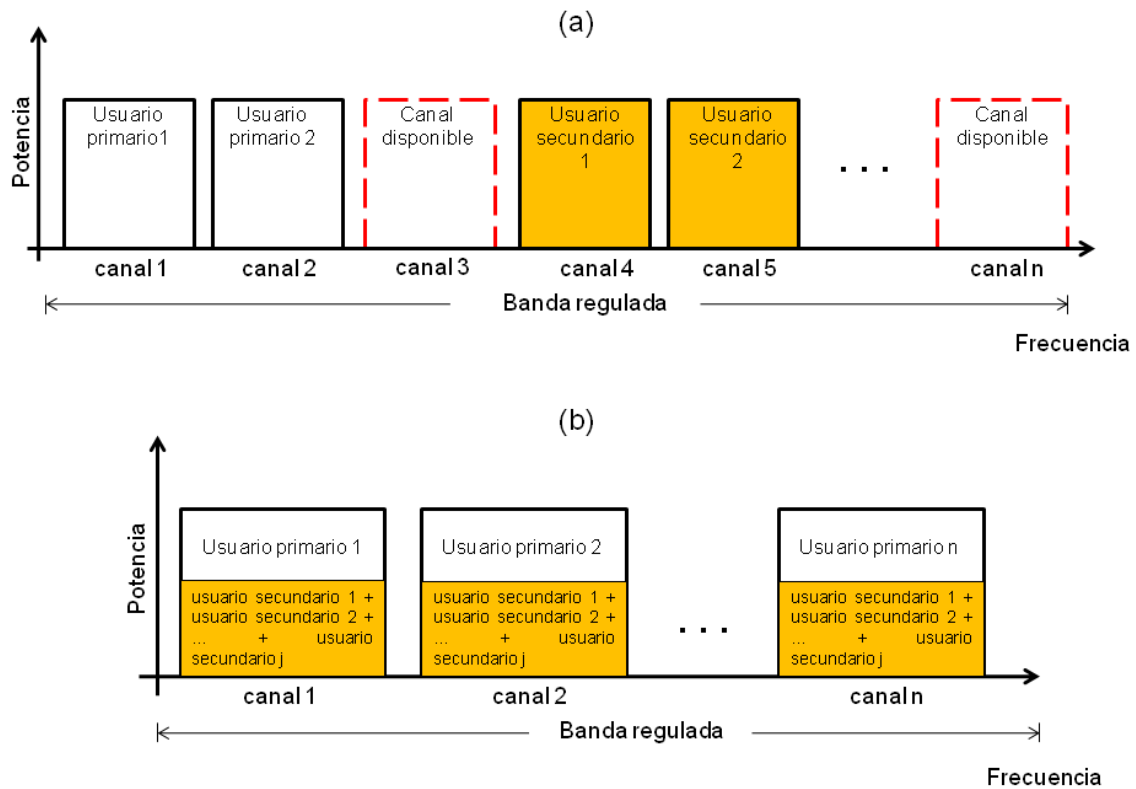


Figura 2.1. Estrategia de acceso: (a) spectrum overlay, y (b) spectrum underlay

La Figura 2.2 muestra la evolución de la administración del espectro, desde la administración fija hasta la reforma de las políticas del espectro mencionadas a lo largo de esta sección que es conocida en nuestro contexto como *Acceso Dinámico de Espectro*.

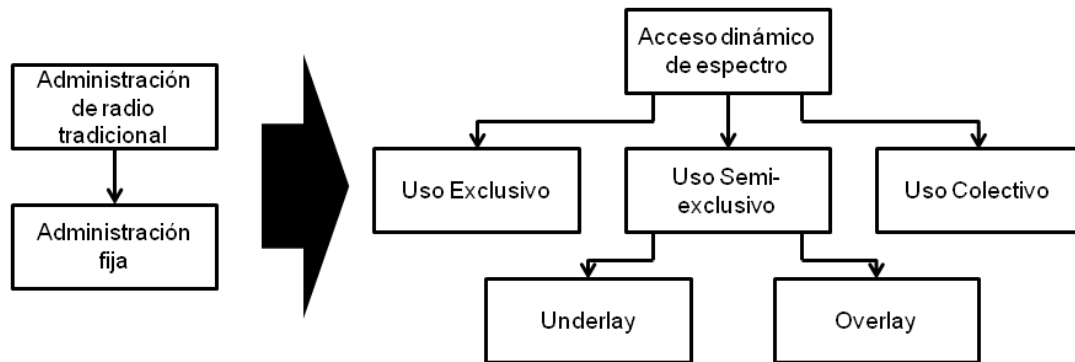


Figura 2.2. Evolución de la administración de espectro

Actualmente muchas de las implementaciones prácticas se enfocan en el uso semi-exclusivo del espectro ya que lo re-usa de una manera más eficiente, aprovechando las oportunidades espectrales (overlay) o compartiendo un mismo canal (underlay).

2.3 Radio Cognoscitiva: Tecnología habilitadora de espectro compartido

Para explotar las estrategias de acceso dinámico de espectro, se requiere de tecnología que proporcione a los usuarios secundarios la capacidad de ajustar automática y dinámicamente sus parámetros de operación (tales como; potencia de transmisión, frecuencia de operación, esquema de modulación, entre otros) de tal forma que no interfieran con la comunicación de los usuarios primarios. En este contexto, una de las tecnologías habilitadoras de espectro compartido es la *Radio Cognoscitiva* (CR por sus siglas en inglés, *Cognitive Radio*), concebida a finales de la década de los 90's por Joseph Mitola [36]. CR se define como un dispositivo de radio lo suficientemente inteligente para detectar las necesidades de comunicación del usuario en función del contexto de uso, y es capaz de proporcionarle los recursos de radio y servicios inalámbricos adecuados a dichas necesidades [37].

Recientemente, la ITU, en específico su grupo de estudio ITU-R WP 1B, define que un sistema de radio cognoscitivo (CRS por sus siglas en inglés, *Cognitive Radio System*) [37] es “un sistema de radio que: obtiene conocimiento de su entorno de operación y geográfico, políticas establecidas y su estado interno; para ajustar sus parámetros de

operación y protocolos de forma autónoma y dinámica de acuerdo al conocimiento adquirido para alcanzar objetivos predefinidos; y al mismo tiempo aprender de los resultados obtenidos”. Esta definición ha dado un entendimiento común acerca de CRS y ha sido adoptada por la mayoría.

Generalmente se reconocen 4 funcionalidades con las que deben contar los dispositivos CR: 1) determinar las porciones del espectro que se encuentran disponibles, así como detectar la presencia de usuarios primarios (*monitorear el espectro*), 2) seleccionar el canal disponible que ofrezca mejores condiciones de operación (*administrar del espectro*), 3) coordinar el acceso al canal seleccionado entre los usuarios secundarios (*compartir el espectro*), y 4) liberar el canal cuando se detecte que el usuario primario lo utilizará y buscar otra porción de espectro disponible (*movilidad del espectro*) [38][39].

2.3.1 Capacidades de un CRS

De la definición anterior de CRS, se reconocen tres capacidades que los dispositivos CR deben poseer: *obtener conocimiento de su entorno, ajustar parámetros de operación y aprender de los resultados.*

El tipo de información que un dispositivo CR *obtiene para su conocimiento* incluye [37]:

- *Entorno de radio*, donde se considera el estado actual del uso del espectro, los sistemas de radio disponibles y sus bandas de frecuencia asignadas, áreas de cobertura de estos sistemas de radio y nivel de interferencia del entorno.
- *Entorno geográfico*, se refiere a la ubicación y distribución de los distintos dispositivos inalámbricos que forman parte del CRS y de otros sistemas en un área geográfica específica.
- *Políticas establecidas*, se refiere a las reglas que el CRS debe seguir para evitar causar interferencia dañina a otros sistemas de radio, por ejemplo, las bandas de frecuencia permitidas para uso del CRS o la potencia máxima de transmisión permitida.
- *Patrones de uso*, esto es, el comportamiento del CRS, de otros sistemas de radio, y de los usuarios.

- *Necesidades del usuario*, por ejemplo, cantidad de ancho de banda, retardo mínimo, tiempo de descarga mínimo, y bajo costo.

Los métodos para obtener este conocimiento son [37]:

- *Reunir información desde el componente de radio del sistema* mediante mediciones de potencia de la señal recibida, relación señal a interferencia, y carga.
- *Geolocalización*. Es un sistema de localización para estaciones base y terminales.
- *Sensado del espectro o acceso a base de datos de espacios en blanco*. Identifica los canales disponibles en la banda primaria.
- *Acceso a un canal piloto cognoscitivo*. permite intercambiar información entre componentes del CRS.

La Figura 2.3 resume el concepto de CRS.

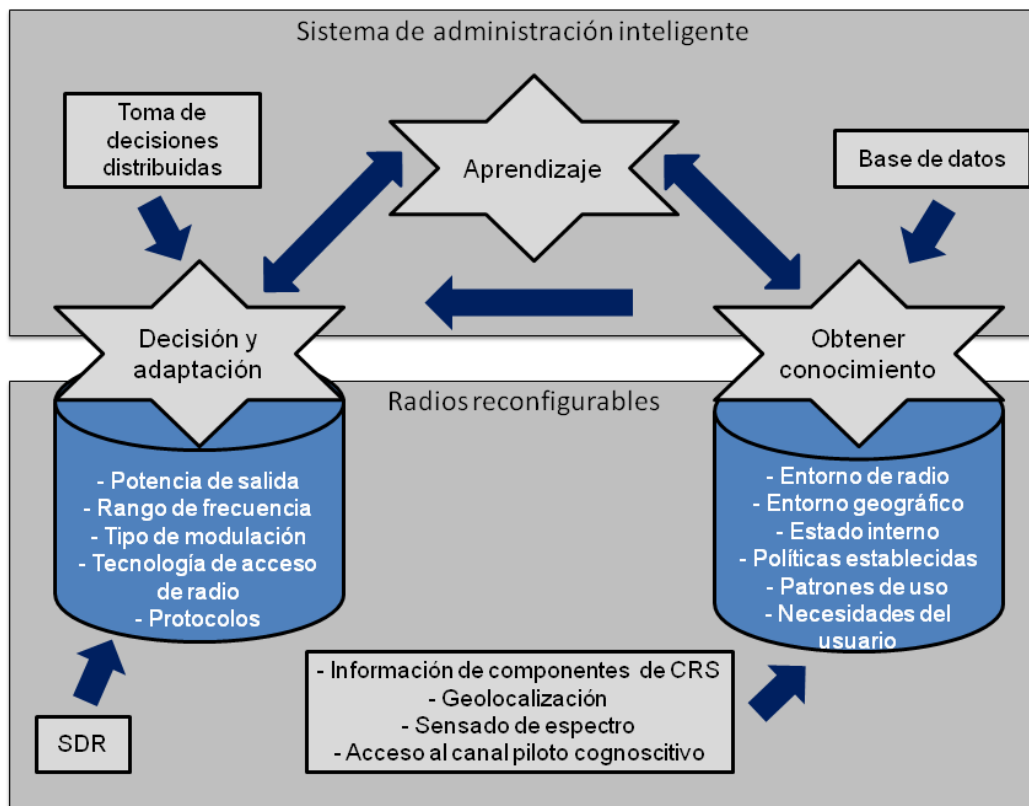


Figura 2.3. Resumen del concepto de CRS [37]

2.3.2 Elementos de un CRS

Los elementos principales que forman un sistema de radio cognoscitiva y que son del interés en este trabajo son las redes primaria y secundaria [38]. La red primaria se compone de aquellos dispositivos (usuarios primarios) que cuentan con una licencia para operar en una banda de frecuencia específica y por lo tanto tienen prioridad de hacer uso de su espectro. En contraste, la red secundaria está formada por los dispositivos (usuarios secundarios con o sin licencia para operar en una banda de frecuencia) que cuentan con capacidades cognoscitivas para acceder y hacer uso de espectro primario con la condición de que el acceso de los usuarios secundarios al espectro de los usuarios primarios debe de ser transparente para estos últimos y no debe afectar su desempeño.

Con respecto a la arquitectura de red [38], si se tiene una entidad central responsable de la asignación de espectro para los usuarios primarios y/o usuarios secundarios se conoce como arquitectura centralizada, de otra forma, si los usuarios secundarios toman sus propias decisiones para acceder al espectro se le conoce como arquitectura distribuida.

Finalmente, las opciones de uso de espectro para los usuarios primarios está limitado en la banda regulada en la que operan mientras que para el caso de los usuarios secundarios pueden operar tanto en la banda regulada como en la banda no regulada [38].

2.3.3 Estandarización

Uno de los primeros cambios importantes que se han dado en las políticas del espectro para habilitar el acceso a usuarios secundarios en bandas reguladas, es en las bandas asignadas a servicios de televisión. La FCC liberó en septiembre del 2010 las reglas para “Operación no regulada en las bandas de TV”, mientras que la OFCOM inició su proceso de regulación en el 2009 [40]. En la actualidad, la *Asociación Europea de Manufactureros de Computación* (ECMA) y el *Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos* (IEEE) han finalizado sus estándares, IEEE 802.22 y ECMA 392, que hacen uso de la CR para aprovechar los espacios en blanco de las bandas de TV para uso secundario [41]. IEEE 802.22 es un estándar para servicios inalámbricos fijos que logra el acceso de banda ancha en entornos rurales que son difíciles de alcanzar con las tecnologías tradicionales de banda ancha [42]. En cambio, ECMA 392 es un estándar dirigido a la

distribución multimedia y acceso a internet para dispositivos personales portátiles [43][44]. Similar a ECMA 392, IEEE está desarrollando también su estándar para dispositivos personales portátiles llamado IEEE 802.11af (White-Fi) que permitirá utilizar Wi-Fi en las bandas de TV [40][41].

Así mismo, la FCC ha propuesto abrir el acceso a usuarios secundarios en la banda asignada a telemetría móvil aeronáutica (2360-2400 MHz), para despliegue de redes médicas de área corporal (MBAN por sus siglas en inglés, *Medical Body Area Networks*). Para que los usuarios secundarios exploten los espacios en blanco y se mitigue la interferencia a los usuarios primarios de esta banda, se considera utilizar zonas de exclusión (radios de protección en el receptor primario) y otros mecanismos como *Listen-Before-Transmit* y *Adaptive Frequency Selection* (LBT/AFS). Dado que las potencias de transmisión propuestas para los usuarios secundarios son muy bajas (1 mW en la porción espectral 2360-2390 MHz y 20 mW en la porción espectral 2390-2400 MHz), algunos estudios demuestran que estos mecanismos son suficientes para proteger a los usuarios primarios y mantener la calidad de servicio de las aplicaciones de las MBANs. En este contexto, se logra un incremento en la eficiencia espectral cuando se permite el acceso oportunista a esta banda a los usuarios secundarios, en lugar de asignar una nueva porción espectral para las MBANs [40].

Además de la demanda de recursos espectrales por parte de los dispositivos móviles, también se tiene el reto de satisfacer los requerimientos de ancho de banda para soportar los servicios de banda ancha que ofrecerán las redes móviles de nueva generación, tales como LTE-Advanced (del inglés *Long Term Evolution-Advanced*) o Wi-Max. La tecnología de *Agregación de Portadora* se propone como una solución al combinar fragmentos continuos o no continuos de espectro para crear un canal virtual de banda ancha. De esta manera se aprovecha la fragmentación en las bandas espectrales, esto es, los espacios en blanco encontrados en la banda [45][46]. Por las características antes mencionadas, la tecnología de agregación de portadora se incorporará en el estándar de sistemas móviles LTE-Advanced el cual requiere canales de banda ancha de hasta 100 MHz para alcanzar las altas tasas de datos que la ITU ha establecido desde el 2007 para el estándar de IMT-Advanced (del inglés *International Mobile Telecommunications-Advanced*) conocido

comúnmente como Cuarta Generación (4G). Pocos países tienen bloques contiguos de 100 MHz disponibles para asignarlos al estándar de IMT-Advanced [47]. En LTE-Advanced los usuarios primarios y secundarios operan en la misma banda del espectro formando redes homogéneas.

2.3.4 Casos de aplicación de CR

A continuación se describen algunos ejemplos en los que la CR podría beneficiar en el incremento de la eficiencia espectral [40].

La aparición de teléfonos inteligentes, la popularidad de las redes sociales, y el desarrollo de nuevas aplicaciones móviles, han incrementado el uso de los recursos de las redes celulares. En consecuencia, el sistema se encuentra sobrecargado en ciertas áreas geográficas debido al incremento del tráfico generado en la red y al limitado recurso espectral que posee el operador celular. En lugares como aeropuertos, estadios deportivos o centros de convenciones, regularmente la cantidad de personas que se congrega es alta y, en consecuencia, el tráfico que se genera (debido a las llamadas, mensajes de texto o compartición de fotos, videos) le demanda a la red celular una cantidad de recursos, a tal grado de saturarla. Una solución que se propone para este escenario es desplegar áreas de cobertura pequeñas, conocidas como femtocélulas (o hotspots) que permitan desviar el tráfico de datos generado hacia otros canales de comunicación inalámbricos. Sin embargo, para lograr lo anterior y, asumiendo que existe una saturación de recursos espectrales en la red celular, es necesario que estos dispositivos femtocelulares tengan la capacidad de detectar y aprovechar porciones de espectro disponibles, lo que se conoce como *femtocélulas cognoscitivas*. Estas porciones de espectro o espacios en blanco se pueden aprovechar de las bandas de frecuencia que no esté utilizando la red celular en instantes de tiempo determinados. Sin embargo, debido a la interferencia mutua que ambos dispositivos (radio base celular y dispositivo femtocelular) pueden generar por utilizar las mismas bandas espectrales de comunicación, se propone utilizar las bandas de televisión que no se utilicen en ciertas zonas geográficas, ya que por sus características de propagación mejora la cobertura, y además no generaría interferencia entre la femtocélula y la base celular.

Otro ejemplo en el que se puede hacer uso de una red cognoscitiva es en redes de seguridad pública. Estas redes de comunicación utilizadas por los servicios de emergencia (policía, bomberos, y servicios médicos de emergencia) para prevenir o responder a incidentes, consisten de dispositivos inalámbricos que les permite a los usuarios mejorar su eficiencia, visibilidad y habilidad para colaborar instantáneamente con el comando central, miembros del equipo y otras agencias. Sin embargo, en la mayoría de los países, las frecuencias asignadas a servicios de seguridad pública se encuentran congestionadas, especialmente en áreas urbanas. Además, los servicios de emergencia de diferentes jurisdicciones y agencias a menudo no se pueden comunicar durante las emergencias donde la interoperabilidad es impedida por el uso de múltiples bandas de frecuencia, equipo de radio incompatible, y falta de estandarización. Con la CR, usuarios de los servicios públicos podrían usar espectro adicional proveniente de las bandas de TV o con la asociación con operadores comerciales acceder a bandas reguladas para responder efectivamente ante una emergencia.

Finalmente, la tecnología de CR puede aplicarse en MBANs para la implementación de monitoreo ubicuo de signos vitales (temperatura, presión, oxígeno en la sangre, electrocardiogramas, etc.) en pacientes en hospitales. Actualmente esto se puede hacer a través de sensores colocados en el cuerpo del paciente, sin embargo, la banda 2.4 GHz no es apropiada para aplicaciones medicas criticas debido a su alta congestión y por consecuencia alta interferencia. Abrir la banda de 2360-2400 MHz para MBANs donde la CR habilitaría el acceso, aseguraría la calidad de servicio de sus aplicaciones dado que es una porción espectral menos saturada.

2.4 Importancia de identificar requerimientos para definir políticas de espectro

La interferencia es un fenómeno que no es posible eliminar en un sistema inalámbrico, sin embargo se puede controlar, y en este sentido los reguladores han establecido ciertas políticas para el uso del espectro en las que se definen reglas de operación de los equipos para una banda en particular [15]. Un regulador responsable no

permitirá que un dispositivo inalámbrico en el mercado dañe o genere interferencia a otros sistemas [29].

En sus inicios, la idea de CR proponía contar con nula regulación para sus dispositivos, lo que desató uno de los debates más importantes en los últimos años en los círculos de las políticas de espectro, principalmente en la forma de cómo garantizar protección a los usuarios primarios y, si en realidad, esta tecnología proporcionaría un eficiente uso del espectro. Sin reglas claras de cómo administrar el espectro, la presencia de dispositivos secundarios egoístas (esto es, dispositivos que transmiten con mayor potencia, duración, o ancho de banda de lo necesario para mejorar su propio desempeño) degradaría el desempeño de la red de CR. Lo anterior, según la *Teoría de Juegos*, sería el resultado de que contar con un dispositivo secundario egoísta en el sistema provoca que el dispositivo secundario vecino optimice su rendimiento siendo aún más egoísta que el primero, lo que potencialmente conduce a una escalada de un sobre-consumo de recursos que degrada el rendimiento de todos los usuarios en el sistema. A este fenómeno se le conoce como la *tragedia de los recursos comunes*, en el que muchos dispositivos consumen mucho del recurso compartido y en consecuencia todos los dispositivos en la banda experimentan una comunicación de baja calidad [29].

La liberación de la banda de TV para uso secundario fue uno de los factores decisivos para terminar con este debate, al considerarse que CR sería posible si y solo si se desarrollaban simultáneamente políticas de espectro que hicieran efectivo su uso. Para que una innovación sea exitosa, se requiere tomar en consideración al sistema completo; tecnología inalámbrica, políticas de espectro y los usuarios que interactúen con ambas [29]. La comprensión de este hecho, originó el desarrollo del primer estándar para CR, IEEE 802.22.

Identificar requerimientos de diseño para desplegar estas nuevas redes de CR, ayudará a los reguladores en el desarrollo de políticas que eviten la generación de interferencia dañina entre los sistemas inalámbricos que interactúan entre sí, principalmente a los usuarios de la red primaria. Se considera que la interferencia es dañina si es lo suficientemente grande para causar una interrupción en el servicio de cualquiera de los usuarios [29][15]. Una de las soluciones que se proponen en la literatura, es el desarrollo de

algoritmos de control de admisión, los cuales determinan si un usuario móvil puede hacer uso o no de algún canal de comunicación. Si se cumple la restricción o restricciones de admisión impuestas por el algoritmo, entonces se permite que el usuario utilice los recursos de la red, en caso contrario el usuario será bloqueado. Algunas de las restricciones que se pueden considerar en estos algoritmos de control de admisión son [11][48]; las zonas primarias de exclusión (el radio de protección de un receptor primario), límites de potencia de transmisión, número de usuarios secundarios, umbrales y tiempo de monitoreo, niveles aceptables de interferencia (relación señal a interferencia) por mencionar algunos. En este sentido, la contribución principal de este trabajo de tesis es el desarrollo de un algoritmo bio-inspirado para el control de admisión de usuarios secundarios sobre una red primaria. De las restricciones que se toman en cuenta para la asignación de recursos espectrales son la relación señal a interferencia (SINR) en la red primaria y secundaria como medida de la calidad de servicio (QoS) con el objetivo de maximizar la tasa de datos total del sistema.

En el siguiente capítulo se abordan la filosofía y fundamentos de operación del algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO) que es considerado como base para el diseño del algoritmo de asignación de canal propuesto en este trabajo de tesis.

Capítulo 3

Algoritmos de optimización por cúmulo de partículas

La resolución de problemas de optimización impone una serie de requisitos que dificultan y en muchos casos impiden la utilización de métodos exactos para encontrar las soluciones óptimas dado el tamaño y estructura del problema. En estas situaciones, cuando el problema de optimización no puede resolverse en el tiempo de búsqueda requerido (que en el peor caso puede llegar a ser exponencial) [49], se utilizan las llamadas técnicas metaheurísticas, que son capaces de encontrar “buenas” soluciones (e incluso en muchos casos la solución óptima) con un tiempo y consumo de recursos aceptables. Entre estas técnicas se encuentran la Optimización por Cúmulo de Partículas (PSO por sus siglas en inglés, *Particle Swarm Optimization*), perteneciente a la familia de los algoritmos bioinspirados (donde también están incluidos los Algoritmos Genéticos [50] y la Optimización por Colonia de Hormigas [51]), que está resolviendo efectiva y eficientemente un gran conjunto de problemas de optimización de alta complejidad. En este capítulo se describen los fundamentos de operación del algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO). Se presenta la filosofía que origina esta técnica y las características principales que hacen la diferencia entre las versiones del algoritmo PSO para espacios continuos y para espacios discretos. Se concluye este capítulo con una descripción de las diferentes variantes del algoritmo PSO para espacios discretos, tales como SCPSO y Derivación 0.

3.1 Introducción a las técnicas metaheurísticas de optimización

La optimización es el procedimiento de detectar atributos, configuraciones o parámetros de un sistema para producir respuestas deseables [52]. Constantemente se están resolviendo problemas de optimización, tales como; el camino más corto para ir de un lugar a otro, la organización de una agenda, distribuir uniformemente un recurso entre varios individuos, entre otros. Un problema de optimización básicamente está compuesto por una situación inicial, un estado u objetivo que se desea alcanzar y restricciones o limitaciones. En general, se formula como la minimización o maximización de una función objetivo que

relaciona las variables relevantes del dominio del problema y durante el proceso de optimización se busca el conjunto de valores que maximicen o minimicen dicha función. Las variables representan el dominio del problema, y la función objetivo caracteriza el objetivo propio. Al igual que en cualquier problema, las variables se someten a restricciones que garantizan soluciones aceptables dentro del contexto del problema.

Una clasificación de los métodos de optimización de acuerdo a la complejidad del problema consiste en métodos *exactos* y *aproximados* [49]. Los métodos exactos garantizan encontrar la solución óptima. En contraste, los métodos aproximados sacrifican la garantía de encontrar la solución óptima a cambio de encontrar una solución “buena” en un tiempo razonable.

Dentro de los métodos aproximados se pueden encontrar dos subclases [49]: los *algoritmos de aproximación* y las *heurísticas*. Los algoritmos de aproximación definen que tan cerca están las soluciones obtenidas de la solución óptima, a diferencia de las heurísticas que encuentran soluciones “buenas” en un tiempo razonable. Las heurísticas pueden ser de dos tipos, *heurísticas específicas* que están adaptadas y diseñadas para resolver un problema específico y/o instancia, y *metaheurísticas* que son algoritmos de propósito general que pueden ser aplicados para resolver casi cualquier problema de optimización.

Algunas propiedades fundamentales que caracterizan a las metaheurísticas se describen a continuación [49]:

- Plantillas generales que guían el proceso de búsqueda.
- Han sido desarrolladas con el objetivo de llevar a cabo la búsqueda global con 3 propósitos generales: resolver problemas rápidamente, resolver problemas grandes, y obtener algoritmos robustos.
- Las metaheurísticas son métodos no exactos y generalmente son no deterministas.
- Pueden incorporar mecanismos para evitar las áreas del espacio de búsqueda no óptimas.
- Las metaheurísticas utilizan funciones de aptitud (fitness) para cuantificar el grado de adecuación de una determinada solución.

En una metaheurística debe de existir equilibrio (generalmente dinámico) entre diversificación e intensificación. El termino diversificación se refiere a la exploración del espacio de búsqueda, mientras que intensificación se refiere a la explotación de alguna región concreta de ese espacio. El equilibrio entre estos dos aspectos contrapuestos es de gran importancia, ya que por un lado deben identificarse rápidamente la regiones prometedoras del espacio de búsqueda y por el otro lado no se debe consumir tiempo en las regiones que ya han sido exploradas o que no contienen soluciones de alta calidad.

3.2 Optimización por cúmulo de partículas (PSO)

La optimización por cúmulo de partículas tiene sus orígenes en los trabajos de James Kennedy y Russell C. Eberhart, en los cuales modelan la conducta social del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces [53]. PSO es una técnica metaheurística basada en poblaciones (es decir trabaja con un conjunto de soluciones en cada iteración) y 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 están formuladas para que dichos agentes funcionen sin la necesidad de una estructura de control centralizada, de manera que interacciones locales de cada agente y el ambiente permitan la emergencia de comportamientos globales inteligentes.

La técnica PSO se basa en el enfoque psico-social de entidades colectivas, donde los agentes emulan una característica simple: adaptar su comportamiento al de los agentes dentro de su propio vecindario o de la población completa [54].

Para explicar la terminología clave de PSO consideremos la siguiente analogía [55]: un enjambre de abejas (*cúmulo*) en un campo tiene el objetivo de encontrar el lugar con la más alta densidad de flores (*función de aptitud*). Sin ningún conocimiento previo del campo, las abejas inician buscando aleatoriamente por flores con velocidades también aleatorias. Cada abeja (*partícula*) puede recordar las posiciones donde encontró más flores (*el mejor personal o pbest*), y de alguna manera sabe las posiciones donde las otras abejas encontraron una abundancia de flores (*el mejor global o gbest*). Debatida entre retornar a la posición donde personalmente encontró más flores, o explorar la posición reportada donde otras encontraron más flores, la abeja acelera en ambas direcciones alterando su trayectoria

de vuelo en algún lugar entre los dos puntos en función de si su experiencia o la influencia social dominan su decisión. En el camino, una abeja puede encontrar un lugar con más alta concentración de flores que la que encontró previamente. La abeja es atraída a esta nueva posición así como a la posición de la mayor concentración de flores encontradas por el enjambre. Ocasionalmente, una abeja podría volar sobre un lugar con más flores que el encontrado por cualquier abeja en el enjambre, entonces el enjambre es atraído hacia aquella posición considerando también sus descubrimientos personales. De esta forma las abejas exploran el campo: sobrevolando posiciones de gran concentración, y siendo atraídas hacia ellas. Constantemente, están verificando el territorio en el que vuelan contra las posiciones previas encontradas de más alta concentración, esperando encontrar la de más alta concentración de flores. Finalmente, el vuelo de las abejas les lleva a un lugar en el campo con la concentración más alta de flores.

En PSO, todas las partículas del cúmulo actúan individualmente bajo el mismo principio: acelerar hacia la mejor posición encontrada personalmente (*pbest*) y la mejor posición encontrada por el cúmulo (*gbest*). En la analogía la *posición* se refiere a un lugar de la abeja en el campo representado por coordenadas en el plano x - y , esta idea se puede extender a cualquier espacio N -dimensional de acuerdo al problema. Este espacio N -dimensional es el espacio de solución para el problema a ser optimizado, donde cualquier grupo de coordenadas (posición) representa una solución potencial al problema (solución candidata). Como en todas las técnicas de computación evolutiva tiene que haber alguna función o método para evaluar la calidad de una solución. La *función de aptitud* toma la posición en el espacio de solución y retorna un solo número que representa el valor de esa posición, en la analogía anterior la función de aptitud es la densidad de flores que entre más alta mejor la posición. Cada partícula tiene su propio *pbest* determinado por la trayectoria que ha volado. En cada punto a través de su camino la partícula compara el valor de aptitud de su posición actual (solución candidata) contra *pbest*. Si la posición actual tiene un valor de aptitud más alto (un problema de maximización), *pbest* es remplazado con su posición actual. Para el cúmulo solo hay un *gbest* al cual cada partícula es atraída. En cada punto en su camino cada partícula compara la aptitud de su posición actual contra *gbest*. Si cualquier partícula tiene una posición con una aptitud más alta, *gbest* es remplazado por la posición actual de esa partícula.

3.3 Descripción del algoritmo PSO

La técnica PSO consiste en un proceso iterativo y estocástico que opera sobre un cúmulo de partículas. La posición de cada partícula representa una solución potencial al problema que se está resolviendo, es decir, una solución candidata. Generalmente, una partícula i está compuesta de tres vectores y dos valores de aptitud:

- El vector X_i , almacena la posición actual de la partícula en el espacio de búsqueda. Su tamaño depende del número de variables necesarias para resolver el problema. Cada posición del vector se le conoce como dimensión.
- El vector P_i , almacena la posición de la mejor solución encontrada hasta el momento por la partícula.
- El vector V_i , es la velocidad de la partícula. Refleja el cambio de dirección que sufre la partícula dentro del espacio de búsqueda.
- El valor de aptitud $pbest$, almacena el mejor valor de aptitud encontrado por la partícula hasta el momento.
- El valor de aptitud $gbest$, almacena el mejor valor de aptitud encontrado por alguna partícula del cúmulo.

El cúmulo se inicializa generando aleatoriamente las posiciones (vector X_i) y velocidades (vector V_i) de las partículas. Las posiciones se generan aleatoriamente en el rango $[X_{min}, X_{max}]$, donde X_{min} y X_{max} son los parámetros que limitan el área de búsqueda y dependen exclusivamente del problema a resolver. Las velocidades se generan aleatoriamente, en el intervalo $[-V_{max}, +V_{max}]$, donde V_{max} será la velocidad máxima que pueda tomar una partícula en cada movimiento.

Una vez que se ha inicializado el cúmulo, las partículas se deben mover dentro del proceso iterativo como se muestra en el algoritmo 3.1 [56].

Algoritmo 3.1 Pseudocódigo del algoritmo PSO básico

```
1: Repite
2:   Para  $i = 1$  a número de partículas
3:     Si  $f(X_i) > f(P_i)$  entonces hacer Fase de actualización de pbest
4:       Para  $d = 1$  a número de dimensiones
5:          $p_{id} = X_{id}$ 
6:       Siguiendo  $d$ 
7:     Fin Si
8:      $g = i$  Fase de actualización de gbest
9:     Para  $j = 1$  a número de partículas
10:      Si  $f(P_j) > f(P_g)$  entonces  $g = j$ 
11:    Siguiendo  $j$ 
12:    Para  $d = 1$  a número de dimensiones Fase de actualización de  $v_{id}$  y  $x_{id}$ 
13:       $v_{id} = v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id})$ 
14:       $v_{id} \in (-V_{max}, +V_{max})$ 
15:       $x_{id} = x_{id} + v_{id}$ 
16:    Siguiendo  $d$ 
17:  Siguiendo  $i$ 
18: Hasta que se alcance la condición de paro
19: Retornar  $(P_g, f(P_g))$ 
```

Se comienza por la *Fase de actualización de pbest*. Para ello, se compara el valor de aptitud de la solución candidata de la partícula, $f(X_i)$, contra la aptitud de la mejor solución encontrada hasta el momento por la partícula, $f(P_i)$. Si se cumple $f(X_i) > f(P_i)$, entonces la posición actual X_i se considera como *el mejor personal o pbest*. Después en la *Fase de actualización de gbest* se busca la mejor partícula en el cúmulo (*gbest*), es decir, aquella que tiene el mejor resultado para el problema hasta el momento.

La velocidad v_{id} y posición x_{id} de cada partícula i en cada dimensión d , se modifica en cada iteración. El modelo matemático resultante y que representa el corazón del algoritmo PSO está representada en el algoritmo 3.1 por las siguientes expresiones;

$$v_{id} = v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id}) \quad 3.1$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad 3.2$$

donde c_1 y c_2 son los factores cognitivo y social respectivamente. Los factores r_1 y r_2 son valores aleatorios uniformemente distribuidos en el rango $[0,1]$, p_{id} es el valor en la dimensión d de la partícula i con el mejor personal, y p_{gd} representa el valor en la

dimensión d de la partícula g del cúmulo que contiene el mejor global. El segundo término en ecuación (3.1) es la decisión que tomará la partícula influenciada por su propia experiencia a lo largo de su vida, mientras que, el tercer término en ecuación (3.1) es la decisión que tomará la partícula según la influencia que el resto del cúmulo ejerce sobre ella. Si se cumple $c_2 > c_1$ entonces se incrementa la influencia de g_{best} lo que favorece la exploración del espacio de soluciones [57], esto es, la habilidad del algoritmo para evaluar diferentes regiones del espacio de búsqueda con el fin de encontrar las mejores soluciones. Si se cumple $c_2 < c_1$ entonces se incrementa la influencia de p_{best} lo que favorece la explotación del espacio o búsqueda local [57], esto es, la habilidad que ofrece el algoritmo para concentrarse en la región del espacio de búsqueda que presenta los mejores resultados de tal forma que se pueda identificar la mejor solución.

Uno de los objetivos fundamentales de esta metaheurística es lograr que exista un balance entre la explotación y exploración del espacio de búsqueda, esta tarea recae en la velocidad de las partículas. Para lo anterior, es necesario limitar la velocidad de las partículas para evitar que escapen del espacio de búsqueda del problema, y en consecuencia se presente una divergencia de las partículas o mejor conocido como *efecto de explosión del cúmulo* [52]. El método más simple [52] para limitar la velocidad de las partículas es que después de determinar la nueva velocidad de cada partícula con ecuación (3.1), las siguientes restricciones sean aplicadas antes de la actualización de la posición:

$$v_{id} = \begin{cases} V_{max}, & Si \ v_{id} > V_{max} \\ -V_{max}, & Si \ v_{id} < -V_{max} \end{cases} \quad 3.3$$

Una partícula se mueve desde una posición del espacio de búsqueda hasta otra, simplemente, añadiendo al vector posición X_i el vector velocidad V_i para obtener un nuevo vector posición, como se establece en ecuación (3.2).

El algoritmo 3.1 concluye su proceso de búsqueda una vez que el cúmulo de partículas ha pasado por todas las fases del proceso, y se cumpla la condición de paro, que se establece por una cantidad de iteraciones suficientes para que el algoritmo converja a la

mejor solución o cuando la solución encontrada sea igual o próxima a una solución deseable.

3.3.1 Topologías del cúmulo de partículas

Un aspecto importante que se considera en estos algoritmos por cúmulo de partículas es la manera en la que una partícula interactúa con las demás partículas de su vecindario (red social). Principalmente se identifican dos tipos de vecindarios: *gbest* y *lbest* [56][54].

En el vecindario *gbest* todas las partículas del cúmulo son influenciadas por la mejor solución encontrada por alguna partícula del cúmulo. Conceptualmente, en *gbest* todas las partículas están conectadas entre sí (ver Figura 3.1), por lo que tiende a converger en el óptimo rápidamente pero es susceptible a caer en un óptimo local. Esto es porque el cúmulo se empieza a mover hacia la primera solución buena que es encontrada. A medida que más miembros del cúmulo encuentran soluciones cercanas a ese primer éxito, la atracción llega a ser más fuerte, hasta que todo el cúmulo ha gravitado en esa zona, y no hay influencia de otras regiones [58].

En contraste, en el vecindario *lbest* cada partícula es afectada por el mejor desempeño de sus k partículas vecinas inmediatas como se muestra en Figura 3.1. *lbest* ofrece la ventaja de que algunos sub-cúmulos puedan hacer la búsqueda de la mejor solución en varias regiones del espacio del problema, por lo que se recomienda para la solución de problemas complejos [54]. La configuración *lbest* tiende a converger más lentamente que *gbest* pero encuentra la solución de forma más confiable [58].

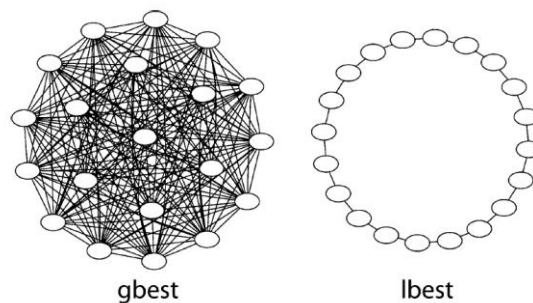


Figura 3.1. Vecindarios de PSO [54]

Las descripciones de los algoritmos PSO para las codificaciones continua y binaria presentados en este capítulo se basan en el vecindario *gbest*.

3.4 PSO para codificación binaria

En la actualidad, se están estudiando problemas de optimización que requieren de una representación binaria de sus soluciones. Por este motivo, es necesario proveer una versión del algoritmo PSO que trabaje con este tipo de codificación.

La versión binaria de optimización por cúmulo de partículas (BPSO por sus siglas en inglés, *Binary Particle Swarm Optimization*) [59] representa la evolución del algoritmo PSO de espacios continuos a espacios discretos.

La idea general del algoritmo BPSO es la siguiente [56]: consideremos que se tiene un *ser simple*, con un conjunto de decisiones por hacer, si/no o cierto/falso. Así mismo, este *ser simple* se encuentra rodeado por otros seres simples 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 el desempeño de los otros seres. Estos dos componentes de información, el 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, donde la velocidad sigue definida para el espacio continuo, sin embargo, BPSO no considera la velocidad como tal, sino que la utiliza para definir la probabilidad de que un cambio de bit ocurrirá. 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 [60]. El algoritmo 3.2 muestra la implementación de BPSO [56].

Algoritmo 3.2 Pseudocódigo del algoritmo PSO para codificación binaria (BPSO)

1: Repite
2: Para $i = 1$ a número de partículas
3: Si $f(X_i) > f(P_i)$ entonces hacer *Fase de actualización de pbest*
4: Para $d = 1$ a número de dimensiones
5: $p_{id} = x_{id}$
6: Siguiendo d
7: Fin Si
8: $g = i$ *Fase de actualización de gbest*
9: Para $j = 1$ a número de partículas
10: Si $f(P_j) > f(P_g)$ entonces $g = j$
11: Siguiendo j
12: Para $d = 1$ a número de dimensiones *Fase de actualización de v_{id} y x_{id}*
13: $v_{id} = v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id})$
14: $v_{id} \in (-V_{max}, +V_{max})$
15: Si $\rho_{id} < s(v_{id})$ entonces $x_{id} = 1$; de otra manera $x_{id} = 0$;
16: Siguiendo d
17: Siguiendo i
18: Hasta que se alcance la condición de paro
19: Retornar $(P_g, f(P_g))$

donde:

- 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 al igual que en el PSO son el factor 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 sigmoide:

$$s(v_{id}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}}} \quad 3.4$$

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 [56][59].

El algoritmo BPSO queda descrito por las ecuaciones (3.5) y (3.6) de actualización de velocidad y solución candidata respectivamente y se encuentran implementadas en las líneas 13 y 15 del algoritmo 3.2:

$$v_{id} = v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id}) \quad 3.5$$

$$\text{Si } \rho_{id} < s(v_{id}) \text{ entonces } x_{id} = 1; \text{ de otra manera, } x_{id} = 0 \quad 3.6$$

Sin embargo, BPSO es susceptible a caer en óptimos locales al tratar con problemas de alta dimensionalidad, ya que tienen espacios de búsqueda más complejos donde las partículas pueden quedar atrapadas más fácilmente en óptimos locales [60]. BPSO es también susceptible a la pérdida de la diversidad que se presenta cuando la función sigmoide se satura [61], es decir, cuando se aproxima demasiado a los valores extremos (0 y 1), por ejemplo, con valores de $v_{id} > 10$ y $v_{id} < -10$. Por ello, en [56] y [61], se recomienda para V_i utilizar valores en el rango de $[-4, 4]$, con esto la función sigmoide no se aproxima demasiado a los valores extremos (0 y 1), y de esta forma se produzca un cambio en x_{id} .

Actualmente existen otras versiones de BPSO que tratan con los problemas antes descritos, por ejemplo, el SCPSO (por sus siglas en inglés, *Socio-Cognitive Particle Swarm Optimization*) [62] y Derivation 0 [63].

3.5 Otras versiones de BPSO

Desde la aparición de BPSO en 1997, han surgido nuevas versiones que tratan de mejorar su desempeño, por ejemplo, la propuesta en [62] llamada SCPSO. En esta versión se mantiene la diversidad en el cúmulo introduciendo la distancia entre $gbest$ y $pbest$ como una nueva ecuación de actualización de velocidad. Por lo tanto, ahora el cúmulo de partículas se manipula por las siguientes expresiones:

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id}) \quad 3.7$$

$$v_{id} = w^l * v_{id} + c_3 * (gbest - pbest) \quad 3.8$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad 3.9$$

$$x_{id} = x_{id} \text{ mod } (2) \quad 3.10$$

El factor c_3 presente en ecuación (3.8) es el coeficiente socio-cognitivo por contener a $gbest$ y $pbest$. La nueva ecuación de actualización de velocidad (3.8) provee una perturbación en la ecuación original de actualización de velocidad (3.7) que es la responsable de mantener la diversidad en el cúmulo. Los pesos de inercia w y w^l permiten que la partícula controle la influencia de v_{id} anterior sobre v_{id} actual.

El peso de inercia w puede ser calibrado para una mejor convergencia. Valores altos del peso de inercia provocan una búsqueda exhaustiva (más exploración) y valores bajos una búsqueda más localizada (más explotación). Generalmente se pueden seguir 3 estrategias para definir el peso de inercia [64]:

1. Mantener el peso de inercia constante durante la búsqueda.
2. Definir el peso de inercia como una función del tiempo o del número de iteraciones.
3. Uso de parámetros de retroalimentación para monitorear el estado del algoritmo y ajustar el valor del peso de inercia.

Otros aspectos que se deben considerar son el tamaño del cúmulo de partículas y el número de iteraciones [57]. Un gran número de iteraciones trae una mejor exploración del espacio de soluciones, en caso contrario, se favorece la explotación que resulta en una convergencia rápida pero posiblemente en una solución no óptima. La convergencia del

algoritmo es influenciada por el número de partículas en el cúmulo. Cúmulos grandes necesitan más iteraciones para converger. Recientemente, se han propuesto algunas versiones de PSO que adaptan en tiempo de ejecución del algoritmo el tamaño del cúmulo como en [65] y [66].

Otra versión mejorada del BPSO es la Derivation 0 [63], que aplica la actualización de velocidad y solución candidata mediante operadores de aritmética modular, con lo que se mantiene la diversidad en el cúmulo. En este caso, para obtener otro valor de x_{id} se añade $0, 1 \text{ mod}_2$, ó -1 mod_2 . La idea es usar velocidades v_{id} que tengan justo estos tres posibles valores $\{-1, 0, 1\}$, y combinar esas tres tendencias para que el resultado sea siempre 0 ó 1 utilizando la función módulo.

Para este caso las expresiones que se sustituyen en las líneas 13-15 del algoritmo 3.2 son:

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id}) \quad 3.11$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad 3.12$$

$$x_{id} = (4 + x_{id}) \text{ mod}_2 \quad 3.13$$

$$v_{id} = (3 + v_{id}) \text{ mod}_3 - 1 \quad 3.14$$

Para la actualización del vector velocidad se considera además de la ecuación (3.11) la ecuación (3.14), que se encarga de realizar la transformación modular de los valores de velocidad. Mediante la operación mod_3 se transforman los nuevos valores de velocidad v_{id} a valores del conjunto $\{-1, 0, 1\}$. De manera similar a la actualización de la velocidad, tras realizar la actualización de x_{id} en ecuación en (3.12), se lleva a cabo una transformación modular representada por la ecuación (3.13) donde x_{id} toma los valores 0 o 1.

3.6 Resumen

Muchos problemas del mundo real están clasificados según la teoría de la complejidad computacional como “duros”, esto es, no se puede garantizar encontrar la mejor solución en un tiempo razonablemente corto. Para esta clase de problemas, el empleo de heurísticas suelen ser los métodos más adecuados para su resolución, ya que son simples

de implementar, pueden adaptarse a muchos problemas, y se han probado exitosamente en una gran variedad de áreas. Las heurísticas son métodos aproximados de resolución que utilizan un proceso iterativo para guiar la búsqueda de soluciones. Dentro de las heurísticas, se encuentra las metaheurísticas que son algoritmos de propósito general que pueden ser aplicados para resolver casi cualquier problema de optimización. Muchas metaheurísticas están inspiradas en procesos naturales [49]: *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 *Recocido Simulado* de la física.

La optimización por cúmulo de partículas (PSO) está inspirado en la conducta de interacción social de bandadas de aves y bancos de peces. Para buscar la solución óptima, cada individuo, que es típicamente llamado "partícula" actualiza su velocidad de vuelo y posición actual iterativamente de acuerdo a su propia experiencia de vuelo y la experiencia de vuelo de otras partículas. La versión original de PSO encuentra soluciones en el espacio continuo. Sin embargo, muchos problemas de optimización están definidos en el espacio discreto, por ejemplo, problemas de decisión. El primer intento para extender PSO para problemas discretos es PSO binario (BPSO) que 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. Pronto se encontró que el uso de la función sigmoide y conservación de la ecuación de actualización de velocidad de la versión continua, producía la pérdida de diversidad de soluciones en el cúmulo para algunos problemas. Adicionalmente se encontró que las partículas eran susceptibles de quedar atrapadas en óptimos locales. Para solucionar estos problemas aparecieron nuevas versiones mejoradas de BPSO como SCPSO y Derivation 0.

El problema de optimización que se aborda en este trabajo de tesis doctoral es un problema combinatorio y de decisión, dado que de un conjunto de usuarios secundarios desplegados en un área se deben de seleccionar aquellos que no causen interferencia dañina a los usuarios primarios presentes, maximizando la tasa de datos en el sistema. En el siguiente capítulo se presenta el modelo de control de acceso y asignación de canal

aplicando la versión mejorada del algoritmo de optimización binaria por cúmulo de partículas SCPSO.

Capítulo 4

Algoritmo de control de acceso y asignación de canal

La compartición de espectro es uno de los mayores desafíos para la aplicación del acceso dinámico de espectro pues regula la forma como se comparte el espectro disponible entre los usuarios secundarios y el usuario primario, garantizando protección a este último. En este capítulo, se describe el modelo de control de acceso y asignación de canal en un contexto de espectro compartido aplicando una versión mejorada del algoritmo de optimización binaria por cúmulo de partículas SCPSO. Se describen el problema de asignación de canal y las condiciones para lograr el uso concurrente de un canal primario entre usuarios secundarios y primarios. El problema de optimización que se aborda es lograr la máxima tasa de datos en el sistema.

4.1 Introducción

Una red inalámbrica heterogénea consiste, en este caso, de una red primaria y una red secundaria, su planificación tiene como finalidad determinar la cobertura y capacidad de cada una de ellas. Los valores de cobertura y capacidad deben garantizar Calidad de Servicio (QoS) para todos los enlaces desplegados en dicho sistema. El análisis y estimación de la capacidad de un sistema de espectro compartido no es un tema nuevo, sin embargo, en la literatura se presentan distintas formas de evaluar la cantidad máxima de usuarios que puede soportar simultáneamente un sistema heterogéneo. Aprovechar las diversas estrategias de espectro compartido para redes inalámbricas permitirá incrementar la eficiencia espectral, debido al reuso de bandas de frecuencia. Sin embargo, el precio que se debe pagar por este reuso audaz de frecuencia es del aumento de interferencia. La QoS y capacidad que puede ofrecer un sistema inalámbrico heterogéneo dependerá principalmente de la cantidad de interferencia que exista en el entorno de propagación y ésta debe ser menor a la que podrían tolerar ambas redes. La interferencia es consecuencia del traslape de las distintas transmisiones que suceden en una misma frecuencia. La relación señal-interferencia (*SINR* por sus siglas en inglés, *Signal to Interference-Noise Ratio*) es una métrica que permite evaluar los niveles de interferencia al compararlos con los niveles de

la señal. Es decir, si la relación entre la potencia de la señal recibida del enlace de análisis y la potencia acumulada por la interferencia de las otras transmisiones simultaneas es mayor que un umbral de calidad de recepción establecido $SINR_{umbral}$, entonces se considera que el mensaje se recibe correctamente [67]. Por lo tanto, cada servicio que se ofrece en el sistema de comunicaciones inalámbricas debe definir su nivel de tolerancia a la interferencia de tal forma que se logre una comunicación exitosa. Por ejemplo, para servicios solo de voz es necesario que se logre obtener en el sistema valores de $SINR$ de entre 3 y 10 dB (esto es, valores de $SINR_{umbral} \geq 3$ dB) para garantizar una comunicación de voz con el mínimo de errores [68]. Incrementar el valor de $SINR_{umbral}$ representa una mejor QoS en cada enlace de comunicación del sistema, sin embargo, el número de enlaces secundarios que pueden seleccionarse para hacer uso de un canal disminuye, y con esto también la capacidad de la red. En consecuencia, resultará en un uso ineficiente del espectro. Por otro lado, si se disminuye el valor $SINR_{umbral}$, se incrementa la cantidad de usuarios que podrán hacer uso de los canales de forma simultánea pero se sacrifica calidad de servicio en la comunicación. Lo anterior se debe principalmente al incremento en el número de retransmisiones de la información, y, en apariencia, se logrará una mayor utilización del espectro, aunque para ello es necesario realizar un análisis del compromiso entre la cantidad de información útil que se está transmitiendo y la cantidad de espectro utilizado. Sin embargo, este análisis queda fuera de los objetivos de este trabajo. En nuestro contexto de redes heterogéneas, incrementar o disminuir el umbral de decisión $SINR_{umbral}$ permite controlar la cantidad de enlaces secundarios que pueden coexistir con los enlaces primarios de la red.

4.2 Modelo del sistema

En una red inalámbrica heterogénea, cuando un transmisor secundario solicita 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 primario, de tal forma que si se asigna un canal de comunicación a este nuevo enlace, el sistema debe determinar la nueva situación de interferencia que se generará. La interferencia de la red varía a lo largo del tiempo y no es posible conocer cuál será la situación de la misma 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 primario al enlace secundario, cuando esto generará demasiada interferencia, habría enlaces que sufrirían una degradación en su QoS, con el consecuente perjuicio para el operador al disminuir el grado de satisfacción de sus usuarios primarios.

Minimizar la interferencia es uno de los objetivos principales que se debe atender cuando se comparten bandas de frecuencia. En este caso los usuarios primarios tienen prioridad sobre una banda de frecuencia específica, y a los usuarios secundarios se les permite transmitir en esa banda siempre y cuando no causen interferencia dañina a los usuarios primarios.

Para resolver el problema de asignación de canal en el contexto de espectro compartido, es decir que un enlace secundario pueda utilizar un canal primario al mismo tiempo que un enlace primario, en esta sección se describe la estrategia propuesta para el control de acceso de enlaces secundarios en el sistema heterogéneo.

Con base a la Figura 4.1, se considera un área de cobertura A en el que se despliegan aleatoriamente un conjunto de enlaces secundarios Sl y enlaces primarios Pl . Un enlace, ya sea secundario o primario se representa por la unión de un transmisor y un receptor. El conjunto de enlaces primarios forman la red primaria, la cual tiene asignado una porción de espectro regulado. Mientras que la red secundaria la forman los enlaces secundarios, quienes tendrán que solicitar permiso al sistema primario para utilizar alguno de sus canales. El sistema heterogéneo cuenta con una entidad central que conoce la cantidad de canales primarios que se pueden asignar a los enlaces secundarios. La asignación de canales primarios a 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, esto es porque a cada enlace primario le corresponde un canal primario único el cual es potencial a compartirse con un enlace secundario. Un enlace primario siempre tiene asignado un canal primario, y un mismo canal primario puede asignarse a varios enlaces secundarios, siempre y cuando éstos, en conjunto, no generen la suficiente interferencia para interrumpir la comunicación del enlace primario que está utilizando dicho canal primario. La interrupción

es una medida global de congestión, ya que únicamente indica la imposibilidad del sistema de atender a todos los usuarios con una calidad adecuada, sin proporcionar ninguna indicación de cual zona o zonas del sistema son las responsable de tal congestión, o cuales zonas se encuentran con mayor carga de tráfico. En la Figura 4.1 se puede observar que varios enlaces secundarios tienen asignado un mismo canal primario (referenciado con el número entre corchetes).

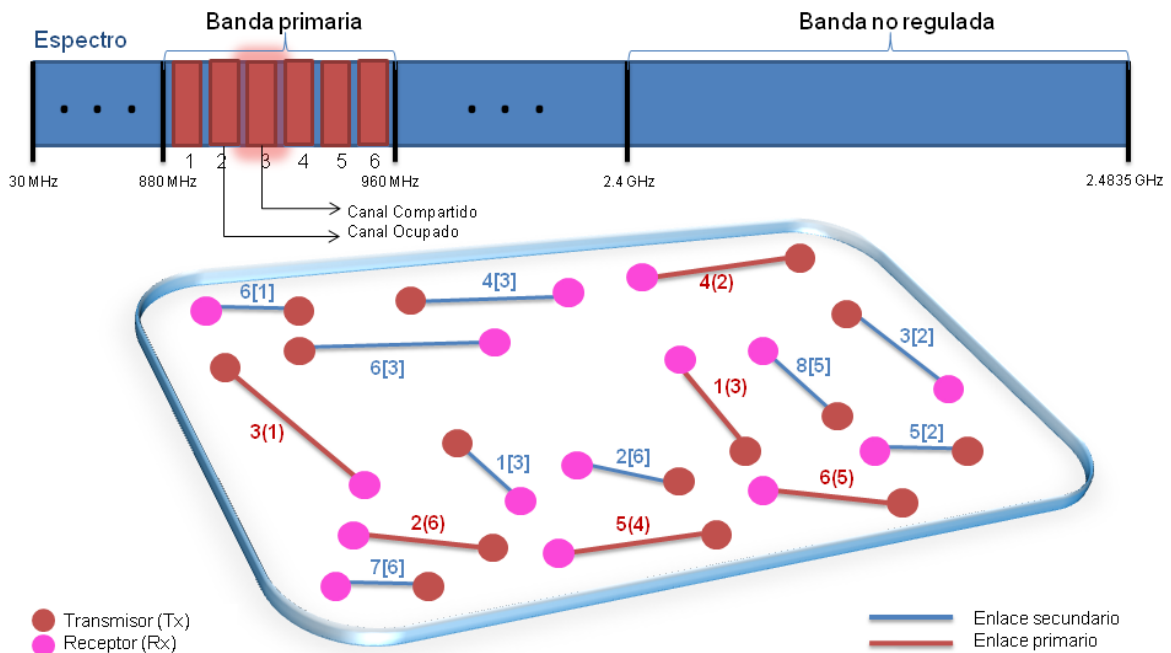


Figura 4.1. Modelo del sistema

La capacidad de la red secundaria se define por la máxima tasa de datos que la red puede transportar y ésta depende de la cantidad de enlaces secundarios que pueden coexistir con los enlaces primarios. 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, las expresiones (4.1) y (4.2), permiten determinar el valor de $SINR$ que observa el receptor del enlace secundario y del enlace primario respectivamente [18]:

$$SINR_u = \frac{P_u / lds(u)^n}{\sum_{k \in \Phi} P_k / dss(k,u)^n + P_v / dps(v,u)^n}, \quad 1 \leq u \leq Sl \quad 4.1$$

En la ecuación (4.1), se observa que en el denominador existen dos factores que representan el nivel de interferencia que observa un enlace secundario; el primero de ellos se refiere a la interferencia producida por aquellos enlaces secundarios que utilizan el mismo canal primario que el enlace secundario que se está analizando. Mientras que el segundo factor representa la interferencia producida por aquellos enlaces primarios que comparten su canal primario con los enlaces secundarios antes mencionados. Además, en la ecuación (4.1) 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 solo aquellos transmisores secundarios que tienen asignado un mismo canal primario
- Φ es el conjunto de transmisores secundarios que están utilizando un mismo canal primario
- n representa el factor de atenuación que sufre la señal en el enlace de comunicación que puede tomar cualquier valor entre 2 y 4.

De forma similar, el valor de $SINR_v$ que observa el receptor primario en el enlace primario v considerado en el análisis se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$SINR_v = \frac{P_v / ldp(v)^n}{\sum_{k \in \Phi} P_k / dps(k,v)^n}, \quad 1 \leq v \leq Pl \quad 4.2$$

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

Se puede observar que en la ecuación (4.2) solo se considera la interferencia que generan los enlaces secundarios que utilizan el mismo canal que el enlace primario, ya que se asume que no existe reuso de bandas espectrales en la red primaria.

En la Figura 4.2, se muestra un ejemplo del cálculo de $SINR_u$ y $SINR_v$ para cada conjunto de enlaces secundarios y primarios respectivamente que comparten un canal primario concurrentemente. En este caso, para determinar el valor de $SINR$ del enlace secundario 6 (mostrado con línea discontinua azul), se considera la interferencia que proviene de aquellos enlaces secundarios y enlace primario (representados por líneas punteadas negras) que utilizan el canal primario 3. Por otro lado, también se obtiene el valor de $SINR$ que observa el enlace primario 1, el cual utiliza el mismo canal primario 3 que utiliza el enlace secundario 6, para esto se considera la interferencia que producen solo aquellos enlaces secundarios que tienen asignado el mismo canal primario (representados por las líneas verdes punteadas).

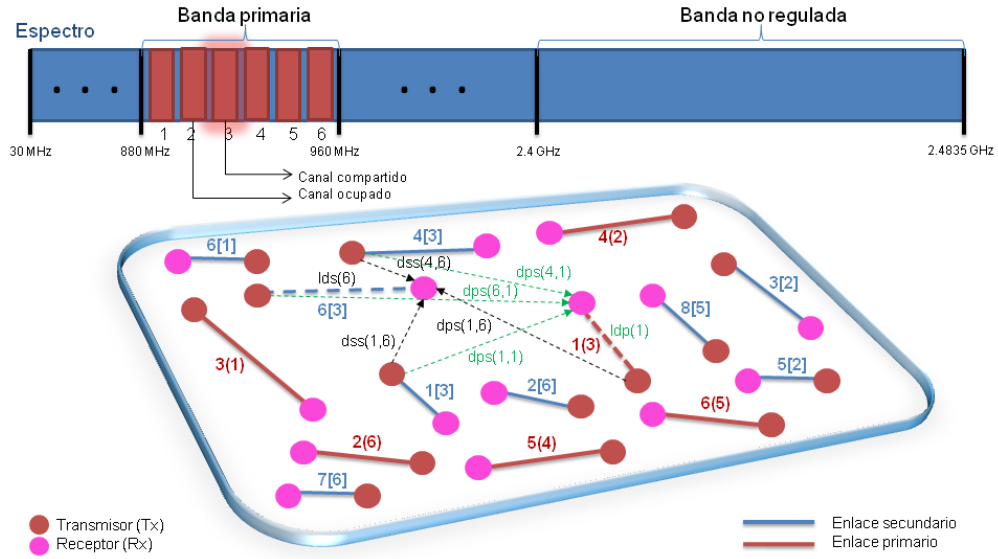


Figura 4.2. Cálculo de $SINR_u$ y $SINR_v$

Maximizar la eficiencia espectral se refiere a maximizar la cantidad de información que el sistema puede transmitir en un ancho de banda específico. Por lo tanto la eficiencia espectral del sistema heterogéneo se obtiene a partir de las máximas tasas de datos que ofrecen cada uno de los enlaces secundarios y primarios que tienen asignado un canal de comunicación, como se puede observar en las expresiones (4.3) y (4.4) respectivamente. La tasa de datos máxima que cada enlace puede ofrecer depende del ancho de banda B del canal primario que ambos tipos de enlaces utilizan y de las condiciones del entorno de propagación de cada enlace (atenuación e interferencia).

$$c'_u = B \log_2(1 + SINR_u) \quad 4.3$$

$$c''_v = B \log_2(1 + SINR_v) \quad 4.4$$

Con base a lo anterior se define la función objetivo para la estrategia de compartición de canal que permitirá maximizar la eficiencia espectral y capacidad del sistema:

$$Max \sum_{u=1}^{SI} c'_u x_u + \sum_{v=1}^H c''_v \quad 4.5$$

s.a

$$SINR_u \geq \alpha \quad 4.6$$

$$SINR_v \geq \beta \quad 4.7$$

$$c'_u > 0, u=1, 2, \dots, Sl \quad 4.8$$

$$c''_v > 0, v=1, 2, \dots, Pl \quad 4.9$$

$$c'_u, c''_v \in R^+ \quad 4.10$$

$$x_u = \begin{cases} 1, & \text{si } SINR_u \geq \alpha \text{ y } SINR_v \geq \beta, \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad 4.11$$

La función objetivo en (4.5) representa la suma de las tasas de datos de los enlaces secundarios c'_u seleccionados (cuando $x_u=1$, en caso contrario, $x_u=0$) y las tasas de datos de los enlaces primarios c''_v que *maximizan* la tasa de datos total en el sistema. α y β representan el umbral de interferencia para la red secundaria y primaria respectivamente. La restricción en (4.6) controla la interferencia percibida en los receptores de los enlaces secundarios seleccionados que utilizan el mismo canal de un enlace primario v . La restricción en (4.7) garantiza que el grupo de enlaces secundarios seleccionados no causaran interferencia dañina al receptor del enlace primario v degradando la calidad de su señal. Finalmente, las ecuaciones (4.8) - (4.11) son restricciones de integridad.

4.3 Algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en la heurística SCPSO

La estrategia de control de acceso y asignación de canal propuesto en este trabajo permite determinar cuántos y cuáles enlaces secundarios tienen derecho a utilizar un canal primario para coexistir pacíficamente con los enlaces primarios presentes en el sistema. El objetivo es maximizar la tasa de datos de la red heterogénea sin degradar la calidad de servicio de la red primaria y garantizando también una calidad de servicio mínima en la red secundaria, como se mostró en la sección anterior. En ese sentido, se debe encontrar un vector binario P_g de tamaño Sl que representa la solución, donde los *estados 1/0* simbolizan

si el u -ésimo enlace secundario es seleccionado como parte de la solución (*estado 1*) o no (*estado 0*). La máxima tasa de datos alcanzada en el sistema es $f(P_g)$.

En el capítulo 3 se describió la operación del algoritmo PSO y algunas otras variantes como el BPSO o SCPSO. Como se mencionó, BPSO tiene las desventajas de pérdida de diversidad y susceptibilidad de las partículas de quedar atrapadas en óptimos locales, por lo que se proponen otras versiones mejoradas como SCPSO para resolver estos inconvenientes. En la siguiente sección se describe la implementación de la estrategia de control de acceso y asignación de canal para la compartición de espectro utilizando la técnica SCPSO. SCPSO [62] es una técnica que permite encontrar *soluciones buenas* pero no garantiza que la solución encontrada sea la óptima. Sin embargo, en esta nueva versión se mantiene la diversidad en el cúmulo introduciendo la distancia entre g_{best} y p_{best} como una nueva ecuación de actualización de velocidad, un factor socio-cognitivo c_3 , y pesos de inercia w y w' .

A continuación se describe a detalle el pseudo código basado en SCPSO (mostrado en el algoritmo 4.1) para resolver el problema de control de acceso en un contexto de espectro compartido.

Algoritmo 4.1 SCPSO para compartición de espectro

- 1: Fase de inicialización
- 2: Repite
- 3: Para $i = 1$ a número de partículas
- 4: Fase de actualización de p_{best}
- 5: Fase de actualización de g_{best}
- 6: Fase de actualización de v_{id} y x_{id}
- 7: Si $x_{id} = 1$ entonces asignar aleatoriamente de PC un nuevo canal a x'_{id}
- 8: Siguiendo i
- 9: Hasta que se alcance la condición de paro
- 10: Retornar P_g y $f(P_g)$

La unidad fundamental de cualquiera de las versiones de los algoritmos de optimización basados en cúmulo de partículas (PSO), es la *partícula*. Un cúmulo está formado por un conjunto de partículas y cada una de ellas se considera una solución candidata al problema. Cada partícula i del cúmulo tiene tres vectores D -dimensionales asociados (donde $d = 1, 2 \dots D$); el vector posición $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ donde $x_{id} \in \{0, 1\}$, el

vector velocidad $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ donde $v_{id} \in [-V_{max}, V_{max}]$ y el vector de memoria $P_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ donde $p_{id} \in \{0,1\}$. El vector X_i , representa una solución candidata al problema, el vector V_i , es la predisposición de la partícula para decidir por 0 o 1, y finalmente el vector P_i , almacena la mejor solución encontrada por la partícula.

Durante la *Fase de inicialización*, que se muestra en el algoritmo 4.1, se genera aleatoriamente el espacio de búsqueda inicial que permitirá obtener la mejor partícula; esto es, la mejor solución al problema de control de acceso de espectro compartido. En esta fase, se genera también el escenario de evaluación en el que se ubican un conjunto de enlaces secundarios Sl y enlaces primarios Pl en un área. Enseguida el vector X_i se inicializa aleatoriamente con valores binarios (1 o 0) y el valor de velocidad inicial V_i para cada partícula se toma aleatoriamente del intervalo $[-V_{max}, +V_{max}]$. El vector P_i , en esta fase inicial, será igual al vector de soluciones candidatas X_i , esto es, $P_i=X_i$.

Como se puede observar en la Figura 4.3, se proponen tres nuevos vectores *Estado del Espectro*, P'_i , y X'_i . Los vectores P'_i y X'_i están asociados de manera adicional a la partícula i . El vector *Estado del Espectro* contiene información acerca de cuál canal primario está utilizando el 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, esto es, los usuarios primarios no presentan problemas de bloqueo de llamadas ya que existe un canal primario disponible para cada enlace primario en cualquier instante de tiempo. El vector X'_i contiene información acerca del canal primario asignado al enlace secundario, en el que los canales primarios se toman de forma aleatoria del conjunto de canales primarios para compartir PC . En cambio, P'_i es el vector donde se almacenan las mejores asignaciones de canales primarios a los enlaces secundarios encontradas por la partícula i .

Por cada x_{id} en la dimensión d del vector X_i igual a 1 ($x_{id}=1$), existe otro valor x'_{id} en el vector X'_i que contiene el canal primario asignado a un enlace secundario. Cada dimensión d del vector X_i igual a 1 ($x_{id}=1$) representa el u -ésimo enlace secundario seleccionado como parte de la solución candidata, por lo tanto, debe existir en x'_{id} un canal primario asignado a este enlace secundario como se muestra en la Figura 4.3. Ahora bien,

por cada $p_{id}=I$ en P_i hay otro p'_{id} en P'_i que mantiene la mejor solución en la asignación de canales primarios a los enlaces secundarios seleccionados en X_i para los casos en que $x_{id}=I$.

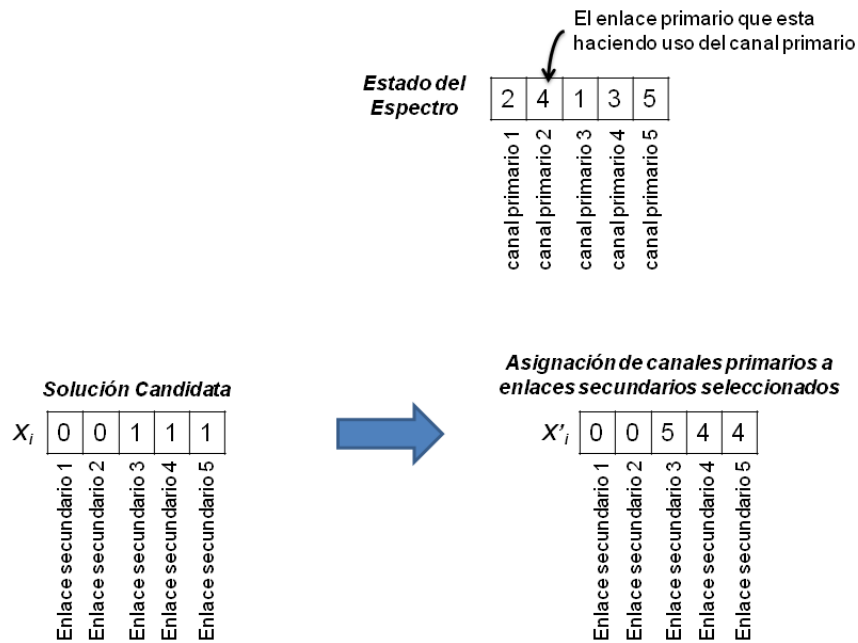


Figura 4.3. Mapeo de los vectores X_i , X'_i y *Estado del Espectro*

La Figura 4.3 permite ejemplificar la explicación anterior. En X_i se muestra que los *enlaces secundarios* 3, 4 y 5 se seleccionaron como parte de una solución candidata por una partícula i , por lo que X'_i contiene sus respectivos canales primarios asignados de forma aleatoria de entre el total de canales primarios para compartir PC considerados en el escenario. El mapeo entre X'_i y el vector *Estado del Espectro* establece la posible compartición de canales primarios entre los enlaces primarios y secundarios. Tomemos como caso particular el *enlace secundario* 5, al cual, como se observa en el vector X'_i , se le asignó el *canal primario* 4, mismo que está utilizando el *enlace primario* 3, como se puede verificar en el vector *Estado del Espectro*. Por lo tanto, con base a las restricciones establecidas en (4.6) y (4.7) el algoritmo control de acceso y asignación de canal tendrá que evaluar si el *enlace secundario* 5 puede explotar el *canal primario* 4 simultáneamente con el *enlace primario* 3.

Una vez que se ha generado e inicializado el cúmulo, se actualizan los valores de $pbest$ y $gbest$. La finalidad de la *Fase de actualización de $pbest$ y $gbest$* es encontrar la mejor partícula del cúmulo.

Durante la *fase de actualización de $pbest$* , se comparan la aptitud de la solución candidata actual $f(X_i)$ contra la aptitud de la mejor solución encontrada hasta el momento por la partícula $f(P_i)$, si la primera es mejor que la segunda, la solución candidata actual X_i se considera como la mejor solución encontrada hasta el momento por la partícula i , por lo que se actualiza P_i con esa solución encontrada. Por otro lado, durante la *fase de actualización de $gbest$* se determina la mejor partícula de todo el cúmulo, es decir, aquella que tiene el mejor resultado (mejor aptitud) para el problema hasta el momento. Existen dos posibles casos para determinar la aptitud de cada partícula y actualizar $pbest$ y $gbest$:

- CASO 1 (Se satisfacen las restricciones del umbral $SINR$): Como se mencionó en la primera sección de este capítulo, la aptitud de la partícula se refiere a la cantidad de datos total que el sistema (escenario) tiene capacidad de transmitir en un instante de tiempo, este valor depende principalmente de la interferencia presente en el sistema, generada por los enlaces primarios y secundarios, y del ancho de banda asignado al enlace de comunicación de un transmisor y un receptor.

Como se mencionó anteriormente, la métrica que evalúa la interferencia en el escenario de evaluación es el $SINR$. Utilizando las ecuaciones (4.1) y (4.2) es posible determinar el valor de $SINR$ de cada enlace primario y secundario del sistema. Para este trabajo se implementó un vector de nombre “*SINR de enlaces 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 (esto es, se satisface (4.6)), entonces el u -ésimo enlace secundario se considerará en *estado verdadero o estado 1*, en caso contrario como *falso o estado 0*, tal y como se observa en el vector “*vector de evaluación de enlaces secundarios*” de la Figura 4.4. Si se establece, como ejemplo, un $SINR_L=10$ dB, entonces todos los enlaces secundarios tendrían asignado *estado 1*, como se observa en la Figura 4.4, lo que implica que el grupo de enlaces secundarios seleccionados por la partícula i cumple con la restricción (4.6). Análogamente, se

aplica el mismo procedimiento para los enlaces primarios. Al observar los vectores X'_i (o P'_i) y el vector *Estado del Espectro* de la Figura 4.4, se establece que el canal primario 5 se encuentra asignado simultáneamente al enlace secundario 1 y al enlace primario 4. El algoritmo determina el *SINR* del enlace primario 4, así como también el del resto de los enlaces primarios considerados por la partícula. En este caso, es importante mencionar que para la evaluación del $SINR_v$ del v -ésimo enlace primario se debe tomar en cuenta la interferencia generada por solo aquellos enlaces secundarios que tienen asignado el mismo canal primario que el v -ésimo enlace primario que se está analizando. Si el valor obtenido de $SINR_v$ es mayor que el umbral β definido en la ecuación (4.7), éste se considera como verdadero (*estado 1*) o en caso contrario como falso (*estado 0*). Únicamente para distinguir a aquellos enlaces primarios que la partícula no consideró como parte de la solución candidata se marcan con -1. Con las ecuaciones (4.3) y (4.4) se obtienen las tasas de datos para cada uno de los enlaces secundarios y primarios considerados por la partícula i respectivamente. La tasa de datos obtenida para cada enlace se almacena en los *vectores de aptitud de enlaces secundarios y primarios* respectivamente. La aptitud total de la partícula i consiste de la suma de cada una de las tasas de datos obtenidas para cada enlace secundario y primario en el sistema.

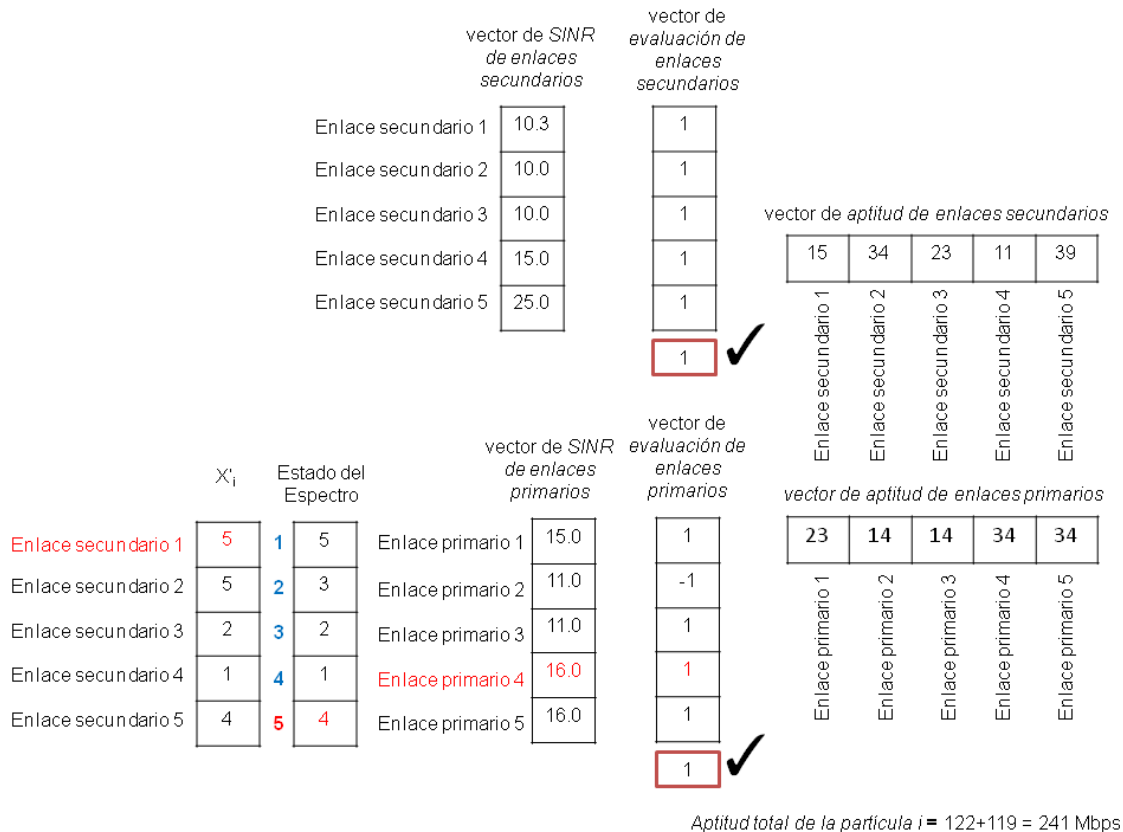


Figura 4.4. Administración de vectores para el cálculo de aptitud: CASO 1

CASO 2 (Las restricciones del umbral SINR no se satisfacen): Cuando alguna de las restricciones (4.6) o (4.7) no se satisfacen, se debe a que la interferencia presente en el sistema es mayor a la potencia de la señal del enlace evaluado. Es decir, el enlace, primario o secundario, seleccionado por la partícula i como solución candidata no satisface algunas de las restricciones y se considera como solución no-valida. En este sentido y según sea el caso, cualesquiera de los vectores “*evaluación de enlaces secundarios*” y/o “*evaluación de enlaces primarios*”, se califican como *estado 0*, como se muestra en la Figura 4.5. Las soluciones candidatas que no satisfacen las restricciones, se penalizan asignándole a la partícula un valor de aptitud total igual a cero, como se observa en la Figura 4.5 y, con esto, se elimina del cúmulo al no poder competir con el resto de las partículas. Este procedimiento difiere de los algoritmos de eliminación de enlaces secundarios empleados usualmente, como en los trabajos [19] y [21], en que para buscar el grupo de enlaces secundarios que pueden coexistir con el usuario primario, remueven parcialmente enlaces

secundarios hasta lograr que la interferencia se mantenga a un nivel tolerable por el usuario primario. Lo anterior implica un mayor número de operaciones del algoritmo. La estrategia de penalización de partículas propuesta en este trabajo reduce esta complejidad adicional en el algoritmo al tratar de seleccionar el grupo de enlaces secundarios. Esto es, porque una partícula pudiera contener el grupo de enlaces secundarios que pudieran removerse si se empleara un algoritmo de eliminación de enlaces secundarios.

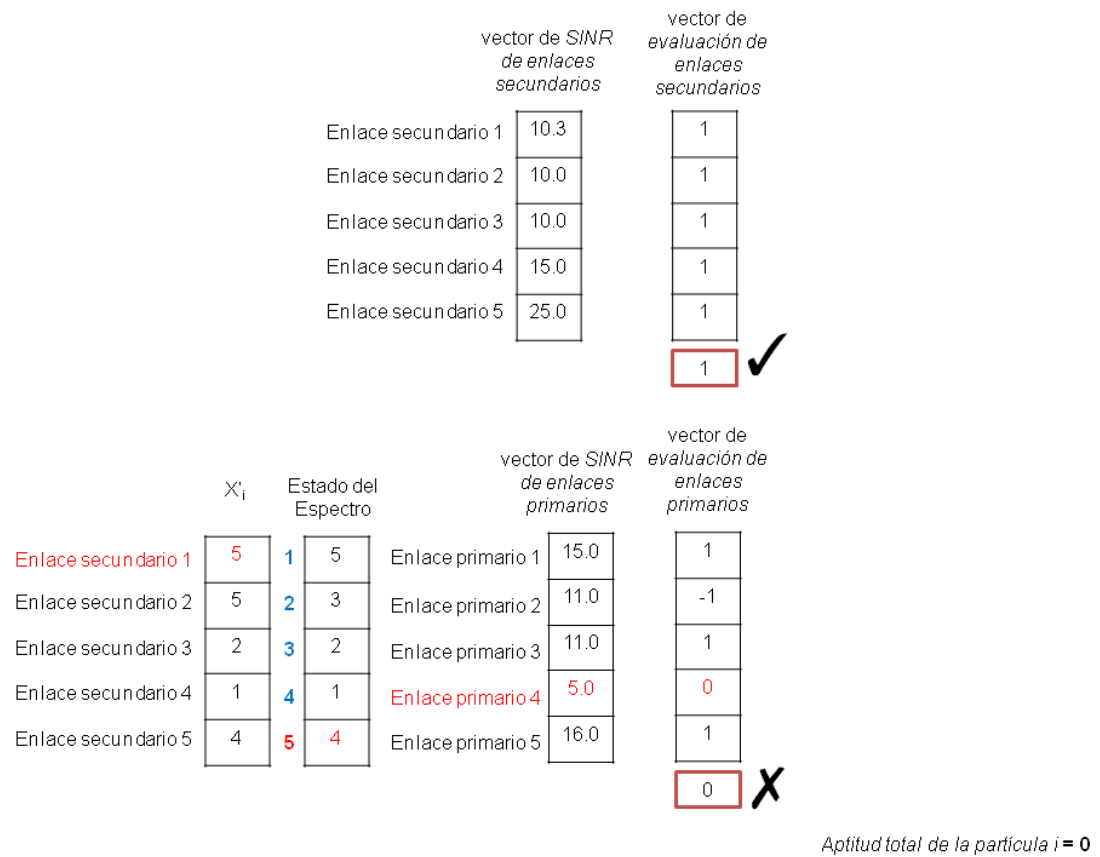


Figura 4.5. Administración de vectores para el cálculo de aptitud: CASO 2

Una vez que la partícula i ha pasado por las fases anteriores, esta evoluciona, es decir; se genera una nueva solución candidata que será evaluada en la próxima iteración. Lo anterior, con el fin de encontrar una posible mejor solución al problema. Con base a las expresiones (4.12) - (4.15) (sección 3.5, capítulo 3), en la *Fase de actualización de v_{id} y x_{id}* se propone una nueva solución candidata, al generar un nuevo valor en la posición x_{id} de la

dimensión d del vector X_i y un nuevo valor de velocidad v_{id} correspondiente a la misma dimensión d del vector V_i , para la partícula i .

$$v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(p_{id} - x_{id}) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}) \quad 4.12$$

$$v_{id} = w^l v_{id} + c_3(gbest - pbest) \quad 4.13$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad 4.14$$

$$x_{id} = x_{id} \bmod (2) \quad 4.15$$

Durante esta etapa también se actualiza el valor de x'_{id} en el que se asigna un nuevo canal primario al enlace secundario en la dimensión d de la nueva partícula, siempre y cuando $x_{id}=1$. Tal y como se muestra en el algoritmo 4.1, el proceso de búsqueda de la mejor partícula del cúmulo ($gbest$) se repite hasta que el cúmulo de partículas sea procesado, analizado, y/o se cumpla la condición de paro, que se establece por una cantidad de iteraciones suficientes para que el algoritmo pueda converger a una solución o cuando la partícula encontrada sea igual o próximo a un resultado deseable. La mejor solución encontrada por el algoritmo representa la cantidad de enlaces secundarios seleccionados P_g que pueden utilizar un canal primario concurrentemente con los enlaces primarios, su ubicación espacial, el canal primario que están compartiendo enlaces primarios y secundarios y la tasa de datos máxima que ofrece el sistema $f(P_g)$.

4.4 Resumen

En este capítulo se describió el modelo propuesto para el control de acceso y asignación de canal de espectro compartido para una red heterogénea. Básicamente, las decisiones que toma el algoritmo de permitir el uso o no de un canal primario se basan en la interferencia que generen los enlaces secundarios. Sin embargo, la propuesta también toma en cuenta la calidad de servicio de la red secundaria, al considerar un umbral de interferencia tolerable por los enlaces que forman parte de ella. Para asegurar que el algoritmo de control de acceso y asignación de canal tome la mejor decisión, se implementó una técnica de optimización por cúmulo de partículas, la cual permite evaluar que la selección del conjunto de enlaces secundarios que forman parte de la solución, maximicen la tasa de datos de la red. Para lo anterior, fue necesario implementar vectores

adicionales asociados a la partícula así como una estrategia de penalización de aquellas soluciones candidatas no validas, la cual consiste en disminuir su aptitud ($f(P_g)=0$) para que sean descartadas del cúmulo. El siguiente capítulo se analiza los resultados obtenidos del algoritmo de control de acceso y asignación de canal considerando las variantes del PSO (BPSO, Derivation 0 y SCPSO) descritos en el capítulo 3.

Capítulo 5

Evaluación del algoritmo de control de acceso y asignación de canal

En el capítulo anterior se definió que el objetivo principal es lograr una máxima capacidad del sistema asignando canales primarios a enlaces secundarios. El algoritmo de control de acceso y asignación de canal propuesto establece los criterios para decidir si un enlace secundario puede o no utilizar un canal primario simultáneamente con un usuario primario, mientras que la técnica de optimización permite encontrar la mejor solución; es decir aquel conjunto de enlaces secundarios que maximicen la tasa de datos en el sistema. En este capítulo se evalúa el desempeño de los algoritmos de optimización por cúmulo de partículas para espacios discretos BPSO, SCPSO y Derivation 0 para resolver el problema de control de acceso y asignación de canal.

5.1 Descripción del escenario de simulación

Como se mencionó anteriormente, en este capítulo se presenta la evaluación del algoritmo de control de acceso y asignación de canal propuesto. Para ello se consideraron las variantes de la técnica PSO para espacios discretos que se describieron en el capítulo 3: BPSO, SCPSO y Derivation 0. El objetivo de esta evaluación es determinar la capacidad máxima que se puede lograr en un sistema heterogéneo de espectro compartido como resultado de la asignación de canales primarios a enlaces secundarios, tomando en cuenta la protección a la red primaria y secundaria contra la interferencia.

Los resultados que se presentan en este capítulo se obtuvieron a partir de un *escenario* que se caracteriza por la ubicación de un conjunto de enlaces primarios Pl y un conjunto de enlaces secundarios Sl . En la Figura 5.1 se muestra un ejemplo de un *escenario* considerado para la evaluación del algoritmo de control de acceso y asignación de canal. Para este escenario se realizan varios experimentos, cada uno se caracteriza por ofrecer distintos valores de QoS, esto es, para lograr un determinado QoS en la red primaria y en la red secundaria se establece un valor de umbral de $SINR$ para cada una. Por lo que para un escenario específico, se evalúa el sistema para distintos valores de umbral de $SINR$ y cada

uno de ellos representa un experimento. Por cada *experimento* se realizan 30 corridas independientes y cada una de ellas consiste de una nueva ubicación, distinta y aleatoria, de los enlaces secundarios. En cada corrida se evalúan una gran cantidad de posibles combinaciones de la asignación de canales primarios a enlaces secundarios, la cantidad de combinaciones evaluadas dependen de la cantidad de partículas e iteraciones consideradas en el algoritmo de optimización.

Durante los experimentos, la ubicación de los enlaces primarios permanece siempre fija, mientras que la de los enlaces secundarios se modifica de forma aleatoria en cada corrida, como se mencionó anteriormente. Se asume que cada enlace se ubica en un área de 25 km^2 y está formado por un par transmisor-receptor cuya distancia 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 utilizan el mismo tipo de tráfico (tráfico homogéneo), la atenuación de potencia debida a los fenómenos multitrayectoria y sombreado no se consideran para el cálculo del *SINR*. Los valores de umbral α y β son los mismos para ambas redes primaria y secundaria, lo que se representa por $SINR_L$. Los parámetros de evaluación considerados para las variantes de PSO y experimentos se muestran en la Tabla 5.1 y Tabla 5.2 respectivamente. Los valores que se muestran en la Tabla 5.1 se determinaron a partir de una calibración empírica, en la que se consideraron varios escenarios que fueron evaluados con diferentes parámetros que la técnica PSO requiere para su operación (descritos en el capítulo 3). A partir de los mejores resultados de optimización obtenidos se seleccionaron los parámetros utilizados en las distintas variantes de PSO.

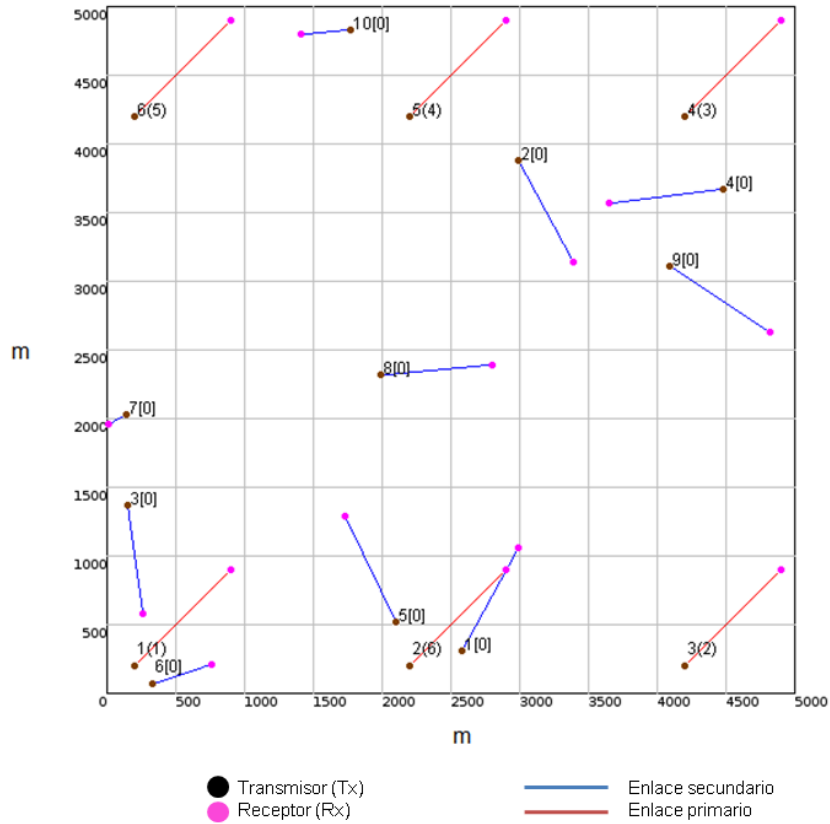


Figura 5.1. Ejemplo de un escenario de evaluación

Tabla 5.1. Parámetros de las variantes de PSO para espacios discretos

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
<i>Tamaño del cúmulo S</i>	<i>100</i>
<i>Número de iteraciones T_{max}</i>	<i>4000</i>
<i>Factores cognitivo, social y socio-cognitivo c_1, c_2, c_3</i>	<i>2, 2, 12</i>
<i>Peso de inercia fijo $w =$</i>	<i>0.721</i>
<i>Limites superior e inferior de peso de inercia variable w_{up}, w_{low}</i>	<i>1.2, 0.1</i>
<i>Velocidad máxima V_{max}</i>	<i>[-6,6]</i>

Tabla 5.2. Parámetros de los experimentos

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
<i>Número de enlaces secundarios S_l</i>	<i>[1,20]</i>
<i>Número de enlaces primarios P_l</i>	<i>6</i>
<i>Canales primarios para compartir PC</i>	<i>1, 2, 3, 4, 5, 6</i>
<i>Número de corridas</i>	<i>30</i>
<i>Umbral de $SINR_L$ (dB) para la red primaria y secundaria</i>	<i>6, 8, 10, 12, 14</i>
<i>Ancho de banda de canal primario</i>	<i>20 MHz</i>

En la Figura 5.2 se muestra un diagrama de flujo de la metodología de evaluación utilizada en este trabajo. Como se mencionó anteriormente la cantidad de experimentos depende de la cantidad de valores de umbral de $SINR_L$ y escenarios que se deseen evaluar en el sistema. Los distintos valores de $SINR_L$ en los experimentos representan la QoS necesaria para que el sistema ofrezca servicios tipo multimedia o de cuarta generación. En todos los experimentos se consideraron seis enlaces primarios, donde la cantidad de enlaces secundarios varía desde 1 hasta 20, en incrementos de 1. Por cada experimento se determina el mejor desempeño del sistema, es decir aquella solución que ofrece la máxima tasa de datos que se puede transmitir en el contexto de espectro compartido. En el proceso de “Ejecutar variante de PSO” de Figura 5.2, se siguen los algoritmos de PSO mostrados en el capítulo 3 (secciones 3.4 y 3.5). El algoritmo 5.1 resume de manera general los pasos del proceso “Ejecutar variante de PSO”:

Algoritmo 5.1 Pseudocódigo del proceso “Ejecutar variante de PSO”

- 1: Generar aleatoriamente un cúmulo inicial de “n” soluciones candidatas
- 2: Repite
- 3: Para $i = 1$ a número de partículas
- 4: Actualizar memoria (pbest)
- 5: Seleccionar al líder (gbest)
- 6: Calcular predisposición de la partícula para decidir por 1 ó 0
- 7: Actualizar solución
- 8: Siguiendo i
- 9: Hasta que se alcance la condición de paro

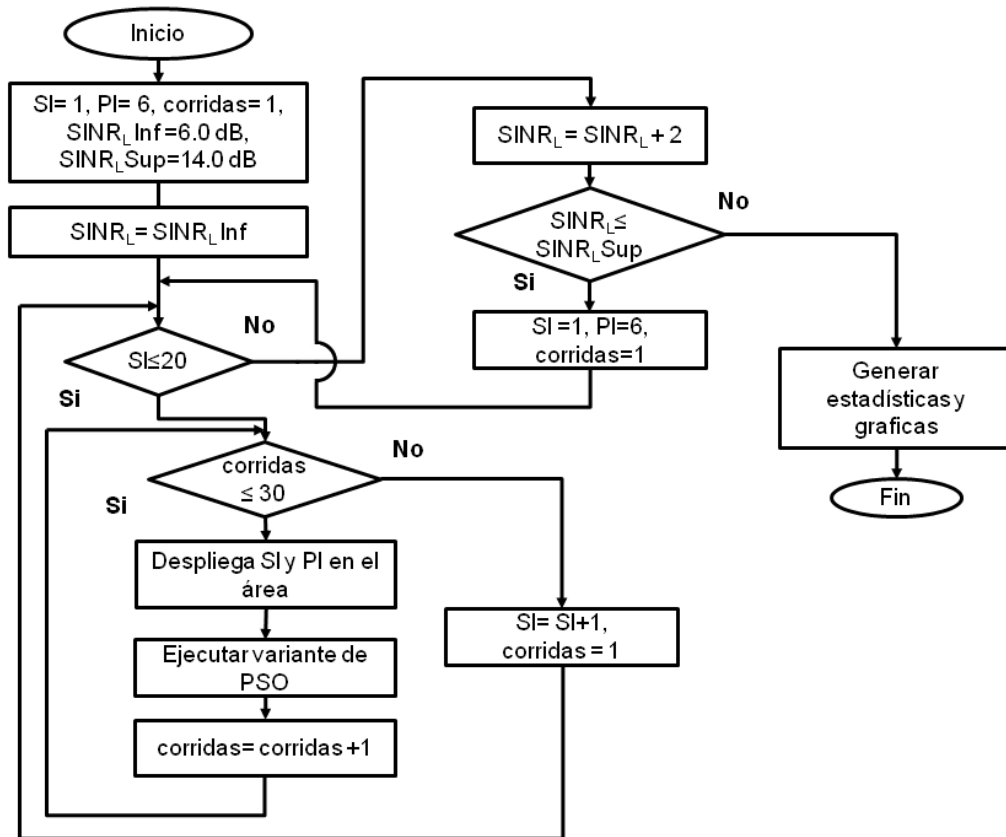


Figura 5.2. Metodología de la simulación

5.2 Evaluación del algoritmo de control de acceso y asignación de canal

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de los experimentos. La metodología descrita en la sección anterior se utilizó con cada una de las versiones de optimización por cúmulo de partículas para espacios discretos, BPSO [59], SCPSO [62] y Derivation 0 [63] para evaluar el algoritmo de control de acceso y asignación de canal. Para determinar el desempeño de una variante de PSO se consideró la tasa de datos total en el sistema (aptitud) y el número de enlaces secundarios seleccionados. Adicionalmente, para cada técnica de optimización se evalúa el tiempo de ejecución; es decir, el tiempo que le toma a cada una encontrar la mejor solución al problema. Para determinar cuál de las tres variantes de PSO se considera como la mejor técnica de optimización para resolver el problema de asignación de canal, se consideraron la mayor

tasa de datos total en el sistema encontrado, el mayor número de enlaces secundarios seleccionados, y el menor tiempo de ejecución.

Se menciona en la literatura que el peso de inercia w , tiene un impacto en la convergencia del algoritmo y, además, es el que provee balance entre la búsqueda global y local de soluciones durante la evaluación de una corrida [69][64]. Por lo anterior, en este trabajo se evalúa el desempeño de las técnicas BPSO, SCPSO, y Derivation 0 considerando los casos cuando el *peso inercia* se mantiene *constante* y cuando el *peso de inercia es variable* con respecto al número de iteraciones. Para el caso de considerar un peso de inercia constante, w se conserva fijo a lo largo de todas las iteraciones, y se sugiere usar un valor de w en el rango de [0.8, 1.2] para encontrar una solución aceptable en un número razonable de iteraciones. En cambio, para el caso de utilizar un peso de inercia variable, el valor de w se reduce gradualmente en cada iteración para ajustar la capacidad de búsqueda [52], esto es:

$$w(t) = w_{up} - (w_{up} - w_{low}) \frac{t}{T_{max}} \quad 5.1$$

donde w_{up} y w_{low} son los límites superior e inferior del peso de inercia. T_{max} es el número total de iteraciones y t representa la iteración actual. La propuesta de considerar un peso de inercia w variable para cada uno de los algoritmos de optimización utilizados en este trabajo, parte de la hipótesis de que si se considera un valor de w alto en las primeras iteraciones facilita la búsqueda global, mientras que utilizar valores bajos de w en las iteraciones finales facilita una búsqueda local.

En la Tabla 5.3 se presenta el experimento que mejor resultado obtuvo para cada una de las técnicas de optimización utilizadas considerando el peso de inercia w constante en todas las iteraciones. Los renglones sombreados en gris representan la mejor solución encontrada para cada variante de PSO. En este sentido, se puede observar que al utilizar cualquiera de las técnicas BPSO, SCPSO o Derivation 0, el sistema ofrece capacidades similares y una diferencia poco significativa entre ellas con respecto a su valor de aptitud. Sin embargo, para cualquier valor de umbral de $SINR_L$, BPSO aprovecha de mejor manera los canales primarios al asignarlos a una mayor cantidad de enlaces secundarios con

respecto a SCPSO y Derivation 0. Asignar canales primarios a un mayor número de enlaces secundarios implica que el sistema puede atender a más usuarios de forma simultánea, pero se presenta el riesgo de que cada usuario independiente tenga menor capacidad de transmisión, ya que la interferencia se incrementa en el sistema. Para lo anterior, es necesario realizar un análisis de satisfacción de servicio por usuario, sin embargo, queda fuera de este trabajo.

La variante Derivation 0 presenta la ventaja, con respecto a los dos anteriores, de que converge a una solución óptima en un menor número de iteraciones, sin embargo, el costo computacional o tiempo de ejecución es superior en un 8% con respecto a BPSO y 53% con respecto a SCPSO.

Tabla 5.3. Mejores soluciones considerando una estrategia de peso de inercia w constante

Algoritmo	Corridas con aptitud máxima				
	S'	Aptitud (Mbps)	Número de enlaces secundarios seleccionados	Tiempo de ejecución (min)	Número de iteraciones para converger
<i>BPSO_6dB</i>	16	2341.5652	10	7.36	3337
<i>BPSO_8dB</i>	16	2363.5843	11	7.38	2016
<i>*BPSO_10dB</i>	19	2370.8834	12	7.96	2025
<i>BPSO_12dB</i>	16	2342.7979	10	7.05	918
<i>BPSO_14dB</i>	20	2341.0741	10	7.21	1408
<i>*SCPSO_6dB</i>	17	2369.8011	11	5.64	2601
<i>SCPSO_8dB</i>	16	2327.7007	10	5.26	948
<i>SCPSO_10dB</i>	19	2315.0039	10	6.09	2979
<i>SCPSO_12dB</i>	16	2348.9692	10	4.85	261
<i>SCPSO_14dB</i>	18	2352.6273	11	6.14	3472
<i>Derivation_6dB</i>	12	2316.613	9	6.59	1097
<i>Derivation_8dB</i>	16	2330.5075	9	8.06	988
<i>*Derivation_10dB</i>	18	2356.849	10	8.58	967
<i>Derivation_12dB</i>	17	2317.8778	9	7.62	358
<i>Derivation_14dB</i>	15	2312.0742	9	6.94	324

En la Tabla 5.4 se muestran los mejores resultados de cada experimento usando BPSO, SCPSO, y Derivation 0 considerando un peso de inercia w variable con respecto al número de iteraciones. Comparando los resultados de los mejores encontrados para cada

variante de la técnica de optimización (los renglones en gris), al igual que en el caso anterior (w fijo) BPSO ofrece el nivel de aptitud mayor y también aprovecha de mejor manera los canales primario al asignarlos a un mayor número enlaces secundarios, aunque en este caso requiere de un mayor costo computacional. Considerando el máximo valor de aptitud y enlaces secundarios admitidos en la red cognoscitiva, se observa que no hay una diferencia significativa entre las soluciones obtenidas con las técnicas SCPSO y BPSO. Ambas versiones asignan la misma cantidad de canales primarios al mismo número de enlaces secundarios, sin embargo SCPSO lo hace en menor tiempo y con menor cantidad de iteraciones que BPSO. Los resultados que se muestran en las Tablas 5.3 y 5.4, son superiores a los reportados en [18], en el que consideran como su mejor solución 8 enlaces secundarios coexistiendo con 6 enlaces primarios.

Tabla 5.4. Mejores soluciones considerando una estrategia de peso de inercia w variable

Algoritmo	Corridas con aptitud máxima				
	Sf	Aptitud (Mbps)	Número de enlaces secundarios seleccionados	Tiempo de ejecución (min)	Número de iteraciones para converger
<i>*BPSO_6dB</i>	17	2385.9257	11	7.85	2846
<i>BPSO_8dB</i>	16	2367.8284	11	7.51	1837
<i>BPSO_10dB</i>	18	2364.0822	11	8.39	3535
<i>BPSO_12dB</i>	12	2345.9004	10	6.81	1737
<i>BPSO_14dB</i>	16	2328.0614	9	6.91	1865
<i>SCPSO_6dB</i>	18	2312.8715	9	5.58	3305
<i>SCPSO_8dB</i>	18	2326.279	11	5.55	3793
<i>SCPSO_10dB</i>	18	2330.108	10	5.98	3072
<i>SCPSO_12dB</i>	16	2345.1084	10	4.54	296
<i>*SCPSO_14dB</i>	18	2347.3203	11	5.33	181
<i>Derivation_6dB</i>	18	2347.6406	10	8.04	2005
<i>Derivation_8dB</i>	18	2344.6554	10	7.34	3673
<i>*Derivation_10dB</i>	16	2350.7205	10	7.03	2257
<i>Derivation_12dB</i>	17	2313.0574	10	6.80	2570
<i>Derivation_14dB</i>	17	2316.4679	9	6.40	3873

La Figura 5.3 muestra la convergencia de los mejores resultados encontrados; para el BPSO con $SINR_L= 10$ dB, SCPSO con $SINR_L= 6$ dB, Derivation 0 con $SINR_L= 10$ dB,

considerando un peso de inercia w fijo. Adicionalmente se muestra el promedio de la aptitud del grupo de corridas del experimento. Considerando el valor promedio de aptitud, la técnica BPSO con un umbral de 10 dB de SINR para ambas redes (primaria y secundaria) presenta el mejor desempeño.

De manera similar, la Figura 5.4 muestra la convergencia de las mejores soluciones encontradas para los casos de BPSO con un $SINR_L=6$ dB, SCPSO con un $SINR_L=14$ dB, Derivation 0 con un $SINR_L=10$ dB, considerando un peso de inercia w variable. Considerando el valor promedio de aptitud las técnicas BPSO y Derivation 0 presentan el mejor desempeño con respecto a SCPSO.

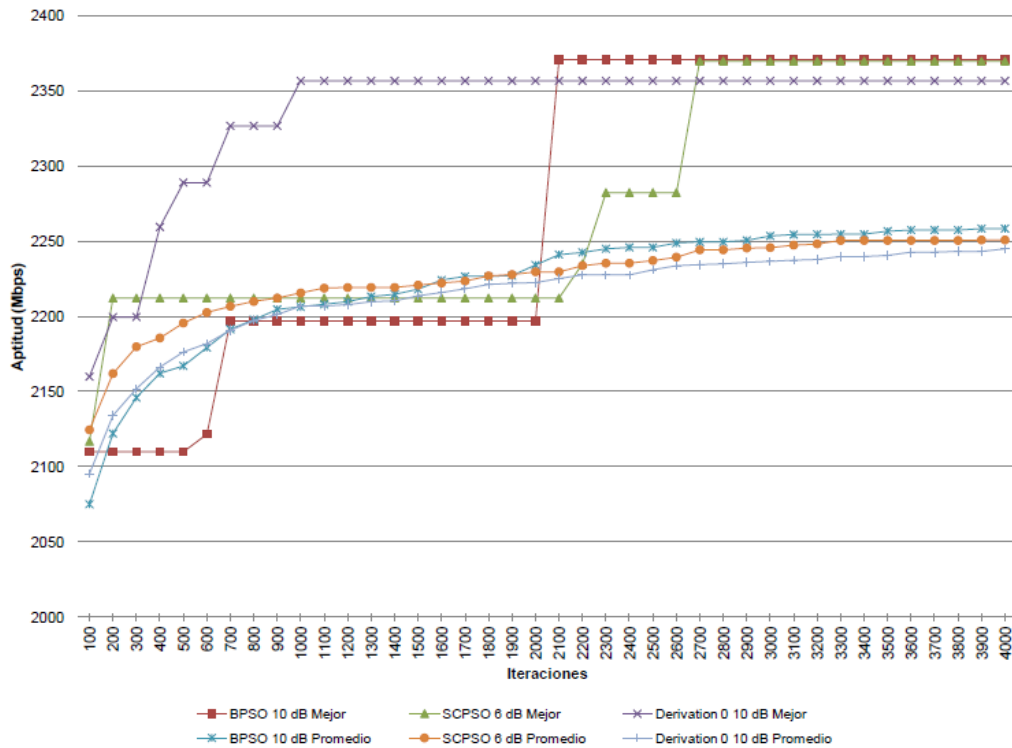


Figura 5.3. Convergencia de soluciones para una estrategia de peso de inercia w constante

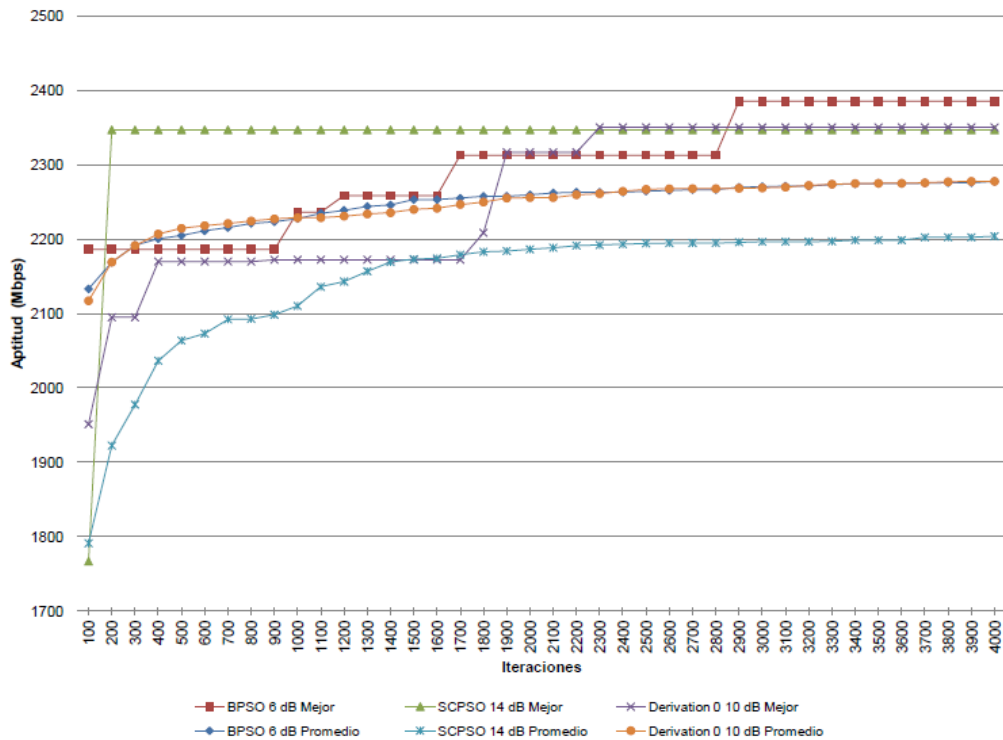


Figura 5.4. Convergencia usando una estrategia de peso de inercia w variable

La Figura 5.5 y Figura 5.6 muestran el comportamiento del tiempo promedio que le toma al algoritmo de optimización obtener la mejor solución de un experimento. En estas figuras se presentan los resultados para el caso en el que se considera w constante y w variable respectivamente, en ambos casos se considera en el sistema un valor de umbral $SINR_L$ de 6 dB. Para cada uno de los casos de enlaces secundarios considerados en el experimento se obtiene el tiempo que le toma al algoritmo encontrar la mejor solución en cada una de las 30 corridas. Este conjunto de valores de tiempo se promedian para obtener el tiempo computacional por cantidad de enlaces secundarios que se muestran en las figuras. Se puede observar, tanto en la Figura 5.5 como en la Figura 5.6, que en todos los casos el tiempo computacional se incrementa linealmente conforme se incrementa el número de enlaces secundarios en el sistema. Sin embargo, considerar w variable incrementa el tiempo computacional para encontrar la mejor solución comparado cuando se considera un w constante. También se observa que la técnica SCPSO es la que obtiene la mejor solución, para cualquier caso, en el menor tiempo computacional, con respecto a las técnicas BPSO y Derivation 0, por lo que considerar un w constante o variable no tiene un impacto significativo en alguna de las variantes de la técnica PSO consideradas.

El tiempo computacional bajo que presenta la técnica SCPSO se debe a que el procedimiento que utiliza para la actualización de velocidad y posición de una partícula requiere menos procesamiento que el que utilizan BPSO y Derivation 0.

Esencialmente, el peso de inercia w , controla la exploración del espacio de búsqueda, por lo que considerar un valor alto al inicio de la ejecución del algoritmo permite que las partículas se muevan por dicho espacio libremente para encontrar la solución óptima en el menor tiempo posible. En la literatura se han reportado casos en los que al considerar un de peso de inercia variable se obtienen soluciones aceptables para diversos problemas, sin embargo, una desventaja es que una vez que w se reduce, el cúmulo pierde la habilidad para encontrar soluciones en nuevos espacios de búsqueda, ya que no es capaz de recuperar su modo de exploración.

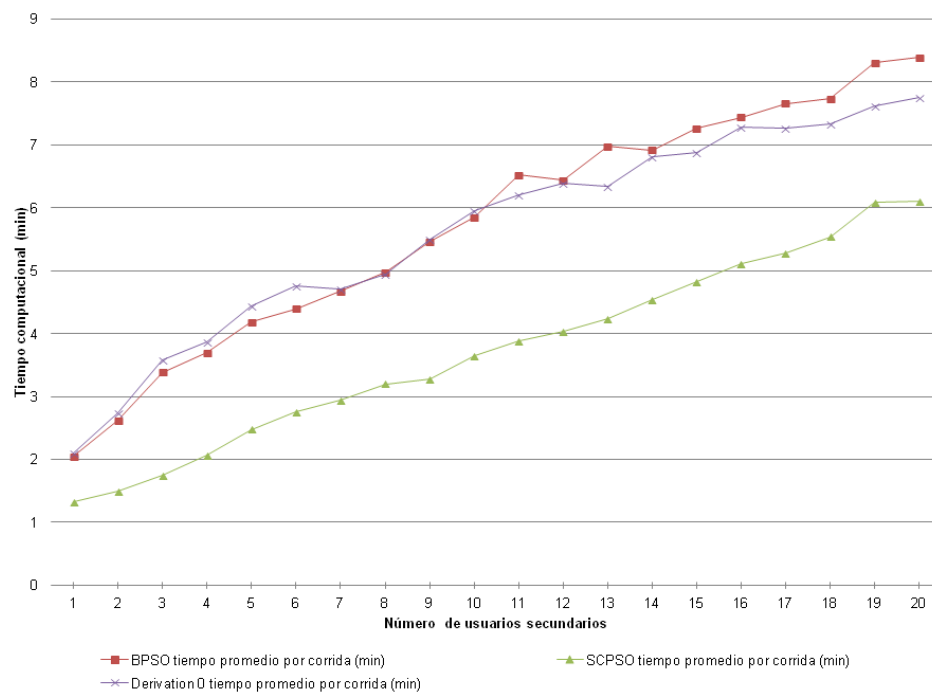


Figura 5.5. Tiempo promedio para encontrar una solución (peso de inercia w constante)

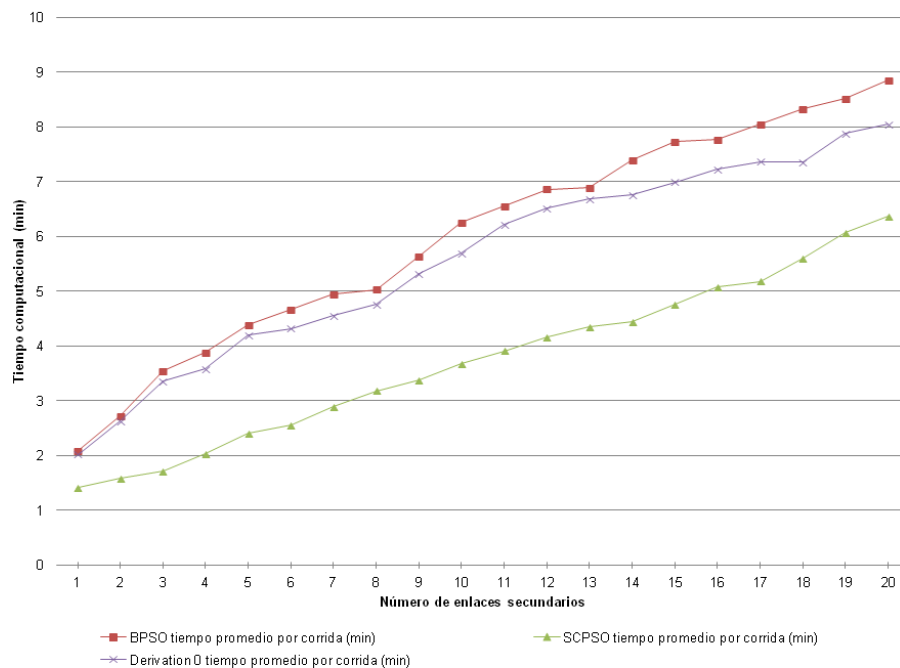


Figura 5.6. Tiempo promedio para encontrar una solución (peso de inercia w variable)

5.2.1 Discusión de resultados

De los resultados presentados en esta sección, se observa que con la técnica BPSO es posible asignar una cantidad de canales primarios a un mayor número de enlaces secundarios coexistiendo pacíficamente entre ellos, además con esta variante de PSO se obtienen las mejores tasas de transmisión pero en un mayor tiempo computacional. Este tiempo se incrementa aún más cuando se utiliza un peso de inercia variable.

La técnica SCPSO encuentra la mejor solución en el menor tiempo computacional con respecto a las otras técnicas evaluadas, esto es independiente de considerar un peso de inercia fijo o variable. Mientras que la variante Derivation 0 es la que presenta el desempeño más bajo; un alto tiempo computacional y baja tasa de transmisión. Se concluye que utilizar un peso de inercia variable incrementa considerablemente el tiempo computacional para la convergencia de soluciones en las variantes de la técnica PSO. La ubicación espacial de los enlaces secundarios afecta directamente en la cantidad de enlaces seleccionados por el algoritmo de optimización, ya que el valor de $SINR$ presente en el

escenario de evaluación depende de la ubicación de los usuarios secundarios y en consecuencia la capacidad del sistema se ve afectada.

Por lo anterior, para la siguiente etapa de la evaluación, en este trabajo de tesis doctoral se utiliza la versión de SCPSO con un peso de inercia w constante para evaluar el algoritmo de control de acceso y asignación de canal bajo propuesto.

5.3 Evaluación de la red cognoscitiva usando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO

En esta sección se discuten los resultados obtenidos de la evaluación de capacidad de la red cognoscitiva al utilizar el algoritmo de asignación de canal SCPSO propuesto.

La Figura 5.7 muestra la tasa de datos total promedio que se obtiene en el sistema cognoscitivo a partir de los enlaces secundarios seleccionados por el algoritmo de un total de enlaces secundarios que solicitaron el servicio. La tasa de datos del sistema se mejora al incrementar el número de enlaces secundarios, sin embargo, se puede observar que existe un límite en el sistema de atender a más usuarios secundarios, lo que significa que el algoritmo de control de acceso propuesto permite que se asignen canales primarios solo a aquellos usuarios secundarios que generan la suficiente interferencia como para no interrumpir el servicio de la red primaria. Esto es, con el algoritmo de control de acceso y asignación de canal, el sistema atiende solo al conjunto de enlaces secundarios que maximizan su capacidad y produzcan la máxima interferencia que el sistema puede tolerar independientemente de la cantidad de usuarios secundarios presentes en el área de cobertura.

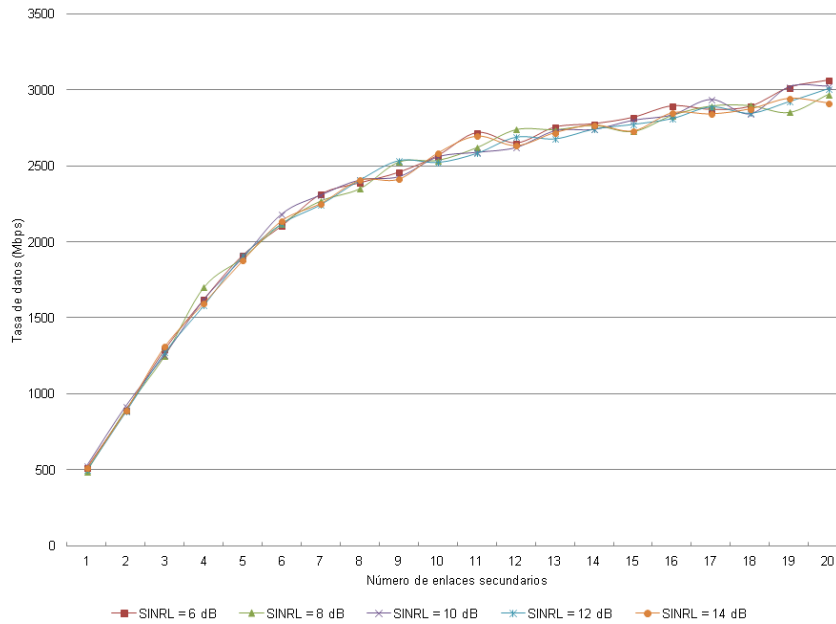


Figura 5.7. Tasa de datos promedio en el sistema

La Figura 5.8 representa el promedio del máximo número de enlaces secundarios seleccionados contra el número de enlaces secundarios solicitantes. Se observa que el algoritmo de asignación de canal comienza a descartar enlaces secundarios a partir de 6 enlaces secundarios desplegados en el área.

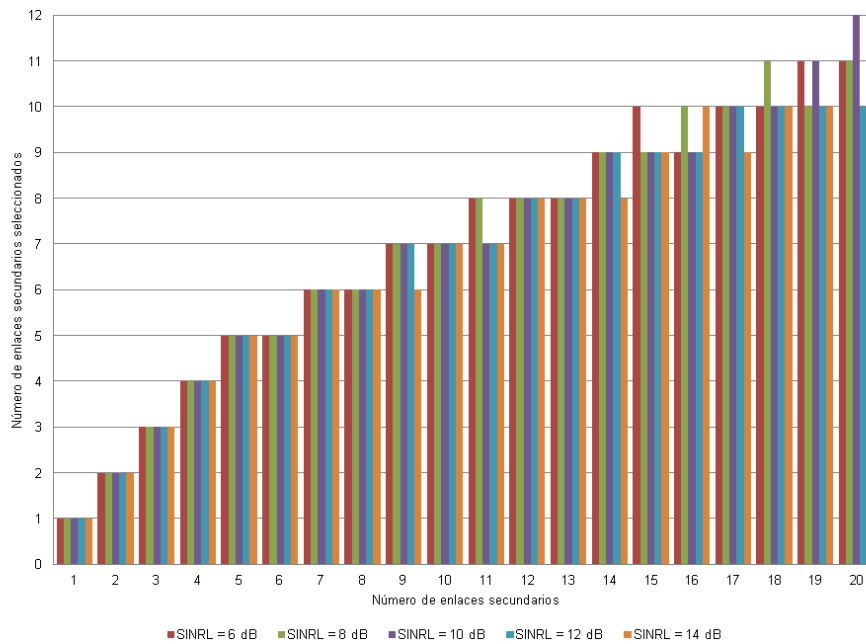


Figura 5.8. Promedio del máximo número de enlaces secundarios seleccionados

La Figura 5.9 muestra la probabilidad de bloqueo que existe en el sistema. La probabilidad de bloqueo se define como la probabilidad estadística de que un usuario secundario no sea atendido inmediatamente cuando solicita el uso de una banda primaria. Los resultados de la Figura 5.9 muestran que existe una mayor probabilidad de bloqueo cuando se consideran umbrales altos de $SINR$ para ambas redes primaria y secundaria. Por ejemplo, para el caso donde 20 usuarios secundarios solicitan una banda primaria en presencia de 6 usuarios primarios, la probabilidad de bloqueo es mayor al 50% para umbrales de $SINR$ mayores a los 12 dB.

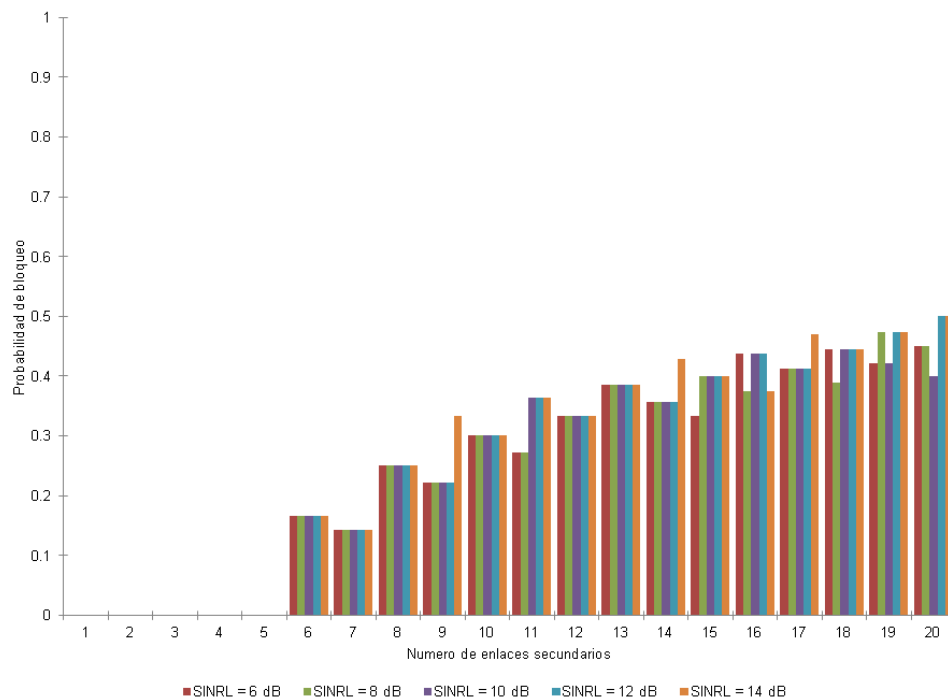


Figura 5.9. Probabilidad de bloqueo del escenario de evaluación

Como se mencionó anteriormente, una de las características de los sistemas cognoscitivos es que uno o varios usuarios secundarios puedan utilizar un canal primario concurrentemente con uno o varios usuarios primarios. En la Tabla 5.5 se muestran resultados sobre la máxima capacidad que se puede obtener en el sistema para diferentes valores de umbral de $SINR$ y además se puede observar la capacidad del algoritmo de asignación de canal propuesto para asignar un canal primario a varios enlaces secundarios. Por ejemplo, para el experimento en el que se considera un $SINR_L = 6$ dB, $S_l = 20$ y $P_l = 6$, los canales primarios 1 (C1), 3 (C3) y 5 (C5) se asignaron cada uno a tres enlaces

secundarios distintos respectivamente. Con esta propuesta, además se puede determinar específicamente cuales enlaces secundarios fueron seleccionados para utilizar dicho canal primario. En la Figura 5.10 se presenta el ejemplo de una solución que se obtuvo de la ejecución del algoritmo de asignación de canal basado en SCPSO. Lo que se observa en la Figura 5.10 es la solución al escenario propuesto en la Figura 5.1. Los enlaces secundarios de color azul representan aquellos enlaces secundarios que no forman parte de la solución; es decir aquellos a los que no se les asignó un canal primario debido a que no cumplieron con las restricciones mínimas de interferencia ya sea para la red primaria o para la red secundaria; tal es el caso de los enlaces secundarios 1, 5, y 8. Los enlaces secundarios de color negro representan a aquellos enlaces secundarios que se les aceptó su solicitud de canal y se les asignó un canal primario, de la figura 5.10 se puede observar que los enlaces secundarios 3 y 4 tienen asignado el canal primario 4, que utilizan concurrentemente con el enlace primario 5 (en color rojo).

Tabla 5.5. Mejores soluciones encontradas en los experimentos

<i>Experimento</i>											
<i>Escenario</i>											
<i>SINR_L</i> <i>(dB)</i>	<i>SI</i>	<i>PI</i>	<i>Máxima tasa de datos (Mbps)</i>	<i>Número de enlaces secundarios asignados a canales primarios</i>						<i>Número total de enlaces secundarios seleccionados</i>	
				<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>	<i>C 5</i>	<i>C 6</i>		
6	20	6	3646.7874	3	1	3	1	3	2	13	
8	20	6	3571.9169	2	2	1	1	2	2	10	
10	19	6	3720.2491	1	4	3	1	2	2	13	
12	13	6	3699.2882	3	2	2	1	1	1	10	
14	20	6	3765.2708	2	2	3	1	2	3	13	

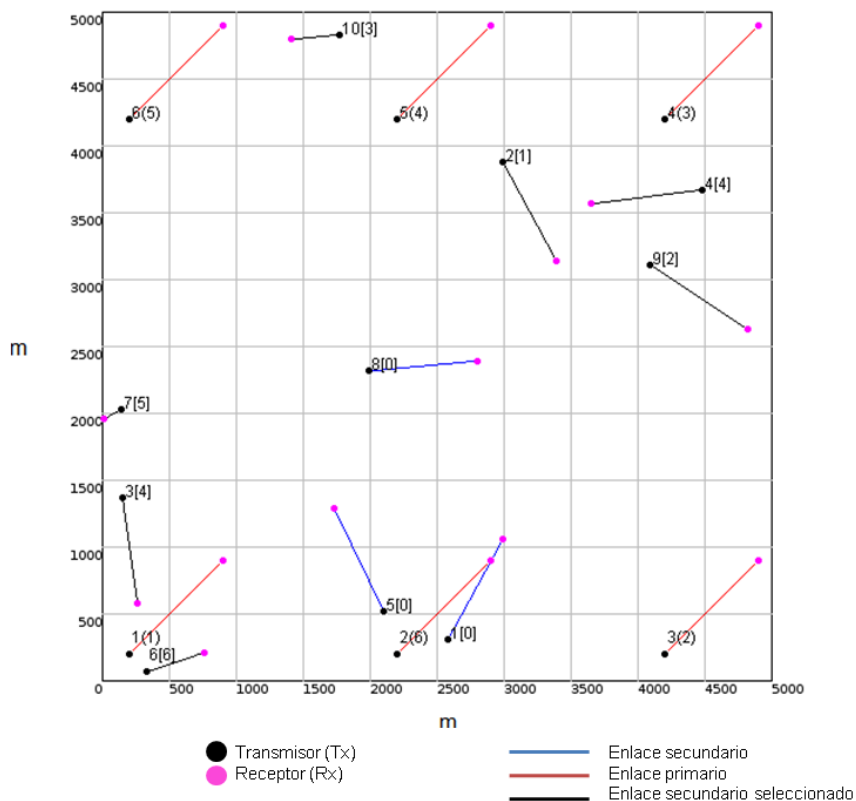


Figura 5.10. Ejemplo de una solución obtenida por el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO para $Pl=6$, $Sl=10$ y $SINR_L=6$ dB

5.4 Resumen

En este capítulo se evaluó el desempeño de 3 variantes del algoritmo de optimización por cúmulo de partículas para aplicarlos en la propuesta de un algoritmo de control de acceso y asignación de canal. El algoritmo de control de acceso y asignación de canal establece los criterios para decidir si un enlace secundario puede o no utilizar un canal primario simultáneamente con un usuario primario, mientras que la técnica de optimización permite encontrar la mejor solución; es decir aquel conjunto de enlaces secundarios que maximicen la tasa de datos en el sistema. Los criterios que se consideraron para determinar el desempeño de las variantes del algoritmo de optimización por cúmulo de partículas fueron; i) tasa de datos total en el sistema, ii) número de enlaces secundarios seleccionados, y iii) tiempo de ejecución. Estos criterios se evaluaron bajo la influencia de dos estrategias de peso de inercia w : constante y variable. De los resultados obtenidos se

puede establecer que la versión SCPSO utilizando un peso de inercia w constante es la que presentó el mejor desempeño, ya que utilizar un peso de inercia variable incrementa el tiempo computacional para que el algoritmo encuentre a una solución. En el siguiente capítulo se presentan resultados que permiten determinar requerimientos de diseño para desplegar una red cognoscitiva utilizando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO.

Capítulo 6

Diseño de la red cognoscitiva considerando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal

La técnica de acceso dinámico de espectro garantiza que los usuarios secundarios que hacen uso de ella, utilicen los canales regulados sin causar interferencia dañina al usuario primario de forma tal que degraden su desempeño. Sin embargo, existe preocupación por parte de los sistemas de comunicaciones móviles en cómo protegerlos, por lo que tienen el interés de que se desarrollen políticas que establezcan el compromiso entre la interferencia producida hacia los usuarios regulados y los requerimientos de despliegue de redes secundarias. En este capítulo se presenta un análisis de algunas recomendaciones de diseño para el despliegue de una red cognoscitiva utilizando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO. De los requerimientos que se analizan son; la distancia mínima necesaria para evitar que la interferencia producida por un transmisor secundario afecte el desempeño de un receptor primario, la tolerancia a la interferencia del receptor primario y la cantidad de enlaces secundarios que soporta el sistema simultáneamente la red primaria.

6.1 Antecedentes

La subutilización del espectro radioeléctrico ha generado la necesidad de compartirlo de forma oportuna entre usuarios móviles. Los usuarios primarios tienen, por derecho, el privilegio de utilizar el espectro que tienen asignado, mientras que los usuarios secundarios tienen que encontrar una oportunidad para usarlo. Los aspectos de interés en un escenario de espectro compartido son la cantidad máxima de transmisiones simultáneas entre usuarios primarios y secundarios, y el nivel máximo de interferencia tolerable por los usuarios primarios.

Para evitar interferencia excesiva en un sistema inalámbrico, las transmisiones inalámbricas se pueden separar en tiempo, frecuencia o espacio. Sin embargo, el recurso espacial es el que presenta mayor reto de los tres, debido a que transmisores y receptores comúnmente no se encuentran co-localizados (es decir lo más cercano posible) y la

potencia de las señales no deseadas se filtran sobre la señal deseada cuando la distancia entre transmisores y receptores es relativamente grande.

La interferencia dañina es aquella que degrada, obstruye o interrumpe un servicio. Esta interferencia depende de, si ambos dispositivos (transmisor secundario y receptor primario) operan en la misma banda de frecuencias y de que tan cercano se encuentren uno del otro. La ubicación o configuración espacial de los enlaces afecta de manera significativa el desempeño de cualquier red inalámbrica, ya que la potencia de la señal y la interferencia que se recibe en un receptor depende de las distancias que existen entre los distintos transmisores y receptores ubicados en el área de cobertura [70].

Lo anterior es una característica de las redes inalámbricas emergentes, tales como, redes femtocelulares, redes ad-hoc o redes cognoscitivas, las cuales operan simultáneamente sobre (overlay) redes macrocelulares existentes. Esta consecuente heterogeneidad de redes inalámbricas permite incrementar la eficiencia espectral y con ello la capacidad de las redes, sin embargo, viene acompañada de un despliegue de nodos en forma aleatoria, infraestructura irregular y una configuración espacial incierta, que ocasiona también un incremento en la interferencia percibida en la red. Por lo anterior, se han desarrollado técnicas que reducen la interferencia y técnicas de codificación que incrementan la eficiencia del uso del canal, sin embargo, estos desarrollos han generado dispositivos más complejos y costosos y, que inevitablemente, su eficiencia depende de la posición relativa de entre transmisores y receptores. Es por ello que si se diseñan redes inalámbricas cognoscitivas con conocimiento previo de la ubicación espacial en la que deben desplegarse transmisores y receptores, es posible reducir la interferencia percibida por los receptores primarios y secundarios y con ello incrementar la capacidad de transmisión de toda la red.

Existen pocas opciones prácticas disponibles que permitan reducir la interferencia espacial entre receptores vecinos, una de ellas, es que los transmisores reduzcan su potencia de transmisión, esto afectaría de igual forma a la potencia de la señal deseada y en consecuencia no se incrementaría el valor de *SINR*. Es común observar en la literatura modelos simplificados que permiten analizar, de forma más sencilla, características de diseño y despliegue de redes inalámbricas, estas propuestas asumen que los nodos

interferentes contribuyen con la misma potencia sin considerar la importancia de la ubicación de los nodos transmisores con respecto al receptor o, los efectos de propagación de las señales, ya que una señal se atenúa con respecto a la distancia. El objetivo de este capítulo no es proponer un modelo espacial para el análisis de distribución de los nodos, sino aprovechar los existentes que en conjunto con el algoritmo de control de acceso y asignación de canal propuesto, permitan determinar la distancia mínima de co-localización de transmisores y receptores en el sistema. Lo anterior, con la finalidad de que los dispositivos cognoscitivos puedan hacer uso de canales primarios sin afectar el desempeño de los receptores primarios ni el de los secundarios.

6.2 Descripción del escenario de evaluación

La efectividad y eficiencia de una red inalámbrica se evalúan por medio de métricas tales como; conectividad, capacidad y confiabilidad (probabilidad de interrupción). Sin embargo, para cada una de estas métricas se requiere que cada uno de los enlaces (en el que se conectan un par de nodos) de la red realicen funciones complejas. Conforme se incrementa el número de nodos en el sistema, se incrementa el número de combinaciones posibles de evaluación para encontrar el mejor valor de cada una de las métricas. En este sentido, en nuestra evaluación se consideran condiciones estáticas de la red, de tal forma que solo se tome en cuenta las probabilidades de éxito o interrupción de cada enlace. En la Figura 6.1 se muestra el escenario de evaluación considerado para la determinación de la zona de protección o exclusión, el comportamiento de la interferencia y el número máximo de enlaces secundarios seleccionados. Debido a que la distancia entre nodos afecta el desempeño de la red, para esta evaluación se considera un modelo estocástico para la ubicación de los nodos. La geometría estocástica [71] es una herramienta que permite analizar la distribución de la interferencia e interrupciones que presentan los enlaces, por lo que es posible analizar estadísticamente el desempeño de la red. Para lo anterior, los modelos estocásticos se enfocan en el análisis de un solo receptor o enlace, tal y como se muestra en la Figura 6.1, éste se ubica de forma fija en el centro del área de cobertura y su correspondiente transmisor se ubica a una distancia máxima de 1000 m con respecto al receptor. Para la ubicación de los transmisores secundarios, se utilizó el modelo espacial

PPP (Poisson Point Process) en el que cada nodo toma una ubicación aleatoria e independiente caracterizada por un par de coordenadas (x_i, y_i) .

Como se mencionó en el capítulo anterior, todas las métricas que permiten evaluar el desempeño de la red dependen directamente del valor percibido de *SINR* por cada uno de los enlaces. El valor de *SINR* es una variable aleatoria que depende de factores tales como, la distancia entre los transmisores no deseados y el receptor deseado, el conjunto de transmisores secundarios activos y la interferencia total acumulada. El algoritmo de control de acceso y asignación de canal propuesto en este trabajo permitirá seleccionar el mejor escenario, es decir la combinación de enlaces secundarios activos que ofrezcan la mayor transferencia de datos, en este capítulo el conjunto de transmisores activos seleccionados se consideran como interferentes para el receptor primario. A partir del resultado anterior, la interferencia total acumulada, que depende de la ubicación espacial de los nodos secundarios y el receptor primario, se obtiene a partir de las potencias recibidas de los transmisores secundarios activos.

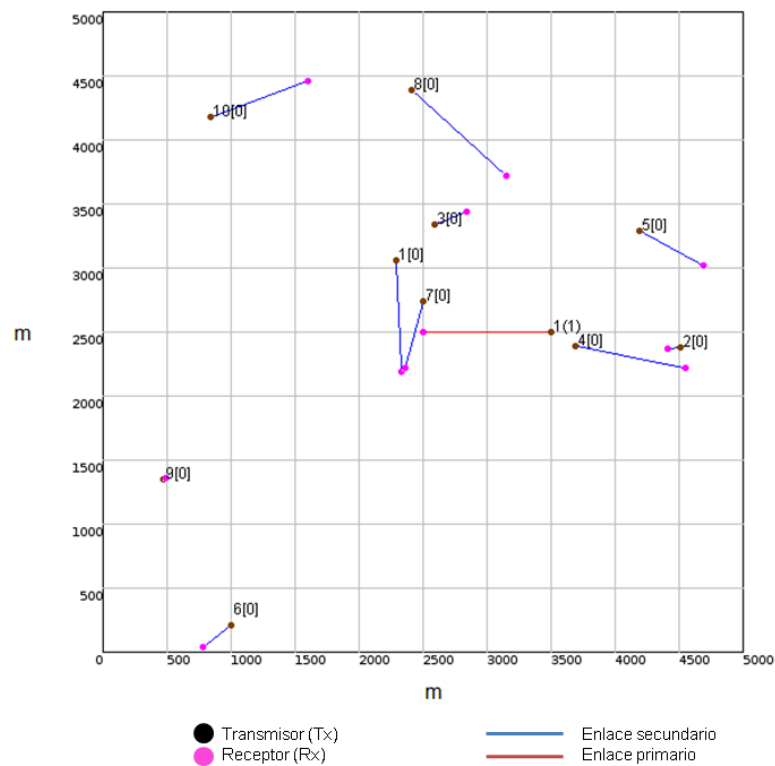


Figura 6.1. Escenario de evaluación

Al igual que en el capítulo anterior, durante el proceso de evaluación se realizaron varios experimentos, cada uno caracterizado por un valor de umbral $SINR_L$ distinto. Por cada *experimento* se realizan 5000 corridas independientes y cada una de ellas representa una nueva ubicación, distinta y aleatoria, de los enlaces secundarios. En cada corrida se evalúan distintas combinaciones de la asignación de canales primarios a enlaces secundarios para determinar la mejor solución, esto es, la combinación que ofrezca mayor tasa de transferencia.

Durante los experimentos, la ubicación de los enlaces secundarios se modifica de forma aleatoria en cada corrida, como se mencionó anteriormente. Se asume que cada enlace se ubica en un área de 25 km^2 y está formado por un par transmisor-receptor cuya distancia está limitada a 1000 m. 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 utilizan el mismo tipo de tráfico (tráfico homogéneo), la atenuación de potencia debida a los fenómenos multitrayectoria y sombreado no se consideran para el cálculo del SINR y se consideró que el valor de umbral de $SINR_L$ es el mismo para ambas redes primaria y secundaria. La configuración de parámetros para el algoritmo SCPSO se muestra en la Tabla 6.1.

La cantidad de experimentos depende de la cantidad de valores de umbral de $SINR_L$ que se deseen evaluar en el sistema. En este caso se generaron 6 distintos experimentos cada uno con un valor de $SINR_L$ de 4, 6, 8, 10, 12 y 14 dB, respectivamente. En todos los experimentos se consideraron diez enlaces secundarios y un solo enlace primario. Por cada experimento se obtiene el mejor desempeño del sistema, es decir aquella solución que ofrece la máxima tasa de datos que se puede transmitir en el contexto de espectro compartido. La configuración de parámetros para cada experimento se muestra en Tabla 6.2.

En las siguientes secciones se explican los procesos para determinar los compromisos entre los distintos requerimientos de despliegue a partir del resultado que se obtiene en esta etapa.

Tabla 6.1. Parámetros de SCPSO

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
<i>Tamaño del cúmulo $S =$</i>	40
<i>Número de iteraciones $T_{max} =$</i>	150
<i>Factores cognitivo, social y socio-cognitivo $c_1, c_2, c_3 =$</i>	2, 2, 12
<i>Peso de inercia fijo $w =$</i>	0.721
<i>Velocidad máxima $V_{max} =$</i>	[-6,6]

Tabla 6.2. Parámetros de los experimentos

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
<i>Número de enlaces secundarios $S_l =$</i>	10
<i>Número de enlaces primarios $P_l =$</i>	1
<i>Canales primarios para compartir $PC =$</i>	1
<i>Número de corridas $=$</i>	5000
<i>Umbral de $SINR_L$ (dB) $=$</i>	4, 6, 8, 10, 12, 14
<i>Ancho de banda de canal primario</i>	20 MHz

6.3 Requerimientos de diseño de una red cognoscitiva

Dado que la filosofía del acceso dinámico de espectro es garantizar protección al usuario primario, al momento de desplegar una red cognoscitiva se deben seleccionar cuidadosamente los aspectos de diseño de dicha red, ya que realizar un despliegue arbitrario generaría interferencia dañina a los usuarios de la red primaria. En general, algunos ejemplos de parámetros de diseño son [11][48]: zonas primarias de exclusión (el radio de protección de un receptor primario), límites de potencia de transmisión en usuarios secundarios, número permisible de usuarios secundarios, umbrales y tiempo de monitoreo,

nivel aceptable de interferencia en receptor primario (relación señal a interferencia). El valor que toman estos parámetros de diseño depende de la estrategia de acceso y del uso de los canales (ya sea overlay o underlay) que los usuarios secundarios emplean para explotar una banda primaria. Para el despliegue de una red cognoscitiva de espectro compartido (caso underlay) es relevante establecer un límite en la potencia de transmisión de los usuarios secundarios, en las zonas primarias de exclusión, en el número permisible de usuarios secundarios y en el nivel aceptable de interferencia en el receptor primario. El umbral de detección y el tiempo de monitoreo del espectro son factores exclusivos del modo de acceso overlay. Estos se refieren al valor máximo que debe establecerse para detectar la energía de la señal primaria y con esto decidir el estado del canal primario (ocupado o disponible), mientras que el tiempo de detección se refiere al tiempo que le debe tomar a un usuario secundario detectar la presencia del usuario primario (es decir, decidir si el canal está ocupado).

Considerando el algoritmo de asignación de canal basado en SCPSO propuesto y descrito en los capítulos anteriores es posible identificar y determinar los parámetros de diseño que se requieren para el despliegue óptimo de una red cognoscitiva. Los resultados referentes a la zona primaria de exclusión, el número de usuarios secundarios coexistiendo con el usuario primario y los niveles aceptables de interferencia en el receptor primario se obtienen a partir del mejor escenario encontrado en un experimento, esto es, de la solución óptima encontrada.

6.3.1 Zona primaria de exclusión

En el contexto de redes cognoscitivas, la interferencia que causan los transmisores secundarios al receptor primario debe ser la menor posible, una solución que se propone para disminuir dicha interferencia es reducir la potencia de transmisión de los nodos secundarios. Sin embargo, esta acción afecta la capacidad de la red secundaria ya que la señal deseada también se ve afectada y el valor de SINR percibido también disminuye. Otra solución, es que no se le permita a ningún nodo secundario transmitir cuando se encuentre cerca de un receptor primario. En la práctica el nodo secundario desconoce la ubicación de los nodos primarios (transmisor y receptor) por lo que es necesario determinar una zona de exclusión, que se obtiene a partir de la distribución de interferencia percibida en el sistema.

Esta zona de exclusión es el área de cobertura de los nodos primarios en la que ningún nodo secundario puede transmitir cuando se encuentre dentro de ella. Una zona primaria de exclusión es el radio de protección para un receptor primario, es decir, la distancia mínima a la que debe ubicarse uno o varios transmisores secundarios con respecto al receptor primario, con la finalidad de que ambos puedan utilizar la misma banda frecuencia primaria (ver Figura 6.2).

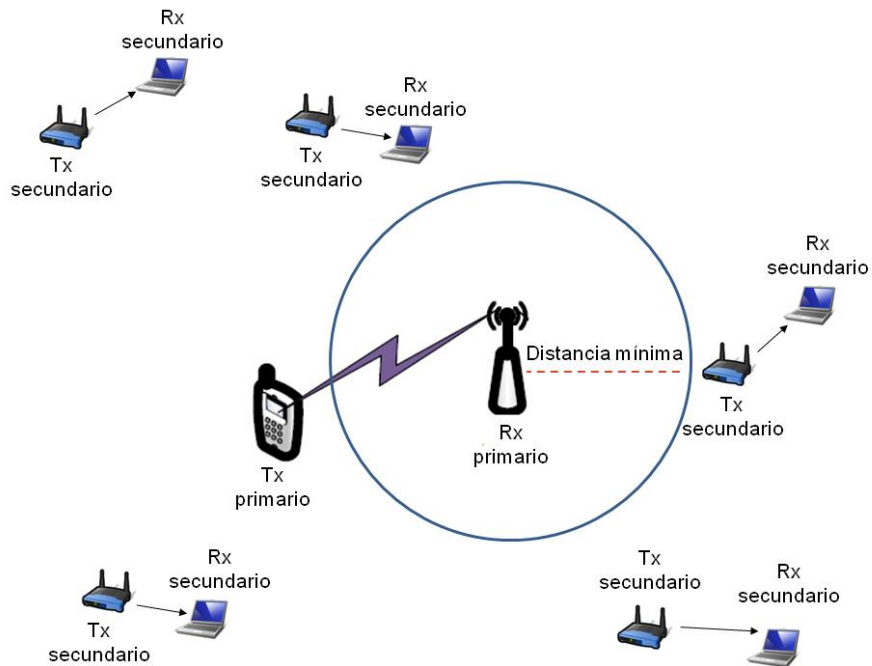


Figura 6.2. Zona primaria de exclusión

De la Figura 6.2, se asume que cada enlace secundario (formado por un par transmisor-receptor) representa una red secundaria, ya sea, una red femtocelular o una red ad-hoc. Para este caso, el transmisor secundario funciona como un punto de acceso o transceptor el cual tiene la capacidad de asignar un canal de comunicación a sus receptores secundarios cuando lo soliciten. Asumiendo que en un instante de tiempo, el transceptor secundario no cuenta con canales propios disponibles para asignar a sus usuarios, éste tendrá que hacer uso de sus capacidades cognitivas para utilizar alguno de los canales primarios que tiene asignado la red primaria y asignárselo a su usuario secundario. Bajo esa situación, para que dicho enlace secundario pueda utilizar el mismo canal que el enlace primario, debe existir una distancia mínima entre ambos, de tal forma que la transmisión

del enlace secundario no interfiera con la transmisión del enlace primario. Además de considerar la QoS de la red primaria, es posible que varias redes secundarias traten de utilizar el mismo canal primario simultáneamente, por lo que también se debe tomar en cuenta la QoS de las redes secundarias y la interferencia que cada una percibe debido a las transmisiones primarias y secundarias que ocurran en ese instante de tiempo.

Para determinar esta distancia mínima entre transceptor secundario y receptor primario se considera un escenario como el que se muestra en la Figura 6.1. En esta figura se pueden observar un receptor primario, diez enlaces secundarios y, ambas redes solo cuentan con un canal primario para compartir. Utilizando el algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en SCPSO propuesto en este trabajo, en la Figura 6.3 se muestra la mejor solución encontrada para el escenario de evaluación de la Figura 6.1. Dicha solución muestra el conjunto de enlaces secundarios activos seleccionados que maximizan el caudal eficaz de la red.

Para este caso, en la Figura 6.3 se muestra que el algoritmo seleccionó cuatro enlaces secundarios para compartir el mismo canal primario. A partir de este resultado, el se calcula la distancia que existe entre cada uno de los transmisores secundarios seleccionados y el receptor primario. La menor de las distancias es la que se considera como el radio de la zona de exclusión. Las distancias se calculan a partir de las coordenadas (x_i, y_i) conocidas de la ubicación de cada nodo. Este proceso se efectúa únicamente con el resultado de la corrida que contiene el mejor resultado encontrado para cada experimento, es decir, de las 5000 corridas que se evalúan para un umbral de $SINR_L$ determinado, se selecciona aquella que tiene la tasa de datos del sistema más alta.

La Figura 6.4 muestra los valores de la distancia mínima que debe existir entre el transmisor secundario y el receptor primario para cada valor de $SINR_L$ considerado en el sistema. También se muestra el valor promedio del conjunto de distancias obtenidas. Este valor representa el valor esperado de la distancia a la que se deben ubicar los cuatro enlaces secundarios que utilizan el mismo canal primario simultáneamente.

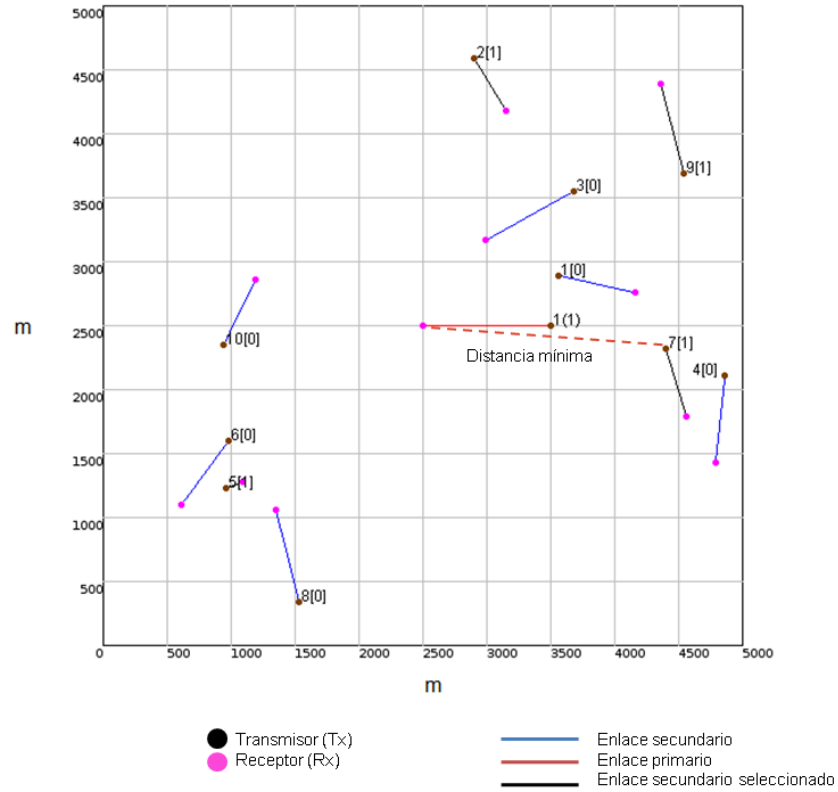


Figura 6.3. Cálculo de la distancia mínima en escenario con el mejor encontrado

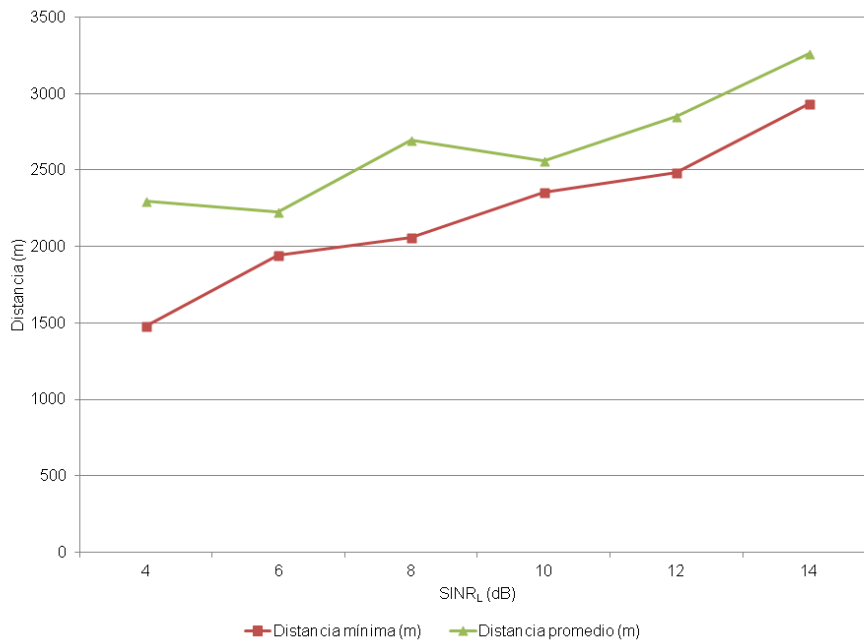


Figura 6.4. Resultados de la distancia mínima y distancia promedio obtenidas para cada experimento

Los resultados de la Figura 6.4 sugieren que entre mayor sea el nivel de calidad (umbral de $SINR_L$) que se desee en el sistema, mayor será la distancia a la que deben ubicarse los transmisores secundarios. Sin embargo, se puede afirmar que los usuarios secundarios que utilicen potencias de transmisión menores podrán transmitir a una distancia menor del receptor primario. En la Figura 6.5 se muestra el área de cobertura en la que un receptor primario podrá decodificar la información que envía el transmisor primario sin que se vea afectada por la interferencia de los enlaces secundarios. Fuera de esta área de cobertura, los enlaces secundarios podrán hacer uso del mismo canal primario para efectuar su comunicación, tal y como se muestra en la Figura 6.2. El tamaño de la zona de protección dependerá del valor de $SINR_L$ o de la pérdida de calidad de servicio que tolere el nodo primario. Sin embargo, solo por el hecho de que el transmisor secundario se encuentre ubicado fuera de la zona de exclusión primaria, no implica que éste pueda transmitir en forma segura o libre de errores, ya que si el receptor secundario se encuentra lo suficientemente cerca de un transmisor primario, éste último podría interferir con la señal secundaria. Por lo que es recomendable que se analice el efecto que produce el transmisor primario sobre el receptor secundario.

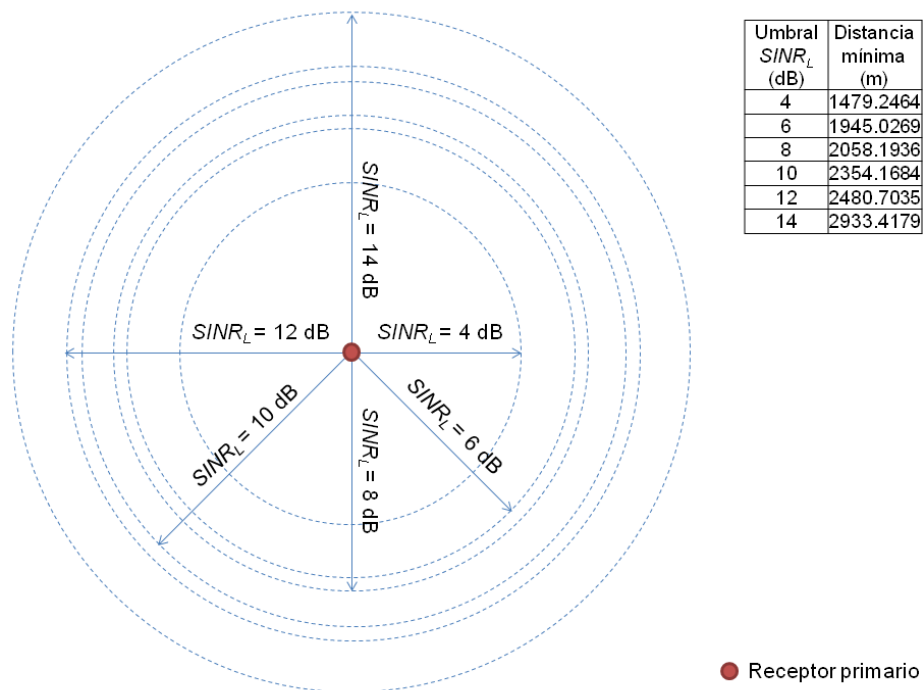


Figura 6.5. Radios de zonas primarias de exclusión

6.3.2 Múltiples usuarios secundarios

El reto principal que existe en un escenario de múltiples usuarios secundarios o cognoscitivos es la forma en que estos puedan compartir una banda de frecuencia y acceder al espectro de forma dinámica. Este problema es similar al que se presenta en las técnicas de acceso múltiple que utilizan las redes inalámbricas multicanal. En ambos casos, las transmisiones múltiples independientes necesitan compartir un conjunto de recursos espectrales. El desempeño de la red estará limitado por la tolerancia a la interferencia que presenten los usuarios primarios y secundarios. Limitar la interferencia por debajo de un valor de umbral, permite tener un balance entre la tasa de dato del sistema y la cantidad de usuarios secundarios que pueden hacer uso simultáneo de los canales primarios. En otras palabras, el límite de interferencia es una medida de la tolerancia que pueden ofrecer los usuarios debido a la interferencia de acceso múltiple. En redes inalámbricas de este tipo la clave es establecer un compromiso entre la mínima interferencia percibida por los usuarios primarios y el máximo desempeño de todo el sistema. Una de las estrategias que se siguen para lograr lo anterior es limitar el número de usuarios secundarios en la red, por lo que de forma natural surge la pregunta de cuál es la relación óptima que debe existir entre el número de usuarios cognoscitivos y no-cognoscitivos que maximicen la transferencia de datos en el sistema. Este debate se ha abordado en la literatura con la idea de determinar la conveniencia de asignar nuevo espectro (espectro regulado liberado) a usuarios primarios o a usuarios que no cuentan con una licencia para operar. La generalidad de este compromiso se puede resumir en lo siguiente; si se considera demasiada regulación, es decir, limitar el número de usuarios secundarios provocaría que el sistema fuese ineficiente, debido a que no se aprovecharían los recursos espectrales que se encuentren disponibles. Por otro lado, establecer demasiada autonomía a los usuarios cognoscitivos, es decir, aceptar muchos usuarios secundarios volvería al sistema autodestructivo, debido a la interferencia que se generaría y al incremento de colisiones entre los usuarios secundarios al tratar de acceder a una misma porción espectral.

En trabajos como en [72] y [73] se establece el interés por analizar el efecto de escalamiento de las redes inalámbricas, es decir, cuantificar el incremento que se logra en la tasa de transferencia de datos de la red al incrementar el número de enlaces. En [72] los

autores presentan resultados del escalamiento de una red ad-hoc homogénea, en el que determinan que el caudal eficaz de la red se incrementa por un factor de \sqrt{n} , donde n representa el número de enlaces en la red. En esta etapa del trabajo se considera un experimento similar, solo que en este caso se evalúa el escenario de un red inalámbrica heterogénea como el de la Figura 6.1, en el que se incluyen usuarios primarios y secundarios, como lo hacen en [73]. Los transmisores secundarios están restringidos por una distancia de 1000 m con respecto a su receptor secundario. Este escenario se diferencia del reportado en [72] en que solamente se considera un salto para la comunicación entre transmisores y receptores cognoscitivos y no múltiples saltos como se realiza en una red ad-hoc. A diferencia del experimento que se presenta en [73], aquí no se evalúa la capacidad de la red al incrementar gradualmente el número de enlaces secundarios, sino que el algoritmo de control de acceso y asignación de canal se encarga de seleccionar el conjunto de enlaces secundarios que cumpla con las restricciones de interferencia impuestas para las redes primaria y secundaria.

En la Figura 6.6 se observa una muestra de la distribución de los valores de SINR en receptor primario obtenidos del escenario de evaluación. Se puede observar que los valores de SINR se encuentran en el rango de -46 dB hasta 22 dB. Con esta gráfica se demuestra que el algoritmo SCPSO, utilizado para encontrar la mejor asignación de canales, evalúa partículas de una población compuesta por múltiples y diversos escenarios para encontrar la mejor solución.

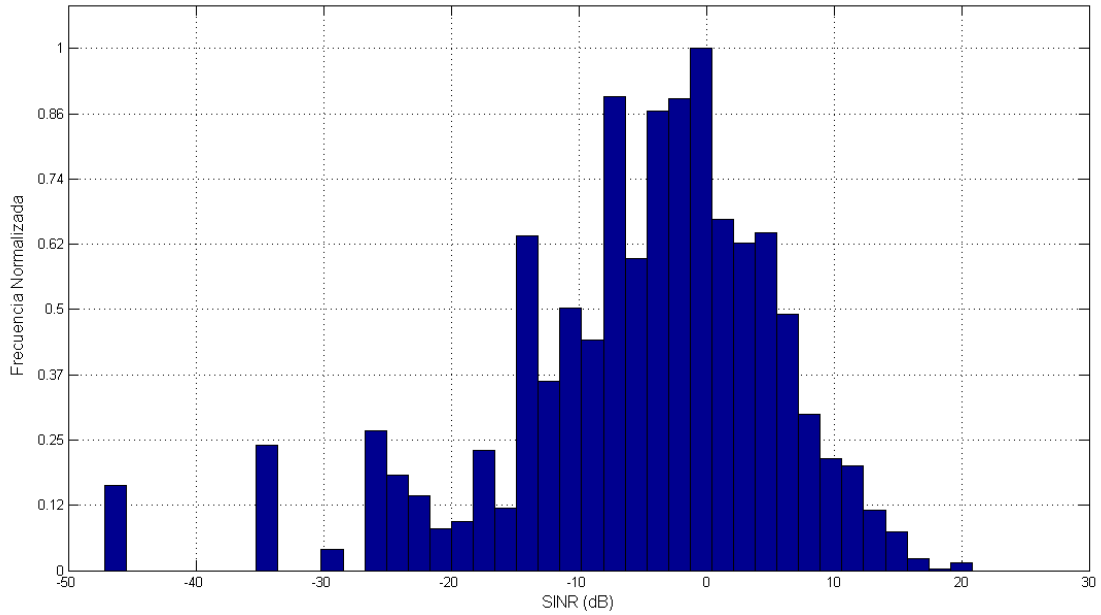


Figura 6.6. Distribución de los valores de $SINR$ obtenido del escenario de evaluación

En la Figura 6.7 se muestra el resultado del número máximo y el promedio de enlaces secundarios que pueden compartir un canal primario con un usuario primario. El número máximo de enlaces secundarios se obtiene a partir de la corrida que contiene la mejor solución encontrada (la tasa de datos del sistema más alta) de las 5000 corridas para un umbral $SINR_L$ determinado (un experimento). Por otro lado, el promedio de enlaces secundarios seleccionados, se calcula tomando en cuenta el total de enlaces secundarios seleccionados en cada una de las 5000 corridas.

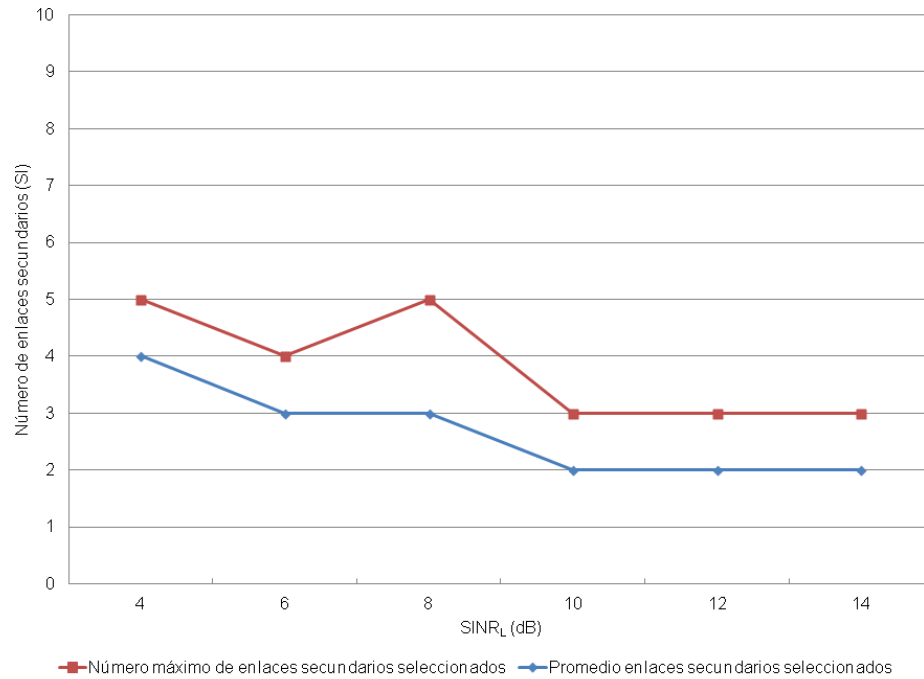


Figura 6.7. Número máximo y promedio de enlaces secundarios seleccionados

De la Figura 6.7 se puede observar que conforme se incrementa el valor de umbral $SINR_L$, el número de usuarios secundarios que la red puede soportar con un canal primario disminuye. Incrementar el valor de umbral $SINR_L$ representa incrementar la calidad de servicio de ambas redes, asumiendo que se estableció el mismo valor de umbral para ambas. Por otro lado, cuando el valor de $SINR_L$ disminuye el sistema puede atender a un mayor número de usuarios secundarios pero sacrificando la QoS de la red. Entonces, la capacidad de la red depende directamente del límite de interferencia que se establezca en la red y éste se puede controlar por el valor de umbral $SINR_L$ que se establezca.

Desde el punto de vista del operador, un valor de $SINR_L$ bajo significa que podrá atender a un mayor número de usuarios secundarios lo que se traduce en mayores ganancias si se considera la idea de cobrar a los usuarios secundarios por el acceso a la banda primaria. En contraste, desde el punto de vista del usuario, utilizar un canal en el que el sistema establece un valor de $SINR_L$ bajo, significa aprovechar una menor tasa de datos, dado que habrá una alta densidad de usuarios.

El beneficio que se logra de la compartición de espectro, en términos de eficiencia espectral, es la reutilización de espectro. Sin embargo, los riesgos son igualmente importantes a considerar, por ejemplo la densidad de usuarios secundarios permisible, ya que de no controlarse puede conducir a una "Tragedia de los recursos comunes", en el que muchos usuarios intentan acceder al mismo recurso espectral, por lo que ninguno es capaz de comunicarse de forma confiable dada la cantidad de interferencia. Por otro lado, una mayor densidad de usuarios secundarios permisible también representa una reutilización más eficiente [74]. De ahí la importancia para proveedores y reguladores del compromiso entre la densidad de usuarios secundarios permisible y la limitación de QoS.

6.4 Métricas de desempeño: resultados

En esta sección se presentan resultados del desempeño del sistema en términos de tasa de datos y probabilidad de interrupción. La Figura 6.8 muestra la tasa de datos máxima y la tasa promedio de datos que el sistema ofrece. La tasa de datos máxima del sistema es la mejor encontrada por umbral de $SINR_L$, es decir, la tasa de datos del sistema más alta dentro del grupo de 5000 corridas por umbral. En contraste, la tasa de datos promedio se obtiene considerando las tasas de datos del sistema de cada una de las 5000 corridas por umbral. La Figura 6.8 sugiere que a mayor valor de umbral de $SINR_L$, la tasa de datos disminuye. Esto es un comportamiento esperado, tomando en cuenta los resultados obtenidos del número máximo y promedio de enlaces secundarios seleccionados (ver Figura 6.7) cuya tendencia es descendente. Con un menor número de usuarios secundarios seleccionados por umbral, se tiene una menor contribución a la tasa de datos del sistema.

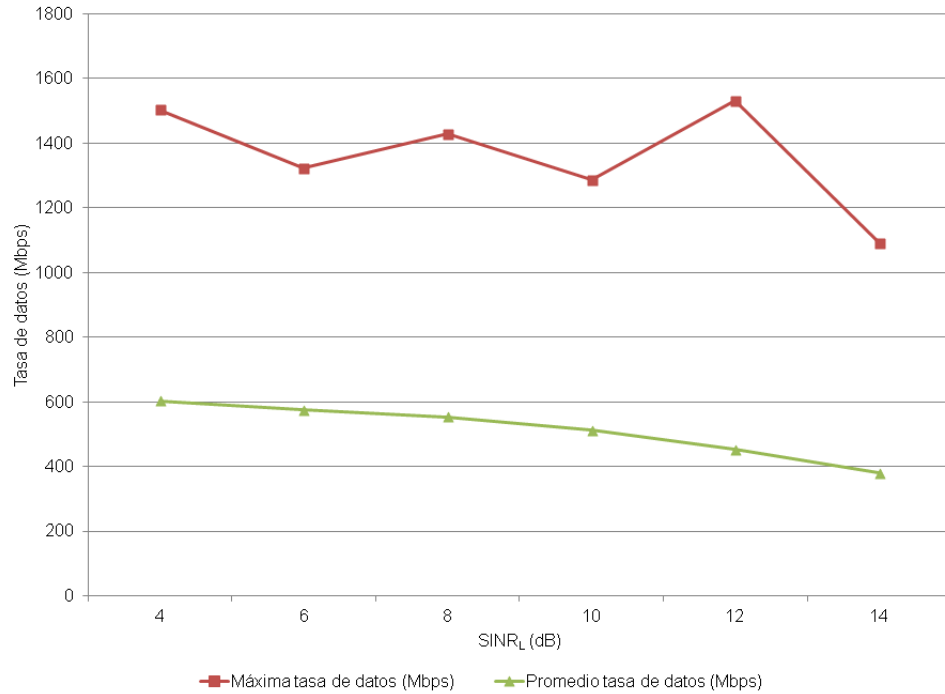
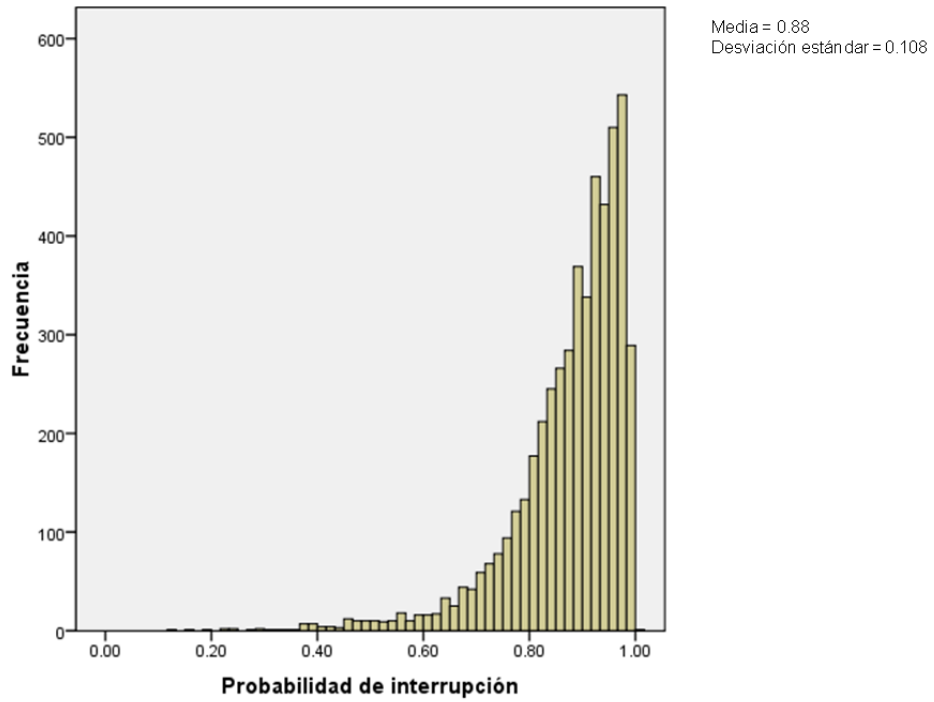
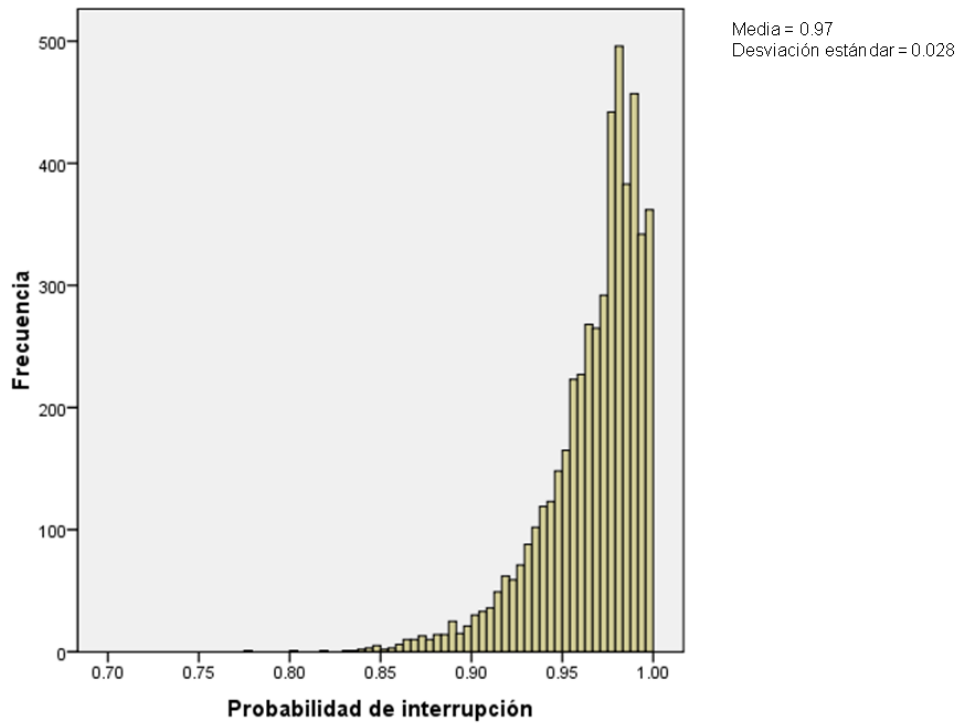


Figura 6.8. Tasa de datos máxima y promedio

En un sistema de comunicaciones inalámbrico, la probabilidad de interrupción se define como la probabilidad de que un usuario no sea atendido por el sistema, debido a que éste no cumple con la restricción de SINR. Es decir, la decisión que toma el sistema de asignar o no un canal de comunicación a un usuario depende de la cantidad de interferencia que exista en la red. Con base a los resultados de la Figura 6.6, es posible determinar la probabilidad de interrupción del sistema evaluado. En este caso, se calcula a partir del total de partículas que no logran el umbral de $SINR_L$ establecido entre el total de partículas evaluadas en una corrida. En este sentido, dado que una partícula es una solución candidata, la partícula está relacionada con el $SINR_V$ del enlace primario y el $SINR_u$ de cada uno de los enlaces secundarios que pretenden compartir el canal concurrentemente con el usuario primario, por lo tanto la probabilidad de interrupción calculada corresponde a la del sistema. La Figura 6.9 muestra la distribución de ocurrencias de las probabilidad de interrupción obtenidas para los experimentos en los que se consideraron umbrales de $SINR_L=4$ dB y $SINR_L=14$ dB respectivamente.



(a)



(b)

Figura 6.9. Probabilidad de interrupción: (a) $SINR_L=4$ dB, y (b) $SINR_L=14$ dB

De las Figuras 6.9 y 6.10, se observa que al incrementar el valor de umbral $SINR_L$ la probabilidad de interrupción se incrementa debido a que el sistema es más exigente con la QoS que se requiere, siendo más difícil para los usuarios secundarios alcanzar las restricciones de $SINR_L$. Los resultados que se muestran en la Figura 6.10 establecen que existe una probabilidad de interrupción del 88% al 97%, lo que significa que la mayoría de las partículas o soluciones evaluadas del escenario no cumplen con su correspondiente restricción de SINR. En la práctica, valores aceptables de probabilidad de interrupción se encuentran en el rango del 5% al 10%, dependiendo de factores como área de cobertura y calidad de servicio. Sin embargo, esos valores se obtienen a partir de la evaluación de un sistema inalámbrico en el que existen únicamente usuarios primarios que comparten alrededor de 992 canales por celda para el caso de un sistema celular de segunda generación o de un número infinito de canales para el caso de sistemas de tercera generación. A diferencia de esos resultados, en este trabajo se está evaluando la probabilidad de interrupción considerando únicamente un canal primario que se comparte entre usuarios primarios y secundarios. En algunos casos, se identificó que el algoritmo no encontró una solución al problema. Lo anterior sugiere que es necesario incrementar el número de iteraciones o partículas para evaluar una mayor cantidad de posibles soluciones y con esto incrementar la posibilidad de obtener mejores resultados de capacidad y calidad del sistema.

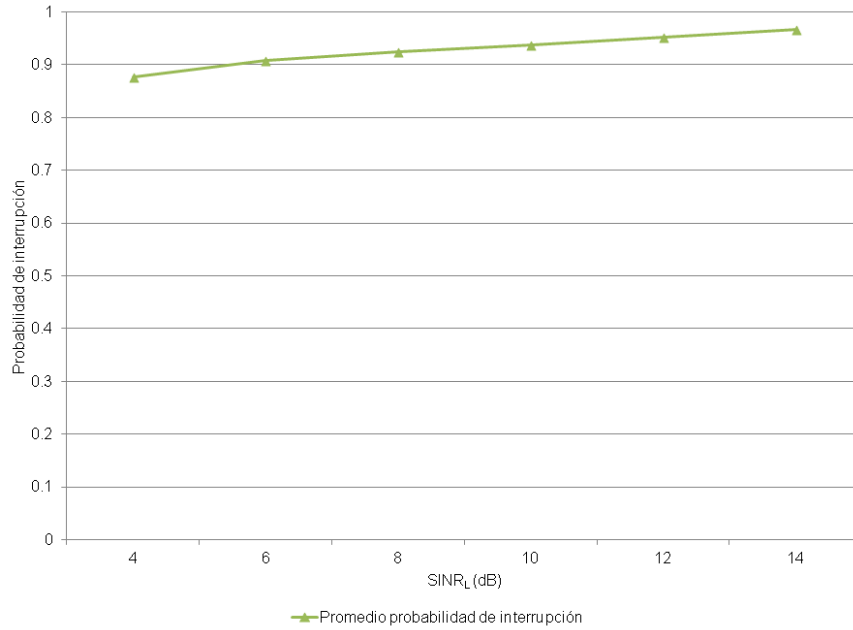


Figura 6.10. Evaluación de la probabilidad de interrupción para diferentes valores de $SINR_L$

6.5 Resumen

En este capítulo se evaluó la interferencia que percibe una red primaria a partir de la presencia de usuarios secundarios que utilizan simultáneamente un mismo canal. Lo anterior permitió proponer el radio de la zona de exclusión para un receptor primario, que define el área en la que ningún usuario secundario puede transmitir utilizando un canal primario. También se determinó el compromiso que existe entre el número de usuarios primarios y secundarios, así como la capacidad que ofrece un sistema inalámbrico heterogéneo a partir de las condiciones del entorno de propagación. El desempeño de una red heterogénea depende directamente del valor de QoS que se desee en todo el sistema, en este caso, considerando las exigencias y requerimientos de usuarios regulados y usuarios cognoscitivos. Identificar requerimientos de diseño para desplegar redes cognoscitivas y cuantificarlos, ayudará a los reguladores en el desarrollo de políticas que eviten la generación de interferencia dañina entre los sistemas inalámbricos que interactúan entre sí, principalmente a los usuarios de la red primaria. En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones de esta investigación, así como una propuesta de trabajo futuro con base en los problemas abiertos identificados a partir de los resultados de esta tesis.

Capítulo 7

Conclusiones

En noviembre de este año, la empresa mexicana Telcel anunció el lanzamiento de su nueva Red 4G LTE (Long Term Evolution por sus siglas en inglés), con la que sus usuarios podrán navegar desde sus dispositivos móviles: teléfonos inteligentes, tablets y módems, a una velocidad de 20 Mbps. Con esta nueva Red, México formará parte de los 33 países pioneros que operan, hasta este momento, esta tecnología en el mundo. Esto confirma que existe un crecimiento imparable de los datos y la proliferación de nuevos dispositivos ávidos de datos. Por tal motivo, los operadores están considerando nuevos e innovadores modelos de despliegue para redes de banda ancha móviles que consideraran macro-celdas tradicionales de gran tamaño junto con celdas más pequeñas, tales como; micro-celdas, pico-celdas y femto-celdas. Esta combinación de distintas tecnologías inalámbricas se le conoce como redes inalámbricas heterogéneas.

Esta tendencia tecnológica de desplegar redes inalámbricas con distintas características es consecuencia de que los operadores consideran difícil adquirir espectro nuevo a corto plazo (a menos que se beneficien del Dividendo Digital), sin embargo, la estrategia les permitirá apoyar la demanda creciente de banda ancha e incrementar la cobertura y capacidad de sus redes. El despliegue exitoso de estas redes heterogéneas conlleva desafíos tecnológicos que surgen de llevar el backhaul a las localidades donde se necesita cobertura y capacidad, así como también los asociados con la gestión de la movilidad, la planificación de localizaciones, la mitigación de interferencia y la planificación de recursos de radio.

Para esta y otras aplicaciones, la radio cognoscitiva se visualiza como una solución al fenómeno de escasez de espectro y saturación de señales en las bandas de frecuencia menores a los 3 Ghz, ya que es capaz de emitir, recibir y comunicarse con sus iguales sin generar interferencia al aprovechar los espacios libres existentes en el espectro. La radio cognoscitiva se considera una revolución en las comunicaciones inalámbricas, porque propone cambiar la manera de gestionar y usar el espectro radioeléctrico.

Sin embargo, se requieren aún soluciones para su implementación práctica. Por ejemplo, el terminal cognoscitivo debe buscar constantemente espectro disponible sin cometer errores. Es decir, debe haber poca probabilidad de pérdida de detección (hay señal, pero no la detecta) y de falsa alarma (no hay señal, pero considera que si está presente), para evitar interferencias con los usuarios y servicios que operan bajo licencia. Al reto de buscar *hoyos espectrales*, técnicamente denominado detección espectral, se añade el de evitar que el servicio regulado no se vea afectado por interferencias provocadas por los usuarios cognoscitivos. Para ello hay que garantizar no solo que el transmisor cognoscitivo detecte la señal del transmisor primario, sino también que el receptor secundario no se encuentre en la zona de cobertura primaria, ya que a éste le afectaría la interferencia producida por los usuarios primarios. La solución es proponer "zonas de protección" creadas a partir no solo de los resultados de la detección espectral, sino también de bases de datos con información sobre las características del entorno de propagación de los usuarios regulados, tales como SINR o área de cobertura. Para que una técnica de detección espectral sea efectiva, debe realizar el proceso de búsqueda de hoyos espectrales en forma rápida, en un gran ancho de banda y con el menor consumo de energía posible. Además de que dichos hoyos espectrales deben ser comunes en el par transmisor-receptor, por lo que requieren de un protocolo para coordinar sobre cual banda de frecuencia van a transmitir.

Además de la detección espectral, el sistema cognoscitivo debe establecer su estrategia de transmisión. Es decir, decidir cuales transmisores secundarios pueden transmitir, en cual banda de frecuencia y por cuánto tiempo. El espectro disponible encontrado en ese momento, debe distribuirse y asignarse entre los distintos usuarios secundarios que requieren transmitir información, de tal forma que se logre una máxima tasa de transferencia de datos en el sistema con poca probabilidad de error en los receptores. Una estrategia de control de acceso y asignación de canal óptima debe considerar un conocimiento preciso del entorno de propagación, medido en términos de la relación entre la señal deseada y la interferencia percibida.

A las dificultades técnicas se añaden intereses económicos, políticos y regulatorios. Por lo que los organismos reguladores deben cambiar su filosofía en la forma que asignan el espectro y establecer los mecanismos que permitan que usuarios secundarios puedan

hacer uso del espectro regulado libre, o persuadir a los usuarios regulados a renunciar a la idea de que solo ellos tienen derecho a utilizar su propio espectro.

En este capítulo se presenta un resumen de la investigación realizada y las principales contribuciones obtenidas de este trabajo, finalmente se describen futuras oportunidades para continuar con este trabajo de investigación.

7.1 Resumen de la investigación

En este trabajo de tesis, se considero 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 usuarios primarios permiten que los usuarios secundarios utilicen concurrentemente su espectro, siempre y cuando no se degrade la Calidad de Servicio de toda la red heterogénea. Se asume que los usuarios primarios están activos todo el tiempo, lo que contrasta con los modelos existentes dominantes en los que los usuarios secundarios primero detectan los espacios en blanco, permitiendo que los usuarios primarios o secundarios (pero no ambos) utilicen el canal común en cualquier momento. Se desarrolló una estrategia de control de acceso y asignación de canal que permite distribuir y asignar canales primarios a usuarios secundarios de tal forma que el conjunto de enlaces secundarios seleccionados maximicen la tasa de transferencia de datos del sistema. Para ello, el algoritmo de control de acceso y asignación de canal propuesto se basó en una versión mejorada de la técnica de Optimización Binaria por Cúmulo de Partículas (BPSO) llamada SCPSO. Esta técnica de optimización permite determinar la mejor solución de un conjunto de soluciones posibles, llamadas partículas. Cada una de ellas se evalúan con base a la Calidad de Servicio de las redes primarias y secundarias, medido en términos de la interferencia que cada una percibe en sus receptores.

Los resultados demuestran que el modelo propuesto y algoritmo de asignación de canal basado en SCPSO mantiene el compromiso entre lograr una máxima tasa de datos del sistema y una mínima probabilidad de error del sistema. Con un diseño apropiado es posible que usuarios primarios y secundarios de una red heterogénea compartan el mismo canal, al mismo tiempo.

Sin embargo, se observó que la convergencia del algoritmo de asignación de canal basado en SCPSO depende de la cantidad de usuarios secundarios y canales primarios considerados en la evaluación, además de los grados de libertad de la propia técnica SCPSO, tales como; cantidad de partículas, peso de inercia, número de iteraciones, entre otros.

Algunas lecciones aprendidas que se pueden establecer son:

1) Debe existir un límite en la distancia del enlace entre transmisor y receptor, ya que el efecto de las pérdidas por propagación tiene un impacto en la selección de los usuarios secundarios y en la tasa de datos del sistema.

2) La capacidad de transmisión de un sistema inalámbrico heterogéneo depende directamente de la capacidad individual de cada usuario cognoscitivo y de sus condiciones espaciales de propagación.

3) Es posible incrementar la eficiencia espectral, medido como el aprovechamiento que se hace una banda de frecuencia, de un sistema inalámbrico heterogéneo si se permite la compartición de los recursos espectrales.

7.2 Contribuciones

Las contribuciones obtenidas en esta tesis se resumen a continuación.

- Propuesta de un algoritmo de control de acceso y asignación de canal basado en una técnica bio-inspirada para un contexto de red inalámbrica heterogénea.
- Análisis de los compromisos entre requerimientos de diseño para el despliegue de una red cognoscitiva.
- Desarrollo de una herramienta de cómputo que permite evaluar capacidad y cobertura de una red inalámbrica heterogénea.

7.2.1 Publicación de resultados

Como resultado de esta tesis, se publicaron los siguientes artículos de revista y memorias de congresos:

- Anabel Martínez-Vargas, Ángel G. Andrade, “Comparing particle swarm optimization variants for a cognitive radio network”. Aceptado para publicarse en la revista Internacional Applied Soft Computing, noviembre del 2012.
- Anabel Martínez-Vargas, Ángel G. Andrade, “Particle swarm optimization applied to a spectrum sharing problem”. AEÜ International Journal of Electronics and Communications, Vol.66, No.12, pp. 969-978, Diciembre 2012, ISSN: 1434-8411.
- Anabel Martínez-Vargas, Ángel G. Andrade, “On evaluation of Dynamic Spectrum Access in Heterogeneous Networks”, Publicado en los Proceedings of the IASTED International Conference-Wireless Communications (WC 2010), 15-17 julio 2010, Banf, Alberta, Canada, pp.732-737, ISBN: 978-0-88986-843-4.
- Anabel Martínez Vargas, Ángel G. Andrade, “Asignación Dinámica del espectro aplicado en sistemas 4G”, Publicado en las memorias del XIV ELAVIO 2009, 9-14 de agosto de 2009, El Fuerte, Sinaloa.
- Anabel Martínez Vargas, Ángel G. Andrade, “Retos de la Migración hacia los Sistemas 4G aplicados en Ambientes Inteligentes”, Publicado en la memoria Avance en las ciencias de la Computación, del Encuentro Nacional de Computación –ENC 2008, 6-10 octubre 2008, Mexicali, Baja California, pp.126-130

7.3 Trabajo futuro

A partir de este trabajo de tesis, se identificaron aspectos que pueden considerarse como áreas de oportunidad para realizar investigación.

- En este trabajo se consideró un escenario de espectro compartido en el que se asume que una entidad central de la red secundaria toma la decisión acerca de cuantos y cuales usuarios secundarios pueden utilizar un canal primario. Esto requiere de un constante proceso de detección espectral, por parte de esta entidad, para identificar las bandas de frecuencia disponibles. Aunque el análisis y evaluación de este proceso quedó fuera de este trabajo, un error en el proceso de detección ocasionaría, ya sea, un incremento en la interferencia o un uso ineficiente del espectro. En lugar de que los nodos cognoscitivos realicen operaciones de detección espectral, se propone desarrollar algoritmos de cooperación entre los nodos cognoscitivos y no-cognoscitivos, de tal manera que intercambien entre ellos información sobre la disponibilidad de los canales primarios. A pesar de que con esta propuesta es posible eliminar el proceso de detección espectral, surge la necesidad de evaluar el compromiso existente al incrementarse el tráfico de señalización durante el intercambio de información entre los nodos cooperativos.
- El escenario de espectro compartido evaluado en esta tesis, se le conoce en la literatura como *underlay*, en el que se asume que los usuarios secundarios y primarios pueden transmitir simultáneamente sobre un mismo canal, con sus respectivas restricciones sobre el nivel de interferencia. En el capítulo 2 se describió que existe otra forma de compartir el espectro llamada *overlay*, en la que solo un usuario, ya sea primario o secundario, puede hacer uso de un canal en un instante de tiempo, teniendo prioridad sobre éste el usuario primario. Cada una de estos modos de operación de espectro compartido por separado mejora la eficiencia espectral del sistema. Sin embargo, es necesario generar nuevos paradigmas para las futuras redes cognoscitivas en las que se desarrollen algoritmos de control de acceso y asignación de canal que combinen los mecanismos *overlay* y *underlay* con la finalidad de lograr mejores resultados en la utilización efectiva del espectro. La

herramienta de cómputo propuesta en esta investigación permite evaluar y analizar el punto de conmutación óptimo para que un usuario secundario decida en que momento utilizar un modo de operación u otro de tal forma que se logre el máximo caudal eficaz.

- Dado que de los resultados se observo que obtener la máxima tasa de datos en el sistema no representa necesariamente el máximo número de usuarios secundarios seleccionados, se propone la reformulación de la función mono-objetivo utilizada en este trabajo a una multi-objetivo para tratar con este compromiso.
- Los resultados obtenidos en este trabajo, con respecto a la capacidad del sistema, superan entre un 5 % y 10% los resultados presentados en otros trabajos que evalúan escenarios similares. Sin embargo, existen otras técnicas bio-inspiradas que pueden considerarse en el algoritmo de control de acceso y asignación de canal propuesto con el fin de mejorar los resultados obtenidos.

Referencias

- [1] H. R. Karimi, M. Fenton, G. Lapierre, and E. Fournier, “European Harmonized Technical Conditions and Band Plans for Broadband Wireless Access in the 790-862 MHz Digital Dividend Spectrum,” in *2010 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum*, 2010, pp. 1–9.
- [2] B. Modlic, G. Sisul, and M. Cvitkovic, “Digital dividend; Opportunities for new mobile services,” in *ELMAR, 2009. ELMAR '09. International Symposium*, 2009, pp. 1–8.
- [3] M. Cave, C. Doyle, and W. Webb, *Essentials of Modern Spectrum Management*, 1st ed. Cambridge University Press, 2007.
- [4] M. A. McHenry, P. A. Tenhula, D. McCloskey, D. A. Roberson, and C. S. Hood, “Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal,” in *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum*, New York, NY, USA, 2006.
- [5] D. A. Roberson, C. S. Hood, J. L. LoCicero, and J. T. MacDonald, “Spectral Occupancy and Interference Studies in support of Cognitive Radio Technology Deployment,” in *1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks, 2006. SDR '06*, 2006, pp. 26–35.
- [6] M. Wellens and P. Mähönen, “Lessons Learned from an Extensive Spectrum Occupancy Measurement Campaign and a Stochastic Duty Cycle Model,” *Mobile Netw Appl*, vol. 15, no. 3, pp. 461–474, Aug. 2009.
- [7] J. M. III, “Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio Dissertation,” *Scientific American*, vol. 294, no. 3, pp. 66–73.
- [8] Beibei Wang and K. J. . Liu, “Advances in cognitive radio networks: A survey,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 5–23, Feb. 2011.
- [9] B. Jankuloska, M. Pavloski, M. Zahariev, V. Atanasovski, and L. Gavrilovska, “Efficient spectrum utilization: A cognitive approach,” in *2010 8th International Conference on Communications (COMM)*, 2010, pp. 527–530.
- [10] S. Mangold, Z. Zhong, K. Challapali, and C.-T. Chou, “Spectrum agile radio: radio resource measurements for opportunistic spectrum usage,” in *IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04*, 2004, vol. 6, pp. 3467 – 3471 Vol.6.
- [11] Chunxiao Jiang, Hao Jiang, Chunxing Jiang, Shuai Fan, Yong Ren, and Canfeng Chen, “Analysis on deployment parameters of secondary users in cognitive radio networks,” in *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2010 - MILCOM 2010*, 2010, pp. 743–748.
- [12] P. F. Marshall and P. J. Kolodzy, “A Potential Alliance for World-Wide Dynamic Spectrum Access,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum, 2010 IEEE Symposium on*, 2010, pp. 1–4.
- [13] Q. Zhao, “A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy,” *IN IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, vol. 24, pp. 79–89, 2007.
- [14] “FCC 03-289A1.” [Online]. Available: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-03-289A1.pdf.

- [15] R. Margie, "Efficiency, Predictability, and the Need for an Improved Interference Standard at the {FCC}," *Telecommunications Policy Research Conference*, 2003.
- [16] J. Kruys and L. Qian, *Sharing RF Spectrum with Commodity Wireless Technologies Theory and Practice*. .
- [17] Yiping Xing, Chetan N. Mathur, M.A. Haleem, R. Chandramouli, and K.P. Subbalakshmi, "Dynamic Spectrum Access with QoS and Interference Temperature Constraints," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 4, pp. 423–433, 2007.
- [18] Y. Wu and Z. Yang, "Coexistence of primary users and secondary users under interference temperature and SINR limit," *J. Electron.(China)*, vol. 26, no. 3, pp. 303–311, May 2009.
- [19] J. Tadrous, A. Sultan, and M. Nafie, "Admission and Power Control for Spectrum Sharing Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 6, pp. 1945–1955, Jun. 2011.
- [20] Bin Wang and Dongmei Zhao, "Performance Analysis in CDMA-Based Cognitive Wireless Networks with Spectrum Underlay," in *IEEE Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008*, 2008, pp. 1–6.
- [21] S. D. Roy and S. Kundu, "Gradual Removal of Secondary User in Cognitive-CDMA Spectrum Underlay Network," in *2011 International Conference on Devices and Communications (ICDeCom)*, 2011, pp. 1–4.
- [22] B. Wang and D. Zhao, "Scheduling for long term proportional fairness in a cognitive wireless network with spectrum underlay," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 3, pp. 1150 –1158, Mar. 2010.
- [23] R. Tandra, A. Sahai, and V. Veeravalli, "Unified space-time metrics to evaluate spectrum sensing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 3, pp. 54 –61, Mar. 2011.
- [24] M. Andersin, Z. Rosberg, and J. Zander, "Gradual removals in cellular PCS with constrained power control and noise," in , *Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1995. PIMRC'95. "Wireless: Merging onto the Information Superhighway"*, 1995, vol. 1, pp. 56 –60 vol.1.
- [25] T. Erpek, M. A. Mchenry, and A. Stirling, "Dynamic spectrum access operational parameters with wireless microphones," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 3, pp. 38–45, 2011.
- [26] M. Waheed and Anni Cai, "Evolutionary algorithms for radio resource management in cognitive radio network," in *Performance Computing and Communications Conference (IPCCC), 2009 IEEE 28th International*, 2009, pp. 431–436.
- [27] Wei Fei and Yang Zhen, "An ACO Algorithm for Sum-Rate Maximization Problem in Opportunistic Spectrum Allocation," in *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08*, 2008, pp. 1–4.
- [28] F. K. Jondral, "Cognitive Radio: A Communications Engineering View," *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, no. 4, pp. 28–33, Aug. 2007.
- [29] J. M. Peha, "Sharing Spectrum Through Spectrum Policy Reform and Cognitive Radio," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 4, pp. 708–719, Apr. 2009.
- [30] "USA: Spectrum Efficiency Working Group Report, 2002 | ICT Regulation Toolkit." [Online]. Available: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/Publication.2831.html>. [Accessed: 09-Apr-2012].

- [31] B. Freyens, "A policy spectrum for spectrum economics," *Information Economics and Policy*, vol. 21, no. 2, pp. 128–144, Jun. 2009.
- [32] B. P. Freyens, "Shared or exclusive radio waves? A dilemma gone astray," *Telematics and Informatics*, vol. 27, no. 3, pp. 293–304, Aug. 2010.
- [33] T. W. Hazlett and R. E. Muñoz, "Spectrum allocation in Latin America: An economic analysis," *Information Economics and Policy*, vol. 21, no. 4, pp. 261–278, Nov. 2009.
- [34] Qing Zhao and B. M. Sadler, "A Survey of Dynamic Spectrum Access," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, 2007.
- [35] L. Lu, X. Zhou, U. Onunkwo, and G. Y. Li, "Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, p. 28, Jan. 2012.
- [36] I. Mitola, J. and J. Maguire, G.Q., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [37] S. Filin, H. Harada, H. Murakami, and K. Ishizu, "International standardization of cognitive radio systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 3, pp. 82–89, Mar. 2011.
- [38] S. Kumar, J. Sahay, G. K. Mishra, and S. Kumar, "Cognitive Radio Concept and Challenges in Dynamic Spectrum Access for the Future Generation Wireless Communication Systems," *Wireless Pers Commun*, vol. 59, no. 3, pp. 525–535, Feb. 2011.
- [39] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, Sep. 2006.
- [40] J. Wang, M. Ghosh, and K. Challapali, "Emerging cognitive radio applications: A survey," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 3, pp. 74–81, Mar. 2011.
- [41] C. Ghosh, S. Roy, and D. Cavalcanti, "Coexistence challenges for heterogeneous cognitive wireless networks in TV white spaces," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 18, no. 4, pp. 22–31, Aug. 2011.
- [42] C. Stevenson, G. Chouinard, Zhongding Lei, Wendong Hu, S. Shellhammer, and W. Caldwell, "IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 1, pp. 130–138, 2009.
- [43] J. Wang, M. S. Song, S. Santhiveeran, K. Lim, G. Ko, K. Kim, S. H. Hwang, M. Ghosh, V. Gaddam, and K. Challapali, "First Cognitive Radio Networking Standard for Personal/Portable Devices in TV White Spaces," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum, 2010 IEEE Symposium on*, 2010, pp. 1–12.
- [44] "Standard ECMA-392 MAC and PHY for Operation in TV White Space." [Online]. Available: <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-392.htm>. [Accessed: 25-Apr-2012].
- [45] K. I. Pedersen, F. Frederiksen, C. Rosa, H. Nguyen, L. G. U. Garcia, and Y. Wang, "Carrier aggregation for LTE-advanced: functionality and performance aspects," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 6, pp. 89–95, Jun. 2011.
- [46] Z. Shen, A. Papasakellariou, J. Montojo, D. Gerstenberger, and F. Xu, "Overview of 3GPP LTE-advanced carrier aggregation for 4G wireless communications," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2012.
- [47] M. N. Alotaibi and M. A. Sirbu, "Spectrum Aggregation Technology: Benefit-Cost Analysis and Its Impact on Spectrum Value," *SSRN eLibrary*.

- [48] M. F. Hanif, M. Shafi, P. J. Smith, and P. Dmochowski, "Interference and Deployment Issues for Cognitive Radio Systems in Shadowing Environments," in *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1–6.
- [49] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [50] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [51] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, Feb. 1996.
- [52] K. E. Parsopoulos, *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*, 1st ed. IGI Global, 2010.
- [53] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948 vol.4.
- [54] J. Kennedy and R. Mendes, "Neighborhood topologies in fully-informed and best-of-neighborhood particle swarms," in *Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on Soft Computing in Industrial Applications, 2003. SMCia/03*, 2003, pp. 45–50.
- [55] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization in electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 2, pp. 397–407, Feb. 2004.
- [56] J. F. Kennedy, J. Kennedy, R. C. Eberhart, and Y. Shi, *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [57] T. Ioan Cristian, "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection," *Information Processing Letters*, vol. 85, no. 6, pp. 317–325, Mar. 2003.
- [58] L. Nunes de Castro and F. J. Von Zuben, Eds., *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*. IGI Global, 2004.
- [59] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," in *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. "Computational Cybernetics and Simulation"., 1997 IEEE International Conference on*, 1997, vol. 5, pp. 4104–4108 vol.5.
- [60] G. Pampara, N. Franken, and A. P. Engelbrecht, "Combining particle swarm optimisation with angle modulation to solve binary problems," in *The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2005*, 2005, vol. 1, pp. 89–96 Vol.1.
- [61] F. Van Den Bergh, "An analysis of particle swarm optimizers," University of Pretoria, Pretoria, South Africa, South Africa, 2002.
- [62] K. Deep and J. C. Bansal, "A Socio-Cognitive Particle Swarm Optimization for Multi-Dimensional Knapsack Problem," in *Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008. ICETET '08. First International Conference on*, 2008, pp. 355–360.
- [63] M. Clerc, "Binary Particle Swarm Optimisers: toolbox, derivations, and mathematical insights," 2005.
- [64] A. Nickabadi, M. M. Ebadzadeh, and R. Safabakhsh, "A novel particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 4, pp. 3658–3670, Jun. 2011.

- [65] A. L. V. Coelho and D. G. de Oliveira, “Dynamically tuning the population size in particle swarm optimization,” in *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*, New York, NY, USA, 2008, pp. 1782–1787.
- [66] D. Chen and C. Zhao, “Particle swarm optimization with adaptive population size and its application,” *Applied Soft Computing*, vol. 9, no. 1, pp. 39–48, Jan. 2009.
- [67] C. Avin, Y. Emek, E. Kantor, Z. Lotker, D. Peleg, and L. Roditty, “SINR Diagrams: Convexity and Its Applications in Wireless Networks,” *J. ACM*, vol. 59, no. 4, pp. 18:1–18:34, Aug. 2012.
- [68] J. Hwang and H. Yoon, “A mixed spectrum management framework for the future wireless service based on techno-economic analysis: The Korean spectrum policy study,” *Telecommunications Policy*, vol. 33, no. 8, pp. 407–421, Sep. 2009.
- [69] J. C. Bansal, P. K. Singh, M. Saraswat, A. Verma, S. S. Jadon, and A. Abraham, “Inertia Weight strategies in Particle Swarm Optimization,” in *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2011 Third World Congress on*, 2011, pp. 633–640.
- [70] J. G. Andrews, R. K. Ganti, M. Haenggi, N. Jindal, and S. Weber, “A primer on spatial modeling and analysis in wireless networks,” *Comm. Mag.*, vol. 48, pp. 156–163, Nov. 2010.
- [71] R. K. Ganti and M. Haenggi, “Interference and Outage in Clustered Wireless Ad Hoc Networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 4067–4086, Sep. 2009.
- [72] P. Gupta and P. R. Kumar, “Towards an information theory of large networks: an achievable rate region,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 8, pp. 1877–1894, Aug. 2003.
- [73] M. Vu, N. Devroye, M. Sharif, and V. Tarokh, “Scaling Laws of Cognitive Networks,” in *2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007*, 2007, pp. 2–8.
- [74] J. Lee, J. G. Andrews, and D. Hong, “Spectrum-Sharing Transmission Capacity,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 9, pp. 3053–3063, Sep. 2011.