

ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO APLICADAS EN REDES INALÁMBRICAS DE NUEVA GENERACIÓN

Trabajo de Grado en la Modalidad de Monografía

Presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Redes de
Nueva Generación

Jorge Edison Mora Arroyo

Asesor: Héctor Julián Parra

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Especialización en Redes de Nueva Generación
Pasto, Colombia
2021**

Dedicatoria

*A Dios, que en su infinita sabiduría ha labrado mi destino;
a mis padres, Jorge y Elsy por enseñarme que la educación es la única y mejor herencia
para nuestros hijos;
a mi esposa María Camila, por ser mi complemento, por su paciencia, y por caminar junto a
mí en los momentos más difíciles;
a mi hija Laura María, por alegrar día a día mi existencia y motivarme a ser un mejor ser
humano;
a mi familia y amigos.*

Agradecimientos

Al Ing. Héctor Julián Parra por su compromiso, orientación y apoyo durante todo el desarrollo de esta monografía.

A la Ing. María Cristina Rodríguez y al Ing. Diego Fernando Vasco, por sus comentarios positivos y recomendaciones durante el inicio de la propuesta de trabajo de grado de la Especialización en Redes de Nueva Generación.

A todos aquellos que de alguna u otra manera contribuyeron para que la finalización de este trabajo de investigación sea una realidad.

JORGE EDISON MORA ARROYO

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| 2. JUSTIFICACIÓN..... | 11 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 13 |
| 4. APOORTE INVESTIGATIVO..... | 14 |
| 5. OBJETIVOS..... | 15 |
| 5.1 General | 15 |
| 5.2 Específicos..... | 15 |
| 6. ESTADO DEL ARTE..... | 16 |
| 7. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO..... | 23 |
| 7.1 Asignación Dinámica de Espectro (DSA)..... | 23 |
| 7.2 Radio Cognitivo (CR) | 43 |
| 7.3 Redes de Nueva Generación (NGN) | 45 |
| 7.4 5G | 46 |
| 7.5 Celdas Pequeñas (Small Cells) | 47 |
| 7.6 Redes Ultradensas (UDN) | 49 |
| 7.7 Redes Heterogéneas (HetNets)..... | 50 |
| 7.8 Técnicas de Optimización y Herramientas Matemáticas para DSA | 51 |
| 8. ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS DE DSA..... | 56 |
| 8.1 Análisis comparativo de CSA y OSA | 56 |
| 8.2 Ventajas y desventajas de la DSA..... | 62 |
| 8.3 Problemas abiertos de investigación asociados de la DSA..... | 64 |
| 9. CONCLUSIONES | 73 |
| 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Tipos de celdas y su aplicación en comunicaciones inalámbricas..... | 48 |
| Tabla 2 Comparación de las características más importantes de las técnicas CSA y OSA. | 57 |
| Tabla 3 Comparación de aspectos que usan las técnicas CSA y OSA para acceder al espectro..... | 61 |
| Tabla 4 Análisis comparativo de diferentes herramientas de AI aplicadas en CSA..... | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Aproximación taxonómica del modelo de acceso dinámico al espectro..... | 23 |
| Figura 2 Esquema general de CSA..... | 26 |
| Figura 3 Esquema general de OSA..... | 31 |
| Figura 4 Ilustración de oportunidad espectral..... | 35 |
| Figura 5 Comparación gráfica de los modelos de asignación espectro estático y dinámico. | 41 |
| Figura 6 Ciclo cognitivo en CR..... | 44 |
| Figura 7 Ciclo cognitivo para DSA..... | 44 |
| Figura 8 Despliegue de Small Cells en un escenario de comunicación inalámbrico. | 48 |
| Figura 9 Ejemplo de una Red Ultra Densa. | 49 |
| Figura 10 Ejemplo de una Red Heterogenea | 50 |
| Figura 11 Estructura de juegos no cooperativos en GT..... | 55 |
| Figura 12 Estructura de juegos cooperativos en GT..... | 55 |
| Figura 13 Comportamiento del retardo de transmisión en CSA..... | 57 |
| Figura 14 Comportamiento del retardo de transmisión en OSA..... | 58 |
| Figura 15 Desempeño de la técnica CSA..... | 59 |
| Figura 16 Desempeño de la técnica OSA | 60 |
| Figura 17 Representación gráfica del modelo CSA de antena única. | 67 |
| Figura 18 Representación gráfica del modelo CSA de múltiples antenas..... | 68 |
| Figura 19 Hoja de ruta para la solución de problemas abiertos de investigación en sistemas OSA..... | 69 |

LISTA DE TERMINOS Y ABREVIATURAS

| | |
|----------------|--|
| AI | <i>Artificial Intelligence</i> - Inteligencia Artificial. |
| AMI | <i>Advanced Metering Infrastructure</i> – Infraestructura de Red Avanzada. |
| AWGN | Additive White Gaussian Noise – Ruido Blanco Gaussiano Aditivo. |
| C-CSI | <i>Cross-Channel State Information</i> – Información del Estado de Canal Cruzado. |
| CN | <i>Converging Networks</i> - Redes Convergentes. |
| CR | <i>Cognitive Radio</i> - Radio Cognitiva. |
| CSA | <i>Concurrent Spectrum Access</i> - Acceso Concurrente al Espectro. |
| CSI | <i>Channel State Information</i> – Información del Estado del Canal. |
| DySPAN | <i>New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks</i> – Nuevas Fronteras En Redes de Acceso Dinámico al Espectro. |
| DSA | <i>Dynamic Spectrum Access</i> - Asignación Dinámica de Espectro. |
| EV | <i>Evolutionary Computing</i> - Computación Evolutiva. |
| FAN | <i>Field Area Network</i> – Red de Área de Campo. |
| FCC | <i>Federal Communications Commission</i> – Comisión Federal de Comunicaciones. |
| GT | <i>Game Theory</i> - Teoría de Juegos. |
| HetNets | <i>Heterogeneous Networks</i> - Redes Heterogéneas. |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. |
| IoT | <i>Internet of Things</i> – Internet de las Cosas. |
| ISM | <i>Industrial, Scientific, and Medical</i> - Industria, Ciencia y Medicina. |
| ITU | <i>International Telecommunications Union</i> - Unión Internacional de Telecomunicaciones. |
| MBAN | <i>Medical Body Area Network</i> – Red de Área Corporal. |
| MIMO | <i>Multiple-Input Multiple-Output</i> – Múltiples Entradas y Múltiples Salidas. |
| MO | <i>Multi-Objective</i> – Multiobjetivo. |
| NGN | <i>New Generation Networks</i> - Redes de Nueva Generación. |
| NE | <i>Nyquist Equilibrium</i> - Equilibrio de Nyquist. |
| OFDMA | <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> – Acceso Múltiple por División |

de Frecuencia Ortogonal.

| | |
|-------------|--|
| OSA | <i>Opportunistic Spectrum Access</i> – Acceso Oportunista al Espectro. |
| PU | <i>Primary User</i> - Usuario Primario. |
| QoS | <i>Quality of Service</i> - Calidad de Servicio. |
| RATs | Radio Access Technologies - Tecnologías de Acceso Radio. |
| RF | <i>Radiofrequency</i> - Radiofrecuencia. |
| SBS | <i>Small Base Station</i> - Estación base de Celda Pequeña. |
| SINR | <i>Signal to Interference Plus Noise Ratio</i> – Relación Señal Interferencia más Ruido. |
| SU | <i>Secondary User</i> - Usuario Secundario. |
| UDN | <i>Ultra-Dense Networks</i> - Redes Ultradensas. |
| UWB | <i>Ultra Wideband</i> – Banda Ultraancha. |
| WAN | <i>Wide Area Network</i> – Red de Área Amplia. |

1. INTRODUCCIÓN

El incremento exponencial de dispositivos móviles e inalámbricos interconectados, demandan de manera permanente el uso de diferentes recursos radio, cuya disponibilidad está limitada por: ancho de banda, densidad de usuarios, potencia de transmisión o interferencia, esquema de modulación y técnicas de acceso al medio, características inherentes a la naturaleza variable y dinámica de un canal de comunicaciones. Lo anterior, permite explorar continuamente alternativas para el uso eficiente de los recursos finitos espectrales, con el fin de estudiar y analizar modelos emergentes de acceso dinámico al espectro (Mora et al., 2019; Mora, 2020).

Actualmente, existen políticas de administración del espectro radioeléctrico que otorgan licencias de operación en canales de frecuencia estáticos o fijos. Dicha asignación, ha provocado escasez de bandas de frecuencia libres para operar nuevos servicios. El mejoramiento de la distribución del espectro se ha planteado con el desarrollo de nuevas técnicas de acceso combinadas con herramientas matemáticas y de optimización, dando paso así a modelos de redes dotadas con cierta inteligencia, las cuales se convierten en un paradigma de las comunicaciones inalámbricas, en donde los dispositivos de comunicación adaptan sus parámetros de operación para comunicarse de manera eficiente, evitando interferencias nocivas con otros dispositivos (Liang, 2020).

El uso de técnicas de espectro expandido se ha utilizado como una opción de coexistencia entre usuarios licenciados y usuarios cognitivos o no licenciados. Estas técnicas permiten una transmisión con niveles de potencia más bajos que las modulaciones convencionales al expandirse en el dominio de la frecuencia. Las redes inalámbricas de nueva generación dependen del aprovechamiento dinámico del espectro, por lo tanto, deben adaptar sus parámetros de radiocomunicación de manera autónoma e inteligente, empleando modelos innovadores de asignación de recursos espectrales.

Por consiguiente, en esta monografía se estudia y analiza la asignación dinámica de espectro, como una posible solución para optimizar el uso de dicho recurso, compartiendo o reusando bandas de frecuencia entre las tecnologías y servicios inalámbricos que así lo requieran, bajo la consideración de que la interferencia es dañina, cuando es lo suficientemente significativa como para desencadenar una

interrupción en el servicio a cualquiera de los usuarios de la red, teniendo en cuenta que para garantizar la transmisión exitosa entre los diferentes usuarios que comparten simultáneamente un canal de Radiofrecuencia (RF, *Radiofrequency*), es imperativo mantener el nivel de interferencia del sistema por debajo de un valor umbral inofensivo. Lo descrito anteriormente implica el acceso limitado a una cantidad excesiva de usuarios y/o dispositivos a la red, de tal forma que se logre una coexistencia mutualista y pacífica con todos los elementos que componen el sistema.

En este contexto, los esfuerzos de este estudio están encaminados a analizar los potenciales beneficios y retos particulares de la asignación dinámica de espectro en redes inalámbricas de nueva generación, para el reuso espectral, bien sea, compartiendo el recurso de manera concurrente, o reciclándolo cuando se encuentre disponible.

2. JUSTIFICACIÓN

La evolución progresiva del sector de las telecomunicaciones hacia las Redes Heterogéneas (HetNets, *Heterogeneous Networks*), las Redes Convergentes (CN, *Converging Networks*) o Redes de Nueva Generación (NGN, *New Generation Networks*), está ligada a la creciente y acelerada demanda de servicios móviles e inalámbricos por parte de los usuarios, constituyendo así el requerimiento principal de una infraestructura, gestión, administración y regulación adecuada, para el transporte de información que garantice los estándares mínimos de las necesidades actuales de conectividad de las personas, máxime cuando nos encontramos inmersos en una crisis de salud pública que ha detonado enormemente el uso de diferentes servicios de telecomunicaciones (Mora, 2020).

Evidencia de ello son los enormes esfuerzos de los diferentes operadores a nivel nacional e internacional para poder migrar a tecnologías 4G, 4.5G y 5G, con el fin de mejorar la experiencia de usuario; con redes de mayor ancho de banda, bajo consumo de potencia, baja latencia y soporte de mayor número de conexiones estables; sin embargo, dichas mejoras muestran también, que los recursos radio son limitados y que es necesario implementar estrategias de acceso y gestión que permitan compartir y reusar el espectro, haciendo uso de los recursos disponibles de manera eficiente, sin que ello implique degradación de la Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) requerida (Martínez, 2015; Salgado, 2016; Mora, 2020).

En correspondencia a lo anterior, es importante estudiar y analizar las diferentes técnicas de DSA que se puedan aplicar en redes inalámbricas de nueva generación, debido a su relevancia en el desempeño de un sistema de comunicaciones, puesto que con el uso adecuado de diversas estrategias se puede lograr una mejor utilización de los recursos finitos espectrales, aunado a un aumento considerable en cobertura y densidad de capacidad, traducidas en mejor experiencia de usuario (Salgado, 2016; Liang, 2020; Mora, 2020).

En este contexto, y según (Zhang et al., 2019) se propone y se reconoce a la Asignación Dinámica de Espectro como una técnica eficaz para la gestión y administración de recursos radio, la cual permite alcanzar los requisitos necesarios para la implementación de los miles de millones de dispositivos de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), que se prevé se desplegaran en un futuro cercano en redes móviles e inalámbricas de nueva generación, permitiendo así un uso

eficiente del espectro y reduciendo drásticamente su necesidad, pasando de 76 a 19 GHz, aproximadamente.

Así, una sólida revisión y posterior análisis del estado del arte facilita la determinación de problemas abiertos de investigación, los cuales se pueden realizar como trabajos futuros con el fin de aportar de manera significativa al desarrollo de la economía digital y la Industria 4.0.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El rápido crecimiento de los nuevos servicios móviles e inalámbricos, inherentes a las necesidades de una sociedad hiperconectada, demandan cada vez más el acceso casi inmediato y permanente de diferentes recursos radio, lo que implica atender de manera cuidadosa, aspectos de estudio como la prevista escasez del espectro electromagnético y su considerable subutilización en las radiocomunicaciones actuales, motivando así el análisis de modelos emergentes de control de interferencia, control de potencia y acceso dinámico al espectro; basando su principio en un conjunto de técnicas soportadas en las teorías de la información y las telecomunicaciones. Es así como el concepto de análisis y control de parámetros de RF comprende diferentes campos de acción, tales como: la Inteligencia Artificial (AI, *Artificial Intelligence*), la Computación Evolutiva (EV, *Evolutionary Computing*), la Teoría de Juegos (GT, *Game Theory*), los Principios de Optimización y el Aprendizaje Automático, entre los más relevantes.

De esta manera, el incremento en el desarrollo de aplicaciones y su tiempo de uso (el cual se ha disparado aún más debido a la imperante necesidad de conectividad causada por la actual crisis de salud pública generada por la pandemia desatada por el virus COVID-19), así como de nuevas tecnologías, han generado una mayor cantidad de transmisión de datos y demanda de los recursos finitos espectrales; gestando así una percepción equívoca de que existe una escasez de espectro, sin embargo; diversos estudios han concluido que se trata de un problema de acceso, administración, control y uso del recurso, puesto que se ha podido observar que mientras ciertas bandas se encuentran contaminadas por una excesiva polución debida a altos niveles de piso de ruido por interferencias, otras presentan un desaprovechamiento significativo, propiciando así una coexistencia radioeléctrica heterogénea inequitativa. Por lo tanto, las diferentes técnicas de DSA se potencializan como una solución para optimizar el uso de dicho recurso, compartiendo o reciclando bandas de frecuencia entre las tecnologías y servicios inalámbricos que así lo requieran. En virtud de lo expuesto surge el siguiente cuestionamiento como planteamiento del problema, para su estudio, análisis e interpretación.

¿Cuáles son las ventajas de emplear técnicas de Acceso Dinámico al Espectro en Redes Inalámbricas de Nueva Generación para realizar un uso eficiente de recursos radio?

4. APORTE INVESTIGATIVO

El aporte de este estudio radica en la identificación de las aproximaciones teóricas de solución al problema de DSA en redes inalámbricas de nueva generación, con el fin de proporcionar de manera estructurada y organizada información sobre métodos innovadores para el uso eficiente del espectro, mediante la disertación y análisis crítico orientado a la determinación de problemas abiertos de investigación que se puedan plantear como trabajos futuros, en diferentes niveles académicos como maestría y/o doctorado.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Elaborar un estado del arte mediante la revisión y análisis de técnicas de acceso dinámico al espectro que se empleen en redes inalámbricas de nueva generación, indicando o describiendo la eficiencia en el uso de recursos radio.

5.2 Específicos

- ✓ Seleccionar de manera crítica la información más relevante de técnicas de acceso dinámico al espectro que se puedan emplear en redes inalámbricas de nueva generación para su posterior análisis y discusión.
- ✓ Analizar comparativamente las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas de asignación dinámica de espectro previamente seleccionadas.
- ✓ Determinar temas de investigación que permitan su desarrollo de acuerdo con el estado del arte en trabajos futuros.

6. ESTADO DEL ARTE

En la literatura especializada se pueden consultar varias propuestas de esfuerzos relacionados con DSA aplicado al control y administración de Tecnologías de Acceso Radio (RATs, *Radio Access Technologies*), cada uno con objetivos particulares de optimización, empleando diferentes técnicas y herramientas matemáticas para su modelamiento; de esta manera se realiza a continuación una breve descripción de los trabajos más relevantes a nivel internacional que en menor o mayor proporción cimientan la base del presente trabajo de investigación documental, hasta el momento.

En (Mitola, 1999; Miramá, 2012; Abbas, 2015; Salgado, 2016) se plantea que la mayoría de los avances en investigación en CR han llevado a la sinergia de metodologías y técnicas en las teorías de la información hacia el aprovechamiento del espectro electromagnético. Entre las metodologías, se encuentran las ciencias de la computación, específicamente, la AI. En consecuencia, estas áreas de la ciencia han permitido que los campos de acción de la tecnología se extiendan a subáreas del conocimiento, como la GT, los algoritmos metaheurísticos, los algoritmos bioinspirados, la lógica difusa, los algoritmos genéticos, los algoritmos evolutivos, las redes neuronales, entre otras.

De esta manera, y teniendo en cuenta que en la mayoría de los esfuerzos realizados se busca principalmente la minimización de los efectos nocivos de la interferencia (SINR) hacia la red primaria, en (Zhang, 2012) se propone un algoritmo de control de acceso que maximiza la cantidad de SU's admitidos al sistema, considerando como restricción la QoS de las redes primaria y secundaria, medida en términos de la interferencia presente en el sistema. Básicamente, controla la potencia de transmisión de los SU's, mediante un algoritmo de Control de Potencia Distribuido con Protección de QoS para SU Activos (Distributed Control Power with Active SU QoS Protection, DCP-AQP). Para lo anterior, se distribuyen en el sistema primario múltiples puntos de medición (MP) de interferencia presente en el sistema. Cada MP cuenta con una alarma, de tal forma que mientras la interferencia se mantenga por debajo de un nivel pre-establecido, el algoritmo informa a los SU's que pueden incrementar su potencia de transmisión para garantizar la calidad de su enlace durante el tiempo que dure su transmisión. Por el contrario, si la medición de la interferencia no cumple con el nivel de alarma, los MP's le indican a los SU's que disminuyan su potencia de transmisión a un nivel mínimo que permita mantener la

QoS del sistema primario, pero al mismo tiempo garantice el éxito de la transmisión de los SU's.

En (Wang, 2008 & Tradous, 2011), se presentan propuestas basadas en un grupo de PU's que comparten un receptor primario y un grupo de SU's pueden utilizar uno o varios canales simultáneamente con ellos, sólo si satisfacen su SINR, manteniéndose dentro del rango de potencia permitida y su interferencia acumulada en el receptor primario está por debajo del umbral establecido. El problema se divide en dos objetivos independientes de optimización: 1) maximizar el número de SU's admitidos y, 2) maximizar la tasa de datos de los SU's admitidos. Para el primer caso, se utiliza un algoritmo de control de potencia, sin embargo, necesita un gran número de operaciones para manejar la ocurrencia de diversos eventos para seleccionar el grupo de SU's que pueden coexistir con los PU's. Para el segundo caso, se aplica programación geométrica secuencial, una técnica que consiste en resolver secuencialmente el problema original a través de una aproximación a la función objetivo. Buscando así maximizar la tasa de transmisión de los SU's sujeta a restricciones de SINR tanto en los PU's como SU's, y un umbral de interferencia en los PU's. El modelo se evalúa mediante programación geométrica bajo dos criterios: asignación de igual tasa de datos y asignación de tasa de datos proporcional. Considerando el modelo presentado en (Wang, 2011), el trabajo en (Roy, 2011) muestra un esquema de eliminación de SU's cuando la interferencia en la estación base primaria (BS) supera el límite de interferencia establecido. Sin embargo, este algoritmo de eliminación no mejora la tasa de datos de la red secundaria comparada con los resultados de (Wang, 2008). Aunque un SU logre un buen nivel de SINR, éste no se tomará en cuenta en el cálculo de la tasa de datos, porque genera interferencia dañina hacia la BS primaria y, con esto, se mantiene el nivel de QoS requerido por los PU's (Martínez, 2015).

En (Wang, 2010), se modela el problema de espectro compartido en una red celular como un problema de calendarización. El objetivo es lograr una tasa de datos justa para todos los SU's de la red secundaria. Se proponen dos heurísticas de calendarización: por utilidad multi-usuario y por umbral de interferencia multi-usuario. En la primera, las prioridades de transmisión de los SU's se determinan por sus contribuciones a la función de utilidad, mientras que en la segunda las prioridades de transmisión se establecen considerando la interferencia de la red primaria. Lo anterior permite establecer radios de protección a los SU's donde las transmisiones de otros SU's no son permitidas dentro de esta zona, evitando las

transmisiones simultáneas que puedan ocasionar interferencia mutua. Los resultados muestran que establecer radios de protección a los SU's mejora significativamente su tasa de datos (Martínez, 2015).

A diferencia de los trabajos anteriores, existen otras propuestas que modelan el problema de espectro compartido como un problema Multiobjetivo (MO, *Multi-Objective*). Por ejemplo, en (Liu, 2013) los autores determinan el compromiso en un sistema de comunicación móvil de futura generación, entre el máximo número de SU's (llamados femto-celdas) con demanda de QoS y la máxima razón de reuso del recurso espectral. El criterio que utilizan para decidir sobre el reuso del espectro, se basa en la distancia que existe entre dos femto-celdas, definida como umbral de distancia D_i , si esta distancia es menor que D_i , éstas no podrán compartir el recurso espectral. El problema MO se convierte en un problema mono-objetivo en el que su transformación incluye una ponderación que disminuye con las iteraciones y se resuelve aplicando el método exacto de Branch and Bound. Sin embargo, en el modelo MO propuesto no se considera la protección contra la interferencia de los PU's, es decir, minimizar la interferencia hacia la macrocelda, la cual es provocada por el reuso del mismo recurso en las femto-celdas (Martínez, 2015).

En (Liu, 2013 & Martínez, 2013, 2015) se relacionan esfuerzos enfocados además de la eficiencia espectral de los SU's, la eficiencia espectral de los PU's para el cálculo de la eficiencia espectral de la red heterogénea. Así mismo, se reduce el consumo de recursos computacionales, ya que la mayoría de los trabajos anteriormente descritos, además del método de solución del problema, requieren implementar algoritmos de eliminación de SU's para buscar el grupo de SU's que pueden coexistir con el PU, removiendo parcialmente SU's hasta lograr que la interferencia se mantenga a un nivel tolerable para el PU. Lo anterior implica que se realicen un mayor número de operaciones, generando complejidad adicional al problema, además de que existe la posibilidad de que SU's con niveles aceptables de SINR no se les asigne un canal de comunicación. Otra diferencia encontrada es que aborda el compromiso entre la máxima densidad de SU's permisible y la máxima tasa de datos en el sistema heterogéneo, teniendo en cuenta así, la importancia de abordar este compromiso, puesto que al obtener la máxima tasa de datos en el sistema heterogéneo no representa necesariamente el máximo número de SU's seleccionados, lo cual se pretende validar en el presente trabajo.

En (Bayat, 2011) se propone un algoritmo de acceso al espectro distribuido, enfocado en la retransmisión de redes en CR, con múltiples PU y múltiples CU. El

eje central del algoritmo propuesto se enfoca en que los PU intercambien con los CU la cantidad de tiempo permitido de acceso en el espectro, de manera que ambos usuarios se encuentren compensados. Dentro del análisis numérico se observa que el algoritmo puede lograr un gran desempeño, comparable al alcanzado por un algoritmo de centralización óptima, y superando al algoritmo de emparejamiento aleatorio. También demuestra la capacidad de lograr, un alto número de intercambios con bajos gastos generales y menor complejidad. Gracias a la reemisión cooperativa, se obtiene una mayor velocidad de la que se lograría sin repetición cooperativa, es decir, en transmisión directa (Salgado, 2016).

Otro esfuerzo realizado en (Liang, 2009) incorpora la idea de elaborar una implementación distribuida que se ocupe de la mejor asignación de CU, para la detección de los PU, de manera que la probabilidad de error de detección se reduzca al mínimo. Proponen un algoritmo de eliminación, para encontrar de manera eficiente la mejor asignación; mediante la elaboración de conexión entre el problema actual, y el problema de inferencia en el contexto de modelos probabilísticos.

En (Hasegawa, 2014) se enseña una solución basada en algoritmos de optimización para mejorar el proceso decisorio en el uso de recursos de radio en redes cognitivas inalámbricas heterogéneas. En las redes con manejo centralizado, se propone un nuevo algoritmo de optimización cuya solución se garantiza que sea igual de óptima, para evitar un aumento exponencial de la complejidad computacional en redes inalámbricas en gran escala; por tanto, se modela el problema de optimización como un problema de costo mínimo de flujo y se encuentra una solución del problema en tiempo polinómico. Para las redes de gestión descentralizada, se propone un algoritmo distribuido utilizando la dinámica de minimización de la energía distribuida de la red neuronal Hopfield.

En (Liu, 2012) se presenta una propuesta enfocada a la asignación de espectro para CR distribuido, tomando en consideración que los sistemas de CR son capaces de detectar las condiciones ambientales reinantes y automáticamente la adaptación de los parámetros de funcionamiento, con el fin de mejorar el sistema y el rendimiento de la red. A partir de las capacidades de CR el enfoque de esta investigación se enfoca en optimizar cada dispositivo inalámbrico individual y sus enlaces de comunicación de un solo salto utilizando la información del ambiente de los dispositivos cercanos dentro de la red inalámbrica. Suponiendo nodos inalámbricos estacionarios, todos los enlaces de comunicación inalámbricos emplean

multiplexación por división de frecuencia ortogonal no contigua (NC-OFDM) con el fin de permitir el acceso de espectro dinámico (DSA). El enfoque propuesto intenta reducir al mínimo la tasa de error de bit, minimizar la interferencia fuera de banda (OOB) y maximizar el rendimiento general utilizando una función de adecuación multiobjetivo. Para esto se emplean algoritmos genéticos los cuales se emplean para desarrollar la optimización necesaria (Salgado, 2016).

Existen también propuestas haciendo uso de redes neuronales artificiales, la mayoría de las diferentes combinaciones de ellas han sido adoptadas en la detección del espectro para CR (Fehske, 2005 & Zhu, 2008) como clasificador de señales utilizando la extracción de futuras señales de ciclo estacionario. Por tal razón, el uso de las ANN y la combinación de señales ciclo estacionarias garantizan una clasificación estable, eficiente y fiable, reduciendo tiempos de procesamiento mediante la realización de una cantidad representativa de cálculos. No obstante, en (Fehske, 2005) se emplea un algoritmo de detección de espectro basado en Wireless Mesh Networks. Este última muestra un mejor rendimiento en la precisión y velocidad en comparación a los algoritmos por teoría bayesiana.

Por otra parte, los algoritmos genéticos han sido ampliamente adoptados para resolver optimización multiobjetivo y problemas de configuración dinámica en CR, en respuesta al cambiante entorno inalámbrico de las redes de comunicación como se propone en (Rondeau, 2004, Newman, 2006; Yong, 2009).

Otro esfuerzo asociado con la aplicación de algoritmos evolutivos se encuentra en (He, 2010) en donde se emplea una función ideal de aptitud para acelerar tiempos de procesamiento, debido a que es importante anticiparse a las que serían varias evaluaciones para producir una sola generación y, de este modo, producir un resultado útil. En concordancia, un algoritmo genético mantiene una población de soluciones candidatas para un problema dado, en donde se evalúa la condición física de la población para obtener aquellos individuos que pueden formar una nueva generación o experimentar mutación para seguir aumentando los niveles de aptitud, asociados a la convergencia de una solución óptima.

En (Abbas, 2015 & Matinmikko, 2013) se emplea la teoría de lógica difusa en CR para resolver los problemas en función de la asignación del ancho de banda, estudiando de antemano la interferencia y la administración de la energía, los anteriores como métodos de evaluación en la correcta asignación del espectro. No obstante, diferentes resultados de estudios han detallado tópicos como la inferencia

difusa centralizada, que asigna los anchos de banda correspondientes a la intensidad de tráfico y la prioridad del servicio. Así pues, esta última detalla cómo los CU tienen que presentar solicitudes de ancho de banda al administrador primario de la red (Abbas, 2015). Del mismo modo el administrador analiza el tráfico desde la cola y verifica los retardos producidos por la demora en la transmisión de paquetes. En otras palabras, se determina la latencia para el acceso a CU.

En cuanto al uso de la GT como herramienta para la asignación de espectro, acceso y administración de recursos radio se encuentran aportes interesantes en (Chen, 2010; Jayaweera, 2011; Losifidis, 2011), donde se plantean juegos de subastas, teniendo en cuenta que los jugadores son los compradores que debe seleccionar la estrategia de oferta adecuada con el fin de maximizar su utilidad percibida (es decir, el valor de los artículos adquiridos menos el pago al vendedor). El concepto de juegos de subastas se ha aplicado con éxito al arrendamiento espectro dinámico de cooperación expuesto en (Chen, 2010 & Jayaweera, 2011); así como a la asignación de espectro dinámica en (Losifidis, 2011). Los fundamentos de los juegos de subastas y los desafíos abiertos de la aplicación de juegos de este tipo en el campo de la gestión del espectro se discuten detalladamente en (Fu, 2008).

Para el caso de uso de juegos estocásticos o juegos de Markov, en (Latifa, 2012) se plantea su utilización en el modelamiento del comportamiento codicioso de un escenario CR, donde cada CU trata de aprender de su mejor respuesta, con el fin de mejorar sus estrategias y comportamiento en el tiempo. En (Zhu, 2010) se presenta de manera particular una estrategia de solución basada en aprendizaje sin pérdida, lo cual permite a los jugadores que inician y no están informados adquirir el conocimiento sobre su estado en el entorno del juego repetido. El concepto de pérdida se relaciona con el beneficio de un jugador que siente después de tomar una acción en particular. La acción que tenga la menor pérdida se actualiza con los pesos más altos y por tanto se seleccionan con mayor frecuencia. Lo anterior permite en un escenario CR actualizar de manera simultánea tanto su potencia de transmisión como las frecuencias de operación.

En (Han, 2007 & Xu, 2012) se utiliza GT para detectar los nodos maliciosos en reconocimiento del espectro y técnicas de aprendizaje sin pérdida para lograr un equilibrio correlacionado en el acceso oportuno al espectro de una red CR.

En (Wu, 2013) se presenta una solución de aprendizaje estocástico de GT para el acceso al espectro cuando no se conocen los datos a priori o las estadísticas de

disponibilidad de canal o el número de CU, el modelo expuesto proporciona una solución alternativa para la generación de esquemas de acceso al espectro.

En (Miramá, 2012) se plantea una propuesta para sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos limitados por interferencia con única portadora, para analizar su capacidad en las condiciones menos favorables, modelando el Control de Potencia (PC, *Power Control*) mediante el uso de la GT y el Aprendizaje Reforzado (RL, *Reinforcement Learning*), el cual se emplea en el estudio del entorno y el ajuste del sistema, orientado a la obtención del mejor desempeño posible.

Finalmente, en (Galvis, 2008 & Xu, 2012, 2016) se resumen de manera estructurada algunos de los esfuerzos relacionados con la consecución de una solución óptima al problema de DSA, teniendo en cuenta que las selecciones de canales de los usuarios son distribuidas y autónomas, se formula el problema como un juego no cooperativo de acceso oportunista. La estrategia de juego formulada se modela mediante un algoritmo de aprendizaje distribuido basado en autómatas estocásticos, que converge a la estrategia pura del Equilibrio de Nyquist (NE, *Nyquist Equilibrium*) orientada a la mitigación de interferencias en el escenario de comunicaciones propuesto.

En (Mora et al., 2019; Mora, 2020) se presentan aproximaciones de solución óptimas al problema de acceso al espectro empleando estrategias CSA y OSA, respectivamente, en una red heterogénea de nueva generación mediante el uso de técnicas de AI y GT.

7. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

7.1 Asignación Dinámica de Espectro (DSA)

El término de acceso dinámico al espectro, representa lo opuesto a la política de gestión de espectro estático, y tiene amplias connotaciones que abarcan varios enfoques pensados en la implementación de una reingeniería necesaria al uso de este recurso. Las diversas ideas presentadas en el primer simposio del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) sobre Nuevas Fronteras en Redes de Acceso Dinámico al Espectro (DySPAN, *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*) sugieren el alcance de este término. Como se ilustra en la Figura 1, las estrategias de acceso dinámico al espectro pueden clasificarse ampliamente en tres modelos.

Figura 1

Aproximación taxonómica del modelo de acceso dinámico al espectro. Adaptada de “A Survey of Dynamic Spectrum Access” (p. 80), por Q. Zhao, 2007, IEEE Signal Processing.



7.1.1 Modelo Dinámico de Uso Exclusivo

Este modelo mantiene la estructura básica de la política de regulación de espectro estática o fija, en la cual las bandas de espectro se licencian a servicios para uso exclusivo. La idea principal es introducir flexibilidad para mejorar la eficiencia del espectro. Se han propuesto dos enfoques bajo este modelo: derechos de propiedad del espectro en (Hatfield & Weiser, 2005) y asignación dinámica del espectro en (Xu et al., 2000). El primer enfoque permite a los licenciatarios vender y comercializar espectro y elegir libremente la tecnología que van a utilizar. Por lo tanto, la economía y el mercado jugarán un papel más importante para impulsar el uso más rentable

de este recurso limitado. Es importante tener en cuenta que, aunque los titulares de licencias tienen derecho a arrendar o compartir el espectro con fines de lucro, la política de regulación no exige dicha participación (Zhao & Sadler, 2007).

El segundo enfoque, denominado asignación dinámica de espectro, fue propuesto por el proyecto europeo DRiVE como se puede consultar en (Xu et al., 2000). Su objetivo es mejorar la eficiencia del espectro mediante la asignación dinámica utilizando diversas técnicas de explotación de las estadísticas de tráfico espacial y temporal de diferentes servicios. En otras palabras, en una región determinada y en un momento dado, el espectro se asigna a servicios para uso exclusivo. Sin embargo, esta asignación varía a una escala mucho más rápida que la política de acceso al espectro fija.

Así, en un modelo de uso exclusivo, estos enfoques no pueden eliminar los espacios en blanco en el espectro que resultan de la naturaleza a ráfagas del tráfico inalámbrico (Zhao & Sadler, 2007), puesto que no existe un acceso inteligente a este recurso, lo que genera una posible subutilización o desaprovechamiento del mismo.

7.1.2 Modelo de Acceso Abierto

También denominado como espectro común en (Benkler, 1998; Lehr & Crowcroft, 2005), este modelo emplea el intercambio abierto entre usuarios pares como base para gestionar una región espectral. Los defensores de este modelo obtienen apoyo relativo del buen funcionamiento de los servicios inalámbricos que operan en la banda de radio industrial, científica y médica ((ISM, *Industrial, Scientific, and Medical*) sin licencia (por ejemplo, WiFi). En estas bandas de frecuencias todos los usuarios tienen los mismos derechos para la utilización del espectro y no requieren de licencia, siempre que se respeten las regulaciones establecidas. Estas regulaciones incluyen generalmente la definición de los límites espectrales, frecuencias portadoras y máxima potencia de transmisión (Mora, 2020).

De esta manera, las estrategias de compartición de espectro en este modelo, pueden tener dos enfoques: uno centralizado como las estudiadas en (Raman et al., 2005; Ileri et al., 2005); y otro distribuido como las propuestas en (Chung et al., 2003; Etkin et al., 2005; Huang et al., 2005) se han investigado inicialmente para abordar los desafíos tecnológicos en el marco de este modelo de gestión del espectro. Sin embargo, se ha encontrado que no es un modelo eficiente al momento de enfrentarse a escenarios altamente congestionados como, por ejemplo: las redes

densas y ultradensas, propias de despliegues de IoT en redes inalámbricas de nueva generación, debido a la degradación inherente por altos niveles de polución y contaminación espectral, asociados a interferencias intrasistema e intersistema (Mora, 2020).

7.1.3 Modelo de Acceso Jerárquico

Este modelo adopta una estructura de acceso jerárquica al espectro con Usuarios Primarios (PU, *Primary Users*) o usuarios licenciados, y Usuarios Secundarios (SU, *Secondary Users*) o usuarios de prioridad baja. La idea básica es abrir el espectro con licencia a los SU al tiempo que se limita la interferencia percibida por los PU. En este caso, el ente regulador asigna diferentes prioridades de acceso y utilización del espectro concesionado a los PU y SU. Los PU tienen preferencia al acceder al espectro, de tal forma que experimentan una alta calidad en el servicio como si se tratara de recursos espectrales reservados exclusivamente para su uso (Castañeda, 2017). Dentro de los estímulos más importantes que se consideran en este modelo para que los PU accedan a compartir sus recursos espectrales se encuentran los siguientes: 1) beneficios económicos a los PU, es decir, estos pueden cobrar por la utilización de los recursos espectrales a los SU; 2) condiciones regulatorias en la operación del servicio, es decir, el ente regulador puede asignar una banda de frecuencias para ser utilizada por los SU por medio de tecnología RC, toda vez que no causen interferencias perjudiciales a los PU. Por ejemplo, en algunos países los licenciarios del servicio de televisión radiodifundida no pagan derechos por el espectro que utilizan, sino que lo obtienen de manera gratuita por otorgar un servicio público (Castañeda, 2017). Lo anterior facilita que el ente regulador solicite que las estaciones de televisión de los licenciarios coexistan con otros servicios de interés público, para permitir la operación de los RC en las mismas bandas de frecuencia; y 3) ayuda a los servicios de emergencia, en la cual los PU deben ceder en ocasiones sus recursos espectrales a servicios de emergencia y éstos últimos pueden hacer uso de RC para acceder al espectro.

Como se ha mencionado anteriormente, en el modelo de acceso jerárquico los SU tienen permitido operar en condiciones que no afecten el desempeño y/o los niveles de Calidad del Servicio (QoS, *Quality of Service*) de los PU. Para esto, los SU usan de manera adaptativa las partes del espectro asignado a los PU, detectando el canal de comunicación y posteriormente determinando una estrategia adecuada de transmisión que no afecte las comunicaciones de los PU. Existen dos esquemas

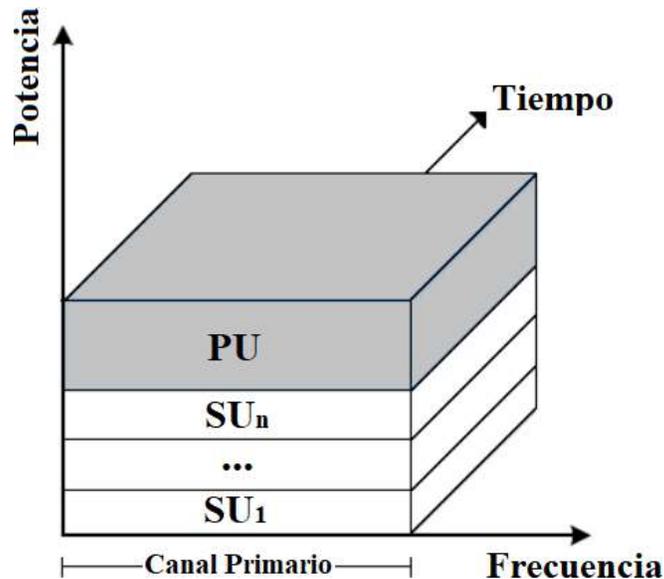
relevantes de compartición de espectro considerados en la tecnología RC que son: la estrategia “*Underlay*” o modelo de Acceso Concurrente al Espectro (CSA, *Concurrent Spectrum Access*) y la estrategia “*Interweaving*” o modelo de Acceso Oportunista al Espectro (OSA, *Opportunistic Spectrum Access*), los cuales se describen detalladamente a continuación.

7.1.3.1 Acceso Concurrente al Espectro (CSA, *Concurrent Spectrum Access*).

El acceso concurrente o compartido al espectro permite que diferentes sistemas de comunicación transmitan de manera simultánea en la misma banda de frecuencia, razón por la cual, ha sido reconocido como una de las técnicas más importantes para realizar DSA. La técnica CSA permite que uno o varios SU transmitan simultáneamente en un canal primario (Mora, 2020), tal y como se ilustra en el esquema relacionado en la Figura 2.

Figura 2

Esquema general de CSA. Tomada de “*Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea*” (p. 22), por J. Mora, 2020, Universidad del Cauca.



La transmisión simultánea tanto de PU como de SU es posible siempre y cuando se pueda controlar los niveles de interferencia del sistema, por lo tanto, al lograr este objetivo, los SU pueden transmitir de manera permanente e independiente de si el PU está transmitiendo o no. Tampoco es necesaria la detección y reconfiguración frecuente del espectro, lo que implica un menor costo de implementación (Avin et

al., 2012). Adicionalmente, CSA permite lograr una mayor eficiencia espectral en un área de cobertura dada, debido a su reutilización espacial del espectro (García et al., 2009; Wang et al., 2012; Mora, 2020), y en consecuencia puede emplearse para el despliegue y gestión de recursos radio con demanda de alto tráfico en redes inalámbricas de nueva generación (Mora, 2020).

Para habilitar CSA, en un sistema de comunicaciones inalámbrico de nueva generación, el transmisor secundario (SU-Tx) necesita reducir la potencia de interferencia producida al receptor primario (PU-Rx) diseñando su estrategia de transmisión, en la que se debe tener en cuenta aspectos como la potencia de transmisión, la tasa de bits, el ancho de banda y el haz de la antena, de acuerdo con la Información del Estado del Canal (CSI, *Channel State Information*) de los sistemas primario y secundario (Liang, 2020). Matemáticamente, el problema de diseño se puede formular para optimizar el desempeño secundario bajo las restricciones de la limitación de recursos físicos del sistema secundario y el requisito de protección del sistema primario. La limitación de los recursos físicos es un aspecto fundamental a tener en cuenta en el diseño de la transmisión del sistema de comunicación tradicional con espectro de funcionamiento dedicado (Liang, 2020). Por lo tanto, la restricción de protección primaria adicional plantea nuevos desafíos y temas abiertos de investigación para el diseño de sistemas CSA de antena única y de múltiples antenas.

Ahora, teniendo en cuenta que para CSA es fundamental el control de interferencia, según se indique explícitamente la temperatura o umbral de este parámetro, la restricción de protección primaria se presenta de dos formas. Cuando la temperatura de interferencia se da como un valor predefinido, la restricción de protección primaria puede expresarse explícitamente como restricción de potencia de interferencia. Básicamente, existen dos tipos de restricción de potencia de interferencia que se conocen como restricción de potencia de interferencia de pico y restricción de potencia de interferencia media (Zhang, 2009). La restricción de potencia de interferencia máxima restringe los niveles de potencia de interferencia para todos los estados del canal, mientras que la restricción de potencia de interferencia promedio regula la potencia de interferencia promedio en todos los estados del canal (Liang, 2020; Mora, 2020). La restricción de potencia de interferencia máxima es más estricta, puesto que los PU pueden protegerse todo el tiempo. Por tanto, es adecuado para proteger los PU con servicios sensibles al retardo. La restricción de potencia de interferencia promedio es menos estricta en

comparación con la anterior, ya que permite que la potencia de interferencia exceda el umbral establecido para algunos estados del canal. Por lo tanto, es adecuado para proteger los PU con servicios insensibles al retardo. Por otro lado, cuando la temperatura de interferencia explícita no está disponible, la restricción de pérdida de calidad de funcionamiento primaria se utiliza para proteger a los PU (Kang et al., 2011; Zhang, 2008). De hecho, esta es una formulación fundamental de restricción de protección primaria y puede ayudar a los SU a explotar la oportunidad espectral de manera más eficiente. Sin embargo, esta restricción requiere la información que incluye el CSI del enlace de señal primario y la potencia de transmisión del PU, que es difícil de obtener en la práctica debido a la falta de cooperación entre los sistemas primario y secundario.

Por otra parte, y con el fin de profundizar en las técnicas de acceso dinámico al espectro de uso concurrente o compartido, tenemos que la investigación sobre sistemas CSA con SU equipados con una sola antena se centra principalmente en el análisis de la capacidad del canal secundario. Se ha demostrado que la capacidad del sistema secundario con canal de desvanecimiento supera a la del canal de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), bajo la restricción de potencia de interferencia (Ghasemi, 2007). La razón radica en que el canal de desvanecimiento con variación puede proporcionar más oportunidades de transmisión para el sistema secundario (Liang, 2020). Para el canal con desvanecimiento plano, la capacidad del canal secundario por debajo del pico y las limitaciones de potencia de interferencia media se pueden consultar en (Musavian & Aissa, 2009), mientras que la capacidad ergódica y la capacidad de interrupción en diversas combinaciones de la limitación de potencia de interferencia pico-promedio y la restricción de potencia de transmisión pico-promedio se estudian en (Kang et al., 2009).

Lo anterior indica que la capacidad bajo la restricción de potencia promedio supera a la de la restricción de potencia pico, ya que la primera puede proporcionar más flexibilidades para el diseño de potencia de transmisión de los SU. En (Kang, et al., 2011), se presenta un análisis de la capacidad ergódica y la capacidad de interrupción bajo la restricción de interrupción PU-Rx, mostrando que para cumplir con el mismo nivel de pérdida por interrupción de PU-Rx, el SU puede lograr una mayor velocidad de transmisión bajo la restricción de interrupción del PU. Así, con una pérdida de interrupción cero permitida, el SU es capaz de lograr una velocidad de transmisión escalable con la restricción de interrupción del PU. En (Zhang &

Liang, 2008), se puede consultar el desarrollo completo sobre la obtención de la información del canal primario con el objetivo de mejorar el uso del espectro y por ende aumentar el desempeño del SU.

A su vez, el uso de múltiples antenas en esquemas CSA proporciona tanto multiplexación como ganancias de diversidad en las transmisiones inalámbricas (Foschini, 1998; Zheng, 2003). En particular, su función de supresión de interferencias cocanal para la transmisión multiusuario la convierte en una técnica prometedora para mejorar el desempeño del modelo DSA (Rashid-Farrokhi et al., 1998; Liang, 2020). En términos generales, el uso de sistemas con múltiples antenas puede proporcionar al SU-Tx en un esquema CSA más grados de libertad en el espacio, que se pueden dividir entre la transmisión de la señal para maximizar la velocidad de transmisión secundaria y la evitación de interferencias para los PU.

En (Zhang & Liang, 2008), se ha investigado la capacidad de canal de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*) del SU en un sistema CSA de múltiples antenas. En esta investigación se demuestra que la restricción de protección primaria hace que los métodos propuestos para el sistema MIMO tradicional sean inaplicables para el diseño de transmisión y recepción de CR. Además, al igual que en la estrategia CSA de antena única, la Información del Estado de Canal Cruzado (C-CSI, *Cross-Channel State Information*) es fundamental para el diseño de transmisión para evitar interferencias en el sistema CSA de múltiples antenas. En (Zhang et al., 2010), se muestra que cuando el canal de interferencia efectivo puede estimarse perfectamente, la potencia de interferencia recibida por los PU se puede evitar perfectamente mediante la formación de haces inteligentes o cognitivos. En (Gao et al., 2010), se demuestra que la transmisión conjunta y la formación de haces de recepción pueden mejorar eficazmente la velocidad de transmisión secundaria suprimiendo la interferencia producida por el PU-Tx. Lo anterior permite inferir que el uso de múltiples antenas también facilita el acceso múltiple y la transmisión del sistema secundario (Mohseni, 2006).

Al igual que en el caso de una sola antena, debido a la restricción de la potencia de transmisión y la potencia de interferencia, el diseño de transmisión y recepción para el canal de acceso múltiple tradicional y el canal de radiodifusión en el sistema de múltiples antenas es inaplicable, tal y como se expone en (Zhang, et al., 2009; Zhang et al., 2012). Además, el diseño de CSA de múltiples antenas debe tener en cuenta la incertidumbre en el canal estimado (Zhang et al., 2009; Gharavol et al., 2010) y el problema de seguridad (Pei et al., 2010; Xiong et al., 2016).

Así, la aplicación de técnicas de CSA en redes heterogéneas o redes inalámbricas de nueva generación, no es una tarea trivial (Lien, 2014; Liang, 2020; Mora, 2020). Aunque la asignación de recursos para las redes móviles inalámbricas tradicionales se ha investigado exhaustivamente en (Sadr et al., 2009; Zhang et al., 2011), el uso compartido del espectro en redes inalámbricas es un desafío debido a la restricción adicional de la potencia de interferencia. de cada red, como el despliegue de la infraestructura y la RAT que afectan profundamente el diseño de CSA. En bastantes publicaciones se ha investigado la compartición del espectro entre sistemas con la misma RAT. Por ejemplo, un sistema secundario de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Acces*) comparte el espectro de un sistema primario OFDMA, o ambos están basados en CDMA. De hecho, debido al crecimiento explosivo del tráfico inalámbrico de cuarta y quinta generación (4G y 5G), compartir el espectro entre los sistemas OFDMA será cada vez más difícil a medida que la contaminación por interferencias en el espectro licenciado aumenten, hasta un punto sin retorno de saturación, por lo tanto, se requieren cada vez más técnicas inteligentes para el uso eficiente del espectro.

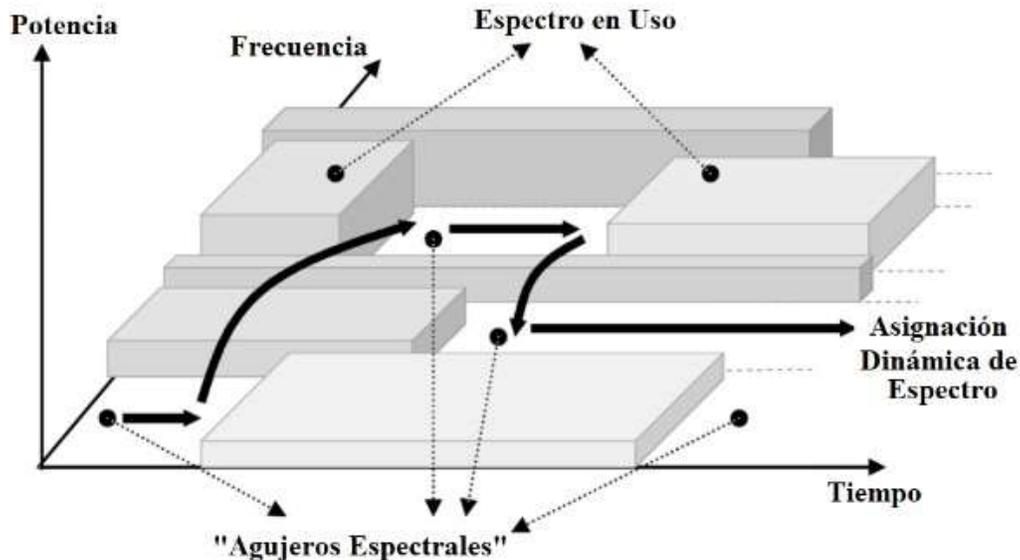
7.1.3.2 Acceso Oportunista al Espectro (OSA, *Opportunistic Spectrum Access*).

El modelo de Acceso Oportunista al Espectro (OSA, *Opportunistic Spectrum Access*), denominado también paradigma de entrelazado (o *Interweave* en inglés) en (Goldsmith et al., 2009) o de superposición de espectro en (Zhao, 2007), es probablemente uno de los esquemas más atractivos para SU o no licenciados que requieren acceder a recursos radio. En este modelo, los SU acceden de manera oportunista a los canales de comunicación que los PU no están utilizando temporalmente, tal y como se ilustra en la Figura 3.

Al permitir el uso sin licencia del espectro y al mismo tiempo garantizar la prioridad de los usuarios licenciados (PU), el esquema OSA ha ganado gran popularidad dentro de las organizaciones reguladoras y se ha convertido en un problema abierto de investigación para la academia (Liang, 2020).

Figura 3

Esquema general de OSA. Tomada de "Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea" (p. 58), por J. Mora, 2020, Universidad del Cauca.



En los sistemas OSA existen dos tareas o acciones fundamentales a realizar, que son: el sensado o descubrimiento de espectro; el cual es universalmente conocido como el habilitador de CR, puesto que dota al dispositivo de cierta capacidad de conocimiento del entorno de RF (como estado y ocupación del canal, recursos espectrales disponibles, entre otros), por lo tanto, permite a los dispositivos cognitivos detectar automáticamente estímulos en su entorno y adaptar de forma inteligente sus parámetros de funcionamiento, garantizando la satisfacción de las necesidades de comunicación del SU utilizando eficiente y oportunamente los recursos espectrales no utilizados por los PU quienes poseen los derechos de uso del espectro (Astaiza et al., 2017).

La segunda acción fundamental en este tipo de sistemas se conoce como selección de canal o utilización del espectro, el cual consiste básicamente en que el usuario cognitivo selecciona el mejor canal que se encuentre libre para transmitir, sin interferir en los procesos de comunicación de los demás PU y SU que componen el sistema de comunicaciones inalámbrico.

Con base en lo anterior, los SU se distribuyen generalmente en ubicaciones diferentes. Al mismo tiempo, existen múltiples PU, con sus regiones de interferencia parcialmente, pero rara vez completamente superpuestas.

Aunque el tema de selección de canales distribuidos en sistemas CR con esquemas OSA ha sido ampliamente estudiado, utilizando, por ejemplo, la teoría de juegos en (Xu et al., 2011;), o modelos ocultos de Markov para procesos de decisión parcialmente observables en (Zhao et al., 2007), o la regla de parada óptima en (Chang, 2009), entre los más destacados; existen aún algunas características distintivas que se pueden considerar campos abiertos de investigación, puesto que rara vez se tienen en cuenta dentro del modelo de estudio, como por ejemplo: 1) solo contemplar la información local de los vecinos en lugar de emplear la información global de todos los usuarios del sistema CR, 2) asumir que la transmisión de un usuario solo genera interferencias a sus vecinos, y no a todos los usuarios del sistema, y 3) las oportunidades espectrales son generalmente heterogéneas, es decir, varían de un usuario a otro; dando lugar a la existencia de HetNets.

En este punto es importante destacar que los sistemas CR con esquemas OSA estudiados generalmente, se caracterizan por una falta de control centralizado y la restricción de que la información global no está disponible, lo que requiere que los algoritmos de selección de canales se distribuyan completamente, basándose en información local.

Sin embargo, tal y como se menciona en (Lobel & Ozdaglar, 2010), es una tarea desafiante lograr la optimización global para sistemas distribuidos donde solo se dispone de información local. Por lo tanto, para comprender mejor el problema de la selección de canales distribuidos en HetNets, primero se debe abordar la tarea de cómo lograr la optimización global con información local (Xu, 2012).

De esta manera, la falta de control centralizado y el acceso restringido a la información global motiva el uso de juegos de interacción local (Montanari & Saber, 2009), los cuales se han introducido recientemente en la investigación de CR, conocidos como juegos gráficos en (Li & Han, 2010), para estudiar este problema. La razón para utilizar modelos de juego en lugar de otros enfoques de optimización descentralizados es que el modelo de juego es una herramienta poderosa para analizar las interacciones entre decisiones autónomas (Xu, 2012).

En un juego de interacción local, la función de utilidad de un jugador solo depende de sí mismo y de los jugadores vecinos. Esto se alinea con la naturaleza de las interacciones locales entre los usuarios en un sistema CR. Aunque se han logrado algunos avances en (Montanari & Saber, 2009), el problema aún no se ha resuelto.

Específicamente, en los juegos de interacción local, o en los modelos de juego en general, se asume que los jugadores son egoístas, lo que conduce a la ineficiencia y al dilema (Xu, 2012; Mora, 2020). Esto se conoce como la tragedia de los comunes y es la limitación inherente de los modelos de juego (Kameda & Altman, 2008).

Así, en (Xu, 2012; Mora, 2020) se realizan contribuciones y validaciones del funcionamiento óptimo del modelo OSA en HetNets, mediante el estudio de casos especiales de juegos de interacción local, como por ejemplo el juego altruista local y el juego de congestión local, para lograr la optimización global de recursos radio en términos de maximización del desempeño de la red y la mitigación de interferencias.

El juego altruista local, se adhiere al supuesto de egoísmo de los usuarios como en los modelos de juego tradicionales; considerando comportamientos altruistas locales entre usuarios vecinos.

Para reducir la sobrecarga de comunicación entre vecinos, se propone un juego de congestión local, en el que cada usuario minimiza el número de vecinos en competencia, logrando demostrar analíticamente que, con los dos juegos, se logra la optimización global del comportamiento de la red a través de intercambios de información local. Realizando una comparación de los dos juegos locales antes expuestos, tenemos que: 1) el juego altruista local maximiza el desempeño de la red, mientras que requiere relativamente más intercambio de información entre vecinos; y 2) el juego de congestión local minimiza las interferencias en la HetNet y requiere menos intercambio de información (Xu, 2012).

Así, los componentes un sistema de comunicación inalámbrico bajo el esquema OSA incluyen la identificación de oportunidades espectrales y la explotación de las mismas, junto con su política regulatoria. El módulo de identificación de oportunidades (o agujeros espectrales) es responsable de identificar con precisión y rastrear inteligentemente las bandas de frecuencia inactivas que son dinámicas tanto en el tiempo como en el espacio. El módulo de explotación de oportunidades toma información del módulo de identificación y decide cómo y cuándo se debe realizar una transmisión. La política reguladora define la etiqueta básica para los SU con el fin de garantizar la compatibilidad con los sistemas heredados (Zhao & Sadler, 2007).

El objetivo general de diseño de sistemas de comunicación inalámbricos de nueva generación tipo OSA es proporcionar un beneficio suficiente a los SU al mismo tiempo que protege a los PU de interferencias.

El uso oportunista y eficiente del espectro por parte de los SU, y la necesidad de protección contra interferencias de los PU establece la interacción entre la identificación de oportunidades, la explotación de ellas y sus políticas reguladoras. Por lo tanto, el diseño óptimo de OSA requiere un enfoque de capas cruzadas que integre el procesamiento de señales y la conexión en red con la formulación de políticas regulatorias.

A continuación, se discuten de manera detallada los tres componentes básicos de OSA mencionados anteriormente.

7.1.3.2.1 Identificación de Oportunidades Espectrales.

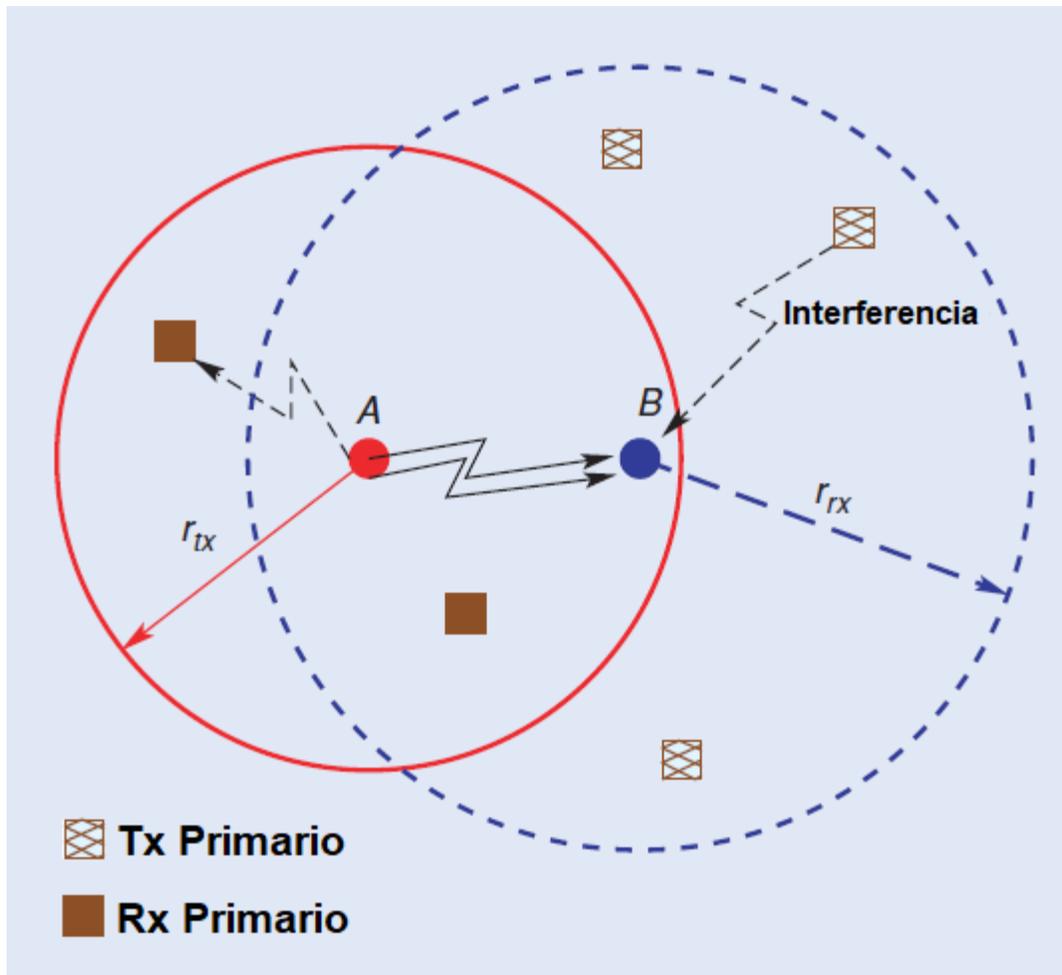
La identificación de oportunidades o agujeros espectrales es crucial para los sistemas de comunicación inalámbricos de nueva generación bajo el esquema OSA, a fin de lograr una comunicación no intrusiva teniendo en cuenta la premisa de uso eficiente del espectro.

Antes de discutir la identificación de oportunidades espectrales, se considera necesario una definición rigurosa de oportunidad espectral. Por lo tanto, de manera intuitiva, un canal de comunicaciones puede considerarse una oportunidad si no se encuentra ocupado por uno o más PU. Sin embargo, en una red con transmisores y receptores primarios distribuidos geográficamente, el concepto de oportunidad espectral es más complicado de lo que parece a simple vista (Zhao & Sadler, 2007).

Con base en la descripción gráfica ilustrada en la Figura 4, es posible identificar las condiciones necesarias para que un canal de radio sea considerado como una oportunidad. Considere un par de SU dónde A es el transmisor y B su receptor asociado. Un canal es una oportunidad para A y B si pueden comunicarse con éxito a través de este canal mientras limitan la interferencia a los PU por debajo de un nivel prescrito determinado por la política reguladora. Esto significa que el receptor B no se verá afectado por los transmisores primarios y el transmisor A no interferirá con los receptores primarios.

Figura 4

Ilustración de oportunidad espectral. Adaptada de "A survey of dynamic spectrum access" (p. 82), por Q. Zhao, 2007, IEEE Signal Processing.



Para ilustrar las anteriores condiciones, es necesario considerar la atenuación de señal monótona y uniforme, y las antenas omnidireccionales. En este caso, un canal de radio es una oportunidad para A y B si ningún PU dentro de una distancia de r_{tx} de A está recibiendo y ningún PU dentro de una distancia de r_{rx} de B está transmitiendo por este canal (ver Figura 4).

Claramente, r_{tx} está determinado por la potencia de transmisión de los SU y la interferencia máxima permitida a los PU, mientras que r_{rx} está determinado por la potencia de transmisión de los PU y la tolerancia a la interferencia de los SU. Generalmente son diferentes (Zhao & Sadler, 2007).

Teniendo en cuenta la anterior definición de oportunidad espectral, es necesario realizar las siguientes observaciones: 1) La oportunidad espectral es un concepto local definido con respecto a un par particular de SU. Depende de la ubicación no solo del transmisor secundario sino también del receptor secundario. Para multidifusión y transmisión, la oportunidad espectral está abierta a la interpretación y da como resultado compensaciones en la red; y 2) la oportunidad espectral está determinada por las actividades de comunicación de los PU y no por las de los SU. Las comunicaciones fallidas causadas por colisiones entre SU no descalifican a un canal de ser una oportunidad (Zhao & Sadler, 2007; Castañeda, 2017; Liang, 2020).

Ahora, otro aspecto muy importante a tener en cuenta es la restricción de interferencias, lo cual es un tema regulatorio complejo, puesto que las restricciones pueden limitar el desempeño potencial de un sistema OSA, mientras que las restricciones flexibles pueden afectar la compatibilidad con los sistemas heredados, por lo tanto, se debe lograr un punto de equilibrio, que permita optimizar y maximizar el desempeño de todo el sistema de comunicaciones inalámbrico.

En términos generales, una restricción de interferencia debe especificar implícita o explícitamente al menos dos parámetros: el nivel de potencia de interferencia máximo η percibido por un receptor primario activo y la probabilidad máxima ζ de que el nivel de interferencia en un receptor primario activo pueda exceder de η (Zhao, 2007; Zhao & Sadler, 2007).

Se puede considerar que el primer parámetro, η , especifica el piso de ruido de los SU; la interferencia por debajo de η no afecta a los PU, mientras que la interferencia por encima de η da como resultado una colisión. Por lo tanto, es inherente a la definición de oportunidad espectral a través de r_{tx} como se expuso en la Figura 4. El segundo parámetro, ζ , especifica la probabilidad de colisión máxima permitida. Dado que los errores en la detección de oportunidades de espectro son inevitables, un valor positivo de ζ es necesario para que los SU puedan aprovechar una oportunidad. De esta manera, ζ determina la decisión de acceso de un transmisor secundario basada en la detección imperfecta de oportunidades espectrales. Un aspecto de precaución es que las diferentes definiciones de probabilidad de colisión ofrecen diferentes niveles de protección para los PU (Zhao, 2007; Zhao & Sadler, 2007).

Por ejemplo, la restricción de colisión puede imponerse sobre la probabilidad conjunta de que tanto los usuarios primarios como secundarios accedan al mismo

canal, o sobre la probabilidad condicional de que un SU transmita dado que el canal está ocupado por PU. La protección ofrecida por la restricción anterior varía con la carga de tráfico de los PU; es posible que los PU con poco tráfico no estén tan bien protegidos como aquellos que tienen mucho más tráfico. Otro problema es si la restricción debe imponerse en cada intervalo de cada canal o sobre la probabilidad de colisión promediada entre los canales y un período de tiempo prolongado. El primero ofrece un nivel específico de protección a los PU sin importar cuándo y por qué canal transmiten, mientras que la protección brindada por el segundo puede ser impredecible cuando los PU reciben ráfagas de mensajes cortos.

Si bien debe imponerse una restricción de interferencia especificada por $\{\eta, \zeta\}$ sobre las actividades de transmisión agregadas de todos los SU, cada uno de ellos necesita conocer la restricción a nivel de nodo para elegir la potencia de transmisión y tomar decisiones de acceso. La traducción de una restricción de interferencia a nivel de red, a una a nivel de nodo depende de la geolocalización y el tráfico de los SU, así como del modelo de atenuación de la señal en el entorno de comunicación con sombreado y desvanecimiento.

7.1.3.2.2 Detección y Explotación de Oportunidades Espectrales.

En este proceso, el sistema OSA debe ser capaz de identificar los rangos de frecuencias que no están siendo utilizados (en el dominio del tiempo) por los PU, para que los SU hagan uso de ellos (los exploten). Existen diferentes maneras de realizar la detección espectral: mediante la detección de transmisores, la detección cooperativa o la detección basada en interferencia (Castañeda, 2017).

Al implementar la detección de transmisores, los sistemas de comunicación inalámbrica OSA deben tener la habilidad de determinar si la señal de un transmisor de un PU se encuentra espacialmente presente en una determinada parte del espectro. Esto se realiza mediante detectores coherentes de filtro acoplado, detectores no coherentes de energía o detectores de señales ciclo-estacionarias, los cuales se explican seguidamente.

Los detectores coherentes de filtro acoplado necesitan del conocimiento previo de cada uno de los sistemas de los PU (información de potencia, fase, codificación y duración de las transmisiones contenida en las secuencias de sincronización) para detectar correctamente su señal. El desarrollo y diseño de este tipo de detectores

es un proceso complejo y costoso, por lo que no se utilizan comúnmente en aplicaciones prácticas.

Los detectores de energía de señales son más sencillos de implementar que los detectores coherentes de filtro acoplado, pero son altamente susceptibles ante los cambios de potencia de las señales y son dependientes de los niveles de ruido. En este tipo de detectores, la señal recibida se procesa y se compara con un nivel de energía de referencia para saber si el PU se encuentra transmitiendo (Castañeda, 2017).

Los detectores de señales ciclo-estacionarias pueden detectar señales moduladas con características periódicas y con bajos niveles de Relación Señal Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference Plus Noise Ratio*). Además, este tipo de detectores puede diferenciar entre el ruido, señales interferentes de otros sistemas y señales de PU.

Por otro lado, la detección cooperativa se refiere a los métodos de detección que utilizan la información procedente de múltiples usuarios de RC. Esta detección consiste en tres etapas: primero, cada usuario de RC “escucha” su entorno para saber la ocupación espectral; después, se realiza un reporte de la información obtenida y finalmente, se difunde la información a los sistemas RC vecinos por medio de canales dedicados broadcast (Castañeda, 2017; Liang, 2020, Mora, 2020). Por último, en la detección basada en interferencia, el usuario cognitivo opera como la tecnología de Banda Ultraancha (UWB, *Ultra Wideband*), ya que los PU coexisten con los SU, los cuales tienen permitido transmitir con bajas potencias, toda vez que no causen interferencias perjudiciales a los PU (Castañeda, 2017).

Así, una vez detectadas las oportunidades espectrales, los SU deben decidir cómo y cuándo explotarlas. Los cuestionamientos específicos al momento de explotar las oportunidades espectrales detectadas incluyen si se debe transmitir o no, dado que los detectores de oportunidad cometerán errores, qué potencia de modulación y transmisión usar, y cómo compartir oportunidades entre SU para lograr un objetivo a nivel de red.

7.1.3.2.3 Políticas Regulatoras.

Las políticas de regulación son obviamente una pieza importante de los sistemas de comunicación inalámbricos de nueva generación basados en OSA, puesto que

establecen reglas de cooperación y uso conjunto entre usuarios primarios y secundarios. Por ejemplo, en los Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) está estudiando formas de avanzar en los mercados secundarios, contemplando el arrendamiento interrumpible, un primer paso lógico para el beneficio mutuo comercial y de los usuarios. Una política de apoyo podría ser fija o abierta a negociaciones y licitaciones dinámicas; podría estar centralizada o descentralizada.

En este punto, cabe realizar algunas preguntas de políticas de regulación básicas, las cuales se pueden ver afectadas por una variedad de factores, muchos de los cuales se mencionaron anteriormente, según la aplicación y los sistemas heredados. De esta manera, es posible esperar que los sistemas intramilitares, así como los sistemas intracomerciales, puedan beneficiarse enormemente de las políticas que permitan compartir el espectro. Por lo tanto, es pertinente preguntar: ¿Deben interactuar y coexistir los sistemas militares y comerciales? ¿Qué forma debería adoptar esa política, que quizás permita diferentes modos de operación, como en tiempos de emergencia nacional? Las políticas reguladoras del espectro varían según los países y regiones, así como entre las secciones espectrales. ¿Cómo se pueden definir las políticas a través de fronteras y regiones internacionales? Si bien en general se acepta que OSA puede aportar numerosos beneficios, existen muchos problemas técnicos, de costos y comerciales que deben abordarse antes de que pueda ocurrir una implementación generalizada, y todos estos problemas están entrelazados con una implementación adecuada de políticas de regulación.

Teniendo en cuenta lo anterior, las políticas deben implementarse en los dispositivos de radio. Un argumento lógico para la separación de la radio y el software de políticas incluye la opción de agregar la capacidad OSA a los sistemas heredados y la capacidad de actualizar o incorporar nuevas políticas. Sin embargo, la implementación de una sección de software separada plantea problemas de seguridad y verificabilidad del software. La modificación por parte de los usuarios podría dar lugar a infracciones de la política (Chapin & Sicker, 2006). Además, la prueba y verificación de dispositivos para el cumplimiento de las políticas se verá muy complicada por las políticas dinámicas y la compleja interacción de los dispositivos en red que detectan y reaccionan al entorno (Zhao & Sadler, 2007); siendo este actualmente, un campo abierto de investigación de enormes desafíos.

7.1.4 Funcionalidades de la DSA

Las distinciones anteriormente descritas, que se realizan entre estas estrategias de DSA resultan útiles para su estudio desde el punto de vista teórico, pero ello no implica que todo modelo de DSA, deba categorizarse unívocamente como “*Underlay*” (CSA) o “*Interweave*” (OSA). En sentido general, el DSA requiere de cuatro funcionalidades estrechamente vinculadas al ciclo cognitivo, las cuales se mencionan a continuación: 1) identificar las oportunidades de acceso al espectro (*Spectrum Awareness*); 2) seleccionar las bandas de frecuencia a utilizar (*Spectrum Decision*); 3) coordinar el acceso al espectro con otros SU (*Spectrum Sharing*); y 4) desocupar los canales utilizados cuando son requeridos por los PU (*Spectrum Handoff*).

Con base en los conceptos desarrollados es importante recordar y comprender la definición de oportunidad espectral, como: “una banda de frecuencia que no es utilizada por el PU de dicha banda, en un momento dado, en un área geográfica específica”.

En virtud de extender el alcance de esta definición puesto que algunos autores la consideran insuficiente, debido a que se limita a la explotación de solo tres dimensiones del espectro radioeléctrico: frecuencia, espacio y tiempo, se proponen otras dimensiones en que puede explotarse el acceso oportunista al espectro, como el código de espectro extendido y el ángulo de arribo de la señal. Los métodos de identificación de las oportunidades de acceso al espectro pueden clasificarse como pasivos o activos. En el primer caso, la información sobre la disponibilidad del espectro se recibe desde fuentes externas al sistema CR, y en el segundo caso, los SU identifican las oportunidades de acceso al espectro mediante la detección del espectro individual o cooperativa.

Con el fin de entender la relevancia de las técnicas de DSA, se presenta en la Figura 5 una comparación gráfica de los modelos de acceso al espectro estático y dinámico, respectivamente, en la cual se puede apreciar sus notorias diferencias (Martínez, 2013,2015; Salgado, 2016; Liang, 2020).

Figura 5

Comparación gráfica de los modelos de asignación espectro estático y dinámico. Tomada de “Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea” (p. 10), por J. Mora, 2020, Universidad del Cauca.



7.1.5 Aplicaciones del Modelo de DSA

Las técnicas de DSA tienen en la actualidad diversas aplicaciones y se prevé que en un futuro cercano se implementen en sistemas más complejos, como las Redes Eléctricas Inteligentes o *Smart Grids*, los servicios de misión crítica, la telefonía móvil 5G y las aplicaciones médicas y de IoT, entre otras (Castañeda, 2017). A continuación, se presentan brevemente algunas de estas aplicaciones.

7.1.5.1 TV White Spaces.

La utilización de TV White Spaces (TVWS) se refiere al uso de las frecuencias disponibles localizadas en las bandas VHF y UHF que no son utilizadas por los concesionarios o licenciatarios del servicio de televisión radiodifundida. Estas bandas de frecuencias disponibles pueden ser utilizadas para proveer servicios de banda ancha bajo la condición de no causar problemas de interferencia significativos en los servicios de otros usuarios.

7.1.5.2 Aplicaciones Militares.

Las técnicas de DSA en aplicaciones militares son emergentes y un ejemplo de su potencial es la capacidad de identificar comunicaciones de enemigos. El departamento de defensa de los Estados Unidos de América ha establecido

programas especiales como SPEAKeasy y next Generation (XG) para aprovechar los beneficios de la tecnología RC (Akyildiz et al., 2017).

7.1.5.3 Servicios de Emergencia y Misión Crítica.

En condiciones de emergencia y en situaciones de desastres naturales, la infraestructura de comunicaciones inalámbricas puede colapsar debido al aumento de tráfico de información o a la caída de los servicios. Además, existen diversos usuarios de servicios de misión crítica equipados con múltiples dispositivos (computadores portátiles, cámaras de video, teléfonos móviles, etc.) que demandan diversos servicios como son voz, mensajería, acceso a Internet, acceso a bases de datos, transferencia de imágenes y video, entre otros. Por lo tanto, existe una gran necesidad de utilizar técnicas de DSA para establecer redes de comunicación de emergencia que sean confiables y usen el espectro de manera dinámica, de tal manera que se faciliten las comunicaciones y se habilite la interoperabilidad de los dispositivos (Castañeda, 2017).

7.1.5.4 Redes Eléctricas Inteligentes

Las Redes Eléctricas Inteligentes o *Smart Grids* se basan en una Infraestructura de Red Avanzada (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*) ubicadas en casas o edificios, en los cuales se cuenta con Redes de Área de Campo (FAN, *Field Area Network*) y/o Redes de Área Amplia (WAN, *Wide Area Network*). Al habilitar RC en este tipo de redes se obtiene, además de un acceso dinámico al espectro, la posibilidad de desarrollar mecanismos de coexistencia para coordinar el uso del espectro y priorizarlo de acuerdo al tráfico de la red *Smart Grid*.

7.1.5.5 Servicios de Telemedicina.

El uso de DSA permite la implementación de aplicaciones médicas inalámbricas conocidas como telemedicina, debido a que puede mejorar el nivel de la calidad del servicio entre los dispositivos médicos al definir prioridades para acceder al espectro. Un ejemplo de aplicación potencial de DSA en los servicios de telemedicina son las Redes de Área Corporales (MBAN, *Medical Body Area Network*) implementadas para monitorear signos vitales de las personas como temperatura, presión, porcentaje de oxígeno en la sangre, generación de electrocardiogramas, entre otros. Este tipo de red requiere de niveles altos de QoS por proveer aplicaciones médicas críticas y no es óptimo desplegarlas en bandas de frecuencias ISM. No obstante, si se aplica tecnología RC en las MBAN para

operar en espectro concesionado como SU, se podría mitigar la problemática de los niveles de QoS y mejorar así considerablemente la experiencia de usuario, el monitoreo del paciente y el diagnóstico médico.

7.2 Radio Cognitivo (CR)

La idea original de CR fue presentada por Mitola, donde fue definida como «el punto en el cual los asistentes personales inalámbricos y las diferentes redes relacionadas, son en términos computacionales, lo suficientemente inteligentes con respecto a los recursos radio y las correspondientes comunicaciones de terminal a terminal como para detectar las necesidades eventuales de comunicación del usuario como una función del contexto de uso y de proporcionarle los recursos de radio y servicios inalámbricos más adecuados a sus necesidades». La investigación destaca el potencial de la tecnología CR para incrementar la flexibilidad de los servicios de comunicaciones inalámbricas en diversos escenarios de telecomunicaciones (Haykin, 2005).

Teniendo en cuenta lo anterior el concepto de CR formulado originalmente por Mitola ha sido revisado y reformulado por varios autores. Según Haykin, «la CR es un sistema de comunicaciones inalámbricas inteligente que es consciente de su entorno y emplea la metodología ‘comprensión mediante la construcción’ para aprender de su entorno y adaptar su estado interno a las variaciones estadísticas en los estímulos de RF de entrada haciendo los correspondientes cambios en ciertos parámetros de operación, como por ejemplo la potencia de transmisión (control de niveles de SINR), la frecuencia de portadora y el tipo de modulación, en tiempo real, con dos objetivos fundamentales: hacer un uso eficiente del espectro y proporcionar una comunicación altamente confiable».

De esta manera es importante comprender que CR difiere de la radio convencional en tres aspectos fundamentales: 1) capacidad cognitiva; 2) capacidad de aprendizaje y adaptación; 3) capacidad de auto-reconfiguración.

La capacidad cognitiva se refiere a la habilidad de obtener información del entorno y del propio estado interno del sistema a través de múltiples sensores. La capacidad de aprendizaje y adaptación permite utilizar esta información para ajustar, dinámica y autónomamente, los parámetros de operación a través de la capacidad de auto-reconfiguración, con el objetivo de optimizar el desempeño del sistema.

Por lo tanto, basados en los anteriores aspectos fundamentales como punto de partida para la operación de un sistema CR, este se puede describir a través de un modelo denominado ciclo cognitivo.

El ciclo cognitivo representa una máquina de estado de las diferentes etapas del proceso cognitivo (Figura 6). La idea del ciclo cognitivo inicialmente propuesta por Mitola fue modificada por diversos autores para adaptarla al concepto de CR como tecnología de DSA, tal como se muestra en la Figura 7, el ciclo cognitivo para DSA incluye el análisis y detección del espectro, la selección de las bandas de frecuencias que más se adecuen a los requerimientos de los usuarios, la coordinación el acceso al espectro con otros usuarios y la movilidad espectral de las frecuencias utilizadas cuando son requeridas por los usuarios autorizados.

Figura 6

Ciclo cognitivo en CR. Tomada de “*Desarrollo de algoritmos para la selección de canales espectrales en redes inalámbricas de radio cognitiva usando las estrategias reactiva y proactiva*” (p. 182), por D. López et al., 2017, Revista Científica.

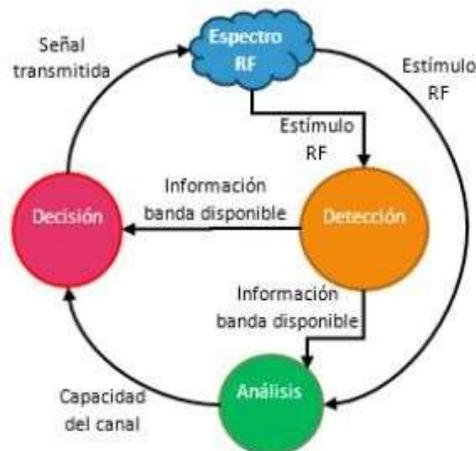
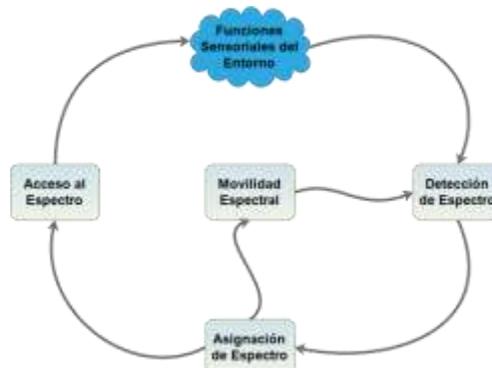


Figura 7

Ciclo cognitivo para DSA.



7.3 Redes de Nueva Generación (NGN)

De acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*) se puede definir genéricamente NGN como una red basada en paquetes que permite prestar servicios de telecomunicaciones, para los cuales se puede utilizar múltiples tecnologías de transporte de banda ancha que brinden QoS.

De esta manera, las funciones relacionadas con los servicios son independientes de las tecnologías subyacentes relacionadas con el transporte, permitiendo así a los usuarios el acceso sin obstáculos a redes y a proveedores de servicios y/o servicios de su elección. Soportando finalmente la movilidad generalizada que permita la prestación coherente y ubicua de servicios a los usuarios.

Ya definido el concepto de NGN es posible hablar de su factor diferenciador con las redes tradicionales, relacionado con la separación entre la capa de transporte y la capa de servicios, lo cual permite según la recomendación Y.2001 definir las siguientes características fundamentales, las cuales, a su vez, pueden interpretarse también como ventajas.

- Transferencia de información basada en paquetes.
- Separación de las funciones de control en capacidades de portador, llamada/sesión, y aplicación/servicio.
- Separación entre la prestación del servicio y el transporte, y la provisión de interfaces abiertas.
- Soporte de una amplia gama de servicios, aplicaciones y mecanismos basados en bloques de construcción del servicio (incluidos servicios en tiempo real/de flujo continuo en tiempo no real y multimedia).
- Capacidades de banda ancha con QoS extremo a extremo.
- Interfuncionamiento con redes tradicionales a través de interfaces abiertas.
- Movilidad generalizada.
- Acceso sin restricciones de los usuarios a diferentes proveedores de servicios.
- Variedad de esquemas de identificación.
- Percepción por el usuario de características unificadas para el mismo servicio.
- Convergencia de servicios entre fijo y móvil.

- Independencia de las funciones relativas al servicio con respecto a las tecnologías de transporte subyacentes.
- Soporte de múltiples tecnologías de la última milla.
- La conformidad con todos los requisitos reglamentarios, por ejemplo, en cuanto a comunicaciones de emergencia, seguridad, privacidad, interceptación legal, etc.

7.4 5G

En telecomunicaciones, 5G son las siglas utilizadas para referirse a la quinta generación de tecnologías de telefonía móvil. Es la sucesora de la tecnología 4G. Actualmente está disponible su primera versión estandarizada (*Release 15 - Stand Alone*) aunque las empresas de telecomunicaciones continúan investigando nuevas tecnologías para posteriores versiones (Looper, 2020). Si bien en 2019 se lanzaron las primeras redes comerciales, se prevé que su uso se extienda exponencialmente desde 2022. Dentro de las especificaciones de 5G se encuentran las siguientes.

- Tasa de datos de hasta 10 Gbps lo que implica de 10 a 100 veces mejor que las redes 4G y 4.5G
- Latencia de 1 milisegundo.
- Banda ancha 1000 veces más rápida por unidad de área.
- Hasta 100 dispositivos más conectados por unidad de área (en comparación con las redes 4G LTE).
- Disponibilidad del 99.999%.
- Cobertura del 100%.
- Reducción del 90% en el consumo de energía de la red.
- Hasta 10 diez años de duración de la batería en los dispositivos IoT de baja potencia.

Algunas de las características más importantes de redes 5G se describen a continuación.

- Escalabilidad masiva con capacidad de 1 millón de usuarios o dispositivos IoT conectados por kilómetro cuadrado, como mínimo.

- Movilidad o capacidad de conexión con usuarios que se mueven de 0 hasta 500 Km/h. Esta característica es especialmente útil para las personas que utilizan transportes de alta velocidad.
- 20 Gbps (Gigabits por segundo) de transferencia de datos (*downlink*) desde la estación base al usuario. Esta transferencia máxima se especifica para un usuario conectado a la estación base o celda móvil con un enlace dedicado. Si varios usuarios se conectan a la misma celda celular, esta capacidad se divide entre ellos.
- Hasta 10 Gbps en sentido contrario (*uplink*), es decir, en la transmisión de datos desde el usuario hacia la red.
- Uso inteligente del espectro empleando técnicas de acceso dinámico.

Por otra parte, es importante mencionar que más allá de las mejoras en la velocidad, se espera que la tecnología 5G desate todo un ecosistema de IoT masivo en el que las redes pueden satisfacer las necesidades de comunicación de miles de millones de dispositivos conectados, con un equilibrio justo entre velocidad, latencia, costo y uso eficiente del espectro.

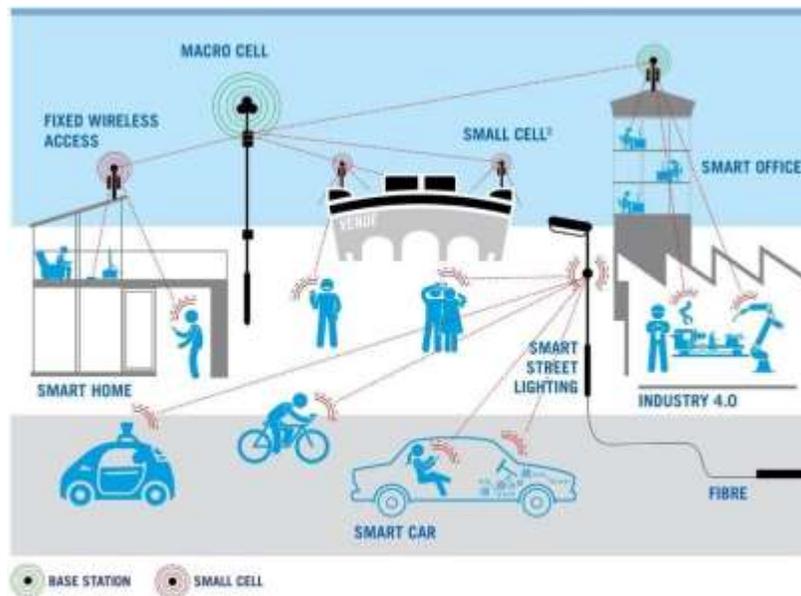
7.5 Celdas Pequeñas (Small Cells)

Es un término general referido a nodos de acceso radio controlados por el operador, de baja potencia, incluyendo aquellos que operan en espectro licenciado y no licenciado. Las Small Cells o Celdas Pequeñas tienen una cobertura típica desde unos metros a algunos centenares de metros (García, 2019).

En la Figura 8 se ilustra gráficamente un escenario de comunicaciones inalámbrico empleando Small Cells.

Figura 8

Despliegue de Small Cells en un escenario de comunicación inalámbrico. Tomada de “¿Will 5G affect our environment and landscape?” (p. 1), 2020. The Scotland 5G Centre.



Con el fin de cuantificar el tamaño de una celda en un proceso de comunicación inalámbrico de acuerdo a su radio de cobertura, en la Tabla 1 se presenta una descripción de cada uno de los tipos de celdas existentes con sus respectivas aplicaciones.

Tabla 1

Tipos de celdas y su aplicación en comunicaciones inalámbricas.

| Tipo de Celda | Radio de Cobertura Típico | Aplicación |
|--------------------|---------------------------|--|
| Macro celda | 1 – 20 Km | Se emplean en áreas rurales y poblaciones cercanas a estas. |
| Micro celda | 500 m – 2 Km | Ofrecen servicio a usuarios fijos o que se muevan lentamente con elevada densidad de tráfico. |
| Pico celda | 100 – 300 m | Ofrecen servicio en áreas pequeñas, como parte de un edificio o centros comerciales. Se emplean para extender la cobertura en la zona donde las señales al aire libre no son de buena intensidad o para añadir capacidad de la red en zonas con altas densidad de tráfico. |
| Femto celda | < 50 m | Se emplean para mejorar la cobertura móvil en interiores o exteriores en donde existe una alta densidad de usuarios. |

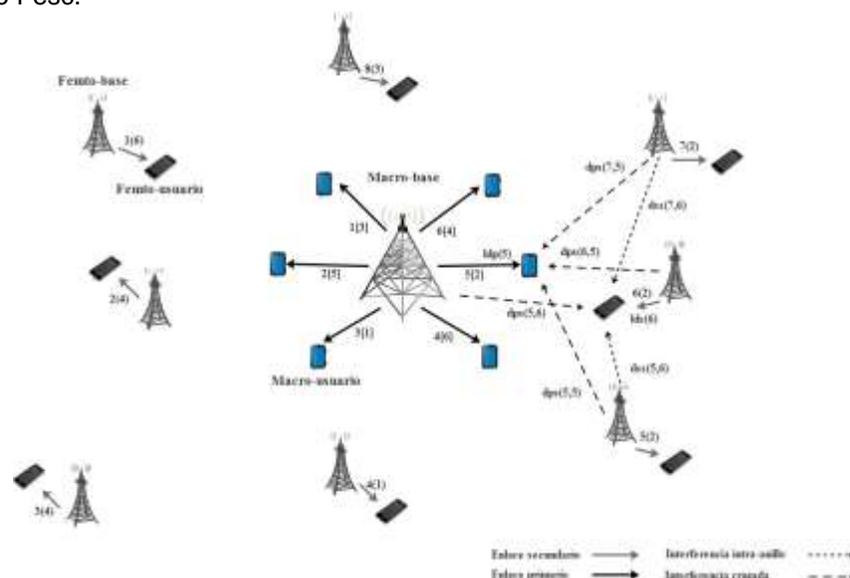
7.6 Redes Ultradensas (UDN)

Las redes de células pequeñas Ultra Densas (UDN, *Ultra-Dense Networks*) están emergiendo como una de las soluciones más prometedoras para abordar el aumento de capacidad de 1000 veces en los sistemas de comunicación inalámbrica de próxima generación. En los últimos años, las UDN se ha convertido en una solución destacada para afrontar los retos de cumplir con los requisitos de densidad de capacidad extremadamente alta, por ejemplo, de hasta 10 Mbps / m² para 5G. La idea básica de las UDN es aumentar la densificación de la red mediante la implementación de varias celdas pequeñas heterogéneas. En términos generales, las Estaciones Base de Celda Pequeña (SBS, *Small Base Station*) son *plug-and-play*, de bajo consumo, de bajo costo y solo pueden admitir servicios de datos de corto alcance. Las UDN tienen el potencial de ampliar la cobertura y aumentar el desempeño de la red con una mejor utilización del espectro.

Con fines ilustrativos, en la Figura 9 se presenta un ejemplo de Red Ultra Densa, en ella se pueden observar los dos tipos de interferencias típicas a analizar con el fin de aplicar técnicas DSA, que son: la Interferencia Intra-anillo, causada por las femtoceldas más cercanas hacia los SU; y la Interferencia Cruzada, generada por las femtoceldas más cercanas hacia los PU y por la macro-celda hacia los SU.

Figura 9

Ejemplo de una Red Ultra Densa. Tomada de “Asignación de Espectro Basado en Inteligencia de Enjambre Empleando un Algoritmo Metaheurístico Híbrido Bioinspirado” (p. 27), por J. Mora et al., 2019, Mundo Fesc.



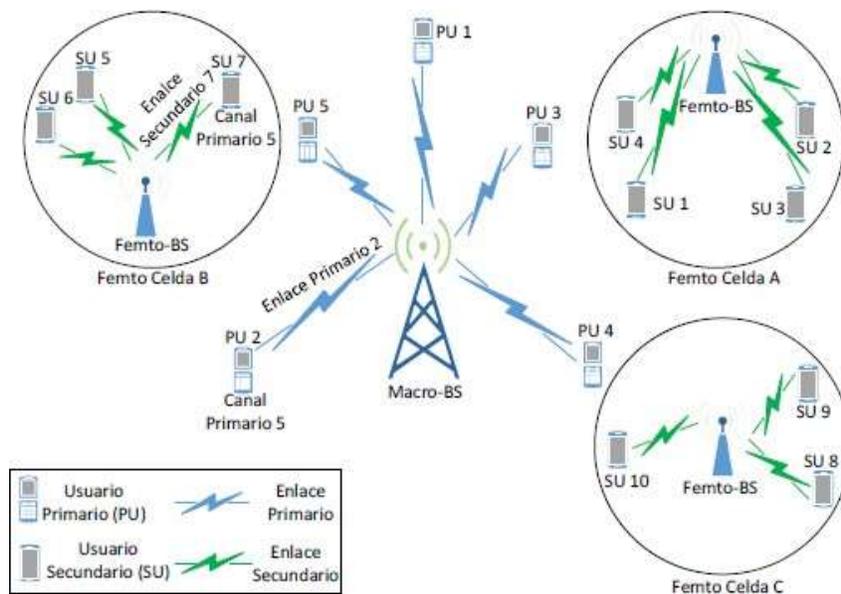
7.7 Redes Heterogéneas (HetNets)

El concepto de Red Heterogénea es uno de los términos más ampliamente utilizados, pero vagamente definido en la industria de las comunicaciones inalámbricas actuales (Martínez 2013,2015; Mora et al., 2019; Mora,2020).

En general en gran parte de la literatura se considera que una HetNet se compone principalmente por una combinación de celdas de gran tamaño (macrocelas) y celdas pequeñas (microcelas, picoceladas y femtoceladas), concepto asimilado para el desarrollo de este trabajo y que se encuentra representado gráficamente en la Figura 10.

Figura 10

Ejemplo de una Red Heterogénea. Tomada de “Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea” (p. 6), por J. Mora, 2020, Universidad del Cauca.



Por otra parte, hay autores que consideran la red celular más la red WiFi como un caso de uso principal de HetNet. También hay quienes consideran la inclusión de nuevas topologías de red y conectividad como parte de la visión heterogénea de las redes, como punto de acceso personal, retransmisión, punto a punto, dispositivo a dispositivo, comunicación de campo cercano y agregación de tráfico, coexistiendo en un mismo espacio de RF. De hecho, como el intercambio flexible de información

y el DSA se convierten en parte de la infraestructura de la red, se puede esperar HetNets basadas en Radio Cognitivo (CR, *Cognitive Radio*).

7.8 Técnicas de Optimización y Herramientas Matemáticas para DSA

7.8.1 Inteligencia Artificial

La AI tiene como objetivo principal dotar a las máquinas de la capacidad y aptitud suficientes para que realicen diferentes tareas, de la manera más cercana a como las realizaría un experto. La máquina inteligente percibirá la toma de decisiones y de esta manera maximizará su propia utilidad. De tal manera, esta tendrá que prever los principales desafíos como la deducción, el razonamiento, la representación de las problemáticas para finalmente dar solución a los problemas como fuente de entradas principales de estudio.

En relación a la CR, los principales retos para las subáreas de la AI son: la detección de la frecuencia disponible de radio, la calidad del canal de comunicación, el reconocimiento, la predicción y anticipación en la toma de decisiones y, por último, pero no menos importante, la decisión sobre la asignación de recursos para el ajuste de errores de transmisión y recepción de datos.

7.8.1.1 Lógica Difusa.

La lógica difusa proporciona al sistema, razonamiento aproximado mediante conjuntos de reglas, teniendo la capacidad de obtener condiciones de incertidumbre mediante la predicción de consecuencias, además de la capacidad de adaptarse a nuevas situaciones. Esta técnica resulta ser una posición relativa desde el observador principal, sin embargo, las conclusiones de la herramienta están respaldadas por métricas iniciales que describen el conjunto de valores admisibles de una muestra. De tal manera, la lógica difusa, aunque con una tasa de estudio aleatoria permite obtener valores diferentes a los supuestos de verdadero o falso.

7.8.1.2 Algoritmos Genéticos.

El principal campo de aplicación de esta técnica radica en la optimización y búsqueda de soluciones, inspiradas en la evolución genética y la selección natural de las especies por naturaleza. Los algoritmos evolutivos forman parte de las

ciencias de la computación y su principal enfoque está determinado en la AI; siguiendo la terminología de la teoría de la evolución. Así pues, es común encontrar definiciones de los cromosomas y funciones de aptitud como descriptores de un algoritmo genético, en donde los cromosomas, son representaciones abstractas

de las soluciones candidatas y la función de aptitud está estrechamente relacionada con el objetivo del algoritmo para los procesos de optimización. La ventaja más importante de utilizar algoritmos genéticos para solucionar el problema de optimización de la asignación de espectro en CR es que pueden manejar restricciones y objetivos de forma arbitraria, por ejemplo, las soluciones ineficientes son simplemente descartadas por el algoritmo.

7.8.1.3 Redes Neuronales Artificiales (ANN).

Las ANN permiten la interacción entre la experiencia y el aprendizaje debido al entrenamiento. Si bien existe un gran número de combinaciones de redes neuronales, en aplicaciones de CR se han implementado básicamente cuatro clases con resultados favorables, entre ellas se destacan: las Redes de Perceptrones Lineales Multicapa, las Redes No Lineales de Perceptrón, las Redes de Funciones de Base Radial y un desarrollo particular de ANN para CR.

La mayoría de las diferentes combinaciones de las ANN han sido adoptadas en la detección de espectro para CR como clasificador de señales, utilizando la extracción de futuras señales de ciclo estacionario. Por tal razón, el uso de las ANN y la combinación de señales ciclo estacionarias garantizan una clasificación estable, eficiente y fiable, reduciendo tiempos de procesamiento mediante la realización de una cantidad representativa de cálculos.

7.8.1.4 Algoritmos Metaheurísticos.

Son empleados comúnmente para la resolución de problemas computacionales en los cuales las entradas principales son definidas por el usuario sobre procedimientos genéricos basados en optimizaciones combinatorias. Por tal razón, son aplicados a complejos problemas de teoría de la información y las telecomunicaciones a través de espacios de soluciones.

En general los algoritmos metaheurísticos basan su estructura en una función ideal de aptitud, la cual debe presentarse para un procesamiento rápido, debido a que es importante anticiparse a las que serían varias evaluaciones para producir una sola generación y, de este modo, producir un resultado útil. En concordancia, el algoritmo

debe mantener una población de soluciones candidatas para un problema dado, en donde se evalúa la condición física de la población para obtener aquellos individuos que pueden formar una nueva generación o experimentar mutación para seguir aumentando los niveles de aptitud.

7.8.1.5 Algoritmos Basados en Técnicas de Aprendizaje Autónomo.

El aprendizaje autónomo tiene como objetivo principal el autoaprendizaje computacional, en el que las técnicas de análisis pueden ser programadas de forma autónoma a través de la inducción del conocimiento, y donde la información objeto de estudio está disponible a partir de grandes conjuntos de datos, dispuestos a ser analizados para la consecución objetiva de resultados.

7.1.5.1.1 Algoritmos Basados en Técnicas de Aprendizaje Autónomo No Supervisado.

El aprendizaje no supervisado puede ser adecuado para diferentes escenarios de CR que operen en entornos desconocidos de RF. Para este caso, los algoritmos de aprendizaje sin supervisión autónoma permiten la exploración de las características del entorno y toman acciones por si mismos sin tener ningún conocimiento previo. Sin embargo, si la CR tiene información previa sobre su entorno, puede aprovechar este conocimiento mediante el uso de técnicas de aprendizaje supervisado.

7.1.5.1.2 Algoritmos Basados en Técnicas de Aprendizaje Autónomo Supervisado.

El aprendizaje supervisado se usa cuando los datos de entrenamiento están etiquetados, es decir, se conoce información a priori acerca del entorno. Algoritmos de entrenamiento, como arboles de decisión, redes neuronales, máquinas de soporte vectorial y razonamiento basado en casos funcionan bien para este tema. Difieren ellos mismos en sus fortalezas y limitaciones, desafíos y aplicaciones referentes a la CR.

7.1.1.6 Algoritmos Basados en Aprendizaje Reforzado (RL).

Es una técnica que permite a un agente modificar su comportamiento mediante la interacción con su entorno. Esta herramienta puede ser utilizada por los agentes para aprender de forma autónoma y sin supervisión. En este caso, la única fuente de conocimiento es la retroalimentación que un agente recibe de su ecosistema

después de ejecutar una acción. El RL se define básicamente por dos características principales: 1) ensayo y error y 2) recompensa retardada. Por ensayo y error se supone que un agente no tiene ningún conocimiento previo sobre el entorno, y ejecuta acciones ciegamente con el fin de explorar el ambiente. La recompensa retardada es la señal de realimentación que un agente recibe del entorno después de la ejecución de cada acción.

Recientemente el RL ha sido incorporado en la CR específicamente en las telecomunicaciones móviles con buenos resultados, por ejemplo, en se muestra la capacidad de implementar un sistema de errores y recompensas en función de cada decisión, optimizando el desempeño en la toma de decisiones para la administración del espectro electromagnético.

7.8.2 Teoría de Juegos (GT).

La GT es un campo de las matemáticas aplicadas que describe y analiza situaciones de decisiones interactivas. Además, proporciona herramientas analíticas para predecir el desenlace de complejas interacciones entre entidades racionales, donde la racionalidad radica en la adherencia estricta a una estrategia basada en resultados percibidos o medidos.

La GT se puede dividir básicamente en dos grupos principales, la GT no cooperativos (Figura 11) y la GT cooperativos (Figura 12). La GT no cooperativos modela escenarios donde los jugadores son individuos que compiten entre ellos, mientras que en la GT cooperativos, los jugadores son grupos de individuos y las acciones son tomadas como tal. La mayoría de los modelos de juegos se basan en juegos no cooperativos, aunque últimamente los juegos cooperativos han ido ganando en popularidad. Una ventaja clave de la aplicación de soluciones de GT en escenarios CR es la reducción de la complejidad de los algoritmos de adaptación en grandes topologías de red (Mora et al, 2019, Mora, 2020).

Figura 11

Estructura de juegos no cooperativos en GT. Tomada de “Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea” (p. 16), por J. Mora, 2020, Universidad del Cauca.

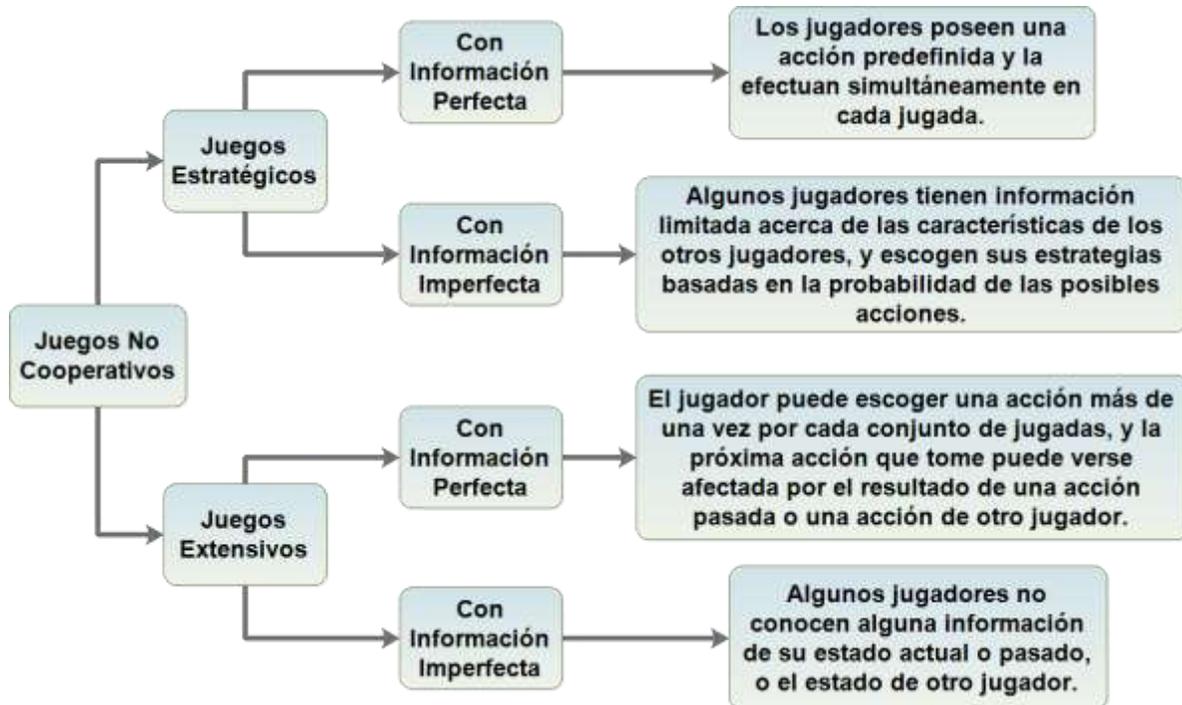
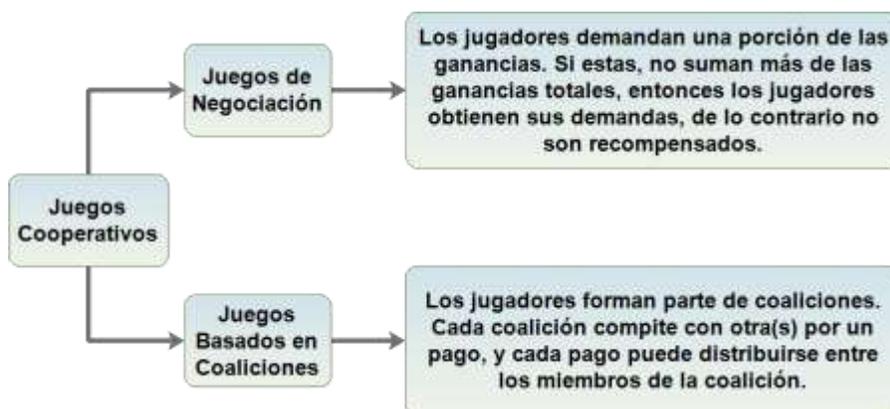


Figura 12

Estructura de juegos cooperativos en GT. Tomada de “Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea” (p. 15), por J. Mora, 2020, Universidad del Cauca.



8. ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS DE DSA

En este capítulo se presenta un análisis detallado de las técnicas de DSA relacionadas con el uso concurrente (CSA) y oportunista (OSA) del espectro, siendo estos dos modelos los de mayor impacto para la optimización y uso eficiente de recursos radio en redes inalámbricas de nueva generación.

8.1 Análisis comparativo de CSA y OSA

Antes de realizar un análisis comparativo de las técnicas de acceso al espectro CSA y OSA, se considera pertinente resumir los aspectos y características más importantes de cada una de ellas, como se describe a continuación.

En un sistema de comunicaciones inalámbrico de nueva generación que opere bajo el esquema de acceso compartido al espectro (CSA) tanto los PU como los SU pueden explotar o usar el espectro simultáneamente, siempre y cuando, la interferencia generada por los SU en los PU se encuentre por debajo de un umbral específico, que no degrade la QoS de toda la red; para ello es necesario tener conocimiento de los niveles de SINR causados por todos los usuarios.

Para el caso de redes inalámbricas de nueva generación bajo el esquema OSA, la idea básica es la comunicación oportunista, mediante el aprovechamiento de agujeros espectrales, los cuales son ranuras o slots espacio-temporales y de frecuencia que no están en uso por parte de PU ni SU. Dichas oportunidades espectrales cambian con el tiempo y el lugar. Así, el modelo OSA requiere información del comportamiento de los usuarios en el espectro. En esta técnica se monitorea periódicamente el espectro, detectando de manera inteligente la ocupación de este recurso por los diferentes usuarios del sistema, para luego comunicarse de manera oportunista explotando los agujeros espectrales disponibles con la mínima interferencia posible.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 2 se presenta un resumen comparativo de los aspectos y características más importantes de las técnicas CSA y OSA.

Tabla 2

Comparación de las características más importantes de las técnicas CSA y OSA.

| CSA | OSA |
|---|---|
| El SU conoce el comportamiento del canal de comunicaciones del PU. | Cuando el PU no está usando el espectro, el SU puede explotarlo, detectando de manera inteligente las oportunidades espectrales. |
| Siempre que la interferencia esté por debajo de un umbral aceptable e inofensivo para el PU, el SU puede transmitir simultáneamente con él. | Un SU puede transmitir simultáneamente con un PU solo en el caso de detección de un agujero espectral falso, situación indeseada que generaría degradación de la QoS de la red. |
| La potencia de transmisión de los SU está limitada por la restricción de interferencia. | La potencia de los SU está limitada por el rango de detección de su agujero espectral. |

Ahora, con el fin de comparar el desempeño de estas dos técnicas de acceso al espectro, con base en lo reportado en la literatura y el trabajo desarrollado en (Mehmeti, 2014; Shilpa, 2016; Mora et al., 2019; Mora, 2020; Liang, 2020) tenemos que en la Figuras 13 y 14 se puede observar a manera de ejemplo el retardo de transmisión al momento de acceder al espectro para las estrategias CSA y OSA, respectivamente.

Figura 13

Comportamiento del retardo de transmisión en CSA. Modificada de "A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques" (p. 616), por M. Shilpa, 2016, ELSEVIER.

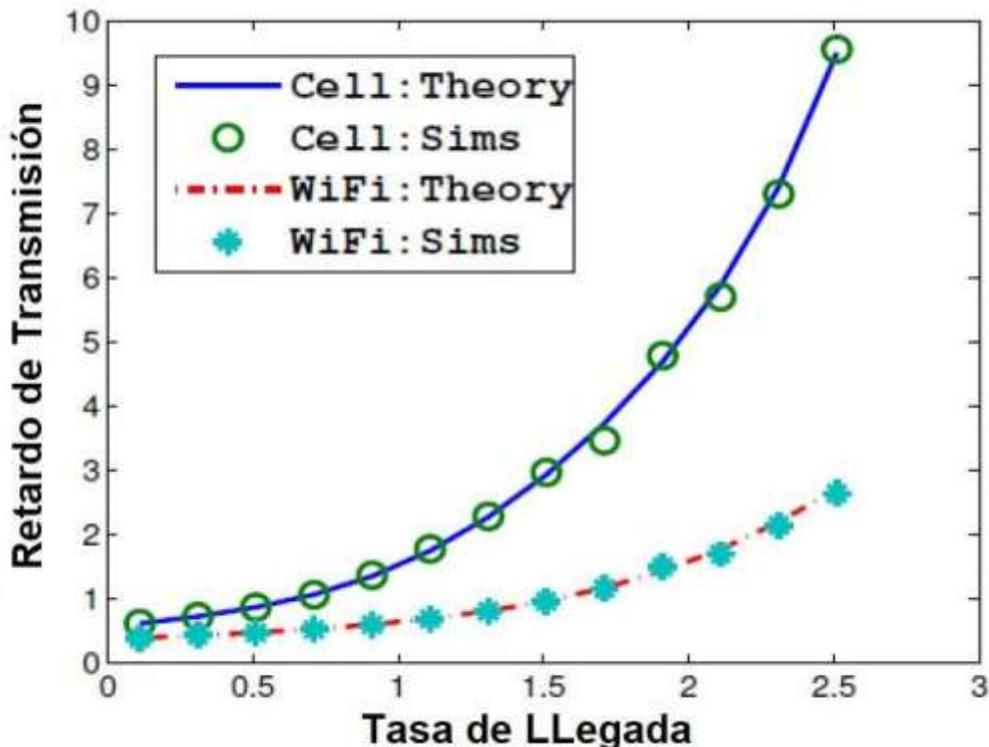
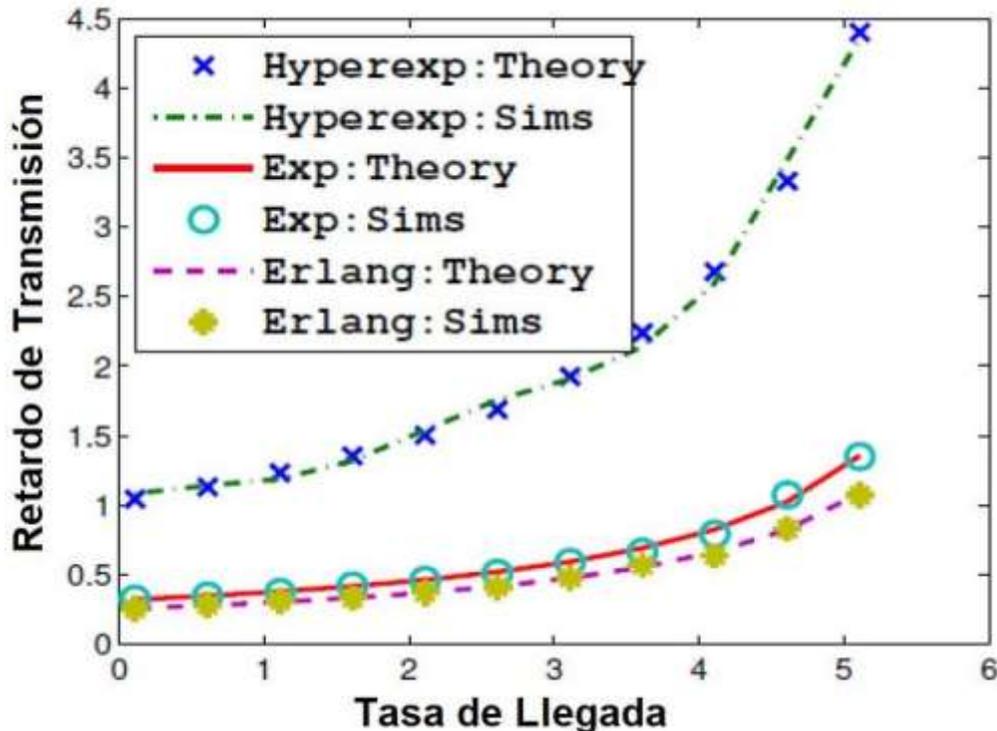


Figura 14

Comportamiento del retardo de transmisión en OSA. Modificada de "A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques" (p. 616), por M. Shilpa, 2016, ELSEVIER.



Para el análisis del comportamiento expuesto en las Figuras 13 y 14 se supone que los flujos de tráfico arriban o llegan en forma de una distribución de Poisson con un parámetro de tasa de ocurrencia λ . Los tamaños de los archivos se distribuyen exponencialmente. La cola se produce cuando el arribo de un archivo encuentra otro archivo en el sistema. El sistema funciona por orden de llegada, el cual se considera mientras se produce la cola del archivo. El retardo de transmisión se usa indistintamente para el tiempo del sistema, ya que este se define como la suma del tiempo de servicio y de espera. El retraso depende de las estadísticas de la actividad del PU, la tasa de datos, el tiempo de escaneo y la intensidad del tráfico.

Así, en la Figura 13 se muestra el retardo promedio de los archivos de los SU con un aumento en la tasa de llegada de archivos para el acceso al espectro empleando la técnica CSA. En esta figura se consideran diferentes parámetros de redes inalámbricas de nueva generación asociadas a telefonía móvil celular y WiFi; de ella se puede concluir que el retardo aumenta con el incremento de la tasa de llegada.

Por otra parte, en la Figura 14 se ilustra el comportamiento del retardo de transmisión para un sistema de telefonía móvil celular con diferentes tiempos de escaneo, empleando la técnica OSA.

Al comparar los comportamientos descritos gráficamente en las Figuras 13 y 14, se puede observar que el retardo de transmisión en la técnica OSA es menor que en la técnica CSA.

Seguidamente, en las Figuras 15 y 16 se presenta el comportamiento del desempeño promedio para redes inalámbricas celulares y WiFi, bajo las estrategias de acceso al espectro CSA y OSA, respectivamente. De manera general, en ellas se puede observar que el desempeño disminuye a medida que existen más PU activos haciendo uso de su canal de comunicación.

Figura 15

Desempeño de la técnica CSA. Modificada de "A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques" (p. 616), por M. Shilpa, 2016, ELSEVIER.

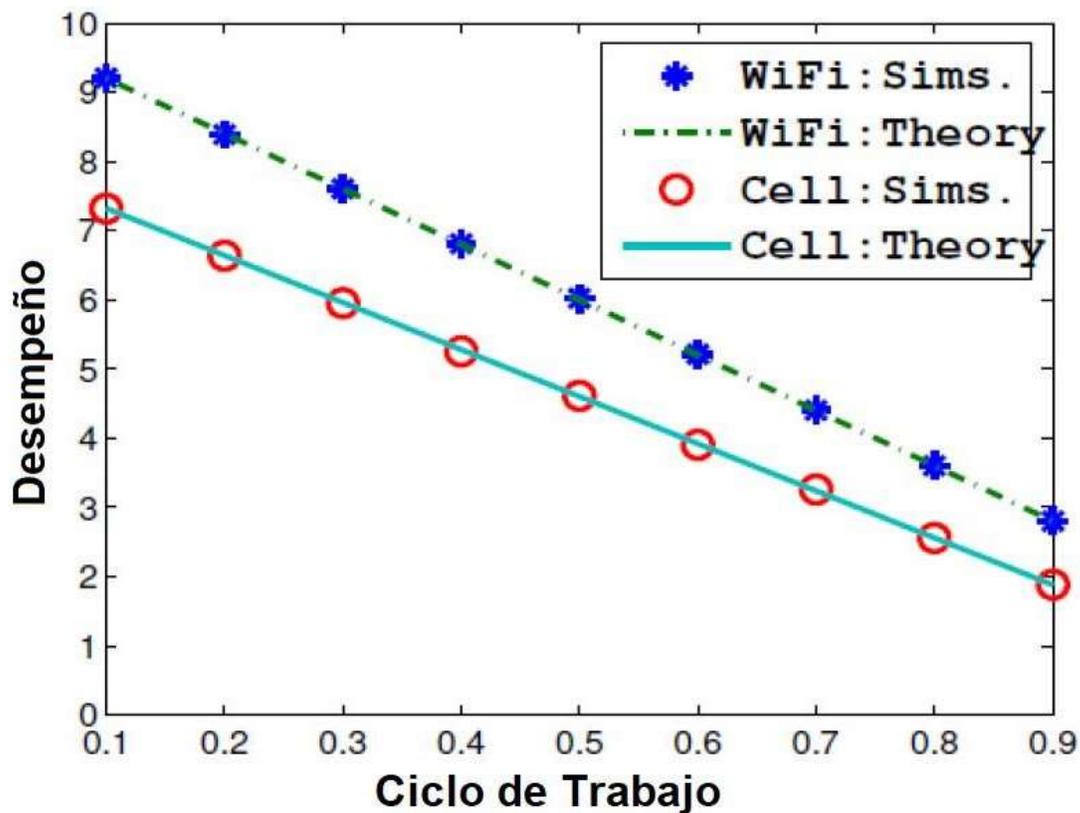
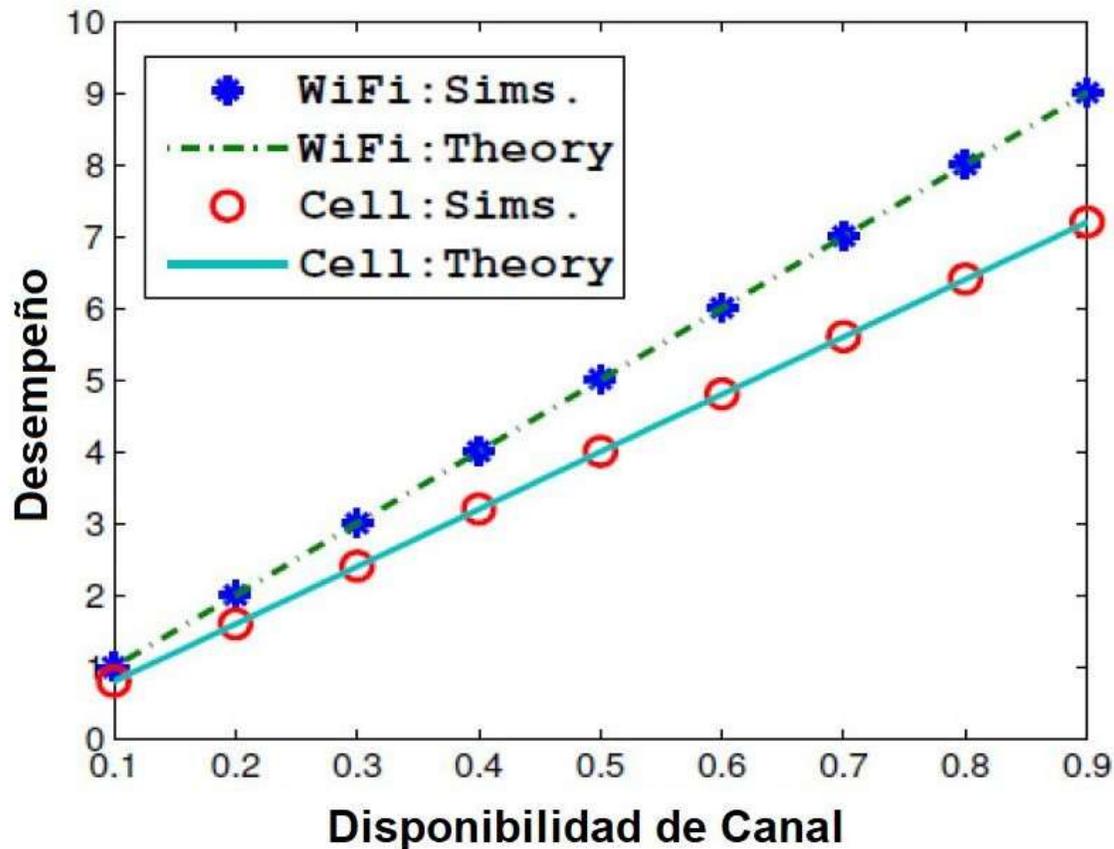


Figura 16

Desempeño de la técnica OSA. Modificada de "A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques" (p. 616), por M. Shilpa, 2016, ELSEVIER.



En la Figura 15, el desempeño se evalúa con el ciclo de trabajo, mientras que en la Figura 16, con la disponibilidad de canal. La disponibilidad de canal denota el porcentaje de tiempo que el SU puede transmitir. De esta manera, en OSA se considera la disponibilidad de canal porque el SU transmite con diferentes ciclos de trabajo en diferentes canales, así en este caso, el desempeño aumenta con la disponibilidad de canal. Las Figuras 15 y 16 se pueden comparar porque si el ciclo de trabajo es X , la disponibilidad de canal es $1 - X$. En virtud de lo anterior, es posible concluir que los valores de desempeño de CSA son hasta cierto punto más altos que los de OSA (Shilpa, 2016).

Con base en lo antes expuesto, en la Tabla 3 se resume comparativamente diferentes aspectos asociados de manera particular a la forma que tiene cada una de las técnicas de DSA estudiadas (CSA y OSA) para optimizar el uso de recursos espectrales.

Tabla 3

Comparación de aspectos que usan las técnicas CSA y OSA para acceder al espectro.

| CSA | OSA |
|--|--|
| El espectro de los SU se comparte con los PU. | Los SU acceden de forma oportunista al espectro de los PU. |
| Los SU aprenden del entorno mediante la estimación de interferencias. | Los SU aprenden del entorno mediante la detección de espectro (agujeros espectrales). |
| Para la gestión de interferencias, una fracción del espectro de los PU se asigna a los SU. | Se asignan bandas de frecuencia disjuntas para PU y SU con el fin de controlar la interferencia. |
| Se emplea el control de interferencia como técnica de protección para los PU. | Se emplea la probabilidad de detección como técnica de protección para los PU. |
| Los SU puede transmitir con cualquier potencia. | La potencia de transmisión de los SU está limitada por un umbral de interferencia. |
| Se puede emplear el esquema ALOHA para acceder al espectro. | Los SU pueden emplear esquemas como CSMA / CA o CSMA / CD para acceder al espectro. |
| Los SU conocen la ganancia del canal, los datos transmitidos por los PU, los mensajes de los PU, entre otros parámetros. | Los SU conocen la intensidad de señal del canal de los PU. |
| Los SU pueden transmitir información en cualquier momento, ya que se les asigna una parte del espectro de los PU. | La transmisión de información de los SU ocurre cuando el espectro está libre. |
| Complejidad media de modelamiento matemático. | Complejidad alta de modelamiento matemático. |
| Herramienta de modelamiento matemático del sistema de comunicaciones más empleada: Inteligencia Artificial. ¹ | Herramienta de modelamiento matemático del sistema de comunicaciones más empleada: Teoría de Juegos. ² |
| Complejidad alta de codificación del modelo matemático. | Complejidad media de codificación del modelo matemático. |
| Nivel de utilidad alto en aplicaciones de IoT, 5G, redes de UWB, HetNets, redes densas y ultradensas. | Nivel de utilidad alto en aplicaciones de televisión radiodifundida como TVWS, aplicaciones militares, 5G, HetNets, redes densas y ultradensas.. |

¹ Si bien en la actualidad se puede considerar a la AI como la herramienta matemática con mayor potencial para el modelamiento y solución de problemas de DSA en sistemas CSA, su uso no es excluyente, puesto que se puede combinar con otras herramientas como la GT para encontrar aproximaciones de solución asociadas a óptimos globales.

² Con base en el razonamiento expuesto en la nota 1, se puede considerar actualmente a la GT como la herramienta matemática con mayor potencial para el modelamiento y solución de problemas de DSA en sistemas OSA, teniendo en cuenta que su uso no es excluyente, puesto que se puede combinar con otras herramientas como la AI para encontrar aproximaciones de solución asociadas a óptimos globales.

8.2 Ventajas y desventajas de la DSA

Dentro de las ventajas más importantes del uso de técnicas de DSA frente a otras tecnologías de comunicación inalámbrica tradicionales, se encuentran las siguientes:

- ✓ Permite explotar el espectro que no está siendo utilizado por los licenciarios o PU, bien sea de manera oportunista o concurrente, lo que conlleva a un uso eficiente de este recurso.
- ✓ Mitiga las interferencias entre usuarios y mejora los niveles de QoS al detectar y conocer de manera inteligente el comportamiento del entorno radioeléctrico. Además, cambia sus parámetros dinámicamente para seleccionar los mejores canales de transmisión (aquellos canales de comunicación con un SINR más alto). (Castañeda, 2017)
- ✓ La utilización de técnicas de acceso dinámico al espectro permite mejorar el uso de recursos radio, puesto que los usuarios no licenciados o secundarios, pueden tener oportunidades de transmisión sin requerir una porción de espectro dedicado (Mora, 2020).
- ✓ El uso de técnicas de DSA en redes inalámbricas de nueva generación permite la modificación de sus parámetros operativos para adaptarse a las condiciones del canal de transmisión, por lo que el consumo de energía en los equipos transmisores, debido a colisiones y retransmisiones de paquetes de información, se reduce considerablemente (Castañeda, 2017; Mora et al., 2019; Liang 2020).
- ✓ Las técnicas de DSA pueden implementarse a nivel operativo casi en cualquier parte del mundo (dependiendo de las políticas de regulación de cada país), gracias a su capacidad de modificar dinámicamente su banda de frecuencias de funcionamiento y así solucionar exitosamente el problema de incompatibilidad espectral.
- ✓ Los PU pueden rentar o arrendar espectro en aquellos lugares y momentos que no lo utilicen. Esto hace que la DSA sea una tecnología viable para aquellos entes que no puedan obtener una concesión de forma inmediata debido a cuestiones legales o financieras. Además, supone una ventaja económica para los PU; aunque estos beneficios dependan directamente del

esquema regulatorio que se establezca para la operación de los SU en cada país (Castañeda, 2017).

- ✓ Permite la coexistencia resiliente en un ecosistema de RF dinámico y heterogéneo mediante el reacondicionamiento del espectro, el cual se puede reciclar o reusar según sea la necesidad. Esta ventaja, permite por ejemplo que mientras se realiza el despliegue de infraestructura para redes 5G, parte de sus servicios sean soportados en la infraestructura existente de las redes 4G y 4.5G.

Si bien la DSA presenta ventajas innegables y bastante atractivas para mejorar el uso de recursos radio en redes inalámbricas de nueva generación, también existen algunas dificultades o desventajas, propias de todas las tecnologías emergentes que se encuentran en proceso de investigación y desarrollo. Por lo tanto, el hecho de abrir la posibilidad de utilizar el espectro de manera dinámica, desencadena dos problemáticas principales asociadas a esta técnica. Una de ellas es la incertidumbre de los PU en cuanto al potencial riesgo de interferencia procedente de las comunicaciones de los SU. Esta interferencia puede degradar los niveles de QoS de los PU e incluso puede provocar pérdidas económicas en sus esquemas de negocio, debido al posible desmejoramiento en la experiencia de usuario. En consecuencia, es importante que los SU sean capaces de contar con mecanismos eficientes para detectar las oportunidades espectrales que garanticen la protección de las comunicaciones de los PU (Castañeda, 2017; Liang, 2020).

Otra problemática de índole económica es la carencia de esquemas sólidos de incentivos para que los PU habiliten la compartición y el reuso espectral; puesto que la mayoría de las políticas de regulación en gran parte del mundo, están pensadas para técnicas de acceso al espectro estático (Castañeda, 2017; Mora, 2020). Por ello, es necesario desarrollar políticas eficientes y estrategias de asignación de precios y tarifas en el uso del espectro que puedan facilitar el acceso a los SU (lo anterior dependiendo de la legislación de cada país).

Adicionalmente, y según (Castañeda, 2017) otras desventajas más específicas que se pueden considerar por ahora para la DSA son las siguientes:

- Implementación y desarrollo de técnicas de detección que puedan operar con altas tasas de muestreo, así como contar con convertidores analógicos a

digitales de alta resolución y sensibilidad, y con tiempos de retardo limitados. Por lo anterior, la implementación de este tipo de hardware resulta costoso.

- Actualmente, existe el riesgo de que un sistema de comunicaciones inalámbricas de nueva generación basado en RC no pueda detectar a un determinado usuario debido a factores como los fenómenos de multitrayectoria y al desvanecimiento de la señal que experimentan los SU.
- Se requiere de niveles limitados de pérdidas de paquetes y retrasos de información durante los procesos de movilidad espectral, lo que impone nuevos retos en términos de transmisión estable de datos, gestión de canales basada en prioridades y QoS.
- Las redes inalámbricas basadas en DSA son vulnerables a ciberataques que comprometen la seguridad del sistema (al igual que otras tecnologías inalámbricas) por medio de software malicioso, el cual puede modificar, extraer, eliminar o robar datos del sistema e información sensible de los usuarios. Por ejemplo, pueden existir usuarios de RC maliciosos que se hagan pasar por un PU, de tal manera que se obstaculice o se cambie la decisión final de asignación de los recursos espectrales por parte del sistema cognitivo. Además, los softwares maliciosos pueden provocar un cambio de los parámetros de transmisión como la frecuencia, la potencia y el tipo de modulación, siendo este un desafío bastante interesante de subsanar (Baldini et al., 2012; Salgado, 2016; Castañeda, 2017).

8.3 Problemas abiertos de investigación asociados de la DSA

Las técnicas de DSA se utilizan para detectar su entorno y mejorar la eficiencia espectral explotando de manera dinámica e inteligente la información de la red. La mayoría de estas técnicas se categorizan sobre la base de la cooperación (CSA) o coexistencia (OSA) y el intercambio entre iguales o el intercambio entre PU y SU. De esta manera, se relaciona a continuación los desafíos o problemas abiertos de investigación más representativos citados en la literatura contemporánea, para cada una de las técnicas estudiadas anteriormente.

8.3.1 Temas abiertos de investigación en CSA

En el caso de técnicas de CSA existen dos desafíos importantes que llaman actualmente la atención de académicos e investigadores, por sus bondades e impactos positivos en el uso eficiente de recursos radio en redes inalámbricas de nueva generación. La primera estrategia se define en (Liang, 2020) como CSA de antena única, y la segunda se encuentra en la literatura como CSA de múltiples antenas. Seguidamente se explica cada una de ellas.

Por otra parte, en la Tabla 4 se presenta un análisis comparativo de las diferentes herramientas de AI con mayor desempeño en la búsqueda de una solución óptima al problema de DSA en redes inalámbricas de nueva generación que utilicen la estrategia CSA para su funcionamiento.

Tabla 4

Análisis comparativo de diferentes herramientas de AI aplicadas en CSA. Adaptada de “Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas” (p. 146), por C. Salgado et al., 2016, TECNURA.

| Herramienta | Ventajas | Desventajas | Oportunidades |
|--------------------------------------|--|--|---|
| Redes Neuronales Artificiales | <p>Presentan habilidad para describir multitud de funciones conceptualmente escalables.</p> <p>Tienen un desempeño sobresaliente para la implementación de clasificadores.</p> <p>Permiten la identificación de nuevos patrones mediante entrenamientos.</p> | <p>El entrenamiento puede ser lento dependiendo del tamaño de la red.</p> <p>Es posible que se necesite tener un gran volumen de información de la red para mejorar el proceso de aprendizaje.</p> | <p>Se puede utilizar como una herramienta o técnica de aprendizaje.</p> <p>Puede combinarse con otras técnicas o herramientas matemáticas inteligentes, como por ejemplo, los sistemas basados en normas.</p> |
| Algoritmos Metaheurísticos | <p>Presenta un desempeño excelente para el modelamiento de parámetros de optimización y aprendizaje.</p> <p>Se puede usar de forma paralela con otras técnicas de aprendizaje, para mejorar su desempeño.</p> | <p>Requiere de la formulación de espacios de reglas dificultosas cuando el aprendizaje no es restringido para parámetros de valores.</p> | <p>Se puede emplear conjuntamente con aprendizaje por sistemas basados en normas.</p> <p>Puede ser usado para la búsqueda de procesos.</p> |
| Modelos Ocultos de Markov | <p>Buen desempeño en procesos de clasificación.</p> <p>Fácilmente escalables.</p> <p>Pueden predecir basados en la experiencia.</p> | <p>Requieren de un buen entrenamiento, lo que implica un alto costo computacional.</p> | <p>Se basan en el conocimiento previo.</p> <p>Las técnicas como los sistemas basados en casos y los sistemas basados en normas pueden ayudar a los modelos ocultos de Markov a determinar la observación para una aplicación específica y</p> |

| | | | |
|-----------------------------------|--|--|---|
| | | | así enfrentar problemas con nuevos desafíos. |
| Sistemas Basados en Normas | Relativa simplicidad en su implementación. Habilidad para establecer reglas futuras que mejoren el desempeño del sistema. | Reglas de derivación resultantes de procesos dispendiosos. Requieren tener dominio perfecto o conocimiento completo del sistema, lo cual no siempre es posible. | Se puede combinar con sistemas basados en casos y modelos de ontología para potenciar su desempeño. |
| Ontología | Son sistemas con habilidades para realizar deducciones lógicas de su entorno. Presentan habilidad para entender las capacidades de sí mismo y de otros. | Se requiere dominio perfecto del conocimiento ontológico. Su desempeño es bajo en sistemas de alta complejidad. | Se puede combinar con sistemas basados en casos y sistemas basados en normas para mejorar su desempeño. |
| Sistemas Basados en Casos | Pueden trabajar en situaciones caóticas con muchas variables. Permiten rápida adquisición del conocimiento. | Se basan únicamente en el caso anterior. Demandan altos recursos computacionales. Puede incluir en algunas ocasiones patrones irrelevantes. | Pueden ser combinados con sistemas basados en normas y modelos de ontología para resolver problemas robustos que no confían únicamente en la experiencia. |

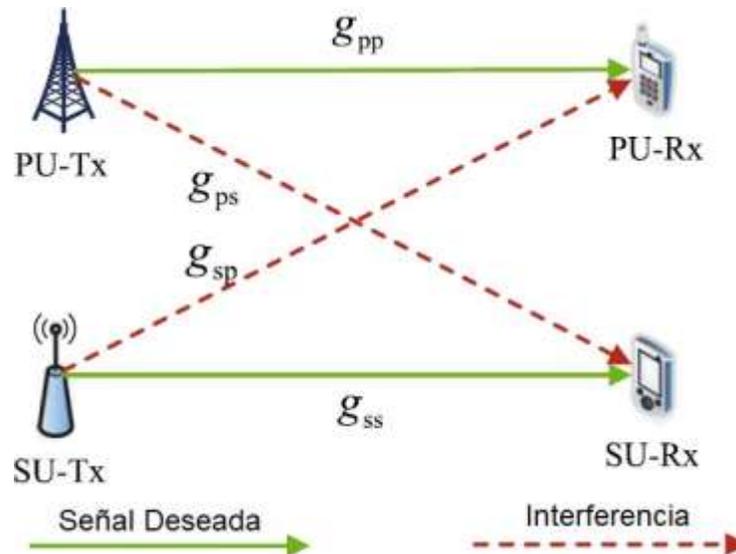
8.3.1.1 CSA de Antena Única.

Este sistema CSA se puede definir como el más simple pero fundamental para todos los trabajos de investigación asociados con el uso concurrente o compartido del espectro. Está compuesto por un par de SU y un par de PU. Cada uno de los terminales está equipado con una sola antena. Una sola banda de frecuencia estrecha es compartida por la transmisión primaria y secundaria. Todos los canales involucrados en el sistema son canales independientes de desvanecimiento en bloque.

En la Figura 17 se ilustra de manera gráfica el modelo correspondiente al sistema CSA de antena única, en la cual g_{pp} , g_{ps} , g_{sp} y g_{ss} indican las ganancias de potencia de canal instantáneas de PU-Tx a PU-Rx, PU-Tx a SU-Rx, SU-Tx a SU-Rx y SU-Tx a SU-Rx, respectivamente.

Figura 17

Representación gráfica del modelo CSA de antena única. Modificada de “*Dynamic Spectrum Management*” (p. 90), por Y. Liang, 2020, SPRINGER.



Se supone que todas las ganancias de potencia del canal son independientes entre sí, ergódicas y estacionarias con función de densidad de probabilidad continua. Para estudiar el límite de la capacidad del canal secundario, se considera que las ganancias instantáneas de potencia del canal en cada estado de desvanecimiento están disponibles en el SU-Tx.

Se supone que el AWGN en el PU-Rx y el SU-Rx son variables gaussianas complejas de simetría circular, independientes con cero y varianza N_0 . Se considera que el PU-Tx no es consciente de la coexistencia del SU y, por lo tanto, adopta una potencia de transmisión fija. Nótese que, en la práctica el PU puede observar la transmisión del SU ya que la potencia de interferencia recibida por el PU aumenta. Para compensar su pérdida de desempeño, el PU puede aumentar su potencia de transmisión. Por tanto, en lugar de ser fija, la potencia de transmisión del PU puede adaptarse según la transmisión secundaria. Esta propiedad se ha utilizado en el diseño de CR para explotar indirectamente la información de la red principal (Zhang & Liang, 2008).

Así, los retos fundamentales de este modelo de CSA radican en mitigar de manera eficiente las interferencias causadas por los SU a los PU, durante el uso simultáneo del canal de comunicación, mediante la determinación de los umbrales óptimos de potencia de transmisión.

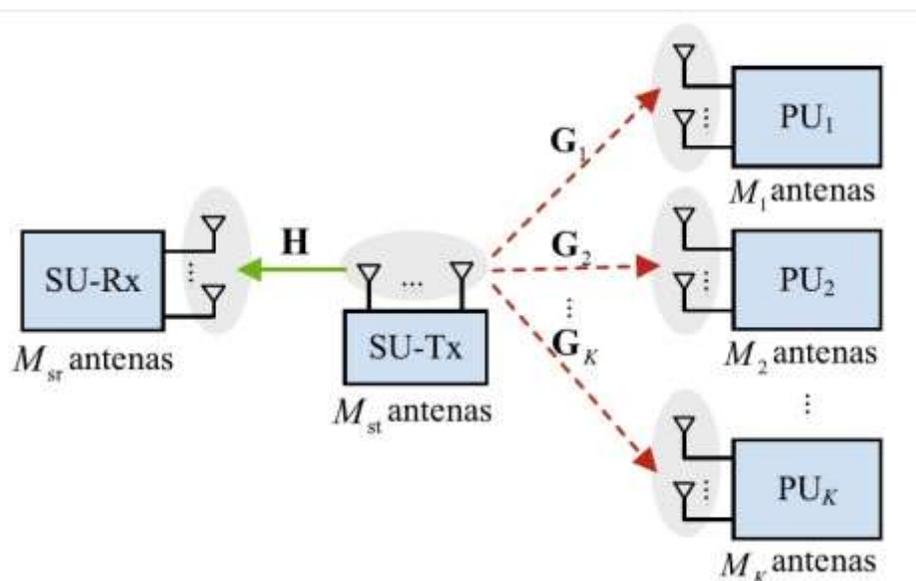
8.3.1.2 CSA de Múltiples Antenas.

Este modelo es de mayor complejidad que el anterior, y emerge de la necesidad de aprovechar las múltiples antenas en los terminales secundarios para equilibrar eficazmente la multiplexación espacial en el SU-Tx y la evitar así las interferencias en los PU. En este caso, los principales desafíos a abordar incluyen: 1) el uso del espectro para el SU-Tx se hará bajo la condición de que el canal de señal secundario y el canal de interferencia sean perfectamente conocidos; y 2) la formación conjunta de haces de transmisión y recepción para los SU se realiza con el objetivo de evitar interferencias en los PU y suprimir así la interferencia en ellos simultáneamente, con la condición de que se desconozca el canal de señal secundario y el canal de interferencia.

De esta manera, con el fin de ilustrar gráficamente el modelo cognitivo del sistema CSA MIMO se presenta en la Figura 18, donde un par de SU comparte el mismo espectro con K usuarios primarios. El número de antenas de PU k se denota con M_k , y el número de antenas de SU-Tx y el de SU-Rx se denotan con M_{st} y M_{sr} , respectivamente. La frecuencia de banda única es compartida por los sistemas primario y secundario. $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M_{sr} \times M_{st}}$ denota la matriz del canal de señal secundario y $\mathbf{G}_k \in \mathbb{C}^{M_k \times M_{st}}$ denota la matriz del canal de interferencia desde SU-Tx a PU_k .

Figura 18

Representación gráfica del modelo CSA de múltiples antenas. Modificada de “*Dynamic Spectrum Management*” (p. 99), por Y. Liang, 2020, SPRINGER.



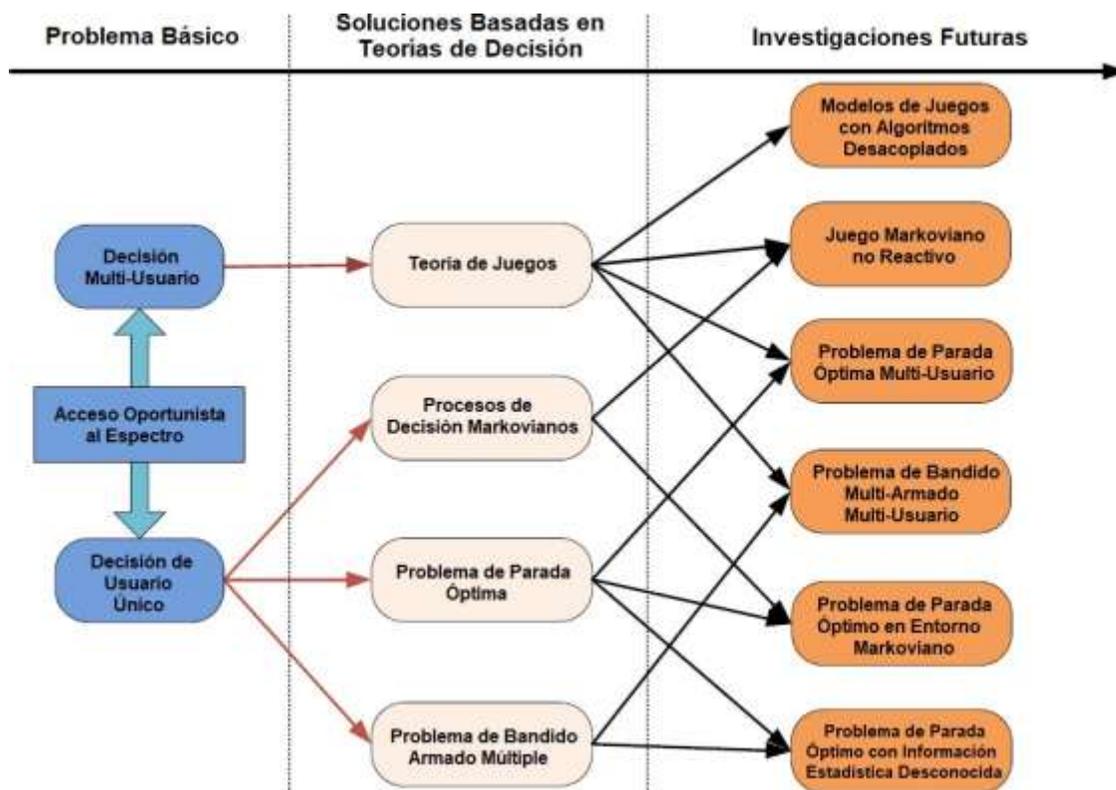
8.3.2 Temas Abiertos de Investigación en OSA

En el caso de los sistemas OSA se tiene que los principales desafíos de investigación están relacionados en su mayoría con cuatro teorías de decisión, por lo tanto, para abordar dos o más problemas de manera simultánea, es natural incorporar dos o más de estas teorías. En ese orden de ideas y según (Xu, 2011; Mora, 2020), en la Figura 19, se presenta a manera de resumen una hoja de ruta con la metodología recomendada para elaborar aproximaciones de solución futuras en redes inalámbricas de nueva generación con acceso oportunista al espectro.

Seguidamente se describen cada uno de los retos a tener en cuenta en futuras investigaciones relacionadas con el acceso oportunista al espectro.

Figura 19

Hoja de ruta para la solución de problemas abiertos de investigación en sistemas OSA. Modificada de "Decision-Theoretic Distributed Channel Selection for Opportunistic Spectrum Access: Strategies, Challenges and Solutions" (p. 20), por Y. Xu, 2011, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS.



8.3.2.1 Modelos de Juegos con Algoritmos Desacoplados.

Los algoritmos de aprendizaje tradicionales en los modelos de juegos están acoplados ya que la actualización de la acción de un usuario necesita información sobre otros usuarios. Además, el intercambio de información genera costos y consumo de recursos. Por lo tanto, es deseable desarrollar modelos de juegos con algoritmos de aprendizaje desacoplados para sistemas de acceso al espectro oportunistas. Dado que la acción de un usuario está influenciada por las acciones de otros usuarios, la convergencia y la optimización de los algoritmos desacoplados para los modelos de juego son generalmente difíciles de garantizar y deben diseñarse cuidadosamente.

8.3.2.2 Juegos Markovianos no Reactivos.

Esta estrategia de optimización surge naturalmente como una incorporación de la GT y el proceso de decisión Markoviano. En un juego de este tipo, hay varios usuarios que compiten por los recursos en el entorno de Markov. En un juego Markoviano clásico (Xu, 2011), la evolución del estado del sistema está determinada conjuntamente por el estado actual del mismo y las acciones elegidas por los jugadores. A este tipo de juego le conoce en la literatura como juego Markoviano reactivo, ya que la evolución del estado del sistema se ve afectada por las acciones actuales.

A diferencia de los juegos reactivos clásicos, los juegos utilizados en los sistemas OSA con un entorno de Markov muestran una propiedad interesante puesto que la evolución del estado del sistema no es reactiva. Para ser más específicos, el estado de la red en los sistemas de acceso oportunista al espectro, que generalmente se define como el estado de ocupación de este recurso, evoluciona según el modelo de tráfico de los PU e independientemente de las acciones de los SU. Así, aunque existen algunas soluciones para los juegos Markovianos clásicos reactivos, por ejemplo, la iteración de valores y los algoritmos de aproximación estocástica propuestos en (Huang & Krishnamurthy, 2010), las soluciones para los juegos de Markov no reactivos serían más concisas y elegantes. En particular, son deseables las soluciones distribuidas que no necesitan información sobre otros usuarios (Xu, 2011).

8.3.2.3 Problema de Parada Óptima Multi-Usuario.

En este caso la teoría del problema de parada óptima es más adecuada para sistemas OSA de un solo usuario que para sistemas multi-usuario. El hecho de que siempre haya múltiples SU en un sistema OSA produce naturalmente el problema de parada óptima multi-usuario. Para resolver el problema de parada óptima multi-usuario, las dificultades residen principalmente en las interacciones entre múltiples usuarios. Se puede incorporar la GT al problema tradicional de detención óptima para desarrollar soluciones deseables. Cabe señalar que en la literatura actual muy pocos autores han abordado este desafío, debido a su complejidad de modelamiento; sin embargo, en (Cheng & Zhuang, 2011; Xu et al., 2011) se pueden consultar avances interesantes al respecto; en donde se consideran múltiples SU con simulación numérica, y en (Xu, 2012; Mora, 2020) se presentan trabajos de investigación basados en análisis teóricos para problemas de parada óptima multi-usuario.

8.3.2.4 Problema de Bandido Multi-Armado Multi-Usuario.

Al igual que en la estrategia anterior, el problema tradicional de bandido multi-armado multi-usuario es más adecuado para los sistemas OSA de un solo usuario que para los sistemas de múltiples usuarios, lo que orgánicamente produce el problema de los bandidos multi-armados y de múltiples usuarios. Aunque algunos estudios existentes han comenzado a considerar el efecto de múltiples usuarios, por ejemplo (Liu & Zhao, 2010; Anandkumar et al., 2011), las soluciones presentadas son solo para algunas aplicaciones específicas y no pueden extenderse a escenarios generales. En estos estudios se proponen algunos métodos para crear ortogonalidad entre los usuarios (ortogonalidad temporal en (Liu & Zhao, 2010) y ortogonalidad de canal en (Anandkumar et al., 2011)), lo que eventualmente conduce a un entorno estacionario para las políticas de aprendizaje propuestas en el mismo. Sin embargo, en una perspectiva amplia, el entorno para los problemas de bandidos armados y multi-usuario no es estacionario, lo que significa que las políticas de aprendizaje tradicionales no se pueden aplicar directamente. Para lograr una solución general del problema de los bandidos con múltiples brazos y multiusuario, se puede incorporar la GT al problema tradicional de los bandidos multi-armados. En (Liu & Zhao, 2012) se pueden encontrar algunos estudios preliminares que sientan las bases para futuras investigaciones.

8.3.2.5 Problema de Parada Óptima en Entorno Markoviano.

En el problema tradicional de parada óptima, las variables aleatorias observadas se distribuyen de forma independiente, desde la época inicio de decisión hasta la época final de decisión, lo que significa que las decisiones en cada época son independientes de las de épocas anteriores (Xu, 2011). Sin embargo, para los sistemas OSA, la dinámica de las oportunidades espectrales entre épocas sucesivas siempre se formula como un proceso de Markov. La anterior dinámica trae consigo desafíos fundamentales; por ejemplo, el orden de detección en cada época se debe optimizar de forma adaptativa en función de las observaciones de las épocas anteriores; siendo este un problema abierto para futuras investigaciones.

8.3.2.6 Problema de Parada Óptima con Información Estadística Desconocida.

Como se mencionó anteriormente, el problema tradicional de parada óptima necesita conocer la información estadística de los canales para calcular la recompensa esperada de proceder a detectar los canales residuales (Xu, 2011; Mora, 2020). No obstante, la información estadística de la disponibilidad y calidad del canal siempre se desconoce a priori, lo que significa que existe una compensación fundamental entre exploración y explotación. La incorporación de los enfoques de los problemas de los bandidos con múltiples armas en los problemas tradicionales de detención óptima proporcionará así soluciones deseables para este desafío.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado de especialización se realizó el estudio y análisis teórico de dos de los esquemas de acceso dinámico al espectro más relevantes según la literatura contemporánea, que son CSA y OSA. De este modo es importante entender que, si bien ambos permiten el reuso inteligente del espectro, son modelos totalmente diferentes, puesto que, en el primero de ellos los SU pueden transmitir simultáneamente con los PU, siempre y cuando, la potencia de transmisión del SU se limite de tal modo que la interferencia causada por él, hacia el PU, permanezca por debajo de un umbral de interferencia, el cual puede tolerar el PU sin efectos negativos en su funcionamiento. Por otra parte, en el esquema OSA los SU solo pueden acceder al espectro cuando los PU no estén transmitiendo, es decir, si un SU, detecta un agujero espectral, correspondiente a un PU inactivo, el SU puede explotar oportunamente dicho canal, y una vez que el PU reanude su transmisión el SU debe desocupar el espectro.

El aumento continuo del tráfico de datos significa que los servicios móviles dependen del acceso a cantidades crecientes de espectro para satisfacer la demanda. Sin embargo, es cada vez más difícil eliminar por completo nuevas bandas de frecuencia para el uso futuro de dispositivos móviles. El uso compartido u oportunista del espectro puede ser una forma de ayudar, cuando no es posible eliminar una banda, al permitir el acceso móvil a bandas adicionales en áreas y, en ocasiones, cuando otros servicios no las utilizan.

El acceso dinámico al espectro, que se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, es un enfoque avanzado para la gestión de este recurso que está estrechamente relacionado con otras técnicas de gestión, como la gestión flexible del espectro y el comercio del mismo. Implica unificar el espectro en términos de franjas horarias y/o geográficas. Esto permite a los usuarios acceder a una parte particular del espectro durante un período de tiempo definido o en un área de cobertura dada, que no pueden exceder sin volver a solicitar el recurso.

La utilización de técnicas de acceso dinámico al espectro permite mejorar el uso de recursos radio, puesto que los usuarios no licenciados o secundarios, pueden tener oportunidades de transmisión sin requerir una porción de espectro dedicado.

Con el uso de las técnicas de DSA se incrementa la eficiencia espectral al aprovechar la actual subutilización de los recursos radio, es decir, se puede utilizar

de manera óptima aquellas bandas de frecuencia que los PU no usan en un intervalo de tiempo o espacio determinado.

Las técnicas de DSA se pueden utilizar junto con diferentes tecnologías inalámbricas de nueva generación que se emplean actualmente para satisfacer la creciente demanda de recursos radio, logrando así, explotar el espectro disponible de manera más eficiente.

La técnica CSA permite que uno o varios SU transmitan simultáneamente en el espectro primario, siempre que se pueda controlar la interferencia a los PU. Por tanto, los SU pueden transmitir de forma continua independientemente de si los PU están transmitiendo o no.

CSA puede lograr una mayor eficiencia espectral de área debido a su reutilización espacial del espectro, por lo tanto, puede usarse para acomodar altas densidades de tráfico en redes heterogéneas de nueva generación.

En la técnica CSA no es necesario consultar la base de datos de geolocalización ni realizar detección del espectro, por lo que se puede evitar la reconfiguración frecuente del mismo. Esto hace que el dispositivo cognitivo sea con hardware de bajo costo, disminuyendo considerablemente su dificultad de implementación.

Sin la necesidad de una detección y reconfiguración frecuente del espectro, la técnica CSA se destaca por tener un bajo costo y facilidad de implementación en la práctica.

El uso de la tecnología MIMO en esquemas de comunicación inalámbricos de nueva generación bajo la técnica CSA puede proporcionar a los SU más grados de libertad en el espacio, lo que implica dividir la transmisión de la señal para maximizar la velocidad de transmisión secundaria y mejorar así la mitigación de interferencias para los PU.

La restricción de protección primaria plantea nuevos desafíos y temas abiertos de investigación para el diseño de sistemas CSA de antena única y de múltiples antenas.

El objetivo general de diseño de sistemas de comunicación inalámbricos de nueva generación tipo OSA es proporcionar un beneficio suficiente a los SU al mismo tiempo que proteger a los PU de interferencias.

Teniendo en cuenta que la detección de espectro es la función habilitadora para el funcionamiento adecuado de sistemas de comunicaciones inalámbricos de nueva generación bajo el esquema OSA, es pertinente reconocer la incapacidad de un SU para realizar la detección y acceso al espectro al mismo tiempo, puesto que esto requiere un diseño conjunto de estrategias de detección y acceso para maximizar los requerimientos de transmisión propios de los SU y, al mismo tiempo, garantizar la protección suficiente para que la QoS de los PU no se vea degradada.

Si bien, en general se acepta que OSA puede aportar numerosos beneficios, existen todavía muchos problemas técnicos, de costos y comerciales que deben abordarse antes de que pueda ocurrir una implementación generalizada, ya que todas estas dificultades están entrelazadas con una implementación adecuada de políticas de regulación.

El uso compartido u oportunista de recursos radio abre la posibilidad de un nuevo modelo de gestión y regulación del espectro para la implementación moderna de servicios móviles e inalámbricos de nueva generación. No obstante, se requiere de una planificación cuidadosa para tener éxito.

El uso de técnicas de DSA permite a los operadores móviles compartir voluntariamente su espectro para respaldar servicios más rápidos, mejorar la cobertura e impulsar la innovación.

El espectro inalámbrico se puede catalogar como un recurso de acceso limitado y costoso, cuyo suministro deficiente impediría la implementación de nuevas tecnologías inalámbricas como LTE-A PRO y 5G. En muchos casos, a medida que los usuarios adoptan tecnologías más nuevas y se actualizan las redes, las redes más antiguas aún existen, pero a menudo se subutilizan. Esto significa que es factible volver a armar el espectro de redes más antiguas sin degradar su desempeño.

Compartir o reusar el espectro puede jugar un papel fundamental en la era 5G, siempre y cuando se realice una implementación rigurosa de las técnicas de DSA; de lo contrario se puede correr el riesgo de dañar su potencial.

Debido al crecimiento explosivo del tráfico inalámbrico de cuarta y quinta generación (4G y 5G), compartir o reusar el espectro entre los sistemas inalámbricos de nueva generación será cada vez más difícil a medida que la contaminación por interferencias en el espectro licenciado aumente, hasta un punto sin retorno de

saturación; por lo tanto, se requieren cada vez más técnicas inteligentes para el uso eficiente del espectro, siendo este un tema abierto de investigación.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Haykin, S. (2005). *Cognitive radio: brain-empowered wireless communications*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23(2), 201-220.
- Xenakis, D., Passas, N., y Merakos, L. (2004). *Multi-parameter performance analysis for decentralized cognitive radio networks*. Wireless Networks, 20(4), 787-803.
- Martínez, A. (2015). *Control de admisión y asignación de canal para acceso dinámico de espectro usando cómputo multi-objeivo*. Computación y Sistemas, Vol. 19, No. 2, 2015, pp. 337-355.
- Martínez, A., y Andrade, A. (2013). *Comparing particle swarm optimization variants for a cognitive radio network*. Applied Soft Computing, Vol. 13 No. 2, 2013, pp. 1222–1234. DOI: doi: 10.1016/j.asoc.2012.10.016.
- Mora, Jorge. (2020). *Asignación de Espectro Basado en Inteligencia Artificial y Teoría de Juegos para el Control de Interferencia en una Red Heterogénea*. Tesis de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones. Modalidad Investigación. Universidad del Cauca.
- Salgado, C. (2016). *Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas*. TECNURA, Vol. 20, No. 49.
- Galvis, A., y Márquez, A. (2008). *Simulación y Análisis de Alternativas para la Asignación Dinámica de Espectro en ambientes TDMA*. Proceedings de las Jornadas IEEE de Sistemas de Telecomunicaciones 2008; Escuela Politécnica Nacional/IEEE ComSoc, Quito (Ecuador).
- Mora, Jorge., Miramá, Víctor., Erazo, Olger. (2019). *Asignación de espectro basado en inteligencia artificial empleando un algoritmo metaheurístico híbrido bioinspirado*. Mundo FESC.
- M. Esteban. (2016). *Optimización Binaria por Cúmulo de Partículas con Memoria (MBPSO) para Resolver un Problema de Espectro Compartido*. Computación y Sistemas, vol. 20, No. 1, pp. 153-168.
- D. Roberson, A. Hood, C. S., LoCicero, J. L., & MacDonald, J. T. (2006). *Spectral Occupancy and Interference Studies in support of Cognitive Radio Technology Deployment*. 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks (SDR), Reston, USA, pp. 26–35.
- Dong, Xiaoqing., Cheng Lianglun., Zheng, Gengzhong., y Wang, Tao. (2019). *Multi-objective optimization method for spectrum allocation in cognitive heterogeneous wireless networks*. AIP Advances, No. 9, pp. 2-21.
- Chen, K., y Prasad R. (2009). *Cognitive Radio Networks*. Edition ed. Chippenham: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-69689-7.

- Liang, Y., Cheng, K., Li, G., y Mahonen, P. (2011). *Cognitive Radio: Networking and Communications an Overview*. IEEE Trans. Veh. Technol., 60(7), 3386 - 3407.
- Mora, Jorge., Mirama, Víctor., Erazo, Olger. (2020). *Performance Analysis of a Heterogeneous Network Using Artificial Intelligence and Multi-Objective Optimization*.
- G. Carneiro, et al. (2005). *The DAIDALOS Architecture for QoS over Heterogeneous Wireless Networks*. 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit.
- S. Calabuig. (2010). *Common Radio Resource Management Strategies for Quality of Service Support in Heterogeneous Wireless Networks*. Universidad Politcnica de Valencia. Valencia, España.
- Quinyang, R., y Qian, Y. (2013). *Heterogeneous Cellular Networks*. Willey and Sons.
- Wang, B., y Liu, K. (2011). *Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey*. IEEE J. Sel. Topics Signal Process., 5(1), 5 - 22.
- Raikel, L., y Samuel, M. (2015). *La Radio Cognitiva y su Impacto en el uso Eficiente del Espectro de Radio*. Ingeniería Electrónica, Automtica y Comunicaciones. EAC, vol. 36, No.1.
- Z. Haibo, Y. Quan, S. Xuemin, W, Shaohua y Z, Qinyu. (2017). "Dynamic Sharing of Wireless Spectrum". Springer.
- T. Erpek, M.A. Mchenry y A. Stirling. (2011). "Dynamic spectrum access operational parameters with wireless microphones". IEEE Communications Magazine, Vol. 49, No. 3, pp. 38–45, 2011. DOI: 10.1109/ MCOM.2011.5723798.
- C. Liang. (2020). "Dynamic Spectrum Management". Springer Open.
- Abbas, N.; Nasser, Y. y El Ahmad, K. (2015). *Recent advances on artificial intelligence and learning techniques in cognitive radio networks*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 1, 1-20.
- Mitola III, J. y Maguire Jr., G.Q. (1999). *Cognitive radio: making software radios more personal*. Personal Communications, IEEE, 6(4), 13-18.
- Zhang, Y., Zhang, Z., Luo, H., Wang, W., & Yu, G. (2012). *Initial spectrum access control with QoS protection for active users in cognitive wireless networks*. International Journal of Communication Systems, Vol. 25, No. 5, pp. 636–651.
- Tadrous, J., Sultan, A., & Nafie, M. (2011). *Admission and Power Control for Spectrum Sharing Cognitive Radio Networks*. IEEE Transactions on Wireless, Vol. 10, No. 6, pp. 1945–1955. DOI: 10.1109/TWC.2011.040411.101571.
- Wang, B. & Zhao, D. (2008). *Performance analysis in CDMA-based cognitive wireless networks with spectrum underlay*. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM), New Orleans, USA, pp. 1–6.
- Roy, S. D. & Kundu, S. (2011). *Gradual removal of secondary user in cognitive-CDMA spectrum underlay network*. International Conference on Devices and Communications (ICDeCom), Mesra, Algeria, pp. 1–4.

- Wang, B. & Zhao, D. (2010). *Scheduling for long term proportional fairness in a cognitive wireless network with spectrum underlay*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 9, No. 3, pp. 1150–1158. DOI: 10.1109/TWC.2010.03.090802.
- Liu, P.; Li, J.; Li, H.; Wang, K. (2013). *An Iteration Resource Allocation Method to Maximize Number of Users with QoS Demand in Femtocell Networks*.
- Bayat, S.; Louie, R.H.Y.; Li, Y. y Vucetic, B. (2011). *Cognitive radio relay networks with multiple primary and secondary users: Distributed stable matching algorithms for spectrum access*. IEEE International Conference on Communications.
- Liang, Y.; Lai, L. y Halloran, J. (2009). *Distributed algorithm for collaborative detection in cognitive radio networks*. 2009 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton),394-399.
- Hasegawa, M.; Hirai, H.; Nagano, K.; Harada, H. y Aihara, K. (2014). *Optimization for centralized and decentralized cognitive radio networks*. Proceedings of the IEEE, 102(4), 574-584.
- Liu, Y.; Feng, Z.Y. y Zhang, P. (2012). *Optimized in-band control channel with channel selection scheduling and network coding in distributed cognitive radio networks*. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 19(2), 48-56.
- Zhu, X.-L.; Liu, Y.-A.; Weng, W.-W. y Yuan, D.-M. (2008). *Channel sensing algorithm based on neural networks for cognitive wireless mesh networks*. In Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM'08. 4th International Conference on (pp. 1-4). IEEE.
- Rondeau, T.W.; Le, B.; Rieser, C.J. y Bostian, C.W. (2004). *Cognitive radios with genetic algorithms: Intelligent control of software defined radios*. In Software defined radio forum technical conference (pp. C3-C8). Citeseer.
- Newman, B.; Barker, B.; Agah, A. (2006). *Cognitive Engine Implementation for Wireless Multicarrier Transceivers*. Wiley Wireless Communications and Mobile Computing. DRAFT (pp. 1-25).
- Yong, L.; Hong, J. y Qing, H.Y. (2009). *Design of Cognitive Radio Wiereless Parameters Based on Multiobjective Immune Genetic Algorithm*. In Communications and Mobile Computing, 2009. CMC'09. WRI International Conference on (Vol. 1, pp. 92-96). IEEE.
- He, A.; Bae, K.K.; Newman, T.R.; Gaeddert, J.; Kim, K.; Menon, R.; ... Reed, J.H. (2010). *A survey of artificial intelligence for cognitive radios*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59(1-4), 1578-1592.
- Matinmikko, M.; Del Ser, J.; Rauma, T. y Mustonen, M. (2013). *Fuzzy-Logic Based Framework for Spectrum Availability Assessment in Cognitive Radio Systems*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 31(11), 2173-2184.
- Jayaweera, S.K.; Bkassiny, M. y Avery, K.A. (2011). *Asymmetric cooperative communications based spectrum leasing via auctions in cognitive radio networks*. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 10(8), 2716-2724.

- Looper, Christian. (2020). "What is 5G? The next-generation network explained". Digital Trends.
- García, Antonio (2019). *Small Cells 4G – Nuevos modelos de negocio*. ACCELLERAN.
- Chen, L.; Iellamo, S.; Coupechoux, M.; Godlewski, P. (2010). *An Auction Framework for Spectrum Allocation with Interference Constraint in Cognitive Radio Networks*. Communications Society. IEEE.
- L. Zhang, Y.-C. Liang & M. Xiao. (2019). *Spectrum sharing for internet of things: a survey*. *IEEE Wirel. Commun.* 26(3), 132–139.
- A. Goldsmith, S.A. Jafar, I. Maric, S. Srinivasa. (2009). *Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective*. *Proc. IEEE* 97(5), 894–914.
- Q. Zhao, B.M. Sadler. (2007). *A survey of dynamic spectrum access*. *IEEE Signal Process. Mag.* 24(3), 79–89.
- Y.C. Liang. (2020). *Dynamic Spectrum Management from Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Springer Open.
- E. Astaiza, H. Bermúdez y L. Muñoz. (2017). *Sensado de Espectro Local de Banda Ancha para Radios Cognitivos Multi-antena basado en Compleción de Matrices y Muestreo Sub-Nyquist Uniforme en el Dominio Disperso*. Información Tecnológica.
- Y. Xu, J. Wang, Z. Gao, Q. Wu, and A. Anpalagan. (2011). "Network throughput maximization in CRAHNs using local cooperative game", in *Proc. IEEE GLOBECOM11*, pp. 1–5.
- Q. Zhao et al. (2007). "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 589–600.
- N. B. Chang and M. Liu. (2009). "Optimal channel probing and transmission scheduling for opportunistic spectrum access", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 17, no. 6, pp. 1805–1818.
- I. Lobel and A. Ozdaglar. (2010). "Distributed subgradient methods for convex optimization over random networks", *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 6, pp. 1291–1306.
- A. Montanari and A. Saberi. (2009). "Convergence to equilibrium in local interaction games". in *Proc. 50th Annu. IEEE Symp. Foundat. Comput. Sci.*, pp. 303–312.
- H. Li and Z. Han. (2010). "Competitive spectrum access in cognitive radio networks: Graphical game and learning" in *Proc. IEEE WCNC*, pp.1–6.
- H. Kameda and E. Altman. (2008). "Inefficient noncooperation in networking games of common-pool resources", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 7, pp. 1260–1268.
- D. Hatfield and P. Weiser. (2005). "Property rights in spectrum: Taking the next step" in *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 43-55.

- L. Xu, R. Tonjes, T. Paila, W. Hansmann, M. Frank, and M. Albrecht. (2000). “*DRiVE-ing to the Internet: Dynamic radio for IP services in vehicular environments*” in Proc. 25th Annual IEEE Conf. Local Computer Networks, pp. 281–289.
- Y. Benkler. (1998). “*Overcoming agoraphobia: Building the commons of the digitally networked environment*”, Harv. J. Law Tech, vol. 11, no. 2, Winter.
- W. Lehr and J. Crowcroft. (2005). “*Managing shared access to a spectrum common*” in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 420-444.
- C. Raman, R. Yates, and N. Mandayam. (2005). “*Scheduling variable rate links via a spectrum server*” in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, 2005, pp. 110–118.
- O. Ileri, D. Samardzija, and N. Mandayam. (2005). “*Demand Responsive Pricing and Competitive Spectrum Allocation via a Spectrum Server*”, in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 194-202.
- S. Chung, S. Kim, J. Lee, and J. Cioffi. (2003). “*A game-theoretic approach to power allocation in frequency-selective Gaussian interference channels*”, in Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory, pp. 316–316.
- R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse. (2005). “*Spectrum sharing for unlicensed bands*”, in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 251-258.
- J. Huang, R. Berry, and M. Honig. (2005). “*Spectrum sharing with distributed interference compensation*”, in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, pp.88-93.
- R. Castañeda. (2017). *Tecnologías de Acceso Dinámico y Uso Compartido del Espectro. Instituto Federal de Telecomunicaciones.*
- C. Avin, Y. Emek, E. Kantor, Z. Lotker, D. Peleg & L. Roditty. (2012). *SINR Diagrams: Convexity and Its Applications in Wireless Networks*. JACM 59(18), 1–18. 34. doi:10.1145/2339123.2339125
- J. Wang, Y. Xu, Q. Wu, and Z. Gao. (2012). “*Optimal distributed interference avoidance: Potential game and learning*”, Trans. Emerging Telecommun. Technol., vol. 23, no. 4, pp. 317–326.
- L. Garcia, K. Pedersen, and P. Mogensen. (2009). “*Autonomous component carrier selection: Interference management in local area environments for LTE-advanced*”, IEEE Commun. Mag., vol. 47, no. 9, pp. 110–116.
- R. Zhang. (2009). *On peak versus average interference power constraints for protecting primary users in cognitive radio networks*. IEEE Trans. Wirel. Commun. 8(4), 2112–2120.
- X. Kang, R. Zhang, Y.-C. Liang, H.K. Garg. (2011). *Optimal power allocation strategies for fading cognitive radio channels with primary user outage constraint*. IEEE J. Sel. Areas Commun. 29(2), 374–383.

- R. Zhang. (2008). *Optimal power control over fading cognitive radio channel by exploiting primary user CSI*. IEEE Glob. Commun., pp. 1–5.
- A. Ghasemi, E.S. Sousa. (2007). *Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments*. IEEE Trans. Wirel. Commun. 6(2), 649–658.
- L. Musavian, S. Aissa. (2009). *Fundamental capacity limits of cognitive radio in fading environments with imperfect channel information*. IEEE Trans. Commun. 57(11), 3472–3480.
- X. Kang, Y.-C. Liang, A. Nallanathan, H.K. Garg, R. Zhang. (2009). *Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: Ergodic capacity and outage capacity*. IEEE Trans. Wirel. Commun. 8(2), 940–950.
- R. Zhang, Y.-C. Liang. (2008). *Exploiting hidden power-feedback loops for cognitive radio*, in Proceedings of IEEE Symposium New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), pp. 1–5
- G.J. Foschini, M.J. Gans. (1998). *On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas*. Wirel. Pers. Commun. 6(3), 311–335.
- L. Zheng, D.N.C. Tse. (2003). *Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels*. IEEE Trans. Inf. Theory 49(5), 1073–1096 (2003)
- F. Rashid-Farrokhi, L. Tassiulas, K.J.R. Liu. (1998). *Joint optimal power control and beamforming in wireless networks using antenna arrays*. IEEE Trans. Commun. 46(10), 1313–1324.
- R. Zhang, Y.-C. Liang. (2008). *Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks*. IEEE J. Sel. Top. Signal Process. 2(1), 88–102.
- R. Zhang, F. Gao, Y.-C. Liang. (2010). *Cognitive beamforming made practical: effective interference channel and learning-throughput tradeoff*. IEEE Trans. Commun. 58(2), 706–718.
- F. Gao, R. Zhang, Y.-C. Liang, X. Wang. (2010). *Design of learning-based mimo cognitive radio systems*. IEEE Trans. Veh. Technol. 59(4), 1707–1720.
- M. Mohseni, R. Zhang, J.M. Cioffi. (2006). *Optimized transmission for fading multiple-access and broadcast channels with multiple antennas*. IEEE J. Sel. Areas Commun. 24(8), 1627–1639.
- L. Zhang, R. Zhang, Y.-C. Liang, Y. Xin, H.V. Poor. (2012). *On gaussian mimo bc-mac duality with multiple transmit covariance constraints*. IEEE Trans. Inf. Theory 58(4), 2064–2078.
- L. Zhang, Y.-C. Liang, Y. Xin, H.V. Poor. (2009). *Robust cognitive beamforming with partial channel state information*. IEEE Trans. Wirel. Commun. 8(8), 4143–4153.
- E.A. Gharavol, Y.-C. Liang, K. Mouthaan. (2010). *Robust downlink beamforming in multiuser mimo cognitive radio networks with imperfect channel-state information*. IEEE Trans. Veh. Technol. 59(6), 2852–2860.

- Y. Pei, Y.-C. Liang, L. Zhang, K.C. Teh, K.H. Li. (2010). *Secure communication over miso cognitive radio channels*. IEEE Trans. Wirel. Commun. 9(4), 1494–1502.
- Q. Xiong, Y.-C. Liang, K.H. Li, Y. Gong, S. Han. (2016). *Secure transmission against pilot spoofing attack: a two-way training-based scheme*. IEEE Trans. Inf. Forensics Secur. 11(5), 1017–1026.
- S.-Y. Lien, K.-C. Chen, Y.-C. Liang, Y. Lin. (2014). *Cognitive radio resource management for future cellular networks*. IEEE Wirel. Commun. 21(1), 70–79.
- S. Sadr, A. Anpalagan, K. Raahemifar. (2009). *Radio resource allocation algorithms for the downlink of multiuser OFDM communication systems*. IEEE Commun. Surv. Tut. 11(3), 92–106.
- H. Zhang, L. Venturino, N. Prasad, P. Li, S. Rangarajan, X. Wang. (2011). *Weighted sum-rate maximization in multi-cell networks via coordinated scheduling and discrete power control*. IEEE J. Sel. Areas Commun. 29(6), 1214–1224.
- J. Huang and V. Krishnamurthy. (2010). “*Transmission control in cognitive radio as a Markovian dynamic game: Structural result on randomized threshold policies*,” IEEE Trans. Commun., vol. 58, no. 1, pp. 301-310.
- H. T. Cheng and W. Zhuang. (2011). “*Simple channel sensing order in cognitive radio networks*”, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 29, no. 4, pp. 676-688.
- Y. Xu, Z. Gao, J. Wang, and Q. Wu. (2011). “*Multichannel opportunistic spectrum access in fading environment using optimal stopping rule*” in Proc. First International Conference of Wireless Communications and Applications, (ICWCA 2011), pp. 275-286.
- A. Anandkumar, N. Michael, A. Tang, and A. Swami. (2011). “*Distributed algorithms for learning and cognitive medium access with logarithmic regret*” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 29, no. 4, pp. 731-745.
- K. Liu and Q. Zhao. (2010). “*Distributed learning in multi-armed bandit with multiple players*” IEEE Trans. Signal Process., vol. 58, no. 11, pp. 5667-5681.
- Q. Zhao. (2007). “*Spectrum opportunity and interference constraint in opportunistic spectrum access*” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP).
- J. Chapin, D.C. Sicker. (2006). “*Safety and certification for new radio technologies*” IEEE Commun. Mag., vol.44, no. 9, pp. 30–32.
- Wang, Jianfeng et al. (2011). “*Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey*”, IEEE Communications Magazine, p. 74.
- Akyildiz, Ian F. et al. (2006). “*NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey*”, Computer Networks vol.50, Estados Unidos, p. 2135.
- F. Thrasyvoulos. (2014). *Stay or Switch? Analysis and Comparison of Interweave and Underlay Spectrum Access in Cognitive Radio Networks*. EURECOM, Ref- 4440.

- M. Shilpa & J. Manju. (2016). *A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques*. ELSEVIER., pp. 613-620.
- G. Baldini et al. (2012). "Security Aspects in Software Defined Radio and Cognitive Radio Networks: A Survey and A Way Ahead", IEEE Communications Surveys & Tutorials vol. 14, no. 2, p. 358.
- K. Liu and Q. Zhao. (2012). "Cooperative game in dynamic spectrum access with unknown model and imperfect sensing," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, no. 4.
- López. D, Salamanca. J & Gallego A. (2017). "Desarrollo de algoritmos para la selección de canales espectrales en redes inalámbricas de radio cognitiva usando las estrategias reactiva y proactiva". Revista Científica., pp. 180-194.