



# ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO EN REDES INALÁMBRICAS DE NUEVA GENERACIÓN: UNA APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE

## DYNAMIC SPECTRUM ALLOCATION IN NEW GENERATION WIRELESS NETWORKS: AN APPROACH TO THE STATE OF THE ART

<sup>1</sup>Jorge Edison Mora Arroyo, <sup>2</sup>Héctor Julián Parra Mogollón

<sup>1,2</sup>Especialización en Redes de Nueva Generación, Universidad Nacional Abierta y a Distancia —UNAD

Recibido: 15/10/2021 Aprobado 20/11/2021

### RESUMEN

La contradicción entre la prevista escasez del espectro electromagnético disponible, y la subutilización de los canales de frecuencia asignados, requieren un cambio de paradigma del anacrónico modelo de acceso estático; hacia un modelo de acceso al espectro dinámico, flexible y de alta eficiencia. Con base en lo anterior, en este trabajo de investigación se presenta un estudio y análisis detallado de las diferentes técnicas de acceso dinámico al espectro (DSA, *Dynamic Spectrum Access*), reconociendo su enorme potencial para mejorar el uso de recursos radio en redes inalámbricas de nueva generación (NGWN, *New Generation Wireless Networks*) como 5G, Small Cells, redes ultradensas y redes heterogéneas. Se ha establecido que mediante el uso de DSA, la necesidad de espectro para el despliegue de miles de millones de dispositivos de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) pilar de las comunicaciones 5G se puede reducir drásticamente, debido a la posibilidad de reuso o reciclaje de canales de comunicación libres o licenciados, explotándolos bien sea de manera oportunista y/o simultánea.

**Palabras clave:** DSA, NGWN, 5G, IoT.

### ABSTRACT

*The contradiction between the expected scarcity of the available electromagnetic spectrum, and the underutilization of the assigned frequency channels, requires a paradigm shift from the anachronistic static access model; towards a dynamic, flexible and highly efficient spectrum access model. Based on the foregoing, this research paper presents a detailed study and analysis of the different Dynamic Spectrum Access (DSA) techniques, recognizing their enormous potential to improve the use of radio resources in wireless networks. new generation (NGWN, New Generation Wireless Networks) such as 5G, Small Cells, ultra-dense networks and heterogeneous*

Citación: Mora Arroyo, J. E. ., & Parra Mogollón, H. J. . (2021). Asignación dinámica de espectro en redes inalámbricas de nueva generación: una aproximación al estado del arte. *Publicaciones e Investigación*. <https://doi.org/10.22490/25394088.5590>

<sup>1</sup>jemoraar@unadvirtual.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3850-4506>

<sup>2</sup>hector.parra@unad.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-0737-4502>

<https://doi.org/10.22490/25394088.5590>

*networks. It has been established that through the use of DSA, the need for spectrum for the deployment of billions of Internet of Things (IoT) devices, the mainstay of 5G communications, can be drastically reduced, due to the possibility of reuse or recycling of free or licensed communication channels, exploiting them either opportunistically and/or simultaneously.*

**Key words:** DSA, NGWN, 5G, IoT.



## 1. MATERIALES Y MÉTODOS

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 objetivo de estudiar y analizar modelos emergentes de acceso dinámico al espectro (Mora, Miramá, & Erazo, 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 investigación se estudia y analiza la asignación dinámica de espectro, como una posible solución para optimizar el uso de dicho recurso, compartiendo o reutilizando 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 DSA en NGWN, para el reuso espectral, bien sea, compartiendo el recurso de manera concurrente, o reciclándolo cuando se encuentre disponible.

Lo anterior es de suma importancia en el escenario actual de las diferentes tecnologías inalámbricas de telecomunicaciones, puesto que 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), ha 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 (Mora, Miramá, & Erazo, 2019; Martínez, 2016) 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.

De este modo, en la literatura especializada se pueden consultar varias propuestas de esfuerzos relacionados con DSA aplicado al control y administración de *tecnologías de acceso radio* (RAT, *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.

En Salgado (2016), Mitola & Maguire Jr. (1999), Abbas, Nasser, & El Ahmad (2015), se plantea que la mayoría de los avances en investigación en radio cognitiva (CR, *Cognitive Radio*) 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 inteligencia artificial (AI, *Artificial Intelligence*). 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 *teoría de juegos* (GT, *Game Theory*), 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 *relación señal a ruido más interferencia* (SINR, *Signal to Interference Plus Noise Ratio*) hacia la red primaria, en (Zhang *et al.*, 2012) se propone un algoritmo de control de acceso que maximiza la cantidad de usuarios secundarios (SU, *Secondary Users*) admitidos al sistema, considerando como restricción la calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) de las redes primaria y secundaria, medida en términos de la interferencia presente en el sistema. Básicamente, controla la potencia de transmisión de los SU, mediante un algoritmo de control de potencia distribuido con protección de QoS para SU Activos (DCP-AQP, *Distributed Control Power with Active SU QoS Protection*). Para lo anterior, se distribuyen en el sistema primario múltiples puntos de medición (MP) de interferencia presente en el sistema. Cada MP cuenta con una alarma, de tal forma que mientras la interferencia se mantenga por debajo de un nivel pre-establecido, el algoritmo informa a los SU que pueden incrementar su potencia de transmisión para garantizar la calidad de su enlace durante el tiempo que dure su transmisión. Por el contrario, si la medición de la interferencia no cumple con el nivel de alarma, los MP le indican a los SU que disminuyan su potencia de transmisión a un nivel mínimo que permita mantener la QoS del sistema primario, pero al mismo tiempo garantice el éxito de la transmisión de los SU.

En Wang, & Zhao (2008), se presentan propuestas basadas en un grupo de usuarios primarios (PU, *Primary Users*) que comparten un receptor primario y un grupo de SU pueden utilizar uno o varios canales

simultáneamente con ellos, sólo si satisfacen su SINR, manteniéndose dentro del rango de potencia permitida y su interferencia acumulada en el receptor primario está por debajo del umbral establecido. El problema se divide en dos objetivos independientes de optimización: 1) maximizar el número de SU admitidos y, 2) maximizar la tasa de datos de los SU admitidos. Para el primer caso, se utiliza un algoritmo de control de potencia, sin embargo, necesita un gran número de operaciones para manejar la ocurrencia de diversos eventos para seleccionar el grupo de SU que pueden coexistir con los PU. Para el segundo caso, se aplica programación geométrica secuencial, una técnica que consiste en resolver secuencialmente el problema original a través de una aproximación a la función objetivo. Buscando así maximizar la tasa de transmisión de los SU sujeta a restricciones de SINR tanto en los PU como SU, y un umbral de interferencia en los PU. El modelo se evalúa 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, & Liu (2011), el trabajo en Roy & Kundu (2011), muestra un esquema de eliminación de SU cuando la interferencia en la estación base primaria (BS, *Base Station*) 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 & Zhao (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 (Martínez, 2015).

En Wang & Zhao (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 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 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 dónde las transmisiones de otros SU 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 mejoran 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 multi-objetivo. Por ejemplo, en Liu *et al.* (2013), los autores determinan el compromiso en un sistema de comunicación móvil de futura generación, entre el máximo número de SU (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  $D_p$ , si esta distancia es menor que  $D_p$ , éstas no podrán compartir el recurso espectral. El problema multi-objetivo (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, 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 Martínez (2015), Martínez & Andrade, 2013, Liu *et al.* (2013), se relacionan esfuerzos enfocados además de la eficiencia espectral de los SU, a la eficiencia espectral de los PU para el cálculo de la eficiencia espectral de toda 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 para buscar el grupo de SU que pueden coexistir con el PU, removiendo parcialmente SU hasta lograr que la interferencia se mantenga a un nivel tolerable para el PU. Lo anterior implica que se realicen un mayor número de operaciones, generando complejidad adicional al

problema, además de que existe la posibilidad de que a SU con niveles aceptables de SINR no se le asigne un canal de comunicación. Otra diferencia encontrada es que aborda el compromiso entre la máxima densidad de SU 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 seleccionados.

En Bayat *et al.* (2011) se propone un algoritmo de acceso al espectro distribuido, enfocado en la retransmisión de redes CR, con múltiples PU y SU. El eje central del algoritmo propuesto se enfoca en que los PU intercambien con los SU 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, Lai, & Halloran (2009), incorpora la idea de elaborar una implementación distribuida que se ocupe de la mejor asignación de SU, 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 *et al.* (2014) se expone 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, Feng & Zhang (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, para automáticamente adaptar sus parámetros de funcionamiento, con el fin de mejorar el comportamiento del sistema y el desempeño de la red. A partir de las capacidades de CR el enfoque de esta investigación se centra 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. 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 multi-objetivo. Para esto se emplean algoritmos genéticos los cuales permiten el desarrollo de 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 (Zhu *et al.*, 2008; Liu, Feng, & Zhang, 2012) como clasificador de señales utilizando la extracción de futuras señales de ciclo estacionario. Por tal razón, el uso de las redes neuronales artificiales 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 Liu, Feng, & Zhang (2012) se emplea un algoritmo de detección de espectro basado en Wireless Mesh Networks. Este último algoritmo muestra un mejor desempeño 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 multi-objetivo y problemas de configuración dinámica en CR, en respuesta al cambiante entorno inalámbrico de las redes de comunicación como se propone en Rondeau *et al.* (2004), Yong (2009).

Otro esfuerzo asociado con la aplicación de algoritmos evolutivos se encuentra en He *et al.* (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 *et al.* (2015) y 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 SU tienen que presentar solicitudes de ancho de banda al administrador primario de la red (Abbas *et al.*, 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 SU.

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 *et al.* (2010) y Iosifidis, & Koutsopoulos (2011), donde se plantean juegos de subastas, teniendo en cuenta que los jugadores son los compradores que deben 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 de espectro dinámico de cooperación expuesto en Jayaweera *et al.* (2011) y Chen *et al.* (2010); así como a la asignación de espectro dinámica en Iosifidis, & Koutsopoulos (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 Thrasyvoulos (2014).

Para el caso de uso de juegos estocásticos o juegos de Markov, en Latifa *et al.* (2012) se plantea su utilización en el modelamiento del comportamiento codicioso de un escenario CR, donde cada SU trata de aprender de su mejor respuesta, con el fin de mejorar sus estrategias y comportamiento en el tiempo. En Cheng & Zhuang (2011) 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 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 Li & Han (2010) y Xu *et al.* (2011) 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 Wang *et al.* (2012) 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 SU, 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.

En Wang *et al.* (2012) y Haibo *et al.* (2017) 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.

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

## 2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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.

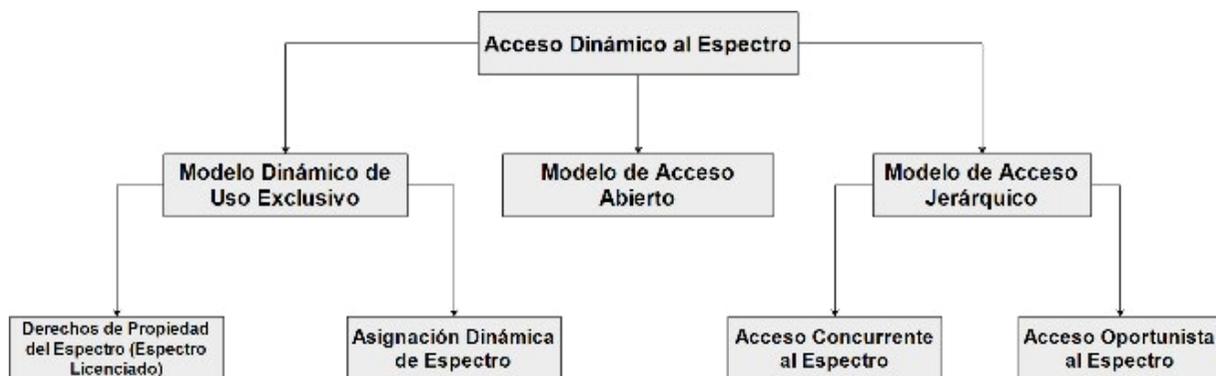


Figura 1. Aproximación taxonómica del modelo de acceso dinámico al espectro. Adaptada de Zhao & Sadler (2007).

**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.* (2011). El primer enfoque permite a los licenciarios 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 ánimo 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.

**Modelo de acceso abierto.** También denominado como espectro común en Benkler (1998) y Lehr & Crockett (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) y Ileri *et al.* (2005); y otro distribuido como las propuestas en Chung *et al.* (2003) y Huang *et al.* (2005); las cuales 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).

**Modelo de acceso jerárquico.** Este modelo adopta una estructura de acceso jerárquica al espectro con PU o usuarios licenciados, y SU 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 QoS 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.

**Acceso concurrente al espectro.** 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.

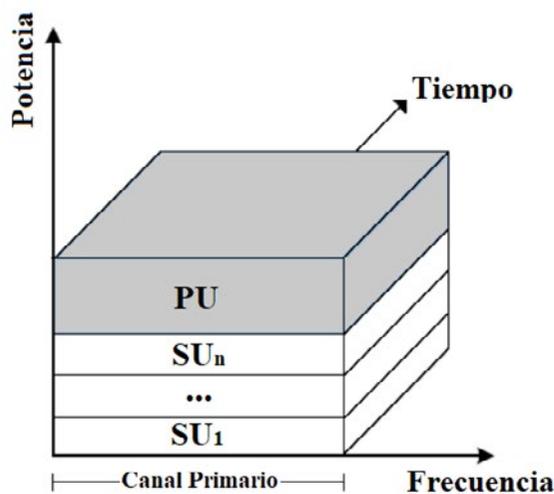


Figura 2. Esquema general de CSA. Tomada de Mora (2020).

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 (Mora, 2020; Zhang *et al.*, 2012; García, 2019), 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 una NGWN, 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 (Mora, 2020; Liang, 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 & Sousa, 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; Zhang, 2008), 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, 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 (Kang *et al.*, 2009; Zheng & Tse (2003). En particular, su función de supresión de interferencias co-canal para la transmisión multiusuario la convierte en

una técnica prometedora para mejorar el desempeño del modelo DSA (Liang, 2020; Rashid-Farrokhi *et al.* 1998). 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 (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 *et al.* 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.* (2012) y Zhang (2009). Además, el diseño de

CSA de múltiples antenas debe tener en cuenta la incertidumbre en el canal estimado (Zhang, 2009; Ghavrol *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 (Mora, 2020; Liang, 2020; Lien *et al.*, 2014). 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.

**Acceso oportunista al espectro.** El modelo OSA denominado también paradigma de entrelazado (o *Interweave* en inglés) en (Goldsmith *et al.*, 2009) o de superposición de espectro en (Zhao & Sadler, 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.

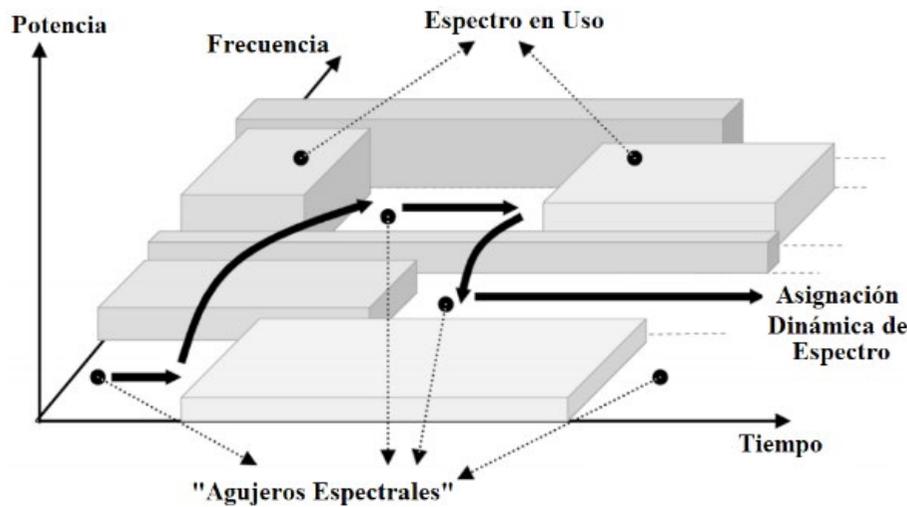


Figura 3. Esquema general de OSA. Tomada de Mora (2020).

En los sistemas OSA existen dos tareas o acciones fundamentales a realizar, que son: el sentido 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 Radiofrecuencia (RF, *Radiofrequency*) (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 GT en Xu *et al.* (2011), o modelos ocultos de Markov para procesos de decisión parcialmente observables en Zhao & Sadler (2007), o la regla de parada óptima en (Chang & Liu, 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 *redes heterogéneas* (HetNets, *Heterogeneous Networks*).

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 *et al.*, 2011).

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 & Saberi, 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 *et al.*, 2011).

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 & Saberi, 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 (Mora, 2020; Xu *et al.*, 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 Mora (2020) y Xu *et al.* (2011) 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 *et al.*, 2011).

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 que permitan su regulación.

**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 NGWN 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 1 se presenta un resumen comparativo de los aspectos y características más importantes de las técnicas CSA y OSA.

Seguidamente, 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 Mora *et al.* (2019); Liang (2020), Shilpa & Manju (2017) en las Figuras 4 y 5 se puede observar a manera de ejemplo el retardo de transmisión al momento de acceder al espectro para las estrategias CSA y OSA, respectivamente.

**TABLA 1.**

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.

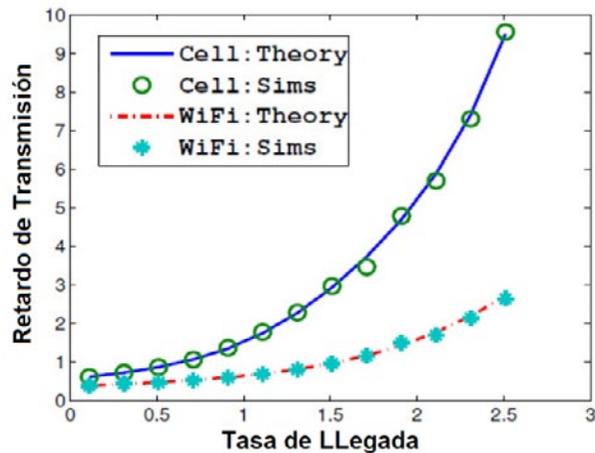


Figura 4. Comportamiento del retardo de transmisión en CSA. Modificada de Shilpa & Manju, (2016).

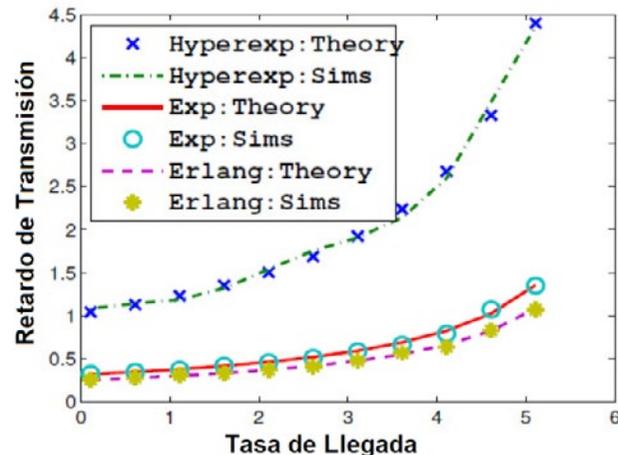


Figura 5. Comportamiento del retardo de transmisión en OSA. Modificada de Shilpa & Manju, (2016).

Para el análisis del comportamiento expuesto en las Figuras 4 y 5 se supone que los flujos de tráfico arriban o llegan en forma de una distribución de Poisson con un parámetro de tasa de ocurrencia. 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 4 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 5 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 4 y 5, se puede observar que el retardo de transmisión en la técnica OSA es menor que en la técnica CSA. Posteriormente, en las Figuras 6 y 7 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.

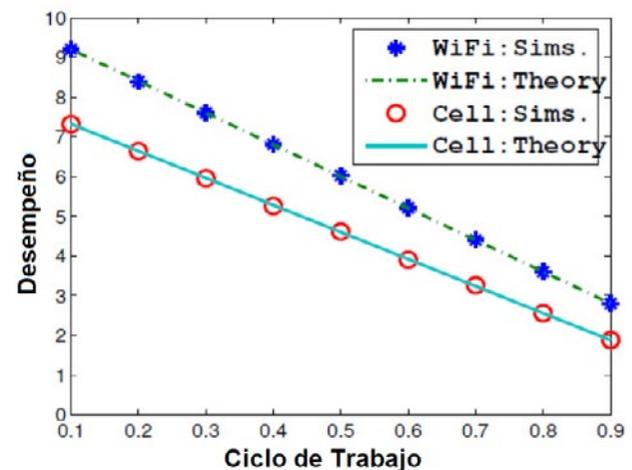


Figura 6. Desempeño de la técnica CSA. Modificada de Shilpa & Manju, (2016).

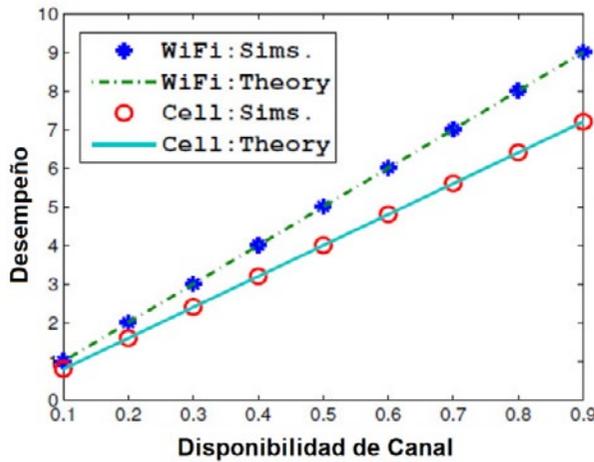


Figura 7. Desempeño de la técnica OSA. Modificada de Shilpa & Manju, (2016).

En la Figura 6, el desempeño se evalúa con el ciclo de trabajo, mientras que en la Figura 7, 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 6 y 7 se pueden comparar porque si el ciclo de trabajo es  $\tau$ , la disponibilidad de canal es  $\tau$ . 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 & Manju, 2016).

Con base en lo antes expuesto, en la Tabla 2 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.

En este punto es importante mencionar que, 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.

TABLA 2. 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 e 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.	Herramienta de modelamiento matemático del sistema de comunicaciones más empleada: teoría de juegos.
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.

De idéntica manera y con base en el razonamiento anteriormente expuesto, 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.

**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 licenciatarios 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 NGWN 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 (Mora *et al.*, 2019; Liang, 2020; Castañeda, 2017).
- 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 (Liang, 2020; Castañeda, 2017).

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 (Mora, 2020; Castañeda, 2017). 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 multitraectoria 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 Salgado (2016), Castañeda (2017), Baldini *et al.* (2012).

### 3. CONCLUSIONES

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 específicas 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. Lo anterior 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.

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.

El espectro inalámbrico se puede catalogar como un recurso de acceso limitado y costoso, cuyo suministro deficiente impediría la implementación de nuevas tecnologías móviles como LTE-A PRO y 5G. En muchos casos, a medida que los usuarios adoptan

tecnologías más nuevas y se actualiza la infraestructura que las soporta, 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 disminuir 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.

## AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, y a la cadena de formación en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes – ETR de la Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería – ECBTI, por generar espacios de difusión del conocimiento especializado en pro de aportar al desarrollo académico, científico y económico del país, dentro de un ecosistema moderno de economía digital e industria 4.0.

## REFERENCIAS

- Abbas, N., Nasser, 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.
- Astaiza, E. Bermúdez H. & Muñoz, L. (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*, 28(3), 185-193.

- Avin, C. Emek, Y., Kantor, E., Lotker, Z., Peleg, D. & Roditty, L. (2012). SINR Diagrams: Convexity and Its Applications in Wireless Networks. *JACM* 59(18), 1–18. 34. doi:10.1145/2339123.2339125
- Baldini G., Sturman, T., Biswas, A. R., Leschhorn, R., Godor, G. & Street, M. (2012). Security Aspects in Software Defined Radio and Cognitive Radio Networks: A Survey and A Way Ahead. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(2), 355-372.
- Bayat, S., Louie, R.H.Y., Li, 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*.
- Benkler, Y. (1998). Overcoming agoraphobia: Building the commons of the digitally networked environment. *Harv. J. Law Tech*, 11(2), Winter.
- Castañeda, R. (2017). *Tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro*. Instituto Federal de Telecomunicaciones.
- Chang N. B. & Liu, M. (2009). Optimal channel probing and transmission scheduling for opportunistic spectrum access. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 17(6), 1805–1818.
- Chen, L., Iellamo, S., Coupechoux, M. & Godlewski, P. (2010). An Auction Framework for Spectrum Allocation with Interference Constraint in Cognitive Radio Networks. *IEEE Infocom*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5462143>
- Cheng, H. T. & Zhuang, W. (2011). Simple channel sensing order in cognitive radio networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 29(4), 676-688.
- Chung, S., Kim, S., Lee, J. & Cioffi, J. (2003). A game-theoretic approach to power allocation in frequency-selective Gaussian interference channels. *IEEE Int. Symp. Information Theory*, pp. 316–316.
- Etkin, R., Parekh, A. & Tse, D. (2005). Spectrum sharing for unlicensed bands. *1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 251-258.
- Fehske, A., Gaedert J. & Reed, J. (2005). A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks. *IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access. Networks*, pp. 144-150.
- Foschini, G.J., Gans, M.J. (1998). On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wirel. Pers. Commun.* 6(3), 311–335.
- Gao, F., Zhang, R., Liang, Y.-C., Wang, X. (2010). Design of learning-based mimo cognitive radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4), <https://ieeexplore.ieee.org/document/5410127>
- García, A. (2019). *Small Cells 4G – Nuevos modelos de negocio*. AC-CELLERAN.
- Gharavol, E.A., Liang, Y.-C., Moushah, K. (2010). Robust down-link beamforming in multiuser mimo cognitive radio networks with imperfect channel-state information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), <https://ieeexplore.ieee.org/document/5460895>
- Ghasemi, A., Sousa, E.S. (2007). Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 6(2), 649–658.
- Goldsmith, A., Jafar, S.A., Maric, I. & Srinivasa, S. (2009). Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. *Proc. IEEE* 97(5), 894–914.
- Haibo, Z., Quan, Y., Xuemin, S., Shaohua, W. & Qinyu, Z. (2017). *Dynamic Sharing of Wireless Spectrum*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-45077-3>
- Hasegawa, M., Hirai, H., Nagano, K., Harada, H. & Aihara, K. (2014). Optimization for centralized and decentralized cognitive radio networks. *Proceedings of the IEEE*, 102(4), 574-584.
- Hatfield D. & Weiser, P. (2005). Property rights in spectrum: Taking the next step. *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 43-55.
- He, A., Bae, K.K., Newman, T.R., Gaedert, 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.
- Huang, J. Berry, R. & Honig, M. (2005). Spectrum sharing with distributed interference compensation. *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp.88-93.
- Ileri, O., Samardzija, D. & Mandayam, N. (2005). Demand Responsive Pricing and Competitive Spectrum Allocation via a Spectrum Server. *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 194-202.
- Iosifidis, G. & Koutsopoulos, I. (2011). Challenges in auction theory driven spectrum management. *Communications Magazine, IEEE*, 49(8), 128-135.
- Jayaweera, S.K., Bkassiny, M. & Avery, K.A. (2011). Asymmetric cooperative communications based spectrum leasing via auctions in cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions*, 10(8), 2716-2724.
- Kameda H. & Altman, E. (2008). Inefficient noncooperation in networking games of common-pool resources. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 26(7), 1260–1268.
- Kang, X., Liang, Y.-C., Nallanathan, A., Garg, H.K. & Zhang, R. (2009). Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: Ergodic capacity and outage capacity. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 8(2), 940-950.
- Kang, X., Zhang, R., Liang, Y.-C. & Garg, H.K. (2011). Optimal power allocation strategies for fading cognitive radio channels with primary user outage constraint. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 29(2), 374–383.

- Khoshkholgh, G. & Navaie, K. (2010). Access Strategies for Spectrum Sharing in Fading Environment: Overlay, Underlay, and Mixed. *IEEE Transactions on Mobile Computing, 9*(12), 1780-1793.
- Latifa, B., Gao, Z. & Liu, S. (2012). No-regret learning for simultaneous power control and channel allocation in cognitive radio networks. *Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp)*, pp. 267–271.
- Lehr, W. & Crowcroft, J. (2005). Managing shared access to a spectrum common. *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 420-444.
- Li, H. & Han, Z. (2010). Competitive spectrum access in cognitive radio networks: Graphical game and learning. *Proc. IEEE WCNC*, pp.1–6.
- Liang, Y., Lai, L. & Halloran, J. (2009). Distributed algorithm for collaborative detection in cognitive radio networks. *2009 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, pp. 394-399.
- Liang, C. (2020). *Dynamic Spectrum Management*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-0776-2>
- Lien, S.-Y., Chen, K.-C., Liang, Y.-C. & Lin, Y. (2014). Cognitive radio resource management for future cellular networks. *IEEE Wirel. Commun. 21*(1), 70–79.
- 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. *2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6671176>
- Liu, Y., Feng, Z.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.
- Lobel I. & Ozdaglar, A. (2010). Distributed subgradient methods for convex optimization over random networks. *IEEE Trans. Autom. Control, 52*(6), 1291–1306.
- Martinez, A. (2015). Control de admisión y asignación de canal para acceso dinámico de espectro usando cómputo multiobjetivo. *Computación y Sistemas, 19*(2), 337-355.
- Martínez, A. & Andrade, A. (2013). Comparing particle swarm optimization variants for a cognitive radio network. *Applied Soft Computing, 13*(2), 1222 1234. 10.1016/j.asoc.2012.10.016
- Martínez, E. (2016). Optimización binaria por cúmulo de partículas con memoria (MBPSO) para resolver un problema de espectro compartido. *Computación y Sistemas, 20*(1). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61544821014>
- Matinmikko, M., Del Ser, J., Rauma, T. & 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.
- Miramá, V. (2012). *Control de potencia basado en teoría de juegos en sistemas de comunicaciones inalámbricas*. Tesis de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca, Popayán.
- Mitola III, J. & Maguire Jr., G.Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE, 6*(4), 13-18.
- Mohseni, M. Zhang, R. & Cioffi, J.M. (2006). Optimized transmission for fading multiple-access and broadcast channels with multiple antennas. *IEEE J. Sel. Areas Commun. 24*(8), 1627–1639.
- Montanari A. & Saberi, A. (2009). Convergence to equilibrium in local interaction games. *Proc. 50th Annu. IEEE Symp. Foundat. Comput. Sci.*, pp. 303–312.
- Mora, J. (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. Universidad del Cauca, Popayán.
- Mora, J., Víctor, M. & Erazo, O. (2020). Performance Analysis of a Heterogeneous Network Using Artificial Intelligence and Multi-Objective Optimization.
- Mora, J., Miramá, V., Erazo, O. (2019). Asignación de espectro basado en inteligencia artificial empleando un algoritmo metaheurístico híbrido bioinspirado. *Mundo FESC*. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/505>
- Musavian, L. & Aissa, S. (2009). Fundamental capacity limits of cognitive radio in fading environments with imperfect channel information. *IEEE Trans. Commun. 57*(11), 3472–3480.
- Newman, B., Barker, B. & Agah, A. (2006). Cognitive Engine Implementation for Wireless Multicarrier Transceivers. *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing*. DRAFT (pp. 1-25).
- Pei, Y., Liang, Y.-C., Zhang, L., Teh, K.C., Li, K.H. (2010). Secure communication over miso cognitive radio channels. *IEEE Trans. Wirel. Commun. 9*(4), 1494–1502.
- Raman, C., Yates, R. & Mandayam, N. (2005). Scheduling variable rate links via a spectrum server. *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, 2005*, pp. 110–118.
- Rashid-Farrokhi, F., Tassiulas, L. & Liu, K.J.R. (1998). Joint optimal power control and beamforming in wireless networks using antenna arrays. *IEEE Trans. Commun. 46*(10), 1313–1324.
- Rondeau, T.W., Le, B. Rieser, C.J. & Bostian, C.W. (2004). Cognitive radios with genetic algorithms: Intelligent control of software defined radios. *Software defined radio forum technical conference* (pp. C3-C8). Citeseer.
- 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.

- Sadr, S., Anpalagan, A. & Raahemifar, K. (2009). Radio resource allocation algorithms for the downlink of multiuser OFDM communication systems. *IEEE Commun. Surv. Tut.* 11(3), 92–106.
- Salgado, C. (2016). Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas. *Tecnura*, 20(49). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/10981>
- Shilpa, M. & Manju, J. (2016). A Comparative Study on Various Spectrum Sharing Techniques. *Procedia Technology*, 25, 613–620.
- Thrasymou, F. (2014). Stay or Switch? Analysis and Comparison of Interweave and Underlay Spectrum Access in Cognitive Radio Networks. *Eurecom*, Ref- 4440.
- Wang, B. & Zhao, D. (2008). Performance analysis in CDMA-based cognitive wireless networks with spectrum underlay. *IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)*, New Orleans, pp. 1–6.
- Wang, B. & Zhao, D. (2010). Scheduling for long term proportional fairness in a cognitive wireless network with spectrum underlay. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(3), 1150–1158. 10.1109/TWC.2010.03.090802
- Wang, B. & Liu, K. (2011). Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, 5(1), 5–22.
- Wang, J., Xu, Y., Wu, Q. & Gao, Z. (2012). Optimal distributed interference avoidance: Potential game and learning. *Trans. Emerging Telecommun. Technol.*, 23(4), 317–326.
- Xiong, Q., Liang, Y.-C., Li, K.H., Gong, Y. & Han, S. (2016). Secure transmission against pilot spoofing attack: a two-way training-based scheme. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* 11(5), 1017–1026.
- Xu, L., Tonjes, R., Paila, T., Hansmann, W., Frank, M. & Albrecht, M. (2000). Drive-ing to the Internet: Dynamic radio for IP services in vehicular environments. *Proc. 25th Annual IEEE Conf. Local Computer Networks*, pp. 281–289.
- Xu, Y., Wang, J., Gao, Z., Wu, Q. & Anpalagan, A. (2011). Network throughput maximization in CRAHNS using local cooperative game. *Proc. IEEE Globecom 11*, pp. 1–5.
- Yong, L., Hong, J. & Qing, H.Y. (2009). Design of Cognitive Radio Wireless Parameters Based on Multiobjective Immune Genetic Algorithm. *Communications and Mobile Computing, 2009. CMC'09. WRI International Conference on (Vol. 1, pp. 92-96)*. IEEE.
- Zhang, H., Venturino, L., Prasad, N., Li, P., Rangarajan, S. & Wang, X. (2011). Weighted sum-rate maximization in multicell networks via coordinated scheduling and discrete power control. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 29(6), 1214–1224.
- Zhang, R. (2008). Optimal power control over fading cognitive radio channel by exploiting primary user CSI. *IEEE Glob. Commun.*, pp. 1–5
- Zhang, R. (2009). On peak versus average interference power constraints for protecting primary users in cognitive radio networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 8(4), 2112–2120.
- Zhang, R., Gao, F. & Liang, Y.-C. (2010). Cognitive beamforming made practical: effective interference channel and learning-throughput tradeoff. *IEEE Trans. Commun.* 58(2), 706–718.
- 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*, 25(5), 636–651.
- Zhao, Q. & Sadler, B.M. (2007). A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Process. Mag.* 24(3), 79–89.
- Zheng, L. & Tse, D.N.C. (2003). Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels. *IEEE Trans. Inf. Theory* 49(5), 1073–1096.
- Zhu, X.-L.; Liu, Y.-A.; Weng, W.-W. & Yuan, D.-M. (2008). Channel sensing algorithm based on neural networks for cognitive wireless mesh networks. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM'08. 4th International Conference on (pp. 1-4)*. IEEE.