

La radio cognitiva: desafíos futuros en el uso del espectro radioeléctrico***Cognitive radio its challenge on the use of radio spectrum*****Luis Rolando Roba Iviricu**

Máster en Sistemas de Telecomunicaciones de la Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Cuba, luis.roba@upr.edu.cu ; ID: <http://orcid.org/0000-0002-6094-1043>

José Manuel Díaz Hernández

Máster en Sistemas de Telecomunicaciones de la Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Cuba, jman@upr.edu.cu ; ID: <http://orcid.org/0000-0002-9996-5093>

Rigoberto Pestana Portales

Máster en Telemática, Telecomunicaciones e Informática. Instituto Tecnológico de la Habana. "Hermanos Saíz Montes de Oca, Cuba, rigoberto.pestana@upr.edu.cu ; ID: <http://orcid.org/0000-0003-4395-3285>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo

Roba, L. R., Díaz, J. M. y Pestana, R. (2020). La radio cognitiva: desafíos futuros en el uso del espectro radioeléctrico, *Avances*, 22(1), 139-167. Recuperado de <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/514/1599>

Recibido: 19 de septiembre de 2019

Aceptado: 20 de diciembre de 2019

RESUMEN

El presente artículo muestra las potencialidades de las tecnologías de Radio Cognitiva como paradigmas en el desarrollo de nuevas oportunidades de acceso a plataformas de comunicación y los desafíos futuros en su implementación. Para su elaboración se emplearon métodos teóricos como el análisis histórico-lógico, el enfoque de sistema y el análisis y síntesis; como métodos empíricos se

utilizó el análisis documental, subrayando la información más actualizada sobre el tema. El problema fundamental estriba en asignación estricta de bandas de frecuencia, que conlleva a una baja utilización de las mismas o un gran nivel de saturación en los servicios que se ofrecen. Se destacan cuatro temas fundamentales relacionados con la caracterización y optimización de la capa

física, esquemas de enrutamiento y seguridad, retos en la implementación de manera general y la estandarización actual de algunas tecnologías incluyendo la visión de conjunto que se tiene actualmente. La Radio Cognitiva como tecnología disruptiva impone numerosos desafíos, que reflejamos con nuestro análisis desde una perspectiva general analizando las diferentes soluciones para el censo espectral punto de partida para la gestión, con necesidades de seguridad en la comunicación y exponiendo diferentes tecnologías y estándares ya probados a nivel experimental y en explotación, destacando los más versátiles en soluciones desde el punto de vista de reconfiguración y adaptación. Desde el punto de vista informacional este trabajo de recopilación nos permite introducirnos en los conceptos de optimización espectral a través de las tecnologías cognitivas en radiocomunicaciones.

Palabras clave: Radio cognitiva, oportunidades de acceso, bandas de frecuencia, saturación espectral.

ABSTRACT

This article shows the potential of Cognitive Radio technologies as paradigms in the development of new opportunities for access to communication platforms and future challenges in their implementation. Theoretical methods such as historical-logical analysis, system approach and

analysis and synthesis were used for its elaboration; As empirical methods, documentary analysis was used, underlining the most up-to-date information on the subject. The fundamental problem lies in the strict allocation of frequency bands, which leads to a low use of them or a high level of saturation in the services offered. Four fundamental issues related to the characterization and optimization of the physical layer, routing and security schemes, challenges in the general implementation and the current standardization of some technologies including the overall vision that we currently have are highlighted. Cognitive Radio as a disruptive technology imposes numerous challenges, which we reflect with our analysis from a general perspective analyzing the different solutions for spectral census starting point for management, with communication security needs and exposing different technologies and standards already tested to experimental and operational level, highlighting the most versatile solutions from the point of view of reconfiguration and adaptation. From the informational point of view, this compilation work allows us to introduce ourselves to the concepts of spectral optimization through cognitive technologies in radiocommunications.

Keywords: Cognitive radio, access opportunities, frequency bands, spectral saturation.

1. INTRODUCCION

La Radio Cognitiva, surge como novedosa tecnología en comunicaciones, con gran potencial para realizar la explotación más eficiente del espectro radioeléctrico, recurso natural, accesible desde cualquier punto de nuestro planeta pero insuficiente a la hora de su aprovechamiento. Muchos autores coinciden en considerarla como una tecnología disruptiva, en el sentido que desplaza a las tecnologías establecidas creando nuevos dispositivos y estándares (López, Trujillo y Gualdron, 2015; Castro, Perdomo, Lavandera y Morales, 2015; Galindo, 2017).

Entre los factores que llevaron a su desarrollo se encuentran: el incremento vertiginoso que en los últimos años ha tenido la electrónica, conllevando a paralelismos de implementación sobre dispositivos re-programables de propósito general; encontrándonos a las puertas de conceptos como Máquinas Inteligentes, con la introducción de paradigmas info-cogno desplegándose redes capaces de alcanzar el aprendizaje. Un punto neurálgico de esta tecnología lo constituyen los dispositivos de radio definido por software (SDR), referenciados

en numerosos trabajos de investigación y desarrollo con implementaciones en la mayoría de sistemas comerciales que coexisten en la actualidad. Expresado con simplicidad la Radio Cognitiva (*Cognitive Radio, CoR*), dota al transmisor/receptor de un determinado dispositivo de la capacidad para ser consciente de su medio ambiente, aprendiendo de experiencias previas y adaptándose al entorno, para ser así mucho más eficiente en lograr una comunicación en determinada banda sobre-utilizada pero aún con facilidades en su espectro de frecuencias (Mitola y Maguire, 1999; Galvis, 2008; Amador y Alonso, 2013; Toledo et al., 2015; Hernández, Gato y Torres, 2018).

La principal ventaja estriba en que permite detectar el espectro no utilizado, crear un canal de comunicación para utilizar este segmento y hacerlo sin generar interferencias con los dispositivos nativos, que son aquellos con licencia (autorizados) para utilizar ese espectro. La idea es que un dispositivo con tecnología de Radio Cognitiva puede reconocer oportunidades de acceso, y utilizar los recursos disponibles en frecuencias y ancho de banda, independientemente de

la tecnología que ofrezca y use el servicio; siendo esto ideal en entornos donde existen frecuencias libres, un ejemplo de ello lo constituyen los entornos en donde existen frecuencias que no se utilizan o que, en un momento dado, no están siendo explotadas, o cuando haya mala señal de recepción producto a una reducción de estas oportunidades.

Como tendencia de desarrollo se puede apreciar que se habla en un futuro de poseer dispositivos que siendo conscientes del medio radioeléctrico, detecten automáticamente los servicios que se encuentran activos un ejemplo Wifi, y automáticamente cuando no existan facilidades en esta banda, lo haga por tecnología 3G o 4G, pero que adapte su comportamiento si detecta muchas frecuencias de Wifi libres, permitiendo utilizarlas todas y aumentar el ancho de banda (López et al., 2015; Castro et al., 2017; Galindo, 2017).

Aquí no se limita a utilizar frecuencias conocidas, para servicios conocidos, en teoría podría funcionar de manera *ad-hoc*, utilizando cualquier tipo de frecuencia encontrada para maximizar el flujo de datos (obviamente, tendría que haber tecnología de Cognitiva en las estaciones base y *routers* inalámbricos para que funcione correctamente). Con el advenimiento de lo que hoy conocemos como sistemas autónomos y como se puede apreciar en numerosos trabajos publicados,

tendríamos dispositivos que sin importar la tecnología empleada sea Wifi, 3G, Bluetooth, etc., lo único que realmente importaría sería el protocolo lógico de alto nivel (por ejemplo, TCP/IP) y no la tecnología "física" de bajo nivel, ya que nuestros dispositivos se comunicarían con cualquier recurso inalámbrico de comunicación en todas las frecuencias conocidas, sin importar el lugar, lo que redundaría en aumentar la eficiencia de las redes de manera exponencial (Montejo, 2013; Galindo, 2017).

El problema actual, viene dado, a la asignación estricta por parte de las políticas actuales de bandas de frecuencias, impidiendo el uso óptimo del espectro, resultando en la práctica, la existencia de bandas de frecuencia de muy baja utilización o prácticamente ninguna, a bandas mal gestionadas y por tanto con un gran nivel de saturación como se expresan en estudios realizados en varios países los cuales han arribado a resultados palpables sobre uso y explotación del recurso.

Por tanto este trabajo va dirigido a brindar una panorámica del desarrollo actual de las tecnologías de Radio Cognitiva de ahí que estructuramos la discusión en cuatro temas fundamentales: (1) Los problemas relacionados con la caracterización teórica y la optimización de la capa física de estas redes, (2) La gestión de recursos de radio, los

esquemas de enrutamiento y mecanismos de seguridad, (3) Retos con la implementación de la Radio Cognitiva y

(4) Visión de conjunto y estandarización relacionados con Radio Cognitiva, desarrollándose en la actualidad.

2. DESARROLLO

2.1 Problemas con la caracterización teórica y optimización de la capa física en redes de Radio Cognitiva.

Estos sistemas se caracterizan, de acuerdo con los postulados de la teoría de la información, como un caso particular del denominado canal de interferencias, en donde el objetivo del usuario secundario o cognitivo, es transmitir la mayor cantidad de información posible a su destinatario sin perturbar en exceso al usuario primario o licenciado. En dicho proceso, es crucial que el usuario secundario haga la mejor utilización de toda la información que, sin estar destinada a él, pueda tener conocimiento por haber sido transmitida por el usuario primario; o de cualquier conocimiento previo sobre la estructura de la señal interferente (Astaiza y Bermúdez, 2012; Hernández, 2015).

En los artículos y documentos consultados se hace un gran énfasis en el tema de la re-configuración, adaptación e inteligencia en la capa física a través del

desarrollo de dos tecnologías complementarias: Radio Definido por Software (SDR, Software Defined Radio) y Radio Cognitivo (CR, Cognitive Radio). El término "Software Radio" fue acuñado por Joseph Mitola III en 1991, es el primer autor en referirse a radio re-configurable o re-programable (Mitola y Maguire 1999).

Posteriormente, en ese mismo año, este mismo autor introduce el término de Radio Cognitiva, considerándola como una tecnología de gran significado e importancia y que define una radio que puede cambiar sus indicadores de operación teniendo en cuenta uno o varios parámetros que mida o cense en su entorno. Hace además, una breve mención de cómo la Radio Cognitiva puede interactuar en el sistema a un nivel de alcance de una red cognitiva y termina reconociendo que los sistemas inalámbricos utilizan insuficientemente los recursos del espectro (Mitola y Maguire, 1999).

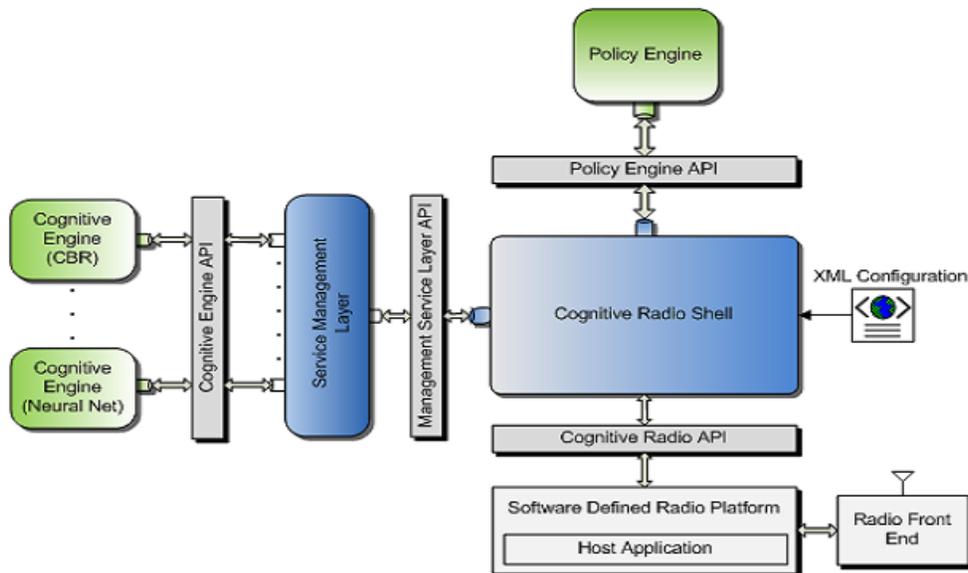


Figura 1. Diagrama simplificado de un sistema de Radio Cognitiva.

En el artículo publicado “*Radio cognitiva estado del arte*”, se muestra la arquitectura general de un sistema de radio cognitiva (Figura 1), además, brinda una serie de elementos para fundamentar los problemas que se generan por la constante evolución de las comunicaciones móviles, por el surgimiento de nuevos estándares y técnicas de acceso al medio, que facilitan el uso eficiente del espectro, pero que necesitan ser soportados por distintas industrias de terminales y de estaciones base. Tendencia hoy, gran demanda en la conectividad inalámbrica de Internet pero con múltiples servicios, por ejemplo la integración para ofrecer una perfecta cobertura global y un control sobre la calidad de servicio (QoS), todo esto mediante protocolos o estándares (WAP, i-mode, WiFi, WiMax, Bluetooth)

que propiciarán el desarrollo de futuros dispositivos inalámbricos (Aguilar y Navarro, 2011).

En este punto debido a la capacidad de re-programación y re-configuración, no se puede perder de vista los dispositivos de radio definida por software (*Software Defined Radio, SDR*), en donde un mismo elemento hardware es capaz de la realización de múltiples funciones, y esta tecnología se percibe como la base para la integración de diferentes estándares ya en explotación (Hernández, Pedraza y Martínez 2016; Hernández et al., 2018).

Como punto de partida para introducirse en los principales proyectos, tecnologías e investigaciones se encuentra el SDR Forum (*Software Defined Radio Forum*), un grupo independiente formado por la industria, científicos, ingenieros y

organismos reguladores. Desde el punto de vista técnico, se considera una excelente alternativa para la integración y convergencia de tecnologías inalámbricas, pero su implementación comercial aun impone ciertos retos, sobre todo de tipo económico, por los costos de los equipos necesarios. Sin embargo, con el avance de la tecnología y nuevos métodos de integración, se espera que a corto plazo la tecnología evolucione lo suficiente, sobretodo en el campo de la microelectrónica, como para que los estándares puedan adoptarlo y crear así un verdadero soporte de capa física para la convergencia y la interoperabilidad, permitiendo una evolución hacia un nivel superior como es la Radio Cognitiva (Márquez, 2014; Hernández et al., 2016; Hernández et al., 2018).

De los aspectos tratados anteriormente, con respecto, a la capa física y su caracterización teórica las principales investigaciones revisadas, van dirigidas a lograr la re-configuración del dispositivo transceptor, en el panorama actual, el hardware de las redes inalámbricas tradicionales se encuentra configurado estáticamente para funcionar con frecuencias previamente establecidas, realizando ajustes de parámetros como ancho de banda, encriptamiento, potencia de transmisión y recepción (Wireless Innovation Forum, s.f.)

Los autores consideran, si se quiere tener un sistema realmente cognitivo entonces la capa física debe ser capaz de adaptarse al ambiente que la rodea ¿Cómo, a través de los procesos o conceptos que se concentran en los algoritmos, estos permiten a las dispositivos detectar los denominados *huecos espectrales* (de ahí viene la optimización) y realiza la conexión una vez reconocida la banda y tecnología utilizada en ese momento. De aquí viene que alcanzar sistemas cognitivos en radiocomunicaciones se convierta en un paradigma, que significa abandonar esquemas de asignación estáticos a la dinamización del espectro pero desde los dispositivos y en concordancia con el ambiente local existente.

2.2 Gestión de recursos de radio, los esquemas de enrutamiento y mecanismos de seguridad.

Para la gestión de recursos de radio se hace necesario la detección del espectro, siendo esta, la labor de obtener un sentido de facilidades disponibles, determinando la existencia de usuarios licenciados; el desarrollo de los métodos de detección sigue constituyendo un reto fundamental, que comprende una gran variedad de aspectos asociados con la determinación del tipo de señal que ocupa una banda; sin embargo, esto requiere técnicas más robustas para el análisis de señales, que suponen mayor complejidad

desde el punto de vista computacional. En los diferentes trabajos consultados este es uno de los problemas fundamentales toda vez que se presentan resultados pero para diferentes bandas con sus características propias de explotación (Montejo, 2013; López et al., 2015; Hernández et al., 2016; IEEE, 2012).

Montejo (2013), define oportunidad espectral como "una banda de frecuencia que no es utilizada por el usuario primario de dicha banda en un momento dado en un área geográfica específica". Aquí el autor considera que esta definición de oportunidad espectral es insuficiente, dado que solo explota 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 primer caso, la información sobre la disponibilidad del espectro se recibe desde fuentes externas al sistema radio cognitivo. En el segundo caso, los usuarios secundarios identifican las oportunidades de acceso al espectro mediante la detección del espectro individual o cooperativa.

Para el correcto proceso de gestión se hace necesario primero realizar la

detección de las condiciones reales del espectro, estos se pueden clasificar en:

- ✓ **Métodos pasivos de detección:** Directamente distribuyen información sobre las bandas de frecuencias disponibles a los usuarios secundarios y los recursos espectrales pueden ser obtenidos mediante la negociación con los sistemas primarios (Aguirre, Pedraza y Puerta, 2012; Astaiza y Bermúdez, 2012; Hernández et al., 2018).
- ✓ **Detección local del espectro:** Cuyo objetivo es decidir entre las hipótesis de ausencia (H_0) y presencia (H_1) de las transmisiones primarias a partir de la observación de la señal recibida. El desempeño de un método de detección en particular puede caracterizarse a partir de la probabilidad de *detección incorrecta* $\delta = P \{H_0 | H_1\}$ y la probabilidad de *falsa alarma* $\xi = P \{H_1 | H_0\}$. (Aguirre et al., 2012; Astaiza y Bermúdez, 2012; Hernández et al., 2018).
- ✓ **Detector de Energía:** La señal es comparando la salida de un detector de energía con un umbral preestablecido. Este detector puede ser implementado en el dominio del tiempo o de la frecuencia. La señal recibida es elevada al cuadrado e integrada en el intervalo de observación. La salida del integrador es comparada con un umbral para decidir sobre la presencia del usuario primario. Este método de detección es uno de los más utilizados

debido a su generalidad, debido a su facilidad de implementación y bajos requerimientos computacionales (Aguirre et al., 2012; Astaiza y Bermúdez, 2012; Hernández et al., 2018).

- ✓ **Detector ciclo estacionario:** Para la detección del espectro se explotan las periodicidades implícitas de las señales moduladas, tales como portadoras sinusoidales, trenes de pulsos o prefijos cíclicos. Una señal es ciclo estacionaria cuando alguno de sus parámetros estadísticos como el valor medio o la autocorrelación es una función periódica del tiempo. Estas características pueden ser detectadas analizando la función de densidad espectral cíclica (*CSD: Cyclic Spectral Density*) de la señal recibida (Aguirre et al., 2012; Astaiza y Bermúdez, 2012; Hernández et al., 2018).
- ✓ **Detección de filtro adaptado:** Cuando los usuarios secundarios tienen información de las características de las señales transmitidas por los usuarios primarios, la detección de filtro adaptado es el método óptimo (Lewicki y Sane, 1998). Tales características incluyen la frecuencia central, tipo de modulación, ancho de banda, forma del pulso y formato de trama. La mayoría de los sistemas de comunicaciones incluyen señales pilotos, preámbulos o secuencias de sincronización utilizadas para asistir el control, ecualización, sincronización, mantener la continuidad o propósitos de

referencia. Los usuarios secundarios, tienen a su disposición información parcial de las señales de los usuarios primarios, esto implica también comunicación mediante la ayuda entre dispositivos quiere decir interactúan entre ellos y con el canal radioeléctrico que estén utilizando en ese momento.

- ✓ **Detección cooperativa:** Las afectaciones en la propagación de la señal como resultado del ruido, la interferencia, el ensombrecimiento y el desvanecimiento presentes en el canal inalámbrico impiden que las técnicas de detección local garanticen en todo momento un desempeño satisfactorio en cuanto a probabilidad de detección y de falsa alarma. Este tipo de detección es una propuesta recurrente en la literatura como solución a esta limitación. La colaboración entre varios usuarios secundarios permite explotar la diversidad espacial en la detección del espectro, incrementando consecuentemente la probabilidad de detección y disminuyendo la ocurrencia de falsos positivos (Zhao, Zheng y Yang, 2005; Yucek y Arslan, 2009; Hernández et al., 2016)

Como hemos interpretado, hoy se cuentan con numerosas investigaciones que defienden sus métodos de detección de espectro pero es difícil, por ejemplo, poder definir cuál de ellos es más eficiente, de una realización en hardware y software más compacta, es decir

diferentes criterios pero todos con la adaptación a los requerimientos que persiguen en una banda determinada. Por ejemplo si estamos hablando de tecnología móvil es de esperar que necesitemos métodos de censado cuyos resultados sean prácticamente inmediatos y hablamos de un canal de naturaleza congestionado no así para otras bandas de frecuencia que no necesitan esa respuesta tan rápida. Una vez realizado el proceso de detección es necesario hablar de esquemas de enrutamiento los cuales son los necesarios para que la información pueda ser compartida entre los nodos principales de la red y los usuarios secundarios conectados a ella. Esta labor es realizada por protocolos de enrutamiento dentro de los que cita Aguirre et al. (2012) y se presenta WCETT, que consiste en la asignación de pesos a cada uno de los enlaces teniendo en cuenta el tiempo de enlace en la transmisión de espera (ETT). En WCETT, cuando se tienen dos nodos adyacentes, estos pueden usar el mismo canal para transmitir la misma cantidad de flujo. Por tanto, antes de realizar la transmisión de datos, el nodo debe esperar a que el recurso del canal esté disponible. De esta forma, se incurre en demoras más largas y con menor rendimiento. WCETT puede verse también como una métrica de enrutamiento que tiene en cuenta dos cosas: la diferencia en el ancho de banda

de enlace y la diversidad de la asignación del canal. En una de las tesis doctorales consultadas, se presentan los resultados de la evaluación de un protocolo de enrutamiento para una Red de Radio Cognitiva, basado en el algoritmo de Dijkstra, en el que los nodos buscan el camino más óptimo, dependiendo de los pesos de cada ruta o enlace. Para la simulación de este escenario se utilizó el software Network Simulator 2 (NS2), herramienta que implementa el protocolo donde se genera el tráfico y se simula la movilidad de los nodos de la red de radio cognitiva (Pedraza, López y Salcedo, 2011).

En redes cognitivas las interferencias son fluctuantes en términos de frecuencia y localización. La mayoría de los estudios se han enfocado en la capa física y en la MAC; sin embargo, las investigaciones en enrutamiento de radio cognitiva son limitadas (Pedraza et al., 2011; Aguirre et al., 2012; *IEEE*, 2012).

Por otro lado, otras investigaciones se centran en la importancia de algoritmos de enrutamiento.

En la generalidad se describen por ejemplo el diseño de métricas de enrutamiento, se analizan los diferentes protocolos de enrutamiento, los estudios en algoritmos basados en la interferencia y se presentan resultados mostrando algoritmos adecuados para Redes de Radio Cognitiva en canales inalámbricos con

desvanecimiento (Pedraza et al., 2011; Aguirre et al., 2012; Raed Al-Zubi, Mohammad Z. Siam y Marwan Krunz, 2012; Lekomtcev, Maršálek, Lavandera y Cabric, 2012; Márquez, 2014).

Otros trabajos se basan en la infraestructura centralizada. También son propuestos, algoritmos basados en demanda de modo reactivo para seleccionar rutas y canales. Se incorporan dos métricas de enrutamiento basadas en el costo de disponibilidad del espectro y en la estimación de carga. Las metas el ROPCORN son maximizar el rendimiento y minimizar la latencia de mensajes, mientras también se minimiza los demás recursos consumidos tales como memoria, red y capacidad (Buddhiko, Kolody, Ryan y Evans, 2005; Hoven, Sahai y Tandra, 2004; Hernández, 2015).

Entre los protocolos de enrutamiento basados en el algoritmo de Dijkstra está SDCR (smallest delay cognitive routing), que utiliza este algoritmo para encontrar la menor ruta de retraso de transmisión. En uno de los trabajos se plantea que la información de enrutamiento es optimizada para preservar la batería de los dispositivos, mientras se mantiene una calidad de señal aceptable. De la misma manera, ha sido analizado un protocolo de estimación probabilística que mejora el throughput al compararse con el tradicional algoritmo de

Dijkstra (Pedraza et al., 2011; Aguirre et al., 2012).

2.2.1 Seguridad en radio cognitiva

Los principales objetivos específicos con la Radio Cognitiva incluyen la preservación de la privacidad de la información. Esto puede ser una necesidad vital, especialmente en las comunicaciones militares. En muchos sistemas de comunicación, la seguridad de la información está garantizada mediante el uso de una cantidad excesiva de cifrado, códigos que sólo son conocidos por el emisor y el receptor objetivo, para evitar que los usuarios no deseados puedan espiar la comunicación. En algunos otros sistemas, la seguridad de la información es un atributo inherente a la capa física. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) y los sistemas de salto de frecuencia, que pueden ser considerados ejemplo de dichas tecnologías, permiten una comunicación segura mediante la asignación a cada usuario de un código específico de esparcimiento o de una secuencia de saltos. De esta manera, un número de usuarios pueden utilizar la misma banda de frecuencias o el mismo fragmento de frecuencias sin escuchar el uno al otro. La Radio Cognitiva se halla todavía en fase muy formativa. Por lo tanto, existen ejemplos limitados de los sistemas de trabajo.

Las áreas de radiofrecuencia de redes futuras requerirán una mayor segmentación y especialización. El tamaño de las redes de acceso demanda el uso de centralización y funcionalidades de autoconfiguración y autogestión, muy probablemente algunas funciones de gestión se realizarán en la nube de Internet (Hoven et al., 2004; Rieser, 2004; Galeano y Romero 2015; Palacios, 2017).

Se precisa una capacidad superior de seguridad, que aprenda y se adapte a las singularidades y ambientes de comunicación. Y, para ello, resulta imprescindible contar con el máximo contexto posible que permita distinguir y eliminar cualquier nueva amenaza. Precisamente, ahí está el origen de la llamada seguridad cognitiva.

Ante ello, los líderes tecnológicos han comenzado a reaccionar y se han propuesto desarrollar una nueva generación de sistemas que "comprendan, razonen y recuerden" anteriores amenazas y que les permitan adelantarse a los peligros del futuro.

Se pretende crear en ellos un "instinto" de seguridad que se adelante a los ataques, con medidas de defensa avanzadas, surgidas de un aprendizaje previo, a partir de datos y experiencias del pasado. Se trata de analizar grandes volúmenes de datos, estructurados o no, procedentes de estudios y análisis

anteriores, de la web y de muy diferentes fuentes. Es decir, de procesar el material que consumen los científicos de datos, pero a una escala sin precedentes.

La clave de esta tecnología es ser capaz de procesar y comprender información a una velocidad muy superior a la de cualquier ser humano. Por tanto, hoy es posible entrenar a las defensas técnicas, para que analicen miles de informes, investigaciones, material de conferencias, artículos académicos, noticias, publicaciones de blogs y alertas del sector, entre otros muchos recursos. Y hacerlo a diario (Hoven et al., 2004; Rieser, 2004; Galeano, 2015; Palacios, 2017; CISCO Technology, s.f.).

Como conclusiones después de realizar el análisis de esta información la Radio Cognitiva y el acceso dinámico al espectro, tienen todavía un duro trabajo en lo relacionado a la gestión del espectro licenciado de manera eficiente, pero se prevé que el concepto de acceso dinámico al espectro aumente y dificulte aún más la complejidad de esta tarea. Hoy se pronostica que existirán zonas geográficas donde dos servicios y hasta dos proveedores de servicios de transmisión diferentes podrán compartir el mismo ancho de banda de frecuencia que a su vez puede estar licenciado o no, de manera que el equipo de radiofrecuencia de una compañía tendrá que enfrentar un ecosistema de interferencia totalmente

nuevo, la red probablemente implementará una nueva función de coordinación de espectro y los equipos de planeación de tráfico tendrán que modelar el tráfico considerando nuevos retos de interferencia. Sin embargo también hay oportunidades que los proveedores de servicios de transmisión, pueden aprovechar como por ejemplo la posibilidad de reemplazar infraestructura de transporte alámbrico por nodos repetidores inalámbricos y la oportunidad de desbordar tráfico hacia espectro compartido.

a. Retos con la implementación de la Radio Cognitiva

Los desafíos de Radio Cognitiva pueden ser varios, debido a que se abarcan temas desde el censado del espectro hasta decisiones de movilidad en este, teniendo en cuenta esquemas de acceso al medio y tipo de redes en las cuales interactúa la radio cognitiva. Por tanto, en este apartado se describirán brevemente estos desafíos (Wireless Innovation Forum, s.f.).

Una de las características desafiantes del espacio en blanco es su variación a través del espacio y del tiempo. En concreto, los canales disponibles no son contiguos y varían de un lugar a otro. Además, el espacio en blanco disponible en un lugar determinado puede variar con el tiempo, si uno o más usuarios en una banda

determinada, usuarios principales, deciden iniciar/detener la operación. Esto requiere de una arquitectura con agilidad de asignación de frecuencia para destinar al espectro de espacio en blanco disponible (Astaiza y Bermúdez, 2012; López et al, 2015; Aguilar y Navarro, 2017).

Los requisitos son más difíciles que en las redes de división de frecuencia dúplex (FDD), que necesitan dos canales separados para la operación. En particular, algunos de los problemas de radio frecuencia que es necesario resolver para las redes de FDD incluyen:

- ✓ Ajuste independiente de emisor y receptor.
- ✓ Proporcionar aislamiento de RF (en el orden de 50 dB) entre el transmisor y el receptor para el transmisor de frecuencia variable y el receptor.
- ✓ El desarrollo de receptores altamente lineal en un amplio rango dinámico de manejar en la banda alta emisiones de televisión de potencia.

i. Censado del espectro

El proceso de censado no puede realizarse al tiempo en que se envía la información entre usuarios de radio cognitiva, por consiguiente, si se requiere desarrollar acciones de censado, los usuarios deben detener las transmisiones para realizar censado, afectando la eficiencia del espectro. Con base en esto sería deseable desarrollar algoritmos de

censado que reduzcan el tiempo de censado del espectro mientras mejoran la precisión en el proceso de censado (Astaiza y Bermúdez, 2012; Lekomtcev et al., 2012; López et al, 2015; Aguilar y Navarro, 2017).

ii. Espectro compartido

En trabajos realizados en radio cognitiva se hacen suposiciones que los usuarios secundarios conocen de antemano como la localización y el nivel de potencia de la transmisión de los usuarios primarios, lo cual permite realizar los cálculos de interferencia de manera fácil. Sin embargo, esta suposición no siempre es cierta para algunas redes de radio cognitiva (Astaiza y Bermúdez, 2012; Lekomtcev et al., 2012; López et al, 2015; Aguilar y Navarro, 2017).

iii. Procesos de aprendizaje

Debido a las complejidades inherentes de la radio cognitiva, sería deseable habilitar en los dispositivos que hagan uso de radio cognitiva un proceso de aprendizaje que tome en cuenta las decisiones tomadas en el pasado para mejorar su comportamiento dentro de la red en decisiones futuras. El diseño de este tipo de algoritmos representa un gran desafío, debido a que se debe encontrar qué mediciones deben ser necesarias para desarrollar este proceso de aprendizaje

(López et al, 2015; Aguilar y Navarro, 2017).

iv. Esquemas de control de Acceso al Medio

Aunque el grupo de investigación del estándar IEEE 802.22 está trabajando en el desarrollo de un protocolo de control de Acceso al Medio (MAC), otras investigaciones han desarrollado esquemas que no se adecuan al estándar. Por ejemplo, los esquemas de control de acceso al medio distribuidos para redes CRAHN no están del todo cubiertos. En el estándar IEEE 802.11 se tratan algunos temas del manejo inteligente del espectro, como se muestra en IEEE 802.11k, pero este se limita a la operación en la banda ISM (IEEE, 2012; Castro et al., 2017).

b. Visión de conjunto y estandarización relacionados con radios cognitivas que se están desarrollando en la actualidad.

Existen varios tipos de Radios Cognitivas que pueden adaptar su tecnología de comunicaciones para interactuar con una variedad de redes existentes de radio (Engelstad, Grønsund, Lavandera y Cabric, 2008).

Solamente se citan en este estudio, aquellas que han llegado a una implantación práctica, una vez validadas de manera experimental sus soluciones embarcadas en dispositivos de desarrollo

tanto desde el punto de vista de hardware como de software.

2.4.1 CORTEKS

Radio Cognitiva implementada en la Universidad de Virginia Tech. CORTEKS es controlado por un software de políticas definidas que actúa como un US del espectro adaptando su frecuencia de operación y modulación para maximizar las posibilidades y tratando en la misma vía de evitar las interferencias que se pudiesen ocasionar con los usuarios primarios. Para determinar la presencia de estos en el espectro censado utiliza redes neuronales para clasificar las señales (Aguilar y Navarro, 2011).

2.4.2 Adapt4 XG1.

Es un tipo de Radio Cognitiva y actualmente es un campo de la radio cognitiva XG1. Utiliza un algoritmo propietario denominado Protocolo de Adaptación Automático al Espectro (ASAP, por sus siglas en inglés), el cual está diseñado para operar como usuario secundario. Tiene características como: selección dinámica de frecuencia, salto de frecuencias y control de potencia en la transmisión en los casos donde sea posible y minimizar la interferencia para los usuarios primarios (Aguilar y Navarro, 2011).

2.4.3 DARPA xG.

Investiga aspectos de esta tecnología como parte del programa NeXt Generation (xG) Networks, también conocido como DSAN (Dynamic Spectrum Access Networks) (Aguilar y Navarro, 2011).

2.4.4 CORVUS.

Esta arquitectura está enfocada en la utilización de usuarios secundarios, para sacar ventaja del espectro que no esté siendo utilizado en una banda de frecuencias licenciadas. Se maneja un grupo de usuarios secundarios denominado SUG, los cuales se comunican entre sí mediante una red ad-hoc para coordinar sus comunicaciones. CORVUS utiliza Spectrum Pooling desde el rango de los MHz hasta los GHz, creando una banda virtual no licenciada. Dentro de ella existen unos canales lógicos dedicados que se utilizan para el intercambio de información de control y censado denominados como Canal de Control Universal y Canal de Control de Grupos. El primero de ellos se usa para la coordinación entre grupos y el segundo para intercambio interno de cada grupo de información de control y censado. Avances recientes en esta arquitectura plantean un enlace confiable de mantenimiento dentro de CORVUS para mantener la calidad en la comunicación del usuario secundario.

Aquí se discute sobre la capa base, así como estrategias de superposición para uso en sistemas de radiocomunicaciones

cognitivos, para compartir el espectro. Se presenta, además, el banco de pruebas utilizado para la radio cognitiva (Čabrić et al., 2004).

2.4.5 E2R Project.

La Union Europea, s.f. citada por Aguilar y Navarro (2017), refieren el E2R (End-to-End Reconfigurability), es un proyecto de la Unión Europea donde participan numerosas universidades y empresas Nautilus. Proyecto de Microsoft, consiste en el análisis teórico y el diseño de un protocolo colaborativo y consciente del ambiente para el acceso dinámico al recurso espectral en ambientes de radio heterogéneos.

KNOWS.

El proyecto KNOWS (Kognitiv Networking Over White Spaces), ha generado una serie de prototipos funcionales cuyos componentes incluyen hardware, un mecanismo para asignación de espectro, y un protocolo MAC (Media Access Control), Parte del desarrollo está basado en el estándar 802.11 del IEEE (Akbar y Tranter, 2007).

2.4.6 Spectrum Pooling.

En esta arquitectura se propone la utilización de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Esta arquitectura consta de una estación base xG y usuarios móviles xG. La modulación

OFDM es candidata para este trabajo debido a que con este tipo de modulación es posible dejar un grupo de subportadoras sin modular, lo que es conveniente cuando estas subportadoras están siendo utilizadas por los UP. La detección de usuarios es realizada mediante el envío periódico, a través de la red, de tramas de detección. Con estas tramas los usuarios móviles actualizan el estado del censado del espectro. La información de detección es entonces recogida en la estación base. Los usuarios móvil es modulan un símbolo complejo a máxima potencia en las subportadoras donde los usuarios primarios aparecen. A través de este método la estación base recibe una señal amplificada de todas las subportadoras con los nuevos usuarios primarios técnicas basadas en ciclo-estacionaridad.

Este panorama también usa información dependiente de la posición para seleccionar el sistema del radio y la red de acceso, para establecer referencias para el operador de la información localizada independientemente. Una terminal móvil tendría ambos estándares Wi-Fi y Wi-MAX y el control de acceso al medio (MAC) / nivel físico (PHY), con una "capa de convergencia" encima de los controles de acceso al medio (MAC) y el sensor del espectro de radiofrecuencia en la terminal, lo que detectaría la presencia de otros radios, y esta información le

permitiría a la capa de control de acceso al medio (MAC) / nivel físico (PHY) ser seleccionada para cualquier sistema de radio, y mejorar los beneficios de la terminal para consultar la base de datos. La terminal móvil está bien posicionada para coordinar el cuerpo del área de red (CAR) que selecciona la más adecuada comunicación de largo alcance para enviar los datos del sensor a la red. (IEEE, 2012). Tema del trabajo doctoral de Christian Rieser, se utiliza en mediciones de canal para construir un modelo oculto de Markov (HMM) de su entorno. Los resultados del HMM a su vez son utilizados por un algoritmo genético para predecir el rendimiento de diferentes combinaciones de componentes de forma de onda para las condiciones de canal observado. (Rieser, 2004).

2.4.7 DIMSUMnet

La radio cognitiva DIMSUMnet (Dynamic Intelligent Management of Spectrum for Ubiquitous Mobile Network), implementa el acceso multiplexado estadístico (SMA) al espectro en una banda de acceso coordinado (CAB). La función de SMA es la mejora en la utilización del espectro, mientras que CAB mejora la eficacia del acceso a espectro y la equidad. CAB utiliza una parte contigua del espectro reservado por las autoridades reguladoras. Un broker o corredor de espectro permanentemente maneja el CAB

y lo arrienda de acuerdo con las solicitudes. DIMSUMnet utiliza un sistema centralizado, un mecanismo de intermediación de red regional que tiene como objetivo mejorar significativamente la utilización del espectro y reducir la complejidad y los requerimientos de agilidad del sistema implementado. La estación base se registra con el administrador designado de su red de acceso (RANMAN), el cual a su vez negocia un contrato de arrendamiento de una porción apropiada del espectro con el broker de manejo e información del espectro (SPIM). Si el arrendamiento es exitoso, el RANMAN configura el espectro arrendado en la estación base. La estación base envía la información recibida del RANMAN a sus usuarios para la configuración del cliente. Trabajos recientes se enfocan en el precio del espectro y las funciones de localización del espectro para los brokers del espectro.

Los autores investigan las cadenas de Markov en tiempo continuo para acceso dinámico al espectro en redes inalámbricas de espectro abierto, es decir, bandas de frecuencias no licenciadas, y se consideran tanto los modelos de colas como los de no colas. Hacen uso de un modelo antropológico para el acceso al medio, el cual usa solamente la información local, denominado homo equalis (HE). Los resultados analíticos se derivan de los modelos de Markov (Buddhikot, Kolody, Ryan y Evans, 2005; Márquez, 2014).

2.4.8 Kuar.

Hacemos referencia a los autores, los cuales, presentan una plataforma de desarrollo de radio definida por software portátil, potente y flexible denominada KUAR (Kansas University Agile Radio). El propósito de esta plataforma es permitir la investigación avanzada en las áreas de redes de radio inalámbricas, acceso dinámico al espectro, y Radios Cognitivas. Describe en detalle los requerimientos en hardware y herramientas de software, y presenta un ejemplo de aplicación de la modulación de KUAR, medición del espectro, estimación de canal, y la rápida configuración y adaptación de KUAR (Cordeiro, Challapali, Birru y Shankar 2005).

2.4.9 KNOWS.

Este sistema detecta los huecos en el espectro en la banda de frecuencias de televisión haciendo uso de censado cooperativo. Emplea un esquema distribuido denominado b-SMART, el cual dinámicamente ajusta la frecuencia de operación, el tiempo de ocupación en el canal asignado y el ancho de banda de la comunicación, basado en el conocimiento de huecos espectrales disponibles en el espectro. A partir de este conocimiento, KNOWS provee a cada usuario un segmento del ancho de banda disponible. KNOWS hace uso de un nuevo esquema

de control de acceso al medio denominado CMAC, basado en el protocolo MAC. A diferencia de este último, CMAC incorpora una mejora en los mecanismos RTS y CTS mostrados en el estándar IEEE 802.11 y en vez de reservar tiempo de transmisión en el aire en un canal, reserva segmentos vacíos de frecuencias en el espectro (Aguilar y Navarro, 2011).

2.4.10 DRiVE Project.

El proyecto europeo de radio dinámica para servicios IP en ambientes vehiculares o DRiVE (Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments), enfoca sus esfuerzos en proveer espectro dinámico en redes donde convergen varias tecnologías heterogéneas, haciendo uso de un canal común de coordinación. El proyecto Over DRiVE fue el siguiente paso del proyecto DRiVE. Este proyecto apunta al desarrollo y coordinación de UMTS (Universal Mobile Telephone Standard) en las redes de radio cognitiva de una red híbrida, para asegurar la eficiencia del espectro para los servicios de multimedia en dispositivos móviles (Aguilar y Navarro, 2017; Palacios, 2017).

2.4.11 Flex.

Se propone FLEX, una arquitectura distribuida para Access point de WiFi, la cual realiza la localización del espectro y eficientemente se adapta a las demandas de tráfico dinámico, de forma que se

maximice la satisfacción del usuario (Hernández, 2015; Aguilar y Navarro, 2017; Palacios, 2017).

2.4.12 OCRA network.

Considera todos los escenarios de implementación posibles sobre las redes heterogéneas xG y desarrolla operaciones en la capa cruzada para el acceso al espectro dinámico basado en OFDM. Para la decisión de espectro y el handoff del espectro, la red OCRA provee un nuevo concepto basado en OFDM, el cual consiste en el manejo del espectro en ambientes heterogéneos. A partir de la estructura de la capa física (PHY), se propone una estructura de modo dual de espectro compartido, la cual habilita el acceso a las redes existentes, así como la coordinación entre los usuarios XG.

Se proponen protocolos MAC cognitivos descentralizados que permiten a los usuarios secundarios ser autónomos al momento de buscar oportunidades espectrales, sin tener que estar controlado por un coordinador del espectro o un canal de comunicación dedicado. Se desarrolla asimismo un marco analítico para el acceso al espectro oportunista basado en la teoría del proceso de decisión de Markov Parcialmente Observable (POMDP). Este enfoque de decisión teórica integra el diseño de protocolos de acceso al espectro en la capa MAC con la detección del espectro en la capa física y estadísticas del

tráfico determinadas por la capa de aplicación de la red primaria. Sin mensajes de intercambio de control entre el transmisor secundario y el receptor debido a los protocolos descentralizados, asegura saltos síncronos en el espectro entre ellos en presencia de ambientes con colisión y errores en el censado del espectro.

Los autores diseñan una radio cognitiva que puede coexistir con múltiples canales paralelos WLAN respetando al mismo tiempo una limitación de interferencia. La interacción entre los 2 sistemas, la cual se caracteriza por la medición y la coexistencia, es mejorada por la predicción del comportamiento de WLAN basadas en un modelo de cadena de Markov de tiempo continuo. El acceso al medio cognitivo (CMA) se deriva de este modelo por la recomposición del problema como uno de los procesos de decisión de Markov limitados. La radio cognitiva considerada en este artículo es basada en saltos de frecuencia con una capa física similar a la utilizada por Bluetooth. Esto permiterealizar comparaciones conceptuales de coexistencia entre Bluetooth y WLAN (Hernández, 2015; Aguilar y Navarro, 2017; Palacios, 2017).

2.4.13 SPARTA.

Los autores proponen la SPARTA, una nueva arquitectura DSA que provee un eficiente y estable uso del espectro integrando la planificación proactiva con la

adaptabilidad reactiva. SPARTA introduce un novedoso algoritmo de control de admisión estadístico que proactivamente evita la congestión en la demanda por el espectro, mientras lidia con la interferencia. Esta arquitectura permite determinar el volumen de la demanda soportada por cada Access Point basada en sus estadísticas y la condición de interferencia local.

Se describe un modelo concreto para una radio cognitiva genérica para utilizar un motor de aprendizaje. El objetivo es incorporar los resultados del aprendizaje motor en un motor basado en razonamiento de cálculo, de manera que las radios pueden recordar las lecciones aprendidas en el pasado y actuar con rapidez en el futuro. También investigan las diferencias entre el razonamiento y el aprendizaje, y los fundamentos de cuando una aplicación particular requiere aprender, y cuando un razonamiento simple es suficiente. La arquitectura básica es consistente con los motores cognitivos observados en la investigación en IA. El objetivo de este artículo no es proponer nuevos algoritmos de aprendizaje de máquina, sino más bien formalizar su solicitud a la radio cognitiva y desarrollar un marco desde el cual pueden ser útiles. Se presenta una nueva metodología emergente para la inferencia estadística que mejora algunas deficiencias del algoritmo EM.

Esta metodología se denomina aproximación variacional y se puede utilizar para resolver los complejos modelos bayesianos donde el algoritmo EM no se puede aplicar. La inferencia bayesiana basada en la aproximación variacional ha sido ampliamente utilizada por la comunidad de aprendizaje de la máquina desde los años noventa, cuando se introdujo por primera vez.

Se da una propuesta de evaluación en el rendimiento de las redes de radio cognitiva tomando en cuenta factores como las métricas utilizadas por las redes, algoritmos utilizados en el proceso cognitivo y de acuerdo con esto los autores proponen los resultados de acuerdo a los escenarios planteados.

2.4.14 IEEE 802.22.

Es el primer estándar mundial basado en tecnología de Radio Cognitiva, también conocido como WRAN (Wireless Regional Area Networks). El objetivo prominente es el acceso al ancho de banda en áreas rurales y remotas con un rendimiento comparable a las tecnologías de acceso a banda ancha existentes en la actualidad. Por esta razón, entes gubernamentales, como es el caso de la FCC, estimulan el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en radio cognitiva que incrementen la disponibilidad de acceso a banda ancha para estos sectores no atendidos.

El estándar hace uso de las bandas de televisión debido a que estas bandas tienen buenas características en cuanto a propagación, permitiendo a potenciales usuarios acceder a los servicios de banda ancha. Por tanto, es un negocio conveniente para los proveedores de servicio de internet inalámbrico WISP (Wireless Internet Service Provider).

Mientras que la mayor parte de desarrollo comercial de radio cognitiva se está realizando en Estados Unidos, el objetivo del estándar IEEE 802.22 es definir un estándar internacional, que pueda operar como un régimen regulatorio. Por tanto, este estándar identifica las bandas de operación desde los 54-862 MHz para el territorio norteamericano, mientras que aún se encuentra en debate el rango de frecuencia desde los 41-910 MHz para acomodarse a los requerimientos internacionales. De igual forma, el estándar debe acomodarse al ancho de banda de los canales que difieren de 6,7 y 8 MHz.

En cuanto a la capacidad del servicio, el estándar determina eficiencias espectrales del orden de los 0,5 bit/(sec/Hz) hasta los 5 bit/(sec/Hz), por lo cual para un canal con un ancho de banda de 6 MHz la tasa de transferencia de datos podría ubicarse en el rango de los 3 Mbps hasta los 30 Mbps (IEEE, 2012).

2.4.15 Coexistencia en las bandas de acceso libre

En las bandas de frecuencia de acceso libre, los dispositivos de comunicaciones inalámbricas deben incluir la capacidad de coexistir con otros dispositivos que operan en el mismo canal y que utilizan protocolos de comunicaciones diferentes. Los mecanismos de coexistencia que se especifican en estándares como Bluetooth, WiFi (IEEE 802.11), ZigBee (IEEE 802.15.4) y WiMAX (IEEE 802.16) comparten similitudes con las técnicas de acceso dinámico al espectro, que pueden verse como una evolución de los mecanismos de coexistencia. La coexistencia no requiere el uso de técnicas cognitivas, pero las técnicas cognitivas pueden utilizarse para facilitar la coexistencia (Galvis, 2008; López et al., 2015; Hernández et al., 2016).

El estándar Bluetooth incluye una característica, denominada salto adaptativo de frecuencia, introducida con el objetivo de reducir la interferencia entre las tecnologías inalámbricas que comparten la banda de frecuencia de los 2.4 GHz. El salto adaptativo de frecuencia requiere de un algoritmo de detección para determinar la presencia de otros dispositivos en la banda ISM. Las frecuencias identificadas como ocupadas son evitadas. El algoritmo de detección utiliza varias estadísticas del canal,

incluyendo el indicador de potencia de la señal recibida y la razón portadora a interferencia más ruido, para clasificar los canales diferentes categorías según su disponibilidad.

En la especificación IEEE 802.11k, extensión propuesta del estándar IEEE 802.11, se utilizan varias estadísticas del canal inalámbrico para hacer más eficiente el uso de los recursos de radio. Algunas de estas estadísticas incluyen el reporte de la carga del canal y el histograma de ruido. Los puntos de acceso (APs: Access Points) obtienen información del canal desde cada unidad móvil y realizan sus propias mediciones. El AP entonces utiliza la información disponible para regular el acceso al canal y realizar una distribución equitativa del tráfico en la red. En otras especificaciones del estándar 802.11, los dispositivos móviles usualmente se conectan al AP con el nivel de señal más intenso, lo cual puede resultar en la sobrecarga de unos APs y la utilización ineficiente de otros. En 802.11k, cuando el AP de señal más intensa se encuentra a su máxima capacidad, las nuevas solicitudes de conexión se asignan a los APs subutilizados.

En el estándar IEEE 802.15.2 se definen una serie de técnicas colaborativas y no colaborativas que pueden ser aplicadas en función de mejorar la coexistencia con otros tipos de sistemas, particularmente con sistemas basados en

los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.15. En la especificación 802.11h se incluyen capacidades de selección dinámica de frecuencia (DFS: Dynamic Frequency Selection) y TPC. En este caso, las funciones de DFS tienen como objetivo la detección de radares militares y reasignación de un conjunto básico de servicios potencialmente interferentes a otras bandas de frecuencias. IEEE 802.16-2004 es otro estándar que incluye capacidades de DFS y TPC. En el estándar IEEE 802.15.4 se incluyen técnicas de selección dinámica del canal, similares a las técnicas de DFS (IEEE, 2012; Galvis, 2008; López et al., 2015; Hernández et al., 2016).

c. Estandarización

En el caso del IEEE, las actividades de estandarización llevadas a cabo por el Comité de Coordinación de Estándares (SCC) 41 sobre las Redes de Acceso Dinámico al Espectro y el Comité de Estándares 802 sobre redes LAN/MAN se destacan el estándar IEEE 802.22 y se especifican las interfaces inalámbricas, capas física y de control de acceso al medio de redes inalámbricas de área regional (WRAN) punto a multipunto, compuestas por estaciones base y dispositivos móviles/fijos operando en las bandas VHF/UHF de TV entre 54MHz y 862MHz.

Para operar en las bandas asignadas a los sistemas de televisión, se definen como requerimientos una probabilidad de detección mayor del 90 % y una probabilidad de falsa alarma menor del 10 %. Los sistemas secundarios deben ser capaces de detectar señales de -116dBm y -94 dBm para los sistemas de TV digitales y analógicos, respectivamente. En el caso de los dispositivos inalámbricos de baja potencia que operan en las bandas de TV, como cámaras y teléfonos inalámbricos, en el estándar se establece como requerimiento un umbral de detección de -107 dBm. Para facilitar su detección, las estaciones bases de estos dispositivos transmitirían periódicamente señales indicando su presencia. Estas señales, definidas en el documento 802.22.1, consisten en secuencias pseudo-aleatorias de un ancho de banda de 78 kHz. Muchas de las características del estándar 802.16 han sido adoptadas en

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo de revisión, hemos introducido los conceptos principales en los cuales se basan hoy todos los trabajos investigativos sobre todo en el acceso condicional no restrictivo el medio de comunicación, lo que trae consigo una optimización, la identificación de oportunidades de acceso a través de algoritmos que sean eficaces en la identificación de espacios espectrales no

las especificaciones de las capas física, control de acceso al medio y convergencia. La arquitectura de protocolos propuesta en el estándar, donde se separa el sistema en los siguientes planos: cognitivo, información/control y administración. Las funciones de geolocalización (GL) y detección del espectro (SSF) y que interactúan con la etapa de RF del dispositivo, proporcionan al módulo de administración del espectro (SM) información de localización y sobre la presencia de señales primarias, respectivamente. La mayor parte de la inteligencia y capacidad de tomar decisiones residen en la estación base y no en el usuario final. Las funciones de seguridad para los planos cognitivo, de información, control y administración incluyen la integridad de los datos, identificación, autenticación, autorización y confidencialidad /privacidad (IEEE, 2012; Luz y de Oliveira, 2012).

utilizados, y por supuesto los procesos de traspaso de la información de señalización necesaria para el establecimiento de una comunicación, esta es una de las cuestiones contradictorias pues muchos investigadores recurren a la ayuda mutua entre dispositivos; esto se verá en un futuro si tiene algún grado de influencia en como hoy los dispositivos actuales se comunican en bandas estrictas sin

posibilidad de re-configuración de parámetros a las alternativas de cognición que se quieren lograr. La bibliografía consultada enriquece las discusiones comenzando con los problemas de censado espectral destacando como una posible solución los algoritmos diseñados para ello. Muchos autores enmarcan sus reflexiones y resultados investigativos en esta primera parte del sistema que conllevaría aun diseño de lo que se conoce como motor de políticas, en el cual se implementarían los estándares de comunicación y los parámetros para ello, nos encontramos en la implementación de la capa física del sistema. Estos sistema por tener una concepción dinámica, se hace necesario que todas las funciones que contenga también aporten a esta constante adaptación lo que se refleja en el análisis de cómo realizar una correcta

gestión, un enrutamiento de los datos de manera óptima y garantizar la seguridad entre los usuarios que concurran en una misma sección del espectro en un momento determinado.

Cuando la tendencia hoy es a desarrollar sistemas de comunicaciones inalámbricos buscando mayores frecuencias y por ende mayores anchos de banda, la tecnología de radio cognitiva nos acerca a utilizar bandas no utilizadas o de baja explotación, y constituye alternativa a ubicar posibles canales de comunicación en bandas que pueden estar congestionadas.

Los retos en su implementación y estandarización que se exponen en la última sección, reflejan la gran cantidad de investigaciones, proyectos y estándares que surgen con este nuevo paradigma de comunicaciones, acercándonos más a la autonomía de estos sistemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, J. H., Navarro, A. (2011). Radio Cognitiva-Estado del arte. *Revista Sistemas y Telemática*, 9(16), 31-53. Universidad Icesi. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4115/411534383003.pdf>

Akbar, I. A., Tranter, W. H. (2007). Dynamic Spectrum Allocation in Cognitive Radio using Hidden Markov Models: Poisson

Distribution Case. *IEEE*, Richmond, pp. 196-201. Recuperado de <http://www.scirp.org/%28S%28i43dyn45teexjx455qIt3d2q%29%29/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=902685>

Aguirre, E. A., Pedraza, L. F. y Puerta, G. A. (2012). Evaluación del establecimiento de la métrica de enrutamiento WCETT en una red de radio cognitiva. Recuperado de

- <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6884/8476>
- Amador, J. A., Alonso, N. (2013). RDS (Radio Definido por Software). Consideraciones para su implementación de hardware. *Revista Telemática*, 12(2), 56-68. Recuperado de:
- Astaiza, E. y Bermúdez, H. F. (2012). Complejidad e impedimentos en el nivel físico para la implementación de redes satelitales cognitivas. *Revista de Investigaciones - Universidad del Quindío*. 23(1), 99-107. Recuperado de http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/revistainvestigaciones/resumen.php?id_r=8&id_a=207
- Čabrić, D., Mishra, S. M., Willkomm, D., Brodersen, R. y Wolisz, A. (2004). CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum. *White Paper, Berkeley Wireless Research Center*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228340611_A_cognitive_radio_approach_for_usage_of_virtual_unlicensed_spectrum
- Buddhikot, M. M., Kolody, S. M., Ryan, K., Evans, J. (2005). DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access. *In Proc. IEEE WoWMoM2005*, pp. 78-85. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.143.2661&rep=rep1&type=pdf>
- Castro, J. A., Perdomo, L., Lavandera, I. y Morales, J. (2017). IEEE 802.22, SUPER WI-FI. *Revista Telemática*, 16(1), pp. 1-12. Recuperado de <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele/article/view/248>
- CISCO technology (s.f.). 2020 global networking trends report. Estados Unidos: CISCO. Recuperado de <https://engage2demand.cisco.com/LP=18332?ccid=cc001244&oid=rpten018612>
- Cordeiro, C., Challapali, K. y Birru, D. (2006). 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios. IEEE. *Journal of Communications*, 1(1), 38-47. Recuperado de https://omidi.iut.ac.ir/SDR/2007/WebPages/07_822_2/802_22/802_22%20Introduction.pdf
- Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., Shankar, S. (2005). IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios, in Proc. *IEEE DySPAN 2005*, pp. 328-337. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?jsessionid=D313439BF4DD588946DE06B52D866D15?doi>

- =10.1.1.78.571&rep=rep1&type=pdf
- Luz, S. y de Oliveira, P. (2011). Estándar IEEE 802.22 para Redes Inalámbricas basadas en Radio Cognitiva: una revisión. *Visión Electrónica*, 5(2), 74-84.
DOI:
<https://doi.org/10.14483/22484728.3576>
- Engelstad, P. E., Grønsund, P., Lavandera Hernández, I., Cabric, D. (2008). Spectrum Sensing Aided Long-Term Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*. Recuperado de: https://bwn.ece.gatech.edu/surveys/cr_spect08.pdf
- Galeano, K. J. (2015). *Modelo de decisión del espectro para Radio Cognitiva que integra las pérdidas de propagación en la banda GSM del Espectro Radioeléctrico* (Tesis para optar al grado de Máster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones). Bogotá D.C, Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Galindo, R. (2017). Radio cognitivo ¿una tecnología disruptiva?. La Habana: Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones (LACETEL), 33 pp.
- Galvis, A. (2008). Acceso dinámico al espectro: Estado actual, Tendencias y Retos. *Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI)*. 2(4), 38-57. Recuperado de: https://bwn.ece.gatech.edu/surveys/cr_spect08.pdf
- Hernández, L. E. (2015). *Arquitectura de comunicaciones de datos inalámbricas para sistemas C4ISR* (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias). Universidad Politécnica de Valencia. 170 p.
- Hernández, C., Pedraza, L. F. y Martínez, F. H. (2016). Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva. *Revista Tecnura*, 20(48), 69-88.
DOI:10.14483/udistrital.jour.
- Hernández, M., Gato, L. M., Torres, J. (2018). Detección de señales mediante formación de coaliciones en Redes de Radios Cognitivos. En *VIII Simposio de Telecomunicaciones*. La Habana, Cuba. 8 pp.
- Hoven, N., Sahai, A., Tandra, R. (2004). Some fundamental limits on cognitive radio. *In Proc. Allerton Conf. on Commun Control, and Computing*. DOI:10.1.1.123.5645

- IEEE (2012). IEE 802.22 Working group on wireless regional area networks, Enabling Spectrum Sharing and Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology in White Spaces Recipient of the IEEE SA Emerging Technology Award. *IEEE 802.22 Working group on wireless regional area networks*, Recuperado de <http://www.ieee802.org/22/>
- Lekomtcev, D., Maršálek, R., Lavandera, I., Cabric, D. (2012). Comparison of 802.11af and 802.22 standards-physical layer and cognitive functionality. *ELECTROREVUE*,3(2). Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-802-.11-af-and-802-.22-standards-%E2%80%93-Lekomtcev-Mars%C3%A1lek/e2fd1027bb71b6e22101a2328c0a0bccf82f09ae>
- Lewicki, D. G. y Sane, A. D. (1998). *Three-dimensional gear crack propagation studies*. Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, NASA. 23 pp.
- López, D., R. Trujillo, E., E. Gualdrón, O. (2015). Elementos Fundamentales que Componen la Radio Cognitiva y Asignación de Bandas Espectrales. *Información Tecnológica*, 26(1), 23-40. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v26n1/art04.pdf>
- Mitola, J. y Maguire, G. Q. (1999). Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/fb5d/1bb23724d9a5a5eae036a2e3cf291cac2c1b.pdf>
- Márquez, H. R. (2014). Arquitecturas de radio cognitiva: una revisión actual. *Tecnura*, 18(39), 181-196. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v18n39/v18n39a14.pdf>
- Montejo, S. (2013). *Mecanismos de Control y Asignación de los Recursos de Transmisión Mediante el Conocimiento de la Ubicación en las Redes Ad Hoc Radio Cognitivas* (Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas). Santa Clara, Cuba. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Palacios, P. G. (2017). *Análisis de Cognitive Radio en Redes Móviles* (Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería de Redes de Comunicaciones). Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile.
- Pedraza, L. F., Hernández Suárez, C. A., Galeano Romero, K. J., Rodríguez de la Colina, E., Patricia Páez, I.

- (2015). *Ocupación espectral y modelo de radio cognitiva para Bogotá*. Primera edición. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Pedraza, L. F., López., D. A., Salcedo, O. (2011). Enrutamiento basado en el algoritmo de Dijkstra para una red de radio cognitiva. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 15(30), 94-100. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277261281_Enrutamiento_basado_en_el_algoritmo_de_Dijkstra_para_una_red_de_radio_cognitiva
- Raed Al-Zubi, Mohammad, Z. S., Krunz, M. (2012). Coexistence Problem in IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks. *ELECTROREVUE*, 3(2). Recuperado de <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1812342>
- Rieser, C. J. (2004). Biologically Inspired Cognitive Radio Engine Model Utilizing Distributed Genetic Algorithms for Secure and Robust Wireless Communications and Networking. (Dissertation- Tech, V.) Recuperado de <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/11283>
- Spectrum Sensing in IEEE 802.22. Recuperado de <http://www.eurasip.org/Proceeding> s/Ext/CIP2008/papers/1569094657.pdf
- Tendencias y tecnologías del futuro que modificarán a las compañías de telecomunicaciones móviles (2019). (Available in English) Recuperado de <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/11283>
- Toledo, K., Martinez, L., Cabrera, A., Cruz, E., Gato, L. M., Sánchez, E., González, E., Bengochea, Y., Torres, J. (2015). Procesamiento de señales con tecnología SDR: primeros pasos con el receptor PERSEUS. *Revista Telem@tica*, 14(1), 74-84. Recuperado de <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/whitefi-sigcomm09.pdf>
- Wireless Innovation Forum (s.f.). Recuperado de <http://www.wirelessinnovation.org/what-are-crand-dsa>
- Yucek, T.y Arslan, H. (2009). A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *IEEECommun. Surveys Tuts.*, 11(1), 116-130. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/4796930>

Zhao, J., Zheng, H., Yang, H. (2005). Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. DySPAN 2005, First IEEE International Symposium*. pp. 259-268. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Distributed-coordination-in-dynamic-spectrum-Zhao-Zheng/9fb4e1e3e4801554ec54ea7e4671fbcd18b92fd2>

Avances journal assumes the Creative Commons 4.0 international license