

Consideraciones para el Despliegue de Redes basadas en Radio Cognitiva: Ocupación y Regulación del Espectro

Carro, Gonzalo¹; Hernández, Patricia¹; Beltramelli, Federico²; Simon, María¹; Capdehourat, Germán¹; Rodríguez, Benigno¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

²Facultad de Información y Comunicación, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Resumen: El desarrollo constante de las aplicaciones de comunicación inalámbrica, que se refleja en el creciente número de usuarios y la variedad de dispositivos inalámbricos que son utilizados para aplicaciones diarias, representa una demanda creciente del recurso espectro radioeléctrico (ERE). En la hora pico algunas bandas están ocupadas mientras que otras permanecen sin ser utilizadas en toda su capacidad. Por lo tanto, la eficiencia con la que se administra el acceso a este recurso finito es de gran importancia para el futuro y la idea de desarrollar herramientas para un mejor uso del espectro de radio guarda relación con una demanda de uso compleja y en crecimiento. Los avances tecnológicos permiten el desarrollo de sistemas de comunicación con el potencial de utilizar los recursos de radio de una manera más dinámica y eficiente. En este contexto, las técnicas de Radio Cognitiva, ofrecen una mayor eficiencia y flexibilidad con respecto al uso del ERE. En Latinoamérica la ocupación del espectro no aparece hoy como un problema inmediato y si bien existen algunas experiencias locales que han aplicado la tecnología de CR, en muchos casos no se cuenta aún con mecanismos de control y gestión del recurso para este uso, por ejemplo, en Uruguay. Existe la necesidad de encontrar el mecanismo de gestión que se adapte al acceso oportunista de la mejor manera pues permitirá entre otros beneficios, el crecimiento de estos sistemas y un mejor uso del recurso. Para que esto sea posible es necesario en cada país desarrollar el marco regulatorio necesario. Este documento presenta los fundamentos de CR, sus beneficios y desafíos, información sobre los estándares existentes de los sistemas de CR, así como algunos ejemplos de implementación de estos sistemas que sugieren que el marco regulatorio y jurídico puede facilitar o dificultar las experiencias y avances en este campo.

Palabras clave: Radio cognitiva, comunicaciones inalámbricas, gestión del espectro radioeléctrico, tecnología de acceso inalámbrico.

Considerations for the Deployment of Cognitive Radio based Networks: Spectrum Occupation and Regulation

Abstract: The continuous development of wireless communication applications, reflected on the growing number of users and the variety of wireless devices for everyday applications, represents a growing demand for radioelectric spectrum. At busy hours some bands are overloaded while others remain unused. Therefore, the efficiency with which the access to this finite resource is administered is of great importance for the future and the idea of developing tools for better use of the radio spectrum is related to a complex and growing demand for use. Technological advances are enabling the development of communication systems with the potential of using radio resources in a more dynamic and efficient way. In this context, Cognitive Radio (CR) techniques offer improved efficiency and additional flexibility regarding the use of the spectrum. In Latin America, spectrum occupation does not appear today as an immediate problem and although there are some local experiences that have applied CR technology, in many cases there are still no control mechanisms and resource management for this use, for example, in Uruguay. There is a need to find the management mechanism that adapts to opportunistic access in the best way because it will allow, among other benefits, the growth of these systems and a better use of the resource. To make it possible, it is necessary in each country to develop the necessary regulatory framework. This paper presents the basics about CR, its benefits and challenges, information about existing standards as well as implementation examples of these systems, that suggest that legal and regulation frameworks can enable or hinder the develop of CR issues.

Keywords: Cognitive Radio, wireless communications, radio spectrum management, wireless access technology.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de CR fue presentado por Joseph Mitola III en el año 1998 en un seminario en el *KTH Royal Institute of Technology* ("KTH Royal Institute of Technology in Stockholm", n.d.). Al año siguiente fue publicado en un artículo bajo el título: "*Cognitive radio: making software*

radios more personal" (Mitola & Maguire, 1999) y posteriormente fue desarrollado ampliamente en su tesis de doctorado (Mitola III, 2000).

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) define un Sistema de Radio Cognitiva, en inglés *Cognitive Radio System* (CRS) como "un sistema radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite al sistema extraer información de su entorno operativo y geográfico, las políticas establecidas y

benigno@fing.edu.uy

Recibido: 13/04/2018

Aceptado: 17/09/2019

Publicado: 31/10/2019

<https://doi.org/10.33333/rp.vol44n1.03>

su situación interna; y adaptar de manera dinámica y autónoma sus parámetros y protocolos operacionales en función de la información obtenida a fin de cumplir unos objetivos predeterminados, así como extraer enseñanzas de los resultados obtenidos” (International Telecommunication Union [ITU], 2009).

Desde su origen, el concepto de CR ha captado la atención de la comunidad científica, así CR ha sido visualizada como una pieza clave en el desarrollo de la quinta generación de sistemas celulares (5G) cuyos principales desafíos son: aumentar la cobertura, capacidad y conectividad disminuyendo la latencia. En (F. Hu & B. Chen & K. Zhu, 2018) se analizan varias alternativas para que 5G pueda cumplir con estos objetivos, entre éstas se considera esencial el uso de un rango de espectro extendido (de 1 GHz a 100 GHz) con técnicas de CR.

Numerosas aplicaciones se beneficiarán notoriamente del uso de CR por su necesidad de espectro. Algunas de estas aplicaciones son aplicaciones médicas o de confort que se hacen posibles gracias a las redes inalámbricas de área corporal, en inglés *Wireless Body Area Network* (WBAN) y a las redes médicas de área corporal, en inglés *Medical Body Area Network* (MBAN), aplicaciones a la seguridad pública y aquellas que hoy se encuentran en auge relacionadas con redes inteligentes, en inglés *smart grids* (Wang, J. & Ghosh, M. & Challapali, K., 2011). En todas ellas, el concepto de IoT se vuelve relevante pues es este concepto el que habilita en gran medida su existencia. Todas ellas de importancia para las personas, las comunidades y el buen uso de la energía, entre otros. Si bien ya existen, es previsible que se expandan en forma notoria, en particular en la región latinoamericana, lo que generará un aumento considerable del tráfico de datos y de la demanda de espectro. Se estima que para el año 2020 habrá 50 mil millones de dispositivos conectados a Internet (Dave E., 2011), algo así como unos 6,6 dispositivos por cada habitante. Esto obviamente trae consigo numerosos desafíos técnicos y políticos (Cisco, 2016), entre ellos una mayor demanda de ERE, donde la utilización de CR podría tener un rol clave.

Las técnicas más empleadas responden a paradigmas de auto organización, para evitar las complicaciones que devendrían de redes cada vez más grandes y complejas y de su gestión, así como sus costos de operación y mantenimiento, con requerimientos de calidad de servicio (QoS) variables. Desde 2013 (Zang, Z. & Long, K. & Wang, J, 2013) se llama la atención sobre la aparente falta de escalabilidad y de convergencia del acceso dinámico al ERE, en inglés *Dynamic Spectrum Access* (DSA) basado en CR. Dentro de las variantes de auto organización, que comienzan con el sensado, se citan el sensado cooperativo, los algoritmos bio inspirados y la teoría de juegos (Zang, Z. & Long, K. & Wang, J, 2013).

Actualmente resulta muy prometedor aplicar la Inteligencia Artificial (AI) a sistemas de CR, como se analiza en (A. He

et al., 2010). Allí se considera la utilización de técnicas de AI tales como: redes neuronales artificiales, algoritmos metaheurísticos, modelos ocultos de Markov, sistemas basados en reglas y sistemas basados en ontología, en el contexto de redes CR. La AI aplicada a las redes CR no solo puede contribuir al desarrollo de redes auto-organizadas muy eficientes, al acceso dinámico al espectro y a mercados de espectro; sino que es de esperar que permita a mediano plazo un nivel de eficiencia en el uso del espectro cercano al óptimo.

La aplicación de sistemas de CR, requiere de la toma de decisiones a nivel de los organismos reguladores como la atribución de porciones del espectro a nivel internacional y la adjudicación a nivel nacional. Algunos autores (Masonta, M. T. & Mzyece, M. & Ntlatlapa, N., 2013) plantean que para el establecimiento de un marco de referencia para la gestión dinámica del espectro, se deben responder adecuadamente a tres grandes desafíos: ¿cómo caracterizar el espectro disponible?, ¿cómo seleccionar la mejor banda de espectro para satisfacer la demanda y los requisitos de calidad de servicio? y ¿cuál es la tecnología óptima para configurar la aplicación de CR en la banda del espectro seleccionado?.

En la Sección 2 de este documento se discuten las principales características y beneficios de los CRS. Luego en la Sección 3 se presentan brevemente los estándares más conocidos de CR. En la Sección 4 se analizan algunos proyectos piloto y casos de éxito desarrollados con tecnología CR. Luego en la Sección 5 se aporta información sobre los equipos disponibles comercialmente para desarrollar redes inalámbricas basadas en esta tecnología, este tipo de información puede facilitar la tarea de quienes estén considerando la utilización de esta tecnología. En la Sección 6 se comentan los principales desafíos regulatorios y los avances de esta tecnología en diversos países y regiones. Finalmente en la Sección 7 se resumen las principales conclusiones de este trabajo.

2. SISTEMAS DE RADIO COGNITIVA

Los CRS están formados por equipos de radiocomunicaciones capaces de conocer la ocupación del espectro radioeléctrico mediante el sensado (estilo listen and talk o variantes), consulta a base de datos o combinaciones de las dos estrategias (Wang, J. & Ghosh, M. & Challapali, K., 2011). Así, estos sistemas pueden determinar en qué momento y en qué bandas éste se encuentra disponible, así como en qué momentos está siendo utilizado.

Estos sistemas pueden tomar decisiones basadas en políticas establecidas, programas pre-cargados o sensado directo o cooperativo y adaptar sus estrategias de acuerdo a los resultados obtenidos. La AI forma parte de estas técnicas de adaptación o aprendizaje. De esta manera éstos sistemas buscan optimizar, en sucesivos lapsos, los parámetros de funcionamiento con la finalidad de aprovechar de la mejor manera posible el espectro disponible.

Esta nueva clase de radios presenta nuevas posibilidades así como también retos para las políticas sobre tecnología y regulación. La flexibilidad provista por los CRS permite un mayor dinamismo dentro de las operaciones de radiofrecuencia y presenta retos para su certificación y complicaciones asociadas al potencial mal uso de la tecnología (Fette, 2006).

2.1 Diagrama funcional de un CRS

Un CRS se puede modelar como una serie de componentes funcionales que interactúan entre sí y de esa interacción surge el comportamiento operativo del sistema. En la Figura 1 se muestra una representación de dicha interacción. El motor de razonamiento configura la Radio Definida por Software, en inglés *Software Defined Radio* (SDR), a través de la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API). Obtiene información del sensado del entorno y de una base de conocimiento que incluye las políticas de radiofrecuencia (RF) para tomar decisiones sobre los parámetros de operación del SDR. El motor de aprendizaje monitorea estas decisiones y sus resultados, actualizando en función de éstos la base de datos de conocimiento (Clancy III, 2006).

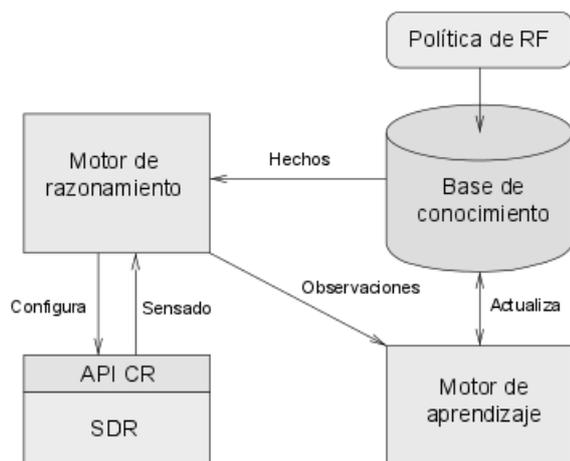


Figura 1. Diagrama funcional de un CRS.

2.2 Características de los CRS

Los CRS presentan tres características fundamentales (ITU, 2011):

- 1) Capacidad de obtener conocimiento.
- 2) Capacidad de modificar sus parámetros de funcionamiento.
- 3) Capacidad de aprender de los resultados obtenidos para continuar mejorando su rendimiento.

Una de las características más interesantes de los CRS es la capacidad de obtener conocimiento. El conocimiento necesario se debe extraer de diferentes fuentes, algunas externas al CRS (entorno radioeléctrico y geográfico, ciertas políticas establecidas para el uso del ERE, patrones de uso y preferencias de los usuarios) y otras internas (el estado operativo del propio CR).

La otra característica de los CRS es la de modificar sus parámetros de funcionamiento de forma automática, persiguiendo objetivos predefinidos. La toma de decisiones sobre sus parámetros puede realizarse de forma centralizada o distribuida.

En lo que refiere a los métodos de ajuste de los parámetros de funcionamiento existen dos tendencias a la hora de implementar un CRS. Una de ellas es proveer al CR de los módulos de hardware necesarios para implementar las diferentes modulaciones, frecuencias de funcionamiento y tecnologías de acceso entre las cuales pueda elegir en función de las necesidades que le imponga el entorno. La otra es el uso de la SDR, en las que se programan las diferentes funciones en software capaz de procesar las señales como lo haría un módulo dedicado.

Finalmente, la capacidad de aprender con el objetivo de permitir mejorar el rendimiento del CRS utilizando información guardada de las acciones tomadas en el pasado y sus resultados. Para realizar esta tarea se utilizan modelos y algoritmos que evalúan cada acción tomada por el CRS, de esta forma se aumenta la calidad de las decisiones tomadas por el sistema y con ello del rendimiento del CRS.

2.3 Beneficios de los CRS

En un escenario en que la demanda de espectro radioeléctrico (ERE) aumenta rápidamente, las tecnologías de CR traen consigo numerosos beneficios (ITU, 2011).

- **Mejoras en la eficiencia del uso del ERE:**
 - Aumento del rendimiento de una Tecnología de Acceso de Radio (RAT).
 - Permitir la coexistencia de diferentes RAT.
- **Flexibilidad:** no solo a nivel de gestión del ERE sino también a nivel operacional en los equipos desplegados a lo largo de su vida útil.
- **Autocorrección y tolerancia a las fallas:** gracias a la capacidad de aprender del resultado de las decisiones tomadas.
- **Eficiencia en el uso de la energía en los dispositivos terminales.**
- **Potencial para nuevas aplicaciones de comunicaciones móviles.**

2.4 Desafíos de los CRS

Según la UIT el desarrollo de los CRS se deberá dar paso a paso, debido a la variedad de desafíos que esta modalidad de uso compartido del espectro trae consigo. Entre los desafíos asociados a las tecnologías de CR se pueden mencionar (ITU, 2011):

- **Desafíos de índole técnica**
 - Confiabilidad de los métodos de sensado del espectro.
 - Problema del nodo escondido (situación que puede ser ocasionada por varios factores, entre los cuales

se encuentran el desvanecimiento multi-camino que experimentan los usuarios de CR al momento de detectar a los usuarios licenciados que se encuentren transmitiendo.

- Robustez de los canales de control en caso de ser necesarios de implementar.
- Colisiones en el acceso al medio.
- Forma de acceso a bases de datos y la robustez de éstas.
- Entorno de radio cambiante.
- Coexistencia de diferentes nodos de CR y otros nodos de RF.

Además de los desafíos de índole técnica mencionados, se pueden prever desafíos de índole administrativa, tales como:

- **Desafíos en la gestión del recurso ERE**
 - Necesidad de definir un marco regulatorio específico para el desarrollo de redes basadas en CRS.
 - Necesidad de adaptar el modelo de gestión para incluir esta tecnología.

3. NORMALIZACIÓN

En esta sección se presentan tres estándares que implementan funciones de CR y sus principales características.

3.1 Estándar IEEE 802.22

El estándar IEEE 802.22 (IEEE 802.22-2011 Standard), para Redes Inalámbricas de Área Regional (WRAN), nace como una norma para sistemas CR. Es considerado el primer estándar de CR. Su principal objetivo es posibilitar el acceso a conexiones de banda ancha en zonas rurales, a través del uso de los Espacios en Blanco de TV, en inglés *TV White Spaces* (TVWS), logrando velocidades del orden de las obtenidas con sistemas cableados xDSL, alcances muy superiores a éstos, mayor robustez frente a los obstáculos y mejor penetración en interiores que otros sistemas de banda ancha inalámbrica. Solamente es capaz de operar en las bandas de televisión, para ello además de una regulación que permita el uso sin licencia de estas bandas, necesita al menos tres canales de televisión libres consecutivos para poder operar, es decir al menos 18 MHz (de acuerdo a las restricciones regulatorias de EE.UU.).

Si bien la disponibilidad de acceso de banda ancha en las ciudades suele ser suficiente, gracias a las tecnologías de acceso *Digital Subscriber Line* (xDSL) o *Gigabit-capable Passive Optical Network* (GPON), en las zonas rurales y remotas la realidad es diferente. En estas zonas escasamente pobladas la inversión en infraestructura necesaria para desplegar este tipo de acceso de banda ancha suele no ser rentable, por lo que las soluciones inalámbricas se ajustan mejor a este tipo de zonas. En países como Estados Unidos donde gran parte de la población reside en áreas rurales, las tecnologías inalámbricas de banda ancha que permiten grandes alcances habilitan a esa parte de la población a

acceder al servicio (Cordeiro, C. & Challapali, K.. & Birru, D. & Shankar N. S., 2006).

3.2 Estándar IEEE 802.11af

El estándar IEEE 802.11 para Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN), permite el acceso a servicios de banda ancha de forma inalámbrica y se ha vuelto de uso masivo en los últimos tiempos. El grupo IEEE 802.11af TG se formó en el año 2009, creando posteriormente una enmienda que introdujo modificaciones en la especificación de las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC) del IEEE 802.11 para permitir la operación en los TVWS (IEEE 802.11af-2013 Standard).

Con la llegada de la televisión digital en varios países del mundo y la migración de los canales analógicos hacia la nueva tecnología, se han generado tramos libres en el ERE en la banda de UHF, esto se suma al hecho de que la banda de TV es ya de por sí una banda subutilizada. Para poder superar esta reconocida subutilización, es necesario el desarrollo de un marco regulatorio que avale cambios en la forma de uso del ERE permitiendo un uso más eficiente de este. Es por eso que reguladores como FCC en EE.UU. o la Office of Communications (Ofcom) en el Reino Unido han impulsado el desarrollo de diferentes sistemas de comunicaciones en estas bandas, favoreciendo pruebas piloto de varios estándares para el uso de los TVWS. El estándar IEEE 802.11af es considerado como uno de los más prometedores de cara al futuro (National Institute of Information and Communications Technology [NICT], 2012).

3.3 Estándar IEEE 802.16h

La enmienda IEEE 802.16h para Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (WMAN) especifica mecanismos mejorados, como mejoras en políticas y control de acceso al medio, para habilitar la coexistencia entre sistemas basados en el estándar IEEE 802.16 exentos de licencia y facilita la coexistencia de estos sistemas con los usuarios primarios (IEEE 802.16h-2010 Standard Amendment). Estos sistemas son desarrollados para brindar servicios de acceso de banda ancha fijo de forma inalámbrica, aunque también soporten equipos de usuario móviles. Esta enmienda permite un uso más eficiente del ERE lo que tiene asociado un ahorro económico significativo.

El desarrollo de WiMAX buscó dar una alternativa a las conexiones de banda ancha por medios físicos, como el par de cobre o la fibra óptica. Los sistemas inalámbricos, al prescindir en gran medida de los enlaces físicos entre estaciones, permiten dar servicio en áreas extensas con costos menores. Es posible dar el servicio tanto en exteriores como en el interior de edificios colocando antenas y radio bases adecuadas. La enmienda IEEE 802.16h al mejorar los mecanismos de coexistencia entre sistemas no licenciados basados en IEEE 802.16 y al facilitar la coexistencia de estos sistemas con el sistema primario agrega una importante mejora en la eficiencia de banda en las bandas que se destinan a estos servicios.

4. EXPERIENCIAS CON RADIO COGNITIVA

Con el desarrollo de diferentes estándares de CR distintas organizaciones y empresas comenzaron a realizar prototipos de equipos de CR y con ellos los primeros pilotos y pruebas de campo. La *Dynamic Spectrum Alliance* presenta en su sitio web ("Dynamic Spectrum Alliance", n.d.) una recopilación de pruebas piloto a lo largo del planeta, la mayoría de los cuales son implementaciones de CRS en las bandas de TVWS.

4.1 NICT: utilizando IEEE 802.11af

El 17 de octubre de 2012 el *National Institute of Information and Communications Technology* (NICT) de Japón publica el primer prototipo de equipo que implementa las especificaciones PHY y MAC del borrador que existía en ese entonces del estándar IEEE 802.11af (D2.0). Además de la interfaz inalámbrica IEEE 802.11af, el prototipo contó con otra interfaz IEEE 802.11a/b/g/n para poder funcionar en modo multibanda. El dispositivo soporta además interfaces USB, LTE y WiMAX (NICT, 2015).

El 16 de diciembre de 2015, el NICT publica el desarrollo del primer circuito integrado en banda base basado en el estándar IEEE 802.11af. Con este avance se favorece el desarrollo de dispositivos de comunicación de pequeño porte y bajo consumo de energía.

Entre los logros alcanzados con este circuito integrado se destacan:

- Respecto a los dispositivos desarrollados hasta el momento, se logra una reducción de tamaño de 1/40, reducción del peso de 1/30 y reducción de costo a menos de 1/10.
- El dispositivo fabricado, cuenta con interfaz Universal Serial Bus (USB) y puede ser alimentado vía USB.
- El dispositivo implementa de forma simple todo el sistema, incluyendo la antena.
- El dispositivo puede ser operado como Punto de Acceso (AP) o como una terminal de usuario. Esto facilita notoriamente el despliegue de una red en TVWS.

4.2 NICT, Hitachi Kokusai e ISB Corporation: utilizando IEEE 802.22

El primer prototipo de red basada en el estándar IEEE 802.22 fue desarrollado en conjunto por el NICT, Hitachi Kokusai Electric Inc. e ISB Corporation y presentado el 23 de enero de 2013. El diseño consta de una radiobase (RB) y terminales (CPEs) capaces de crear una WRAN cumpliendo el estándar IEEE 802.22-2011.

El NICT junto a Hitachi Kokusai Electric Inc. implementaron lo referente a las capas MAC y PHY, de forma tal de permitir a los dispositivos usar canales de TV libres en la banda de 470-710 MHz de acuerdo al estándar. La metodología de acceso al medio se basó en una red punto-multipunto con soporte para diferentes tipos de calidad de servicio, capacidades cognitivas de estimación de la interferencia y

acceso a una base de datos, Base de Datos de Espacios en Blanco (WSDB), provista por ISB Corporation que permite evitar la interferencia con emisoras de TV licenciadas (NICT, 2013).

La experiencia fue calificada por el NICT como exitosa, destacándose los siguientes logros:

- Se implementó un sistema basado en IEEE 802.22 capaz de comunicarse a 12.7 km entre la BS y el CPE.
- Se lograron velocidades de bajada de 5.2 Mbps y de subida de 4.5 Mbps.
- Se utilizó una red multi-salto utilizando el estándar IEEE 802.22 como backbone para un repetidor que combina un CPE de IEEE 802.22 y un enrutador inalámbrico IEEE 802.11af.
- Con el enrutador IEEE 802.11af se logra ampliar el alcance del servicio dado a un radio de 200 m del CPE, también mediante el uso de bandas de TV y radio cognitiva. Luego la señal es finalmente repetida por otro enrutador IEEE 802.11b/g/n, al que dispositivos estándar de usuario (celulares, tabletas, etc.) se conectan probando que es posible la navegación web y las vídeo llamadas telefónicas con el sistema WRAN.
- Se desarrolló una función original basada en IEEE 802.22 que permite operar en dos canales de TV no consecutivos logrando velocidades de bajada de 15.5 Mbps y de subida de 9.0 Mbps.

4.3 Ofcom: Proyectos Piloto en TVWS

La *Office of Communications* (Ofcom) ha impulsado las tecnologías de TVWS durante los últimos años como forma de propiciar el acceso universal a la banda ancha pero también con vistas a la nueva tendencia de las comunicaciones Máquina a Máquina (M2M) e IoT.

Resulta interesante repasar el camino recorrido por la Ofcom para llegar a su situación actual en lo que refiere al uso de los TVWS de forma no licenciada. Los procedimientos que ésta puso en práctica bien podrían ser replicados por otras administraciones que deseen regular este tipo de tecnologías.

El 22 de noviembre de 2012, la Ofcom propone una regulación para el uso de dispositivos TVWS y el 26 de abril de 2013 se realiza un llamado a interesados en participar en pruebas piloto para el uso innovador de los TVWS. Ésta fue una de las primeras y más importantes iniciativas en cuanto a CR en Europa. Para el 2 de octubre de ese mismo año ya habían sido adjudicadas tanto las empresas que llevarían adelante los sistemas piloto, como las bases de datos de los TVWS necesarias en el Reino Unido para la implementación de esta tecnología.

Al 10 de octubre de 2014 había siete proyectos piloto implementados en el Reino Unido, con otros planificados a realizarse en los meses siguientes involucrando organizaciones públicas y privadas para probar diferentes aplicaciones innovadoras en el uso del ERE. Luego de varios proyectos piloto calificados como exitosos y consultas con los actores involucrados, el 12 de febrero de 2015 se da la

autorización para que la industria de las telecomunicaciones pueda aprovechar los TVWS en forma compartida sin necesidad de licencias. Finalmente, Ofcom lanza el 18 de diciembre de 2015 un estatuto que regula el uso de los TVWS y se autoriza a cuatro empresas a mantener bases de datos de dispositivos TVWS.

A continuación se describen brevemente los proyectos piloto de CR mencionados:

- **Streaming de vídeo en vivo:** Google y el ZSL London Zoo, utilizando equipos Mediatel y 6Harmonics, lanzaron un proyecto piloto que usa una red de TVWS para difundir vídeo en vivo de diferentes animales que viven en el zoológico de Londres. Este proyecto utilizó la base de datos de ERE provista por Google y sirvió de prueba para el ZSL London Zoo para un sistema de monitoreo y protección de animales salvajes en peligro ("Conservation Technology", n.d.).
- **Defensa contra inundaciones:** las empresas Love Hz y Nominet trabajaron con la Oxford Flood Network en una red construida por sensores inalámbricos que provee alertas tempranas a la comunidad acerca de inundaciones. Los niveles de agua son monitoreados en tiempo real y enviados a través de los TVWS mediante dispositivos Adaptrum.
- **Next generation Wi-Fi / ciudad inteligente:** la University of Strathclyde junto con Microsoft, 6Harmonics, MediaTek, Spectrum Bridge y Sky, con el apoyo del gobierno escocés, llevan a cabo un proyecto piloto para expandir el acceso a la banda ancha en la ciudad de Glasgow así como también utilizar los TVWS para desplegar sensores para crear una "ciudad inteligente".

4.4 Plan Ceibal: Banda Ancha en Zonas Rurales con TVWS

El Plan Ceibal (<https://www.ceibal.edu.uy/es/institucional>) lleva adelante en Uruguay un programa educativo y social uno a uno, donde además de entregar una laptop o tablet a cada estudiante, se brinda conectividad en todos los centros educativos del país, tanto de primaria como de secundaria. En este marco, entre 2014 y 2016 se llevó a cabo una experiencia piloto con TVWS, usando esta tecnología de última milla para dar acceso a internet a escuelas rurales. El interés principal para Plan Ceibal era evaluar la tecnología TVWS como una posibilidad de mejorar en forma significativa el acceso a internet en zonas rurales. En estos casos las tecnologías habitualmente utilizadas son EDGE o 3G, satelital y enlaces en bandas no licenciadas en 5.8 GHz.

En Uruguay no existe aún marco regulatorio que ampare el uso de tecnologías CR tales como TVWS. La Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones (URSEC, ente regulador de comunicaciones en Uruguay) concedió un permiso especial para realizar este piloto utilizando los canales de UHF del 20 al 25, lo que corresponde al espectro que va de 506 MHz a 542 MHz. En la planificación inicial de este piloto estaba previsto dar acceso a 10 centros educativos utilizando 3 estaciones base; la disponibilidad de infraestructuras llevó luego a reducirlo. Es importante señalar

que en simultáneo con la planificación de las pruebas, el país estaba comenzando el proceso de transición a la TV digital, para liberar espectro para los estándares de redes celulares de cuarta generación (ej. LTE). Este proceso continúa avanzando en el presente.

Para llevar adelante este piloto se utilizó equipamiento del fabricante 6Harmonics, empresa con base en Canadá. Además, en su etapa de planificación y diseño se contó con el apoyo de técnicos de Microsoft. El equipo que opera como estación base y como cliente es el mismo (GWS3000) en diferente configuración. La solución funciona como puente, al igual que las redes de acceso de banda ancha habituales basadas en 802.16 u 802.11. El equipamiento permite la asignación dinámica o estática de los canales, siendo esta última la utilizada en este piloto. Además, es posible agregar canales, utilizando en vez del espectro de 6 MHz de un único canal, dos canales contiguos para alcanzar los 12 MHz. Si bien la solución es propietaria, se pudo identificar que está basada en 802.11, posiblemente en forma similar a lo que plantea el estándar 802.11af.

Finalmente con este piloto se brindó acceso a 5 centros educativos, uno mediante un enlace punto a punto y los otros cuatro con dos enlaces punto a multipunto con dos estaciones cliente cada uno. El primero se ubicó en la localidad de Juan Lacaze, Colonia, siendo un enlace punto a punto entre la escuela y un tanque de agua. Los otros casos fueron en la ciudad de Florida, donde se instalaron dos sectores en una torre de comunicaciones de la Administración de Ferrocarriles del Estado (AFE) de Florida, brindando acceso a cuatro escuelas del departamento. En todos los enlaces se utilizó un ancho de canal de 6 MHz. Las distancias correspondientes a cada enlace iban desde los 5 km hasta los 15 km, teniendo algunos casos con línea de vista (LOS) y otros sin ella. Las tasas efectivas alcanzadas en capa de transporte (TCP) se ubicaron entre 2 Mbps y 7 Mbps.

Este piloto realizado por Plan Ceibal fue una de las primeras experiencias de TVWS en América Latina. En las pruebas se identificó que las soluciones de TVWS todavía no estaban maduras para la puesta en producción, y no presentaban grandes ventajas comparativas respecto a las opciones más económicas basadas en 802.11. De todas formas se espera que siga evolucionando y el empuje de grandes empresas, junto con la necesidad de dar conectividad en zonas muy aisladas y carentes de infraestructura hacen pensar que el panorama pueda ser distinto en algunos años. Un punto muy relevante para el futuro es el aspecto regulatorio. Si bien la URSEC autorizó este piloto, también indicó que el uso futuro de esta tecnología podría tener posibles complicaciones jurídicas. Actualmente estas bandas están asignadas únicamente a radiodifusión en Uruguay, por lo que no es posible utilizarlas para transmisión de datos, hasta que eso no se modifique.

5. DISPOSITIVOS CR

Algunos de los dispositivos utilizados en los proyectos piloto que se han mencionado fueron desarrollados como prototipos para esas experiencias. Sin embargo, existen varias empresas

que comercializan dispositivos CR, en particular dispositivos que funcionan en los TVWS y se encuentran disponibles comercialmente.

Es claro que sólo podrán ser utilizados en la medida que el marco regulatorio del país lo permita. Una de las primeras administraciones en interesarse y permitir el uso de los TVWS fue la FCC de Estados Unidos. En la *FCC ID Application Database* ("FCC ID Search", n.d.) se pueden encontrar los dispositivos autorizados por dicha administración.

A la fecha, la FCC ha autorizado trece productos diferentes listados en la Tabla 1. El FCC ID es una identificación para productos inalámbricos en el mercado estadounidense, asignado por la FCC. Los tres primeros dígitos corresponden a la empresa responsable del producto y los restantes identifican al modelo del producto. Si se hace una búsqueda del FCC ID en la *FCC ID Application Database* se podrá encontrar el rango de frecuencias y potencia de operación aprobados para cada producto, las especificaciones técnicas, manuales de usuario e instalación, fotografías del hardware y los resultados de las pruebas realizadas por la FCC previo a la autorización del producto.

La base de datos *Google Spectrum Database* permite descargar la lista completa de los dispositivos registrados para la operación en los TVWS en Estados Unidos, actualmente la lista asciende a los quinientos noventa y cuatro dispositivos desplegados ("Spectrum Database – Google", n.d.).

Tabla 1. Productos autorizados por la FCC en el año 2015.

Proveedor	Descripción	FCC ID
6Harmonics	Cognitive radio for global WS market	2AASTGWS-3000
Adaptrum	Fixed TV band device	A2UACRS20F
Adaptrum	Personal/portable TV band device	A2UACRS20P1
Adaptrum	TV band device	A2UACRS10
Carlson Wireless Tech.	WS broadband Radio	OPA-RC2-BS
Carlson Wireless Tech.	WS broadband Radio	OPA-RC2-CPE
FCC Laboratory	Test grantee co test	OPS1
Koos Technical Services	Fixed TVDB	ZBGAWR-1
Koos Technical Services	WS radio controlled by database	ZBGAWR2UHF
Meld Technology	Low power fixed TVBD	OKVMT300
Metric Systems Corp.	Broadband VHF/UHF networking radio system	2ABCU-50739
Redline Communications	WS device with geo-location-fixed	QC8-RDL3000RMF
Runcom Technologies	Base station	XYMBTSTVWS-1

De la información obtenida de las hojas de datos de los fabricantes, sitios web de los fabricantes y de los reportes de las pruebas realizadas por la FCC se puede concluir:

- La mayoría de los productos estudiados fueron desarrollados para dar conexión de banda ancha inalámbrica en el formato punto-multipunto, es decir con una BS y varios CPEs. Sin embargo, algunos de ellos soportan topologías diferentes como enlaces punto-punto encadenados o incluso redes mesh, lo cual agrega flexibilidad para el diseño de soluciones.
- La mayor parte de los equipos operan en las bandas de TV de UHF, a excepción de algunos pocos (Koos Technical Services AWR, Metric Systems Corp., Raptor X 50739 y Runcom Technologies RNU4000BS WiMAX BS) que soportan VHF. Se hace hincapié en este punto fundamentalmente porque en Uruguay los canales de TV analógicos se encuentran en la banda de VHF.
- Los dispositivos que soportan VHF son capaces de funcionar en el rango de canales del 7 al 13.
- Se destaca el dispositivo MT300 Pico Broadcaster por estar destinado a una aplicación diferente a la de los demás productos. El MT300 utiliza canales disponibles UHF para transmitir una señal de video en HD a un número ilimitado de receptores de TV digital (que sean capaces de recibir en el estándar americano ATSC) en un radio aproximado de 100 m con línea de vista.
- Gran parte de estos equipos utilizan modulación adaptiva para optimizar su desempeño, soportando diferentes variantes de *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) y *Phase Shift Keying* (PSK). Con estas modulaciones, alcanzan tasas de datos del entorno de los 16 Mbps permitiéndoles brindar servicios comparables en velocidad a los de la tecnología xDSL ([Esopo], 2016).

6. DESAFÍO REGULATORIO

Dentro de la UIT, quien define los estándares de gestión y planificación, normas y adopta el Reglamento de Radiocomunicaciones del espectro es el Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R). A partir de una combinación de elementos técnicos, administrativos, económicos y políticos, se intenta dotar de una mayor eficiencia el uso de un recurso escaso. La gestión del espectro se vincula también a las políticas nacionales de planificación, las que se ordenan a partir de los acuerdos internacionales asumidos por los Estados ante organizaciones como la UIT y la Organización Mundial del Comercio (OMC) entre otras organizaciones.

A partir de mecanismos de control y gestión se intenta maximizar el uso social productivo y lograr eficiencia técnica mediante la limitación de interferencias radioeléctricas.

Los modelos tradicionales de gestión de espectro reconocen bandas licenciadas y no licenciadas, sobre las que se pueden aplicar modelos de gestión de corto, mediano y largo plazo, a través de criterios de compartición de frecuencias, uso y planificación de uso del espectro (UIT).

Los estándares de gestión y uso de espectro que se han utilizado reconocen modelos rígidos y/o dinámicos, que pueden verse condicionados por aspectos políticos tanto como por soluciones tecnológicas disponibles. El más tradicional y más usado se denomina de Comando y Control, en el cual el regulador asigna una porción de espectro a un servicio. Resulta un modelo muy eficiente en relación a

posibles interferencias, pero muy poco flexible y está orientado exclusivamente a regular el mercado primario. Existen otros modelos con mayor orientación hacia el mercado, donde el regulador no determina el servicio o la tecnología a utilizar, aunque sí establece el operador que ocupará una determinada franja de espectro. La FCC reconoce dos tipos de aplicación en este sentido: el modelo gerencial, donde el poseedor de la licencia es el responsable por el uso de un posible arrendatario y el modelo de transferencia, en donde el operador activo asume toda la responsabilidad por el uso (Muñoz, E. & Eslava Blanco, H. J., & Franco Calderón, J. A., 2015).

La evolución en la gestión del espectro parece dirigirse hacia una flexibilización a escala global, y esto se asocia a los requerimientos crecientes de uso, a la complementariedad de redes y al establecimiento de sistemas con capacidad de aprendizaje y procesamiento de información. La compartición del espectro es tecnológicamente viable y refiere al concepto de Acceso Dinámico al Espectro (DSA). Las aplicaciones y tecnologías relacionadas con la identificación de los de los Espacios en Blanco, en inglés *White Spaces* (WS) y los TVWS se ubican dentro de estos últimos modelos. El desafío para reguladores nacionales y la armonización internacional parece estar ubicado en el establecimiento de estándares y de Bases de Datos de Espacios en Blanco actualizadas, en inglés *White Space Database* (WSDB) que logren una capacidad predictiva para la coexistencia entre los sistemas primarios y secundarios, además del establecimiento de umbrales tolerables de interferencia (Harada, 2014).

Las dificultades con las que se encuentra la implementación de CR refieren entre otros factores a la gama de espectro atribuido para su uso en la actualidad, la necesidad de acordar si requiere de uso licenciado o no licenciado, los modelos de *path loss* para determinar la protección y limitación de interferencia, la regulación de espacios fronterizos, la protección de usuarios primarios, métodos de otorgamiento de licencias y el establecimiento de sistemas de gestión y bases de datos para su funcionamiento. Si bien estos pueden ser algunos de los elementos que no favorezcan el desarrollo de tecnología, existen algunos ejemplos en países geográficamente distantes de implementación de experiencias en CR (Holland, O & Bogucka, H & Medeisis, A., 2015).

A continuación se presentan algunas experiencias iniciales en países de varios continentes (Información aportada por la Ing. Graciela Piedras en 2017).

EEUU fue uno de los primeros países en permitir el acceso secundario al ERE con dispositivos CR a bandas de TV en el año 2004. En el año 2008, permitió el funcionamiento en las bandas de TV en posiciones no utilizadas por servicios, en este caso, licenciados. En 2010 presentó la base de datos de espacios en blanco (WSDB) como el principal método para determinar las partes vacantes en los TVWS. En marzo 2013 la FCC autorizó los sistemas de WSDB a nivel nacional. En Canadá, el organismo regulador *Industry Canada*, comienza con el estudio del marco político y técnico para el uso de TVWS en el año 2011.

Por su parte el Reino Unido en el año 2006 realiza consulta para el uso del espectro que se libera al digitalizar la TV por dispositivos sin licencia y que se pondría en operación en 2007. En 2009, se presenta una evaluación de tres mecanismos para la protección del usuario primario: detección, geolocalización y balizas. A diferencia de EEUU no se requiere certificar los dispositivos o las bases de datos; Ofcom utiliza datos del transmisor y realiza cálculos internamente cuyos resultados luego provee al operador de la base de datos y no fija la potencia máxima de transmisión de los dispositivos dejando este tema para la base de datos. Se aplica a bandas en UHF.

En el año 2011, en Europa, el Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC) bajo la CEPT presentó un informe sobre los requisitos técnicos y operativos para sistemas de radio cognitiva en TVWS.

En Singapur, la Autoridad de Desarrollo de Comunicaciones de Singapur, en inglés *Info-communications Media Development Authority* (IMDA) estableció en 2014 el reglamento marco para las operaciones de CR y adoptó el mecanismo de base de datos de geolocalización. También adoptó una política de no licencia para el uso de frecuencias en la banda de frecuencias designada y publicó las normas técnicas con las especificaciones y requisitos para los equipos que utilicen los TVWS aplicadas a las bandas en VHF y UHF.

Por su parte, Nueva Zelanda a través de su órgano regulador, en inglés *Radio Spectrum Management* (RSM) presentó en 2014 una consulta para la certificación y reglas de licencia de dispositivos TVWS. Los dispositivos deben seguir la norma de la FCC o de ETSI. Se aplica a bandas en UHF.

En Jamaica, en el año 2015 se comenzó el desarrollo del acceso de banda ancha utilizando TVWS con apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, en inglés US Agency for International Development (USAID) y el consorcio estadounidense NetHope. Microsoft dio apoyo técnico y regulatorio. El proyecto está enmarcado en el Plan de desarrollo Visión 2030 de Jamaica. En 2015 el Proyecto Piloto había conectado 2000 usuarios en 31 áreas rurales y estaba planificado agregar 5000 usuarios adicionales.

Por su parte, en algunos países de Latinoamérica las experiencias con CR comenzaron entre los años 2014 y 2016.

En Argentina, el Ente Nacional de Comunicaciones ENACOM acordó con Microsoft en el año 2016 las primeras pruebas en TVWS con el fin de proveer a las áreas remotas de Internet, las pruebas comenzaron en el año 2017.

Colombia por su parte también firma acuerdo con Microsoft en el año 2016 con el mismo fin que Argentina. Se efectuaron pruebas en las zonas de La Guajira, Norte de Santander y Caldas en un esfuerzo conjunto público-privado. Según lo que indica la Agencia Nacional del Espectro de Colombia (ANE), el 99% de los municipios hacen uso de menos de 10 canales de los 36 disponibles en UHF (ANE, 2017). El uso de

los espacios en blanco en Colombia está enmarcado dentro de la reglamentación del espectro de libre utilización que no requiere una asignación. En caso de que se pretenda prestar servicios a terceros con el espectro de uso libre, es necesario que el prestador de servicio se incorpore en el Registro de Proveedores de Redes y Servicios de Telecomunicaciones. Los dispositivos que hagan uso del espectro de libre utilización deberán operar bajo los parámetros técnicos señalados en el anexo técnico de la Resolución 711 de 2016 y la Resolución 461 de 2017 de la ANE y deberán cumplir las normas que expida la ANE en cuanto a la exposición del público a niveles de energía de radio y no tendrán protección contra interferencia. Se tiene un período de prueba de 2 años. Se aplica a bandas en UHF.

En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), llevó adelante un análisis de disponibilidad de espectro en varias áreas y se aprobó la Resolución 05-03-ARCOTEL-2016 que hace referencia al Reglamento para la Prestación de Servicios de Telecomunicaciones y Servicios de Radiodifusión por Suscripción, esta resolución posee fichas descriptivas de servicios que permite poder seleccionar el tipo de servicio más adecuado que corresponde a TVWS. Se aplica a bandas en VHF y UHF.

En el año 2014 en Uruguay, Microsoft brindó asesoramiento técnico a Plan Ceibal para realizar una prueba piloto en TVWS usando CR como tecnología de última milla para dar acceso a Internet a escuelas rurales. El interés principal para Plan Ceibal era evaluar el uso de la tecnología en TVWS como una posibilidad de mejorar en forma significativa el acceso a Internet en zonas rurales. En Uruguay no existe aún marco regulatorio que ampare el uso de tecnologías CR en TVWS, URSEC concedió un permiso especial para realizar este piloto.

Finalmente, cabe mencionar que en Uruguay se encuentran evidencias de la existencia de TVWS, por ejemplo, en la dimensión espacial del ERE de las asignaciones para TV analógica. En la Figura 2 se muestran las coordenadas de las estaciones de TV analógica asignadas al canal 2 de VHF (54 – 60 MHz) a modo de ejemplo de TVWS, se observa el contorno de protección que indica el área primaria de servicio de cada estación y que fue calculado en base a información extraída del sitio web de URSEC ("URSEC", n.d.). Aquí se puede apreciar como 10 de los departamentos del país se encuentran fuera de los contornos de protección para las estaciones asignadas al canal 2 (es importante aclarar que este estudio se deriva exclusivamente de las asignaciones de canales publicadas en el sitio web de URSEC, restando así la verificación de que la administración no tenga otros servicios asignados en estos espacios en blanco cuya asignación no sea pública).

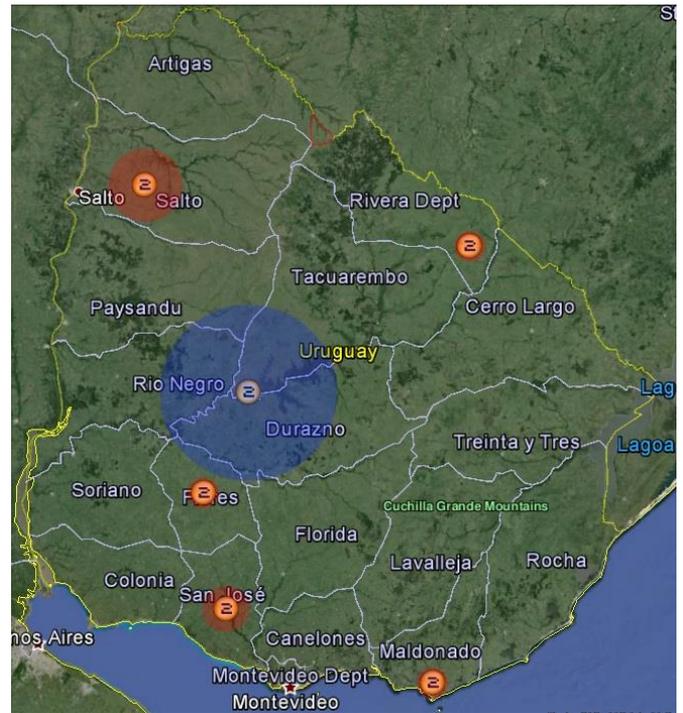


Figura 2. TVWS para canal 2 analógico en Uruguay.

7. CONCLUSIONES

El despliegue de redes inalámbricas basadas en CR es una alternativa relativamente reciente que permite hacer un uso más eficiente del ERE.

La tecnología de CR ya tiene normativa y cuenta con despliegues en algunos países del mundo.

Puede parecer en una primera aproximación que la región de Latinoamérica tiene el espectro menos ocupado. Esto no es así en varias sub regiones. Adicionalmente en muchos casos no se ha realizado todavía el apagón analógico. Pero sobre todo, las tendencias muestran que las aplicaciones móviles seguirán creciendo y con ello aumentando el uso del espectro.

Cualquier país que pretenda usar esta tecnología, necesitará desarrollar una regulación específica (Wang, B & Liu, k. J. R., 2011) para su uso y un modelo de gestión que la incluya. En la Sección 4, Subsección 4.3, se comenta una estrategia posible para avanzar en esta área. Los organismos regulatorios locales, así como las universidades, son actores que pueden tener un rol muy importante en la dinamización del despliegue de esta tecnología, promoviendo la investigación en el área, la realización de proyectos piloto y la elaboración de una normativa nacional específica que permita su uso en el país.

Las capacidades instaladas (competencias técnicas, burocráticas, políticas y de gestión) con las que cuentan los organismos reguladores, emergen como una variable sustantiva al momento de asumir la toma de decisiones en procesos dinámicos y de alto impacto en servicios con tendencia a su universalización.

En la Sección 5 se aporta información actualizada sobre equipos comerciales que podrían ser utilizados para el despliegue de redes inalámbricas basadas en CR, este tipo de información puede facilitar la tarea de quienes estén considerando la utilización de esta tecnología.

La información pública, transparente y organizada sobre el uso del espectro, con observatorios sobre su evolución y políticas, sería un gran aporte para detectar oportunidades y necesidades, y comenzar pruebas de concepto antes de que se experimente una gran escasez de espectro disponible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Plan Ceibal por brindar información sobre el piloto realizado y a la Ing. Graciela Piedras por la información brindada con respecto al estado de la regulación en el área de CR.

REFERENCIAS

- A. He et al. (2010). A Survey of Artificial Intelligence for Cognitive Radios, IEEE.
- Cadena Muñoz, E. & Eslava Blanco, H. J. & Franco Calderón, J. A. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. *Revista Tecnura*, 19(45), 159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a12>.
- Cisco. (2016). *Harnessing the Internet of Things for Global Development*, UIT. Recuperado de <http://www.coitt.es/res/revistas/11a%20Redes.pdf>
- Clancy III, T. C. (2006). *Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks*. (Doctoral thesis). University of Maryland.
- Conservation Technology. *Zoological Society of London (ZSL)*. Recuperado de <https://www.zsl.org/conservation-initiatives/conservation-technology/>
- Cordeiro, C. & Challapali, K. & Birru, D. & Shankar N, S. (2006). IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios. *Journal Of Communications*, 1(1). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4304/jcm.1.1.38-47>
- Dave E. (2011). *Internet de las Cosas: Como la Próxima Evolución de Internet lo Cambia Todo*. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).
- Dynamic Spectrum Alliance*. Recuperado de <http://dynamicspectrumalliance.org>
- EsOpo – Uso del Espectro Radioeléctrico en Uruguay y Oportunidades para el Uso de Radio Cognitiva*. (2016). *Iie.fing.edu.uy*. Recuperado de <https://ie.fing.edu.uy/proyectos/esopo>
- FCC ID Search*. *Federal Communications Commission*. Recuperado de <https://www.fcc.gov/oet/ea/fccid>
- Fette, B. (2006). *Cognitive radio technology* (1st ed.). Amsterdam: Newnes/Elsevier.
- F. Hu & B. Chen & K. Zhu (2018). *Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey*. IEEE Access, vol. 6, pp. 15754-15776.
- Harada, H. (2014). White Space Communication Systems: An Overview of Regulation, Standardization and Trial. *IEICE Transactions on Communications*, E97-B. <https://doi.org/10.1587/transcom.E97.B.261>
- Holland, O & Bogucka, H & Medeis, A. (2015). Opportunistic Spectrum Sharing and White Space Access: The Practical Reality. Wiley.
- 802.22-2011 IEEE Standard for Information technology. *Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands*. (2011). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1109/ieeestd.2011.5951707>
- 802.11af-2013 IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Television White Spaces (TVWS) Operation. (2014). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1109/ieeestd.2014.6744566>
- 802.16h-2010 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation.
- ITU. (2009). *Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)*. Geneva: ITU. Recuperado de https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-E.pdf
- ITU. (2011). *Report ITU-R M.2225. Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service*. Geneva: ITU. Recuperado de https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2225-2011-PDF-E.pdf
- KTH Royal Institute of Technology in Stockholm*. Recuperado de <https://www.kth.se/en>
- Masonta, M. T. & Mzyece, M. & Ntlalapa, N.(2013). *Spectrum Decision in Cognitive Radio Networks: A Survey*. IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 15, n° 3, pp. 1088-1107, Third.
- Mitola III, J. (2000). *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio* (Doctoral thesis). Royal Institute of Technology (KTH).
- Mitola III, J. & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1109/98.788210>
- NICT. (2012). *World's First TV White Space WiFi Prototype Based on IEEE 802.11af Draft Standard Developed*. Recuperado de <http://www.nict.go.jp/en/press/2012/10/17-1.html>
- NICT. (2013). *World's First TV White Space Prototype Based on IEEE 802.22 for Wireless Regional Area Network*. Recuperado de <http://www.nict.go.jp/en/press/2013/01/30-1.html>
- NICT. (2015). *NICT Develops World's First IEEE802.11af-compatible Baseband IC for TV White-space Wireless LAN Systems*. Recuperado de <http://www.nict.go.jp/en/press/2015/12/16-1.html>
- Spectrum Database – Google*. *Google.com*. Recuperado de <https://www.google.com/get/spectrumdatabase>
- URSEC*. Recuperado de <https://www.gub.uy/unidad-reguladora-servicios-comunicaciones/>
- Wang, B & Liu, k. J. R., (2011). *Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey*. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, n. ° 1, pp. 5-23.
- Wang, J. & Ghosh, M. & Challapali, K.(2011). *Emerging cognitive radio applications: A survey*. *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, n° 3, pp. 74-81.
- Zang, Z. & Long, K. & Wang, J, (2013). *Self-organization paradigms and optimization approaches for cognitive radio technologies: A Survey*. *IEEE Wireless Communications*. vol. 20, n. ° 2, pp. 36-42.

BIOGRAFÍAS

Gonzalo Carro obtuvo el título de Ingeniero Electricista (opción Telecomunicaciones) en la Universidad de la República (UdelaR) en Montevideo, Uruguay en el año 2017. Desde el año 2011 trabaja para la empresa Nokia, realizando tareas de configuración, optimización y puesta en funcionamiento de radio bases UMTS y LTE, tanto macro como pequeñas celdas.



Patricia Hernández obtuvo el título de Ingeniero Electricista (opción Telecomunicaciones) en la Universidad de la República (UdelaR) en Montevideo, Uruguay en el año 2017. Desde el año 2012 trabaja en la empresa estatal proveedora de energía eléctrica, UTE, en el desarrollo y puesta en servicio de sistemas de comunicación para la red distribución y transmisión de energía eléctrica. Actualmente se encuentra



desarrollando su Maestría en Ing. Eléctrica, en el área de Internet de las Cosas (IoT).



Federico Beltramelli obtuvo el título de Licenciado en Comunicación (1998) y el grado de Magister en Ciencia Política en la Universidad de la República (2011), Uruguay y de Doctor en la Facultad de Periodismo y Comunicación de la Universidad de La Plata (2018), Argentina. Es profesor Agregado del Departamento de Medios y Lenguajes en la Facultad de Información y Comunicación, UdelaR. Co-coordina el grupo de investigación Políticas, Medios, Tecnología y Espectro (POLIMATE) en el Programa de desarrollo de investigación en información y comunicación FIC - UdelaR.

Uruguay. Como investigador trabaja en el área de sistemas inalámbricos (OFDM, FSO, MMW, WSN, CR, IoT y Antenas).



María Simon, Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, es Ingeniera Industrial especializada en Telecomunicaciones y Profesora titular en esa área. Trabaja en comunicaciones, redes, radiofrecuencia y en teoría de la información y codificación. Fue Ministra de Educación y Cultura, ministerio también a cargo de Ciencia y Tecnología, y antes presidió el directorio de ANTEL (empresa pública de telecomunicaciones).



Germán Capdehourat obtuvo el título de Ingeniero Electricista (2006), de Especialista en Telecomunicaciones (2009) y de Doctor en Ingeniería Eléctrica (2015) en la Universidad de la República (UdelaR), Uruguay. Es docente de la Facultad de Ingeniería de UdelaR desde 2005, siendo Profesor Adjunto desde 2015. Integra el SNI desde 2012 y ha participado en diversos proyectos de I+D en las áreas de tratamiento de imágenes y redes inalámbricas. Desde 2007 también trabaja en Plan Ceibal, donde participó del despliegue de la solución de conectividad en todo el país y desde 2013 forma parte del equipo de I+D+i.



Benigno Rodríguez obtuvo los títulos de Ingeniero Electricista y Magister en Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería (FING), UdelaR, Uruguay. En 2007 obtuvo el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Telecomunicaciones, en la Technische Universität Hamburg-Harburg, Alemania. Desde 1993 ha desempeñado varios cargos docentes en FING/UdelaR, ocupando actualmente el cargo de Profesor Agregado y el de Jefe del Depto. de Telecomunicaciones en el IIE/FING/UdelaR. Se ha desempeñado también como Jefe de Depto. y Responsable de Planificación en empresas de telecomunicaciones en