

Opportunities for a more Efficient Use of the Spectrum based in Cognitive Radio

M. Delgado and B. Rodríguez

Abstract— Different studies about the use of radio spectrum have shown the existence of underutilized bands, like the ones destined to television broadcasting. This provides an interesting opportunity considering the exponential growth in wireless communications and applications, which results in an important demand for higher bandwidth to achieve an adequate performance. To operate in bands that are already licensed, it is necessary to ensure that this operation does not cause any interference to the primary user, and always gives priority to it. In this context the IEEE has been defining a standard with functionalities of Cognitive Radio that allows operation in licensed bands opportunistically, and without causing interference. From there comes the IEEE 802.22 standard, which has a set of features and procedures to measure, monitor and manage the radio spectrum, essential to ensure the protection of primary user's transmissions. Some pilot projects have demonstrated the potential of this standard to provide broadband services comparable to classical ADSL services, especially in remote or rural areas inaccessible to deploy fixed networks. One of the great challenges to install such systems commercially, is to achieve the permissions for the operation and to have a defined regulation for these systems, decisions that are in the hands of the telecommunications services regulators in each country. This paper presents an overview of these issues with the intention of promoting a more efficient use of the spectrum.

Keywords— Cognitive Radio, spectrum sensing, IEEE 802.22, WRAN, wireless systems.

I. INTRODUCCIÓN

EL ESPECTRO radioeléctrico es un recurso escaso y como tal, caro. El crecimiento exponencial en las comunicaciones y aplicaciones inalámbricas ha hecho que la utilización eficiente del espectro sea una de las principales preocupaciones para las empresas de Telecomunicaciones. Diferentes estudios de utilización del espectro radioeléctrico han dejado en evidencia una sub utilización de la banda asignada para la radiodifusión televisiva, brindando aquí una oportunidad de mejora. Esto motiva el utilizar estas bandas de frecuencias durante el tiempo en que no están siendo utilizadas por los usuarios licenciados (claros espectrales en la banda de televisión, denominados en inglés como White Spaces), obteniendo así una mayor eficiencia en el uso del espectro. Es claro que este uso compartido no es en equidad de condiciones, ya que se debe respetar a quien paga la licencia por el uso de esa porción de espectro. Por tanto la prioridad deben tenerla siempre las transmisiones de estos sistemas “primarios”. En este escenario, para poder operar de

forma oportunista en estas bandas y sin causar interferencia, lo que equivale a ser “transparente” para el sistema licenciado, los sistemas deben tener la capacidad de ser conscientes del entorno para determinar dinámicamente que canales están siendo utilizados y cuales están libres. Además deben poseer gran versatilidad para poder cambiar de banda rápidamente ante la detección de una transmisión de un usuario primario. He aquí que surgen diferentes proyectos de estándares de interfaz aérea que incorporan todas estas características, conocidas como de Radio Cognitiva (CR). Algunos de ellos surgen como extensiones de estándares consolidados como el IEEE 802.11 y IEEE 802.16 y otros nacen ya con este enfoque como el IEEE 802.22. Es de esperarse que estos estándares tomen gran protagonismo en los años venideros, teniendo en cuenta el crecimiento sostenido en la demanda de comunicaciones y aplicaciones inalámbricas. En este trabajo se presentan los principales conceptos de CR y se analiza con cierto grado de detalle el estándar IEEE 802.22 a fin de analizar su verdadero potencial y aplicabilidad. El resto del documento se organiza de la siguiente forma: en la Sección II se exponen los principales conceptos de CR; en la Sección III se introduce el estándar IEEE 802.22; en la Sección IV se profundiza en los aspectos de monitoreo y gestión del espectro, así como en la seguridad del usuario licenciado; en la Sección V se presentan algunos ejemplos de aplicación del estándar IEEE 802.22 y finalmente en la Sección VI se concluye lo expuesto en este trabajo.

II. RADIO COGNITIVA

Uno de los mayores problemas que hoy afecta a los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos es la disponibilidad del espectro radioeléctrico. Este último, en algún momento considerado como casi infinito, se encuentra en una situación de relativa alta ocupación. Las políticas de asignación de bandas de frecuencias fija para usos licenciados traen aparejado comúnmente el problema de la subutilización del espectro. En la medida que puedan compartirse las bandas licenciadas entre varios sistemas, en un modo de no interferencia, podría lograrse una mayor eficiencia en el uso de este recurso escaso y valioso. Con esta idea surge el concepto de CR. Casi todas las definiciones de CR coinciden en considerar un sistema de radio como cognitivo cuando es adaptivo, autónomo, con capacidad de monitorear el ambiente en el cual opera así como ser “conciente” de las características del mismo [1]. Algunos autores, como el Dr. Joseph Mitola quien introdujo el concepto de Radio Cognitiva en su artículo “*Cognitive Radio for Flexible Multimedia Communications*” de 1999, adicionan la capacidad de “aprender” de la experiencia pasada [2].

El concepto de “adaptivo” para un sistema de radio hace referencia a la posibilidad de hacer cambios de forma

M. Delgado, Antel, Montevideo, Uruguay, marcedelcar@gmail.com.

B. Rodríguez, Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay, benigno@fng.edu.uy.

dinámica en los parámetros de operación como la frecuencia, ancho de banda instantáneo, esquema de modulación, esquemas de acceso (TDMA, CDMA, etc.), tasa de transmisión y nivel de potencia de transmisión.

Para operar sin causar interferencia, los sistemas de CR no solo deben tener la capacidad de modificar sus parámetros de operación dinámicamente sino que también deben saber cuándo hacerlo. Para ello, funciones como el monitoreo del espectro, el acceso a bases de datos con información de uso del espectro, la regulación local y funcionalidades de geoposicionamiento resultan de vital importancia para cumplir este objetivo [3].

Existen diferentes técnicas para el monitoreo del espectro pudiéndose clasificar éstas en dos grandes categorías: de forma cooperativa y no cooperativa. La primera categoría hace referencia a las técnicas que implementan una coordinación entre varios o todos los elementos de la red compartiendo la tarea de monitoreo. Generalmente una entidad central, una radio base por ejemplo, es la encargada de la gestión de esta tarea generando luego un mapa de utilización del espectro a partir de la conciliación de la información recabada.

Esta técnica ofrece ventajas como reducir notablemente la problemática de la “estación oculta”, incrementar la precisión de los datos obtenidos así como la agilidad para generar un mapa completo de uso del espectro y reducir falsas alarmas en la detección de transmisiones de usuarios primarios. Por otro lado, las técnicas no cooperativas implican que cada elemento de la red determina cuando es posible transmitir a partir del monitoreo que realiza él mismo y de la información que pueda tener pre cargada (I. Poole, “Cognitive Radio Tutorial”, Radio-Electronics.com, disponible en: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/cognitive-radio-cr/technology-tutorial.php>).

Si bien la CR parece ser la solución al problema de escasez de bandas de frecuencia libres, aún presenta grandes desafíos para poder instalarse como una alternativa válida. Hoy en día los avances tecnológicos hacen que las complejidades técnicas de los sistemas de CR no sean las que más preocupan. Mayoritariamente, el desafío se encuentra en la adecuación de las políticas regulatorias de cada región. Las entidades regulatorias de cada país son las que definen quien y de qué forma se utiliza el espectro. Para viabilizar la CR, deben incorporarse entonces normas y políticas específicas que garanticen, con un alto grado de confiabilidad, la seguridad de los usuarios licenciados. Por ejemplo, normas que obliguen a que los protocolos a utilizarse sean lo suficientemente robustos cualquiera sean las condiciones de carga de la red, que no sean vulnerables a ataques informáticos, que cumplan estrictamente con las normas y regulaciones locales y que mantengan el desempeño, asegurando la estabilidad de las redes primarias. La especificación y análisis de estos protocolos es lo que presenta el mayor desafío ya que queda en medio entre el plano técnico y el político regulatorio [4].

En cuanto al plano técnico específicamente, se puede destacar que uno de los grandes desafíos se encuentra en desarrollar algoritmos de monitoreo que permitan reducir cada vez más el tiempo que toma esta tarea sin perder (o incluso mejorando) la precisión en las medidas.

Una descripción general de diferentes arquitecturas de CR

que han sido desarrolladas por entidades gubernamentales e instituciones de educación superior puede encontrarse en [1].

III. INTRODUCCIÓN AL ESTÁNDAR IEEE 802.22

Se ha detectado, a través de medidas y estudios de uso del espectro, que la banda asignada a la radiodifusión televisiva se encuentra, en general, sub-utilizada. Esto quiere decir que, durante ciertos períodos de tiempo algunos canales (bandas de frecuencia) se encuentran disponibles y podrían entonces ser utilizados en otras aplicaciones diferentes para las cuales están reservados. Al poder compartir el espectro entre varias aplicaciones se logra un uso más intenso del mismo logrando una mayor eficiencia. No solo el hecho de trabajar de una forma más eficiente motiva esta forma de uso, el surgimiento de cada vez más servicios inalámbricos hace que las entidades regulatorias deban considerar seriamente el reuso de bandas licenciadas sub-utilizadas.

Considerando esta sub-utilización de la banda asignada a la radiodifusión televisiva y las funcionalidades que ofrece la CR para compartir el espectro entre varias aplicaciones, la *Federal Communications Commission* (FCC) habilitó en Estados Unidos, a través de la *Notice of Proposed Rulemaking* (NPRM) publicada en mayo de 2004, la operación de aplicaciones de radio no-licenciadas en la banda de televisión de una forma segura evitando cualquier interferencia [5]. Es así que en noviembre de ese mismo año se crea el IEEE 802.22 Working Group (WG) para definir un estándar para Redes de Área Rural Inalámbricas (WRANs) basado en características de CR que permita operar en bandas licenciadas, específicamente en la banda de televisión que va desde los 54 a los 862 MHz, compuesta, dependiendo de la localidad, por canales de 6, 7 u 8 MHz.

La banda de televisión no solo presenta oportunidades interesantes al encontrarse sub-utilizada, además estas frecuencias ofrecen ventajas de propagación muy buenas que permiten otorgar accesos a banda ancha en zonas remotas o rurales. Es así que el estándar IEEE 802.22 pone el foco en posibilitar el acceso a banda ancha en estas zonas con un desempeño comparable a los servicios disponibles de DSL/ADSL (aprox. 1.5 Mbps / 384 kbps) (I. Poole, “IEEE 802.22 WRAN Standard”, Radio-Electronics.com, disponible en: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/ieee-802-22/ieee80222-wran-standard.php>).

La topología en la cual se basa el estándar es de punto – multipunto conformada por una Radio Base (BS) y un número determinado de usuarios accediendo a través de sus terminales (*Customer Premises Equipments*, CPEs), distribuidos dentro de la celda o zona de cobertura de la BS. Esta última, además de controlar el acceso al medio y cursar el flujo de datos con los CPEs, es la encargada de gestionar las tareas de monitoreo y gestión del espectro. Para esto, la BS utiliza las capacidades de monitoreo de cada CPE para realizar esta tarea de forma distribuida. Con la conciliación de toda la información recabada, la BS obtiene un mapa completo de la utilización del espectro y por tanto es quien determina la ocupación del espectro durante la operación. En este sentido se dice que el IEEE 802.22 es el primer estándar en incorporar funcionalidades de CR.

En cuanto a la cobertura, el estándar define un radio de 33 km en torno a cada BS considerando CPEs transmitiendo a 4W de Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP). No obstante, pueden obtenerse rangos de cobertura de hasta 100 km en condiciones geográficas determinadas.

El estándar elaborado por el IEEE 802.22 WG define completamente las funcionalidades de las capas Física (*PHY*) y de Control de Acceso al Medio (*MAC*).

A. Capa Física

Las oportunidades, tanto en frecuencia como en tiempo, en las cuales es posible transmitir para un sistema 802.22 varían de forma aleatoria. Esto quiere decir que no es posible estimar qué frecuencias estarán disponibles en cada momento ni durante cuánto tiempo. Por tanto, la capa Física debe ofrecer la suficiente flexibilidad para adaptarse a cada situación en particular y en el momento preciso. El estándar propone una modulación basada en Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) la cual aporta robustez frente a efectos comunes de las WRANs como el desvanecimiento por trayectos múltiples (*multipath fading*) y la selectividad en frecuencia (*frequency selective fading*). Otra de las ventajas que ofrece este esquema de modulación es incrementar la eficiencia en su uso, logrando altas tasas de transferencia de datos. Por otro lado, para brindar acceso a múltiples usuarios (CPEs) se propone la utilización de Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA), tanto para el enlace ascendente (uplink) como para el enlace descendente (downlink). Para brindar la flexibilidad requerida, todo lo anterior se ve complementado con la utilización de varios esquemas de modulación para cada señal OFDMA como QPSK, 16-QAM y 64-QAM con relación de codificación convolucional (*convolutional coding rates*) 1/2, 3/4 y 2/3. Todos estos parámetros son los que la BS deberá determinar, para cada CPE, dependiendo de las condiciones que cada usuario experimente en la recepción y transmisión de las señales debido a su posición geográfica respecto a la BS.

Para lograr el desempeño deseado a nivel de tasa de datos (Mbps) y poder brindar velocidades del orden de los servicios ADSL, el estándar adopta la utilización de la técnica de agrupación de canales (*Channel Bonding*) la cual consiste en la utilización de más de un canal de TV en forma simultánea para el envío de los datos.

En la Tabla I se resumen los principales parámetros que determinan el desempeño de un sistema IEEE 802.22 con sus respectivos valores. En la Tabla II se presentan los valores de tasa de datos y eficiencia espectral según la modulación y codificación utilizados.

TABLA I. PRINCIPALES PARÁMETROS DEFINIDOS PARA LA CAPA FÍSICA DE UN SISTEMA 802.22.

Parámetros	Especificación
Banda de frecuencias	54 - 862 MHz
Ancho de banda por canal	6, 7 o 8 MHz
Tasa de datos	4,54 a 22,69 Mbps
Eficiencia espectral	0,76 a 3,78 bit/s/Hz
Modulación	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
EIRP Transmitida	4 W máximo por CPE. 4 W máximo por BS en la regulación de EE.UU
Acceso al medio	OFDMA
Dimensión de la FFT	2048
Modos de Prefijo Cíclico	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Esquema de comunicación	TDD

TABLA II. VARIACIÓN DE LA TASA DE DATOS Y EFICIENCIA ESPECTRAL EN FUNCIÓN DE LA MODULACIÓN Y RELACIÓN DE CODIFICACIÓN.

Modulación	Relación de codificación	Flujo de datos (Mbps)	Eficiencia espectral (para un ancho de banda de 6 MHz)
QPSK	1/2	4,54	0,76
QPSK	2/3	6,05	1,01
QPSK	3/4	6,81	1,13
QPSK	5/6	7,56	1,26
16-QAM	1/2	9,08	1,51
16-QAM	2/3	12,1	2,02
16-QAM	3/4	13,61	2,27
16-QAM	5/6	15,13	2,52
64-QAM	1/2	13,61	2,27
64-QAM	2/3	18,15	3,03
64-QAM	3/4	20,42	3,4
64-QAM	5/6	22,69	3,78

B. Capa de Control de Acceso al Medio

La especificación de la capa MAC, además de definir las habituales funcionalidades de una capa de acceso al medio, incluye capacidades de CR, necesarias para brindar la flexibilidad suficiente para operar en una banda licenciada de una forma oportunista sin causar interferencia. Algunas de las funcionalidades que debe implementar la capa MAC, para la correcta operación en estas condiciones, son las de: control de acceso a la red e inicialización, monitoreo y gestión del espectro.

La capa MAC emplea una estructura de datos organizada en supertramas las cuales a su vez se componen de 16 tramas cada una. En los encabezados de estas supertramas, la BS, a través de los canales disponibles, envía información que será de utilidad para todo CPE que quiera sincronizarse con la BS a fin de establecer una comunicación. En este sentido, cuando un CPE se enciende, escaneará todo el espectro para detectar los canales libres de transmisiones de usuarios licenciados. En estos canales recibirá mediante el análisis de estos encabezados toda la información de la red que necesita para asociarse a la BS.

Por otro lado, en cada trama, la BS gestionará el flujo de datos descendente (downstream) y ascendente (upstream), intercambiando con los CPEs datos de la comunicación

(payload), tareas de medición y monitoreo, procedimientos de coexistencia, entre otros.

La BS utilizará además los encabezados de control de las tramas (Control Frame Headers) u otros mensajes dedicados de la capa MAC, para solicitar a los usuarios cambiar de canal ante la detección de un usuario licenciado. De igual forma, los CPEs podrán utilizar segmentos de las tramas para alertar a la BS de la detección de un usuario licenciado con mensajes de alta prioridad (*Urgent Co-existence Situation - UCS*) u otros de más baja prioridad.

IV. MONITOREO Y GESTIÓN DEL ESPECTRO EN IEEE 802.22

El monitoreo y gestión del espectro resulta de vital importancia en un estándar que pretende operar en bandas licenciadas. Es así que el estándar pone especial foco en las técnicas de monitoreo y gestión del espectro, cuestiones que permitirán asegurar la no interferencia, ya sea con transmisiones de usuarios licenciados como con transmisiones de otras WRAN (incluidas otras 802.22). Es en las técnicas de monitoreo y gestión del espectro donde se ponen de manifiesto las capacidades de la CR que implementa el estándar.

Los mecanismos de monitoreo pueden agruparse en tres paradigmas: los sistemas basados en decisiones de los entes regulatorios; los basados en acciones y decisiones dentro de la propia red; y los basados en la utilización de infraestructura ya instalada común a todas las partes. La CR permite obtener muy buenos resultados dentro de los sistemas que utilizan los elementos y características de la propia red para monitorear y gestionar el espectro. Hay cuatro aspectos fundamentales que deben considerarse: los dispositivos deben garantizar un grado mínimo de precisión en su medida; asimismo deben conocer y proveer suficiente información de su posición geográfica; recabar y difundir la información obtenida a las organizaciones encargadas de hacer cumplir las leyes o normas; y realizar todo esto con un mínimo de redundancia en los recursos de la red [4]. El IEEE802.22 utiliza este último esquema para realizar las tareas de monitoreo y gestión del espectro [6].

El estándar propone un esquema de monitoreo distribuido donde la BS es la encargada de gestionar y administrar los recursos para realizar las tareas. Tanto la BS como los CPEs tienen capacidades para realizar las tareas de monitoreo mientras que las tareas relacionadas a la gestión del espectro quedan en manos exclusivamente de la BS. Dentro de las principales tareas que debe cumplir la BS se encuentran la actualización constante de la información de espectro disponible, clasificación y selección de los canales, determinar los períodos de monitoreo, asegurar el cumplimiento de lo dictaminado por el estándar así como por las normas regulatorias locales, tomar las decisiones de movimiento a otros canales y funciones para la co-existencia con otras WRANs [6].

Con toda la información recabada y la obtenida de las bases de datos y políticas de la localidad, la BS obtiene un mapa de uso del espectro y es capaz de clasificar los diferentes canales entre:

- **No permitido** (principalmente definido por políticas y regulaciones locales).
- **En operación** (canal en operación).
- **De respaldo - backup** (canal que se encuentra disponible y el cual podrá convertirse inmediatamente en un canal en operación).
- **Candidato** (canales que son candidatos a convertirse en un canal de backup).
- **Protegido** (es un canal en el cual se detectó la operación de un usuario licenciado o de otro elemento de la WRAN).
- **Sin clasificar** (canales que no han sido monitoreados y por tanto no fueron clasificados aún).

En función de esta clasificación la BS tomará las decisiones de asignación que aseguren la protección de los usuarios licenciados así como una operación eficiente de la WRAN 802.22. Las señales que se buscan en la etapa de monitoreo son las que operan en la banda de TV:

- Señales de televisión.
- Señales de micrófonos inalámbricos.
- Señales de dispositivos de protección como los 802.22.1 - Baliza Inalámbrica.
- Señales de otros dispositivos que puedan necesitar ser protegidos bajo el dominio de la regulación local.

El monitoreo puede ser realizado en dos etapas, una de menor complejidad que la otra, y que entre otras cosas, difieren en el tiempo que les toma realizar esta tarea. En este sentido se habla de Monitoreo Rápido (*Fast Sensing*) y Monitoreo Fino (*Fine Sensing*) [5]. El estándar no define expresamente los métodos de monitoreo a utilizarse, aunque si propone y recomienda algunas técnicas para ambas etapas.

En la fase de Monitoreo Rápido generalmente se utilizan algoritmos que permiten realizar un monitoreo en un tiempo muy corto con la contrapartida de una baja precisión. Básicamente se basa en la detección de energía la cual se contrasta con un umbral determinado para decidir si el canal está efectivamente ocupado o existe alguna probabilidad de que no lo esté. El tiempo promedio que toma esta fase en cada CPE está en el orden de los milisegundos por canal monitoreado. Es la BS quien, en base al resultado del Monitoreo Rápido, decide en que canales es necesario realizar un monitoreo más detallado (Monitoreo Fino).

Para poder detectar señales de muy baja potencia, se suelen utilizar técnicas de Monitoreo Fino. Cuando en una etapa de Monitoreo Rápido no se detecta presencia de ninguna señal, la BS solicita realizar un monitoreo más preciso. Estos métodos, generalmente de mayor complejidad, incrementan el tiempo de esta tarea. Valores típicos están en el entorno de las decenas de milisegundos.

Al operar en una banda licenciada y de forma oportunista, el estándar debe ser muy cuidadoso en los aspectos relacionados a la protección de las transmisiones realizadas por los usuarios licenciados. Para asegurar esto se define una política de tiempos máximos antes de los cuales debe volverse a monitorear un canal. De esta forma puede detectarse, en

ventanas muy cortas de tiempo, la nueva presencia de un usuario licenciado.

Una vez la BS clasifica cada canal disponible, debe realizar mediciones periódicas para mantener actualizado el estado de cada canal de la siguiente forma.

Canal en operación: Este canal, que está siendo utilizado para las transmisiones entre la BS y CPEs, debe ser monitoreado por el CPE al menos una vez cada dos segundos.

Canal de respaldo (backup): Estos canales deben ser monitoreados al menos 1 vez cada 6 segundos.

Canal candidato: Antes de que un canal candidato pueda pasar al estado de respaldo, debe corroborarse la ausencia de transmisiones licenciadas por un tiempo no menor a 30 segundos, con al menos un monitoreo cada 6 segundos.

Canal protegido: Un canal protegido puede pasar a ser un canal candidato en la medida que el usuario licenciado o el sistema WRAN dejen vacante dicho canal. Un canal protegido puede entonces pasar a formar parte de la lista de canales de respaldo, para lo cual antes debe corroborarse la ausencia de transmisiones licenciadas por un tiempo no menor a 30 segundos, con al menos un monitoreo cada 6 segundos.

Por otra parte, se definen también los valores máximos para los tiempos de monitoreo, comienzo de una transmisión, cierre de una transmisión y movimiento a otra frecuencia (canal). Los valores que se definen son [5]:

- Tiempo de detección de canal (máx): 2 s.
- Comienzo de una transmisión (máx): 100 ms (de asignado el canal).
- Cierre de una transmisión (máx): 100 ms (de dada la orden).
- Movimiento a otra frecuencia (estando en operación): 2 s.

Observando estos tiempos, sobre todo el máximo tolerado para el movimiento de frecuencia en operación, se podría deducir que el estándar no está pensado para garantizar buenos desempeños en aplicaciones de voz en tiempo real (como voz sobre IP), considerando que en el peor de los casos se producirían retardos (delays), en la comunicación punta a punta, no tolerables. No obstante, el estándar especifica tiempos máximos, lo cual no quita que en determinadas situaciones se logren buenos desempeños en este tipo de aplicaciones.

Otra de las medidas que se adoptan en el estándar para realizar de forma segura y confiable el monitoreo y transmisión, y de esa forma proteger al usuario licenciado, es la de considerar dos antenas separadas en los CPEs. Una antena direccional para la comunicación entre el CPE y la BS permite no radiar energía en direcciones indeseadas y de esa forma se minimiza la probabilidad de causar interferencia. Por otro lado, una antena omnidireccional es propuesta para realizar el monitoreo [5].

Para proteger una banda completamente (un canal de 6 MHz por ejemplo), la BS marcará como protegido, no solo al canal en el cual se detecta la transmisión, sino que también lo hará con los canales adyacentes. De esta forma, si se detecta actividad en el canal N, entonces los canales protegidos serán el N, N+1 y N-1.

La última versión del estándar fue publicada en 2011 y desde entonces se han realizado algunas experiencias aunque aún sin un gran despliegue comercial. A continuación se analizan dos de ellas.

A. Red WRAN IEEE 802.22 en la Provincia del Guayas, Ecuador

Como se mencionó, el estándar fue elaborado con un objetivo principal, dotar de conexiones a banda ancha a zonas rurales a través del uso oportunista y no causando interferencia, del espectro asignado a la difusión de señales de televisión. En esta línea, el ingeniero Héctor Ramón Sánchez Paz presentó en su tesis de maestría [7] un análisis acerca de una posible implementación de una red WRAN 802.22 para dotar de conectividad a colegios y escuelas fiscales de la zona rural de la Provincia del Guayas, Ecuador.

Tal cual lo prevé el estándar, la arquitectura implementada fue de punto – multipunto conformada por una Estación Fija Central (BS) ubicada en la ciudad de Guayaquil y 25 Estaciones Fijas (CPEs) ubicadas en establecimientos educativos fiscales distribuidos en cada uno de los cantones de la Provincia de Guayas.

El objetivo, brindar un servicio integral de comunicación dando acceso durante horas de clase a los estudiantes y fuera de horario prestar servicios a los miembros de la comunidad. Para ello se buscó obtener un desempeño comparable a las tecnologías ADSL con 1.5 Mbps de capacidad en el enlace descendente (BS hacia CPE) y 384 kbps para el enlace ascendente (CPE a BS). En estas condiciones, en promedio, podría obtenerse un sistema con capacidad de atender 2.400 personas por canal de 6 MHz, considerando una media de 4 personas por hogar, una eficiencia espectral de 3 bit/s/Hz y un factor de sobreasignación de 50.

Se incorporaron al diseño del sistema los prototipos de CPE y BS implementados por la entidad japonesa NICT (*National Institute of Information and Communications Technology*) y la empresa Hitachi-Kokusai Electric, Inc., los cuales fueron presentados al público el 30 de enero de 2013.

Se lograron establecer de forma estable enlaces de hasta 94 km aproximadamente obteniendo un sistema robusto con capacidades para brindar un perfil integral de servicios de comunicación incluyendo telefonía IP, mensajería unificada, videoconferencia, video seguridad, conexión troncal de acceso a Internet, acceso a correo electrónico y acceso a la red Académica Avanzada del Ecuador (red CEDIA), entre otros. Los costos estimados para la implementación completa de este sistema, calculados en el año 2014, fueron de unos USD 324.125,00.

B. Pruebas de campo en Japón

En el periodo de noviembre a diciembre de 2013, el *National Institute of Information and Communications Technology (NICT)*, en un trabajo en conjunto con la empresa Hitachi Kokusai Electric, implementaron redes inalámbricas en diferentes escenarios para evaluar el desempeño de los protocolos que utilizan los claros espectrales (White Spaces) en la banda de televisión [8].

El objetivo era por un lado testear un enlace de larga distancia con IEEE 802.22 y por otro proveer de conexión a Internet a la localidad de Takashimizu, ubicada en una zona aislada y montañosa, empleando además sistemas IEEE 802.11af.

Los enlaces IEEE 802.22 que se implementaron fueron dos y con las características que se presentan en la siguiente tabla.

TABLA III. ENLACES IEEE 802.22.

Enlace	CPE	EIRP CPE	BS	EIRP BS	Distancia
1	Sadato	3,8 W	Takashimizu	3,8 W	12,7 km
2	Takashimizu	966 mW	El Centro	2,9 W	6,3 km

En la Tabla IV se presentan los resultados de esta experiencia los cuales muestran un desempeño interesante del 802.22 lográndose velocidades de hasta 15 Mbps en el enlace descendente.

TABLA IV. ENLACES DESCENDENTE Y ASCENDENTE.

Enlace	Ascendente (Mbps)	Descendente (Mbps)	Comentarios
1	4,5	5,2	1 canal de TV
2	9	15,5	2 canales de TV no contiguos

En tanto, para proveer conexión a Internet en la localidad de Tikashimizu el esquema implementado fue el de la Fig. 1. El esquema utilizado combina los sistemas IEEE 802.22 (enlace Centro - Tikashimizu), IEEE 802.11af (cobertura regional) y IEEE 802.11b/g/n para brindar acceso a la red a los dispositivos domésticos como portables, tabletas y teléfonos inteligentes.

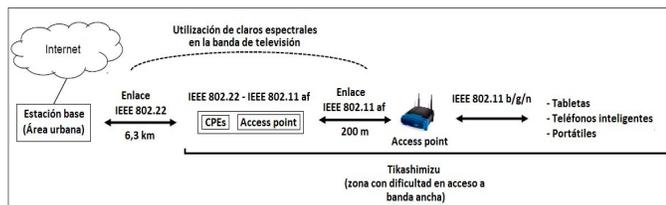


Figura 1. Topología para brindar conexión a Internet en Tikashimizu.

Los resultados de esta experiencia evidencian el alto potencial que tienen los estándares de interfaz aérea trabajando en forma complementaria para brindar conectividad en zonas remotas y en definitiva posibilitar el acceso universal a Internet independientemente de la localidad donde uno resida. Este sistema permitió brindar a la población de Tikashimizu el acceso a aplicaciones de navegación web (*browsing*), video en flujo continuo desde Internet (Youtube) y videollamadas (Skype), entre otras.

VI. CONCLUSIONES

La CR ofrece una solución real y viable al uso ineficiente de espectro radioeléctrico en diferentes bandas (como la destinada a radiodifusión televisiva). El estándar IEEE 802.22 pretende dar un marco normalizado para implementar sistemas de CR. Este estándar define completamente como deben operar las capas Física y de Control de Acceso al Medio para

poder trabajar en una banda licenciada de forma oportunista y sin causar interferencia. En este sentido, el estándar propone diferentes mecanismos para proteger al usuario licenciado basados fuertemente en funcionalidades típicas de CR. Diferentes experiencias piloto han demostrado una aplicabilidad real de este estándar, obteniendo sistemas que podrían brindar conexión a Internet con velocidades similares a los servicios ADSL, sobre todo en zonas remotas (rurales por ejemplo). No obstante, un gran desafío de este tipo de sistemas es el marco regulatorio. Así como lo hizo la FCC en EEUU, las diferentes entidades regulatorias en materia de telecomunicaciones de cada país, deberían analizar la utilización real del espectro y considerar seriamente la habilitación de sistemas de CR (como el IEEE 802.22) para operar en bandas subutilizadas. Es importante reflexionar sobre el estado del marco regulatorio en nuestros países, así como el importante rol de las universidades en la promoción de estas tecnologías, incentivando y colaborando activamente en el desarrollo de dichos marcos regulatorios.

Como trabajo futuro sería interesante explorar que hardware existe comercialmente para implementar un sistema IEEE 802.22 y estudiar los resultados de otras redes donde se estén utilizando técnicas de CR (como IEEE 802.11af y IEEE 802.16h) para poder comparar los desempeños y viabilidades de cada una.

REFERENCIAS

- [1] H. R. Márquez, "Arquitecturas de radio cognitiva: una revisión actual," *Tecnura*, vol. 18, no. 39, pp. 181–196, 2014.
- [2] J. Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications," *Mobile Multimedia Communications (MoMUC 99)* (NY: IEEE Press), 1999.
- [3] S. Imata, "ITU-R Cognitive Radio Tutorial," *IEEE 802.16 Presentation Submission Template (Rev. 9)*, 2011.
- [4] P. Kolodzy, "Communications Policy and Spectrum Management," in B. A. Fette, "Cognitive Radio Technology," ch. 2, pp. 29-71, 1st ed. Oxford, UK, 2006.
- [5] C. Cordeiro, K. Challapali y D. Birru, "IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios," *Journal of Communications*, vol. 1, no. 1, 2006.
- [6] IEEE Std 802.22-2011, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands," 2011.
- [7] W. O. Maggi, "Análisis de Factibilidad Técnica en la Implementación de una Red WRAN (IEEE 802.22) en Escuelas y Colegios Fiscales de Sectores Rurales y Urbanos Marginales de la Provincia del Guayas," Tesis de Maestría en Telecomunicaciones, Univ. Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador, 2014.
- [8] K. Ishizu y H. N. Tran, "TV White Space Communication System: NICT's Device and Database Technologies and Prototypes," in *Proc. of ETSI RRS Workshop*, Sophia Antipolis, 2014.