

ACCESO DINAMICO AL ESPECTRO: ESTADO ACTUAL, TENDENCIAS Y RETOS¹

Alexander Galvis Quintero

Est. Magíster en Telecomunicaciones

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Docente investigador Universidad Pontificia Bolivariana

Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI)

alex_galvis@ieee.org

Recibido Agosto 30 de 2008 / Aceptado Noviembre 24 de 2008

RESUMEN

El presente artículo aborda una temática relacionada con los avances en el desarrollo de tecnologías para hacer un mejor uso del espectro electromagnético, especialmente las utilizadas para el acceso dinámico a este recurso en las redes inalámbricas futuras. Se mencionan algunos de los proyectos más importantes, se describen brevemente las orientaciones más sobresalientes para la solución de los problemas que han surgido, los retos que actualmente enfrentan los investigadores en el área, y la tendencia en la evolución de dichas redes para cumplir con los requerimientos que les han sido impuestos. Todo lo anterior con el objetivo de motivar a la comunidad científica nacional para el trabajo en el área, y despertar el interés de la industria y del Sector en general en estos temas.

Palabras clave: DSA, DFS, gestión del espectro, redes de acceso dinámico.

ABSTRACT

¹ Producto derivado del proyecto "Desarrollo de algoritmos para la optimización de los procesos de acceso dinámico al espectro en redes punto-multipunto de nueva generación", que está realizando el autor para optar al título de de Magíster en Ingeniería, de la Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín.

This paper is about the development and progress of technologies that improve the use of electromagnetic spectrum, focusing on several useful techniques for dynamic spectrum access in future wireless networks. Some of the most important projects are mentioned; later the significant orientations that are used for the solution of emerging problems are briefly described. Other topics as the challenges currently faced by researchers in the field, and the trends on evolution of wireless networks to be able to meet the requirements that have been imposed are treating. The main objectives of this paper are motivating to the academic and scientific community for awakening an interest on the topic and, in this way start to work on it, besides achieve the interest of industry and the general sector in those topics.

Key words: DSA, DFS, spectrum management, dynamic access networks.

Dado que el esquema de asignación de espectro en las tecnologías contemporáneas es fijo para evitar interferencias nocivas entre redes y operadores, la utilización real de este recurso es baja, aspecto que ha sido corroborado por estudios recientes de algunos entes reguladores al rededor del mundo. Considerando lo anterior, es necesario desarrollar métodos de asignación de espectro que sean dinámicos y que operen aprovechando las características de reconfigurabilidad e inteligencia ofrecidas por las nuevas tecnologías de radio. Todo este desarrollo apunta a una mayor flexibilidad de las redes inalámbricas de próxima generación para adaptarse a las condiciones del medio, a la vez que se cumple con los requerimientos de calidad de servicio por parte de los usuarios. Aunque al rededor del mundo existen importantes investigaciones al respecto, algunos aspectos relacionados con la coordinación entre redes para compartir el espectro, la manera como éste es censado, y la implementación física de los algoritmos desarrollados, aun son temas abiertos a la

investigación, lo cual es una oportunidad para realizar aportes interesantes y significativos en el área.

En los últimos años se ha notado un incremento considerable en la utilización de tecnologías inalámbricas en entornos de aplicación que van desde lo militar hasta lo académico e investigativo pasando por la salud, el comercio y los negocios. En ambientes donde la proliferación de redes inalámbricas va acompañada de crecientes exigencias por parte de los usuarios, la administración del espectro y el uso mismo que las tecnologías y las redes hacen de él se vuelve un tema crítico no solo para el direccionamiento de esfuerzos en investigación y desarrollo, sino también en aspectos comerciales y regulatorios. Algunos estudios realizados por la FCC (Federal Communications Commission) a comienzos del milenio [1, 2] permiten concluir tres cosas importantes: primero, que instantáneamente es utilizado solo un porcentaje relativamente pequeño del espectro total disponible para la operación de los sistemas de radiocomunicaciones; segundo, que la saturación y escasez del espectro se debe más a las actuales políticas y prácticas para su administración que a una verdadera insuficiencia física del recurso; y tercero, que es necesario diseñar e implementar tanto políticas como tecnologías que optimicen el uso general que se hace del recurso espectral.

Adicional a esto, comercialmente se propone el soporte a la coexistencia como un requerimiento para el desarrollo de tecnologías y para la generación de futuros estándares, lo que cambiará considerablemente el ambiente comercial para el despliegue de redes y para la prestación de servicios, considerando que las cadenas de valor constituidas cambiarán su dinámica. ¿Qué tecnologías son las candidatas para soportar estas características? ¿Qué dificultades técnicas impone su implementación comercial? ¿De quién será la

responsabilidad de garantizar QoS (Quality of Service) o cómo se repartirá ésta entre los implicados en ambientes multi-radio/multi-operador? ¿Cómo se realizarán procesos como la tarificación? ¿Quién comercializará y qué nuevos canales comerciales deben aparecer? ¿Qué papel juega el regulador? ¿Es sano permitir que el espectro sea negociable entre los tenedores? Todas estas preguntas deberán ser respondidas certeramente para garantizar el éxito en el despliegue de las redes modernas, de las cuales las primeras en hacer aparición posiblemente sean las basadas en el futuro Estándar 802.22 (WRAN – Wireless Regional Area Network) del IEEE (The Institute of Electrical and Electronic Engineers) [3, 4], el cual será el primer estándar basado desde su concepción en técnicas y tecnologías para garantizar eficiencia en el uso de los recursos de radio y coexistencia con otros sistemas.

Con todo esto en mente, se están dirigiendo esfuerzos significativos a nivel mundial para el desarrollo de tecnologías que faciliten el cumplimiento de los objetivos propuestos para las redes inalámbricas de nueva generación, y una de las soluciones parciales propuestas es la aplicación de nuevos esquemas para el acceso y uso del espectro de radio [5]. No obstante, su implementación enfrenta una serie de retos, inicialmente técnicos, que implican diseños *crosslayer* y la aplicación de tecnologías que soporten un alto grado de reconfigurabilidad en capas inferiores, entre otras propiedades. Algunos de los aspectos a considerar son:

- La necesidad de que las capas inferiores gocen de reconfigurabilidad e inteligencia, lo cual – hasta el momento – solo parece ser facilitado por tecnologías de radio cognitivo.
- Las arquitecturas de red definidas deberán soportar mayor flexibilidad y robustez.
- Los problemas de censado de espectro necesitan ser resueltos, pues el censado de espectro es la base para muchas de las funcionalidades definidas en capas por encima

de la física.

- El establecimiento de los límites máximos de interferencia permitidos por cada tecnología para su operación en ambientes de coexistencia.
- El desarrollo de técnicas para acceso al recurso espectral y para su administración técnica considerando aspectos como movilidad, interferencia, ruido, QoS, costo, entre otros.
- La generación de especificaciones a nivel de capas superiores (direccionamiento, enrutamiento, soporte a QoS, seguridad, entre otros) coherentes con los desarrollos realizados en capas inferiores, implicando diseños *crosslayer* que enfrentan sus propios retos.
- La concepción de nuevas metodologías y herramientas para el diseño de redes basadas en estas tecnologías.
- El tratamiento que se le dará a las infraestructuras heredadas.
- El desarrollo de terminales de usuario.
- La definición de políticas que además de apoyar el desarrollo tecnológico potencien su utilidad.
- Los retos que impone la comercialización de estos productos de la innovación.
- La definición de nuevas estructuras de negocio y una dinámica de la cadena de valor un poco diferente.

Es claro que una sola tecnología no será capaz de satisfacer los requerimientos impuestos para las redes futuras, sino que será una combinación inteligente de varias de ellas la que facilitará el alcance de las metas propuestas, y por este motivo, el desarrollo se está dando en diversas áreas de forma paralela.



Figura 1 – El ciclo cognitivo [5]

El tema de reconfigurabilidad e inteligencia en capa física está siendo abordado mediante dos tecnologías complementarias: SDR (Software Defined Radio) y CR (Cognitive Radio). Las definiciones de estas dos tecnologías son simples, pero sus implicaciones técnicas – e incluso comerciales – son variadas y complejas. El término “*Software Radio*” fue acuñado por Joseph Mitola III en 1.991 para referirse a un tipo de radio reprogramable o reconfigurable [6]. En otras palabras, SDR es un radio cuya funcionalidad está sustancialmente definida por *software* y cuyo comportamiento puede ser significativamente alterado a través de cambios en dicho *software*. Esto claramente constituye una ventaja significativa y un motivo de peso para que se piense en la realización de esfuerzos orientados a hacer de SDR una tecnología comercialmente viable. Posteriormente, en el año 2000, el mismo Mitola introduciría el término “*Cognitive Radio*” [7], que define a un radio que puede cambiar sus parámetros de operación teniendo en cuenta uno o varios parámetros que mida o cense en su entorno. Con apoyo en estos conceptos, se están desarrollando otras tecnologías que básicamente soportarán las tres funciones mostradas en la Figura 1, las cuales definen el ciclo cognitivo en capas inferiores: censado de espectro, análisis de espectro, y toma de decisiones en

cuanto al acceso a dicho espectro; todo, en ambientes de radio heterogéneos [5].

La función de censado de espectro es la que actualmente afronta las mayores dificultades técnicas, y en [5] pueden verse de forma general los retos y las propuestas para su implementación. La función de análisis del espectro comprende la revisión de la información obtenida mediante el censado de espectro, considerando aspectos como la interferencia, atenuaciones, tasas de error, retardos, y variabilidad en la disponibilidad del recurso espectral para la posterior toma de decisiones [5]. Finalmente, la función de decisión sobre el espectro consiste en la aplicación de un algoritmo para la asignación del recurso a los usuarios que lo soliciten (acceso), buscando cumplir con ciertos requerimientos como mínima interferencia, máximas tasas de transmisión, mayor capacidad, ahorro de potencia, equidad, entre otros.

Adicionalmente, y como ya se mencionó, en capas superiores también serán necesarios otros desarrollos que busquen garantizar interoperabilidad y transparencia para la prestación de los servicios. Algunos de los esfuerzos más significativos en ese sentido los está realizando el Grupo de Trabajo 802.21 del IEEE que busca estandarizar el MIH (Media Independent Handover) [8], colaborando también con la IETF (Internet Engineering Task Force) mediante las especificaciones para MIP (Mobile Internet Protocol) y relacionados.

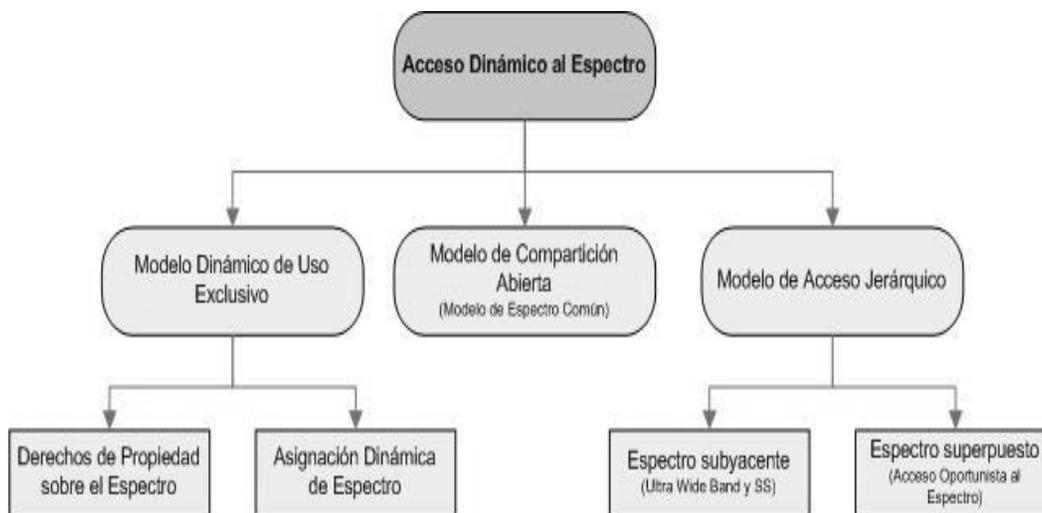


Figura 2 – Taxonomía de las técnicas de Acceso Dinámico al Espectro [9]

En lo que a las funciones de análisis de espectro y decisión sobre el espectro se refiere, el desarrollo se ha concentrado en técnicas denominadas DSA (Dynamic Spectrum Access). DSA es un término general que define un conjunto de técnicas empleadas para el acceso al recurso espectral bajo ciertas condiciones específicas dependientes de la arquitectura de red, del tipo de banda de frecuencia a acceder, y de otros requerimientos. En [9] se provee una taxonomía de las técnicas DSA, la cual se muestra en la Figura 2.

Al interior del Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI) de la Universidad pontificia Bolivariana, se está desarrollando un proyecto de maestría titulado “Desarrollo de algoritmos para la optimización de los procesos de acceso dinámico al espectro en redes punto-multipunto de nueva generación”, en el cual, de las técnicas mostradas en la Figura 2 y caracterizadas en [9], son de particular interés las que corresponden al modelo de acceso jerárquico sobre espectro superpuesto, denominadas de forma genérica como acceso oportunista al espectro. Estas técnicas involucran la operación de diversas redes o infraestructuras sobre una misma porción de espectro, por lo cual deben implementar un método para compartir dicho recurso sin afectar

significativamente su operación. A su vez, las técnicas de espectro compartido pueden considerar coordinación intra-red e inter-redes, y pueden clasificarse según la arquitectura y/o según su comportamiento en la asignación de espectro [5]. De acuerdo a la arquitectura, las técnicas de espectro compartido pueden ser centralizadas o distribuidas; y según su comportamiento pueden ser cooperativas (colaborativo) o no cooperativas [5].

Ya en este punto, las investigaciones – incluyendo el proyecto mencionado – se han dirigido principalmente al desarrollo de algoritmos que permitan solucionar el problema de acceso de manera eficiente en términos de tiempo, con el objeto de que puedan ser implementados en sistemas reales. Muchos de los proyectos, como los descritos en [10, 11, 12, 13 y 14] están relacionados con la implementación de estas técnicas en redes tipo *mesh*. En [10] se describe el diseño *crosslayer* para la ejecución de procesos de este tipo dividiendo el problema en partes, cada una de las cuales se soluciona suponiendo ya resueltas algunas de las otras. El objetivo es minimizar el “costo” total de los enlaces en la red, presumiendo un censado de espectro perfecto y solucionando inicialmente el problema de asignación de canales mediante el método de coloreado de grafos considerando restricciones en cuanto a interferencia, lo que resulta en un algoritmo distribuido para este efecto. Una vez resuelto el problema de asignación, se desarrolla un algoritmo distribuido para controlar óptimamente la potencia de transmisión. Finalmente se abordan los problemas de enrutamiento sobre los enlaces ya establecidos, buscando que los algoritmos converjan al punto óptimo de operación de la red. En [11] los autores también utilizan la representación del problema mediante grafos para su solución, y proponen un método que realiza tanto asignación de espectro como planificación garantizando cierto grado de equidad. A diferencia de la manera como se aborda la interferencia en [10], se utiliza el modelo de protocolo descrito en [15]. En [12] el problema de asignación de espectro en redes multi-salto se expresa como un

problema mixto entero de programación no lineal, el cual se resuelve buscando minimizar la cantidad de espectro utilizado para satisfacer los requerimientos de comunicaciones de un conjunto de nodos, empleando nuevamente el modelo de protocolo para considerar interferencia.

Por su parte, Microsoft Corp. desarrolla un par de proyectos relacionados con redes cognitivas y redes de acceso dinámico. El primero de ellos es el proyecto KNOWS (Kognitiv Networking Over White Spaces) [13], el cual ha generado una serie de prototipos funcionales cuyos componentes incluyen *hardware*, un mecanismo para asignación de espectro, y un protocolo MAC (Media Access Control). Parte del desarrollo está basado en el estándar 802.11 del IEEE, y en [13] se muestra a través de simulación que KNOWS proporciona el doble del *throughput* comparado con 802.11 básico en la mayoría de los escenarios típicos. El esquema de asignación de espectro es de tipo distribuido y se denomina b-SMART [16], pero también al interior del proyecto se han generado otras propuestas similares como el DSAP (Dynamic Spectrum Access Protocol) [17], y tiene la particularidad de que el sistema se ha probado para operar en las bandas UHF (Ultra-High Frequencies) originalmente asignadas a servicios de teledifusión. El segundo proyecto de Microsoft Corp. es Nautilus, el cual consiste en el análisis teórico y el diseño de un protocolo colaborativo y consciente del ambiente para el acceso dinámico al recurso espectral en ambientes de radio heterogéneos [14]. Información adicional sobre estos dos proyectos puede encontrarse también en el sitio Web de Microsoft Research².

El proyecto desarrollado al interior del GIDATI ya ha empezado a arrojar resultados interesantes en cuanto al desempeño de los algoritmos centralizados típicos utilizados en

² Proyecto KNOWS: <http://research.microsoft.com/netres/projects/KNOWS/> y proyecto Nautilus <http://research.microsoft.com/wn/nautilus.aspx>

procesos de asignación dinámica de espectro y de acceso oportunista basado en selección dinámica de frecuencia. Estos resultados parciales pueden encontrarse en [18, 19]. En general, la utilización de algoritmos centralizados y distribuidos depende en gran medida de la arquitectura y topología de red seleccionada. Típicamente en las redes *mesh* los esquemas distribuidos funcionan de manera más natural, considerando que la mayoría de los procesos deben coordinarse entre dos o más nodos que intervienen en las comunicaciones extremo-extremo. A diferencia de las topologías *ad hoc*, las topologías punto-multipunto han sido abordadas en menor medida, a pesar de que actualmente las tecnologías que operan con este tipo de topologías son las de mayor implementación y despliegue comercial. Los sistemas 802.11 generalmente se implementan basados en infraestructura, al igual que las configuraciones en las que se han desplegado las redes 802.16-2004/e obedecen a topologías punto-multipunto, y a ellas se suman las redes celulares que gozan de un gran número de usuarios y amplia cobertura. Adicionalmente y viendo hacia el futuro, la ITU (International Telecommunications Union) mediante el Grupo de Trabajo *IMT Advanced* (International Mobile Telecommunications – Advanced) ha dado los lineamientos iniciales para el desarrollo de sistemas móviles celulares de cuarta generación, los cuales incluyen a LTE (Long-Term Evolution) y UMB (Ultra-Mobile Broadband) cuyas topologías básicas seguirán siendo punto-multipunto [20]. En la *World Radiocommunication Conference 2007* se establecieron algunos de los requerimientos que los sistemas futuros deben cumplir, especialmente los relacionados con el uso del recurso espectral y la coexistencia con otras redes. Igualmente, el IEEE también se encuentra realizando aportes significativos en el área mediante el Grupo de Trabajo 802.18 (*Radio Regulatory Technical Advisory Group*) y el Grupo de Trabajo 802.19 (*Coexistence Technical Advisory Group*). No obstante, el trabajo más interesante del IEEE en los temas relacionados con este tema se está llevando a cabo a través del *IEEE Standards Coordinating Committee 41 – Dynamic Spectrum Access*

Networks (SCC41)³ [21], el cual formalmente se denomina *IEEE 1900 Standards Committee*.

El SCC41 trabaja en cuatro frentes [22]:

- IEEE 1900.1: Grupo de trabajo en terminología y conceptos para los sistemas de radio de próxima generación y gestión del espectro.
- IEEE 1900.2: Grupo de trabajo sobre prácticas recomendadas para análisis de interferencia y coexistencia.
- IEEE 1900.3: Grupo de Trabajo sobre prácticas recomendadas para la evaluación de conformidad de módulos software para *Software Defined Radio* (SDR).
- IEEE 1900.4: Grupo de Trabajo sobre bloques de construcción arquitectural que permitan la toma de decisiones red-dispositivo de forma distribuida para la optimización en el uso de los recursos de radio en redes heterogéneas de acceso inalámbrico.
- IEEE 1900.A: Grupo de Trabajo sobre la fiabilidad y evaluación del cumplimiento de normas para sistemas de radio con *Dynamic Spectrum Access* (DSA).

El IEEE SCC41 organiza un evento internacional denominado *IEEE Symposia on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (DySPAN), el cual está en su tercera versión y presenta los resultados más relevantes de las investigaciones en el área. El trabajo del IEEE SCC41 se ha visto reflejado principalmente en tres aspectos: El desarrollo del Estándar IEEE 802.22 – un estándar que opera en topología punto-multipunto –, algunas consideraciones tomadas en el Estándar IEEE 802.21, y en el desarrollo comercial de SDR/CR liderado por el SDR Forum. En la Figura 3 se ilustra la relación del IEEE 1900 con otros organismos/entidades [21].

³ Información adicional se puede encontrar en <http://www.scc41.org/>

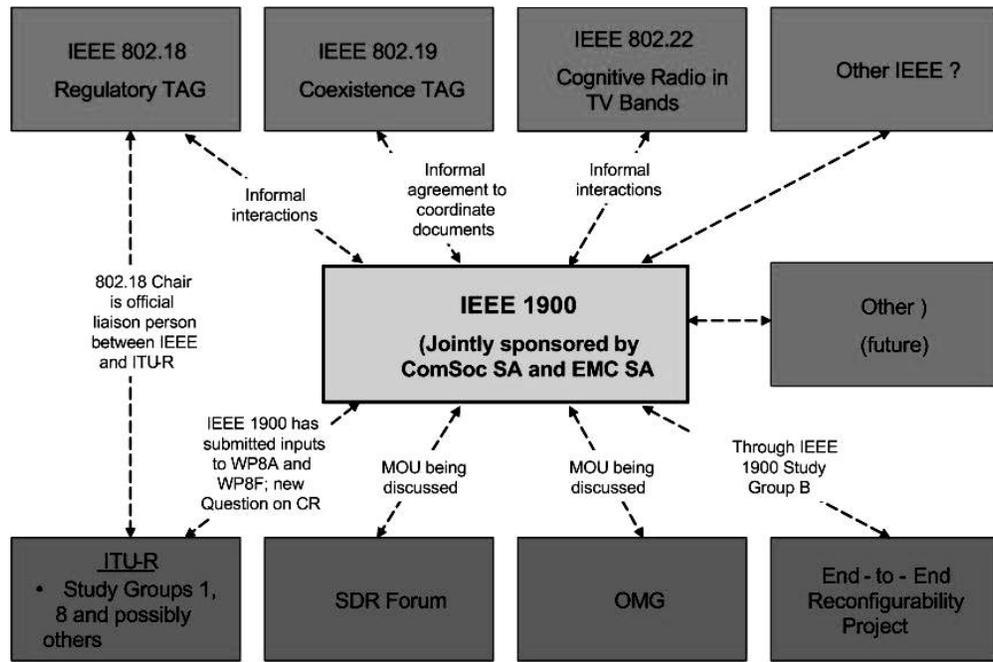


Figura 3 – Relaciones del IEEE 1900 con organizaciones externas [21]

De lo anterior se deduce la importancia de analizar también la manera como las técnicas DSA serán implementadas en redes punto-multipunto y evaluar su desempeño. Así, para la concepción del Estándar IEEE 802.22 (WRAN) se han adelantado trabajos importantes sobre aplicación de DSA en este tipo de ambientes. En [3] y [4] se describe el estado general de este estándar, resaltando la arquitectura de la red y los aspectos en los cuales aun se necesita desarrollo, incluidas las técnicas de acceso y la coordinación que debe existir entre las distintas WRAN para compartir recursos espectrales. Al igual que el sistema presentado en [23], una particularidad de 802.22 es que operará en la banda UHF, la cual le brinda la posibilidad de amplias coberturas que se estiman en un promedio de 33Km con CPE trabajando a 4W, y ofreciendo eficiencias espectrales entre 0,5 y 5 bits/(s/Hz). No obstante, tendrá que coexistir con los servicios de televisión y con otras redes 802.22 [4]. El primer borrador del estándar ya ha sido publicado, pero los aportes para proponer soluciones a los problemas que aun están abiertos siguen apareciendo. La Universidad Central de la Florida y

Qualcomm Inc. proponen en [24] un conjunto de procedimientos para coordinar la coexistencia entre varias redes WRAN operando en el mismo ambiente de radio, maximizando el *throughput*, reduciendo retardos en la red y garantizando ciertos niveles de equidad en la asignación de los recursos. Aunque no se ha definido el método exacto para mitigar interferencia en 802.22, los autores proponen un algoritmo centralizado que incrementa la utilización del espectro, abordando incluso el problema de nodo oculto. En este caso, asumen cada BTS (Base Transceiver Station) 802.22 como una WRAN independiente, y se formulan unas funciones objetivo con base en ciertas restricciones. El problema de asignación se resuelve con la metodología de grafos coloreados, y los resultados de todo el proceso muestran que el esquema propuesto podría proporcionarle mejor desempeño al sistema.

Otra aproximación al caso de acceso dinámico en redes punto-multipunto se realizó hace unos años en los proyectos europeos DRiVE y OverDRiVE (Dynamic Radio for IP services in Vehicular Environments / Over Dynamic multi-Radio networks in Vehicular Environments) [25, 26]. En los algoritmos propuestos en estos proyectos se basó el desarrollo inicial del proyecto del GIDATI [18], especialmente para asignación dinámica de espectro. En ambos proyectos se aplicaron técnicas de asignación dinámica de espectro para permitir la operación de redes UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) en la banda de trabajo de los sistemas DVB-T (Digital/Direct Video Broadcasting – Terrestrial), aprovechando las variaciones temporales y espaciales de las cargas de tráfico en las redes de teledifusión. El simulador desarrollado por el GIDATI permite observar los resultados de la aplicación de algoritmos bastante similares a los descritos en [25, 26], incluyendo DFS (Dynamic Frequency Selection) [18, 19]. Trabajos y resultados más recientes en este sentido se presentan en [27, 28, 29], pero como se explicó anteriormente, las técnicas de asignación dinámica de espectro difieren

de las técnicas de acceso oportunista en aspectos que van desde sus ambientes de aplicación hasta los retos tecnológicos que impone su completo desarrollo e implementación.

Ahora bien. DSA y CR, desde el punto de vista de la implementación comercial, son innovación pura y los estándares basados en los conceptos inmersos en ellas están aun en etapa de concepción, motivo por el cual es imperativo prepararse para su llegada de manera que el despliegue de las redes futuras brinde los beneficios esperados en todas sus dimensiones. Actualmente en Colombia no se han hecho públicos resultados de estudios locales sobre el tema – a excepción de una revisión superficial realizada en [30, 31] y los resultados parciales mostrados en [18, 19]. Este tema considera un problema que afecta a muchos sistemas teniendo en cuenta el incremento de tecnologías inalámbricas desplegadas comercialmente. Debido a esto, es importante para la comunidad académica e investigativa colombiana orientar esfuerzos hacia la realización de aportes en el área, incrementando su participación y visibilidad en la comunidad científica mundial, e impactando positivamente el sector nacional. Actualmente, el escenario que está analizando el GIDATI para la aplicación y medición del desempeño de DSA se ha definido de la siguiente manera:

- Se asume terreno plano.
- Varias redes primarias operando en las bandas ortogonales para DSA. Cada red primaria posee derechos (licencia) sobre una porción del espectro.
- Puede existir o no una banda no licenciada para acceso libre por parte de los usuarios secundarios.
- El espectro disponible para DSA es discontinuo y heterogéneo.
- Redes secundarias cognitivas tipo punto-multipunto con esquema de duplexación TDD.

- El acceso al espectro de los usuarios primarios en cada banda es aleatorio (consideraciones sobre el *holding time* y *spectrum handoff*).
- Usuarios secundarios fijos.
- Capa física reconfigurable, con tiempos de reconfiguración despreciables.
- Arquitectura centralizada para acceso y distribuida para censado de espectro.
- Censado de espectro “perfecto” (es posible tener un mapa instantáneo de disponibilidad de espectro, y se puede detectar de forma instantánea la ocupación del espectro por parte de un usuario primario).
- Los flujos no son fragmentados.
- Para el análisis de interferencia se utilizará el modelo de protocolo.
- Potencia de transmisión fija, dependiente de la banda de operación y de la implementación en capa física.
- Se considera tanto *intra-network spectrum sharing* como *inter-network spectrum sharing* en modo *overlay spectrum sharing*.
- CCCH provisto por cada BTS en configuración *underlay spectrum sharing*. Funciona con la mayor robustez necesaria para soportar las comunicaciones de control, señalización, etc.
- Unidad espectral = Un ancho de banda durante un intervalo de tiempo específicos (la capacidad depende de la implementación de capa física).

Así, la solución del problema planteado aportará una alternativa parcial para lograr el objetivo de que las redes de próxima generación utilicen el espectro electromagnético de manera más eficiente y faciliten la prestación de servicios de telecomunicaciones de forma transparente a los usuarios, independientemente de su ubicación y hora del día. Los ítems anteriores han

permitido modelar el sistema con rigurosidad matemática y se aplicarán técnicas de optimización para encontrar la solución al problema de asignación. El modelo presentado es una aproximación, pero en la medida en que se lo vaya acercando al escenario real se obtendrán resultados cada vez más útiles para la implementación práctica de dichos desarrollos. Adicionalmente, se debe considerar el trabajo necesario en aspectos como el comercial, regulatorio y ambiental para que la innovación en esta área sea de beneficio para todos los involucrados, y en ese sentido es responsabilidad de la comunidad académica e investigativa colombiana mantener al país al tanto de los desarrollos tecnológicos y en el mejor de los casos participar en ellos... como dijo Alan Kay: “*La mejor forma de predecir el futuro es inventándolo*”.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FCC Spectrum Policy Task Force, “Report of the Spectrum Efficiency Working Group”, Washington D.C., noviembre de 2002.
- [2] FCC, ET Docket No 03-222 Notice of Proposed Rule Making and Order. Diciembre de 2003.
- [3] C. Cordeiro, et al. IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard Based on Cognitive Radios. En: Proceedings of IEEE DySPAN 2005, noviembre de 2005, p328–337.
- [4] C. Cordeiro, K. Challapali y D. Birru. IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard Based on Cognitive Radios. En: Journal of Communications, Vol.1, No.1, abril de 2006, p38-47.
- [5] I. F. Akyildiz, et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless

networks: A survey. En: Elsevier Computer Networks, Vol.50, No.13, septiembre de 2006. p2127-2159.

- [6]** H. Harada, R. Prasad. Simulation and Software Radio for Mobile Communications. Artech House Publishers. Nueva York. 2002. 467p.
- [7]** J. Mitola. Cognitive radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Disertación de tesis doctoral. Royal Institute of Technology; Suecia, mayo 8 de 2000. 313p.
- [8]** G. Lampropoulos, et al. Media-Independent Handover for Seamless Service Provision in Heterogeneous Networks. En: IEEE Communications Magazine, Vol.46, No. 1, enero de 2008. p64-71.
- [9]** Q. Zhao y B. M. Sadler. A survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy. En: IEEE Signal Processing Magazine, Vol.24, No.3, mayo de 2007. p79-89.
- [10]** Y. Xi y E. M. Yeh. Distributed Algorithms for Spectrum Allocation, Power Control, Routing, and Congestion Control in Wireless Networks. En: ACM SIGMOBILE – Proceedings of the eighth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'07), septiembre 9-14 de 2007. p180-189.
- [11]** J. Tang, S. Misra y G. Xue. Spectrum Allocation and Scheduling in Dynamic Spectrum Access Wireless Networks. En: Proceedings of International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness 2007 (Qshine 2007), agosto 14-17 de 2007.
- [12]** Y. T. Hou, Y. Shi y H. D. Sherali. Optimal Spectrum Sharing for Multi-hop Software Defined Radio Networks. En: Proceedings of 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007), mayo de 2007. p1-9.

- [13] Y. Yuan, et al. KNOWS: Kognitiv Networking Over White Spaces. En: Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007), abril 17-20 de 2007. p416-427.
- [14] J. Zhao, H. Zheng y G. Yang. Spectrum Sharing through Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Access Networks. En: Wiley Wireless Communications and Mobile Computing Journal, Vol.7, No.9, noviembre de 2007. p1061-1075.
- [15] P. Gupta y P. R. Kumar. The Capacity of Wireless Networks. En: IEEE Transactions on Information Theory, Vol.46, No.2, 2000. p388-404.
- [16] Y. Yuan, et al. Allocating Dynamic Time-Spectrum Blocks in Cognitive Radio Networks. En: ACM SIGMOBILE – Proceedings of the eighth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'07), septiembre 9-14 de 2007. p130-139.
- [17] V. Brik, et al. DSAP: A Protocol for Coordinated Spectrum Access. En: Proceedings of 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), noviembre de 2005.
- [18] A. Galvis, R. Marquez. Simulación y Análisis de Alternativas para la Asignación Dinámica de Espectro en ambientes TDMA. Proceedings de las Jornadas IEEE de Sistemas de Telecomunicaciones 2008; Escuela Politécnica Nacional/IEEE ComSoc, Quito (Ecuador), 2008.
- [19] A. Galvis, R. Marquez. Aplicación de Algoritmos Simples para Asignación Dinámica de Espectro y Selección Dinámica de Frecuencia en sistemas TDMA. Proceedings del Congreso Colombiano de Comunicaciones IEEE 2008 (COLCOM'08); IEEE Sección Colombia/IEEE ComSoc, Popayán (Colombia), 2008.
- [20] 3G Americas. Defining 4G: Understanding the ITU Process for the Next Generation of

wireless technology. Junio de 2007. 15p.

- [21] J. Hoffmeyer. Next Generation Radio and Spectrum Management. IEEE 1900 Committee, Julio de 2007. 37s.
- [22] IEEE SCC42. Overview of SCC41 and the 1900.x Working Groups. Febrero 21 de 2008.
- [23] C. E. Perkins. Mobile IP and the IETF. En: ACM SIGMOBILE – Mobile Computing and Communications Review, Vol.5, No.2, abril de 2001. p1-5.
- [24] S. Sengupta, et al. Enhancements to Cognitive Radio Based IEEE 802.22 air-interface. En: Proceedings of IEEE International Conference on Communications 2007 (ICC2007), junio 24-28 de 2007. p5155-5160.
- [25] P. Leaves, J. Huschke y R. Tafazolli. A Summary of Dynamic Spectrum Allocation Results from DriVE. En: Proceedings of IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, junio 16-19 de 2002. p245-250.
- [26] D. Grandblaise, et al. Reconfigurability Support for Dynamic Spectrum Allocation: From the DSA Concept to Implementation. En: Proceedings of the Mobile Future and Symposium on Trends in Communications 2003 (SymptoTIC'03), octubre 26-28 de 2003. p9-12.
- [27] P. Houze, et al. Dynamic Spectrum Allocation Algorithm for Cognitive Networks. En: Proceedings of Third International Conference on Wireless and Mobile Communications 2007 (ICWMC '07), marzo de 2007. p25-29.
- [28] A. P. Subramanian, et al. Fast Spectrum Allocation in Coordinated Dynamic Spectrum Access Based Cellular Networks. En: 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks 2007 (DySPAN 2007), abril 17-20 de 2007. p320-330.

- [29]** S. Geirhofer, L. Tong y B. M. Sadler. Dynamic Spectrum Access in the Time Domain: Modeling and Exploiting White Space. En: IEEE Communications Magazine, Vol.45, No.5, mayo de 2007. p66-72.
- [30]** A. Galvis, R. Marquez y L. Fletscher. Alternativas Tecnológicas para un mejor Uso del Espectro Electromagnético. En: Revista Colombiana de Telecomunicaciones (RCT) de CINTEL, Vol.19, No.44, julio de 2007. p41-47.
- [31]** A. Navarro. Sobre los Nuevos Retos del Uso del Espectro Radioeléctrico. En: Revista Colombiana de Telecomunicaciones (RCT) de CINTEL, Vol.19, No.44, julio de 2007. p36-40.