

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

LAS COMUNICACIONES MÓVILES
COMO MOTOR DE PROGRESO

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. RAMON AGUSTÍ COMES

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 22 DE JUNIO DE 2010

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. MIGUEL ÁNGEL LAGUNAS HERNÁNDEZ



MADRID MMX

LAS COMUNICACIONES MÓVILES COMO MOTOR DE PROGRESO

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

LAS COMUNICACIONES MÓVILES
COMO MOTOR DE PROGRESO

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. RAMON AGUSTÍ COMES

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 22 DE JUNIO DE 2010

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. MIGUEL ÁNGEL LAGUNAS HERNÁNDEZ



MADRID MMX

Editado por la Real Academia de Ingeniería

© 2010, Real Academia de Ingeniería

© 2010 del texto, Ramón Agustí Comes y Miguel Ángel Lagunas Hernández

ISBN: 978-84-95662-37-8

Depósito legal: M-27.637-2010

Impreso en España

LAS COMUNICACIONES MÓVILES COMO MOTOR DE PROGRESO

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Ingeniería
Excelentísimos Académicos
Señoras y Señores
Queridos amigos

Mi vocación por las radiocomunicaciones nace gracias a un profesor de bachillerato al que no conseguí entender aquello que me explicaba sobre la radio, que me parecía tan fantástico por lo inmaterial, y al mismo tiempo, tan tangible. En búsqueda de este conocimiento decidí entonces cursar la Ingeniería de Telecomunicaciones, aunque por imperativos de la época tuve que hacer el primer curso en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona. No avancé apenas en mis deseos de profundizar en lo que era la Radio, sencillamente porque lo más próximo que se impartía era el tema de Electricidad en Física, que se dejaba para el final, y dadas las turbulencias académicas durante ese año, era el curso 1968-69, tuve que dejarlo definitivamente para el siguiente, ya en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid, donde inicié sin más demoras mi andadura en el mundo de las Telecomunicaciones. Fueron realmente cuatro cursos en los que disfruté y conseguí entender finalmente las interioridades de las Radiocomunicaciones. Profesores tan especiales como el recientemente fallecido Ricardo Valle, José María Hernández, Juan Riera, Jesús Miñana, Vicente Ortega entre otros muchos, marcaron definitivamente mi futura trayectoria profesional. Entendí también que me quedaba todavía mucho por descubrir, por lo que no dudé en acompañar a Ricardo Valle, junto con otros recién titulados, en la experiencia de ayudar a poner en marcha la Escuela Superior de Telecomunicaciones de Barcelona y apostar definitivamente por el mundo de la Investigación.

Me acompañaron en estos primeros pasos ingenieros y catedráticos actuales tan ilustres como Luis Castañer, Gabriel Junyent, Miguel Ángel Lagunas, Aníbal Figueiras, Antonio Puerta, Mateo Valero, Vicente Casares, etc. a los que a cada uno, y por diversas razones, siempre he admirado y a los

que tengo la suerte de continuar haciéndolo y sobre todo de contar con su amistad. Los primeros años no fueron tiempos fáciles en lo académico, de hecho, el primer libro de texto que recomendaba a los alumnos en mi primer curso como profesor lo tuve que costear con mis propios ingresos. La ilusión de juventud que nacía de la motivación por descubrir nuevos horizontes, sin embargo, era lo suficientemente fuerte como para continuar en el empeño. Gracias a Jose Antonio Delgado Penin, mi director de tesis, aproveché la experiencia de trabajar un curso en el Politécnico de Torino en un laboratorio con brillantes profesores en Telecomunicaciones como Sergio Benedetto, Ezio Biglieri, etc., que definitivamente me permitieron acabar de entender lo que era la Investigación.

Pronto percibí la necesidad de la financiación. La carencia de recursos para poder presentar una ponencia en el IEEE Vehicular Technology Conference, en Pittsburg (EEUU) me lo mostró sin amagues de ningún tipo y fue el detonante que como ingeniero me hizo ver que había un mundo real fuera de la Universidad, mundo con el que había que buscar espacios comunes de colaboración, a pesar de que no era lo usual en aquellos tiempos. Después de algunos intentos con fortuna diversa, finalmente conseguí, con los ahora catedráticos Gabriel Junyent y Fernando Casadevall, acreditar por primera vez un laboratorio de la Escuela para poder efectuar las pruebas de homologación pertinentes de equipos de VHF a bordo de embarcaciones, y que, hasta entonces, sólo se podía hacer en el INTA. Con posterioridad, este conocimiento fue transferido a la empresa privada. Ciertamente este encuentro inicial con el mundo empresarial, y otros que siguieron, ya me permitió la financiación necesaria para asistir a congresos, pero lo más importante es que me abrió un camino de colaboración con el mundo exterior que me ha permitido a lo largo de los años el ir adquiriendo de manera continuada un acervo tecnológico que he podido trasladar a la docencia e investigación universitarias y revertirlo a su vez, convenientemente mejorado, al sector empresarial y a la sociedad en general en lo que denominaría un ciclo virtuoso.

Son muchas las personas del entorno empresarial con las que he colaborado desde entonces y de las que siempre he aprendido. En particular, y aun a costa de dejar la lista incompleta, quisiera agradecer a Tomás Sanjuán de Alcatel España y José Jiménez de Telefónica I+D, actualmente directores en las mencionadas empresas, por las colaboraciones realizadas,

por las primeras incursiones en proyectos europeos y por la muchas charlas mantenidas que me han ayudado a conocer con posterioridad el sector; a Matías Anegón en ENSA y José Luis Miranda en Telefónica Móviles por permitirnos la participación en proyectos empresariales con productos reales, a José Luis Ripoll por su continuo soporte a nivel personal y profesional como Director y actualmente como Presidente de la Fundación Vodafone, y a Jaime Bustillo, Director de Tecnología de Vodafone, por su continua puesta al día en el máster de Comunicaciones Móviles UPC-Vodafone del que he sido director durante los últimos 14 años.

Siendo la radio mi razón de ser profesional, continué los primeros años después de la consecución de mi tesis doctoral implicado en esta temática con los radioenlaces de gran capacidad. Tuve con ello la suerte de colaborar en los laboratorios del CNET (Lannion) con Michel Joindot y su equipo en el desarrollo de los primeros equipos con estas características, lo que me facilitó sistematizar una serie de publicaciones en el dominio de la radio, y quizás lo más importante, al hilo de la tecnología desarrollada, apostar por las comunicaciones móviles con antelación a su aparición explosiva unos años más tarde. Esta temática es la que me permitió consolidar un grupo de investigación, que ha ido evolucionando durante los últimos 25 años, desde estudios iniciales de capa física hasta la gestión de los recursos radio en redes de acceso, incluyendo ya recientemente elementos de Radio Cognitiva.

Finalmente, no podría terminar esta Introducción sin mencionar a los muchos profesores, alumnos y doctorandos que han pasado o permanecen en el grupo de investigación, y muy en particular a Fernando Casadevall, Oriol Sallent y Jordi Pérez Romero, de los que siempre he aprendido y confío que algo les pueda haber enseñado.

INTRODUCCIÓN

La exposición que voy a desarrollar a continuación pretende incluir algunos aspectos derivados de la Ingeniería de las Comunicaciones Móviles a los que me he aproximado a lo largo de mi carrera profesional. Las comunicaciones móviles, como cualquier otra rama de la ingeniería, aportan la tecnología precisa para la solución de problemas reales específicos que demanda la sociedad. Estas contribuciones pasan con el tiempo, no sólo a formar parte del acervo cultural de cada época, sino que haciéndolo, inducen cambios en el comportamiento social que a su vez son fuente de nuevas demandas tecnológicas, habilitando así un ciclo de progreso a lo largo del tiempo. En este sentido, he querido iniciar la primera parte de esta exposición, haciendo hincapié en algunos aspectos socioeconómicos, tecnológicos y de progreso enraizados en la historia, así como en los propios mercados actuales, a los que las comunicaciones móviles no son ajenas. En una segunda parte haré especial mención a aspectos básicos derivados del uso del recurso escaso que es el espectro radioeléctrico, y del que se alimentan las comunicaciones móviles, mediante unas notas sobre la Ingeniería radio, que a su vez inducen el afloramiento de las técnicas de gestión de recursos radioeléctricos, que desarrollaré seguidamente, y que persiguen la obtención de un uso lo más eficiente posible del espectro disponible. A continuación introduciré aspectos relevantes al marco regulatorio en el que la Ingeniería radio se desenvuelve. Finalmente, en la tercera parte y última de esta exposición, esbozaré los caminos en el devenir de las comunicaciones radioeléctricas que presumiblemente irán tomando cuerpo en los próximos años, y cuyo común denominador es la gestión de la complejidad, derivada en gran parte por unos recursos radioeléctricos escasos. Cerraré esta exposición con unas breves reflexiones sobre Internet del futuro; red de redes a la que las comunicaciones radioeléctricas van a proporcionar la forma mayoritaria de acceso.

COMUNICACIONES MÓVILES Y SOCIEDAD

All thought draws life from contacts and exchanges

Fernand Braudel

Las comunicaciones móviles, entendidas como aquellas que liberan a sus usuarios de tener que estar en una posición fija y predeterminada para comunicarse, se han difundido más rápido que cualquier otra tecnología de comunicaciones en la historia. Nótese en este sentido cómo en una ventana de diez años, que abarca de 1992 a 2002, las comunicaciones móviles pasaron de ser una tecnología al alcance de unos pocos a superar en número a las líneas de telefonía fija. Asimismo, a finales de 2007 la mitad de la humanidad disponía ya de un teléfono móvil, y se espera que para finales de 2010 se alcancen unos 5.000 millones de terminales según datos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Este hecho, sin precedentes en la historia de la tecnología, ciertamente no ha pasado desapercibido en nuestras vidas diarias, afectando nuestras pautas de relación social de modo decidido, sin que sepamos todavía muy bien cuáles serán las consecuencias últimas de esta transformación de nuestras conductas y comportamientos.

Visto con cierta retrospectiva, las comunicaciones móviles presentan ciertas similitudes con la invención del automóvil, con relación a la autonomía física de las personas, su movilidad, y su difusión a gran escala. De hecho, sería actualmente impensable ni siquiera imaginar una organización social sin el automóvil. Las comunicaciones móviles también permiten una autonomía de los individuos, pero esta vez a nivel del transporte de la información, por lo que su potencial impacto social trasciende seguramente a cualquier ejercicio de imaginación prospectiva. Este hecho adquiere todavía más relevancia cuando pensamos en términos de conectividad, que ya no tiene por qué estar restringida solamente entre personas, sino que puede establecerse entre personas y máquinas, o simplemente entre objetos, tal como las nuevas tendencias en comunicaciones ya dejan entre-

ver. Llega entonces el momento en que, como ha sucedido tantas veces con la tecnología, la gente y las organizaciones acaban por usarla para propósitos muy diferentes a los inicialmente concebidos. Este aspecto se acentúa, si cabe, con tecnologías de tipo interactivo, como la de comunicaciones, al multiplicarse de modo exponencial las posibles conexiones que, a modo de sistema circulatorio de la sociedad, pueden penetrar hasta los rincones más recónditos con objeto de intercambiar conocimiento. La constatación de que es precisamente entre la juventud donde más está calando el uso de las comunicaciones móviles augura una rica trayectoria a las mismas si bien por algunos caminos todavía un tanto inciertos.

Podríamos afirmar, sin faltar a la verdad, que no sólo hemos hecho de los terminales móviles parte de nuestras conductas cotidianas, sino que interactuamos con ellos, cual nuevo apéndice de nuestro propio organismo. Expresiones, ya familiares, tales como “me he quedado sin batería” o “no tengo cobertura”, corroborarían esta sensación. Con seguridad, y haciendo un pequeño ejercicio de prospección, dentro de pocos años ya será muy difícil imaginar un mundo sin comunicaciones móviles, de manera quizás análoga a lo que sería en la actualidad imaginar un mundo sin un transporte rápido y eficaz (automóviles, trenes, aviones, etc.). No es pues de extrañar que donde haya presencia de actividad humana vamos a encontrar formando parte de ella alguna manifestación de comunicaciones móviles. Trabajo, entretenimiento, viajes, relaciones sociales de todo tipo, acceso a información, transacciones comerciales, etc., por citar sólo algunos ejemplos, son actividades en donde ya incorporamos tales comunicaciones de modo casi rutinario. A medida que los terminales móviles vayan incorporando más elementos de inteligencia, les dotemos de capacidades sensoriales y se conviertan en el punto de acceso dominante de Internet, iremos descubriendo nuevas pautas de comportamiento en nuestra interacción con el mundo exterior. De hecho, las comunicaciones móviles, también denominadas personales en la medida que se llevaban a cabo mediante teléfonos móviles personales, han pasado a denominarse de facto comunicaciones inalámbricas o “wireless” a partir de la irrupción de las redes WIFI para acceso a Internet. Ciertamente continuaremos adquiriendo terminales móviles con más prestaciones, en sustitución de los actuales, como hemos estado haciendo estos últimos años, pero también habrá terminales especializados, con distintos factores de forma y omnipresentes. En este sentido, serán objeto de especial atención áreas tales como la salud,

a través de la monitorización de parámetros biológicos y la actuación apropiada en su caso. El transporte de personas, mercancías e incluso energía, en sus diversas manifestaciones, o el medio ambiente, necesitado de una gran protección, serán también, entre otros, escenarios previsibles de enorme impacto social en los que las comunicaciones móviles cobrarán protagonismo más allá de las todavía dominantes comunicaciones personales actuales.

HITOS EN LA HISTORIA DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES

Los orígenes de las comunicaciones móviles, que coinciden con los de la radio, se remontan a 1861 cuando Maxwell propuso una teoría matemática sobre electromagnetismo en el King's College de Londres. Una demostración práctica de la existencia de las ondas electromagnéticas fue llevada a cabo por Hertz en 1887 en la Universidad de Karlsruhe en Alemania. A principios del siglo XX Marconi, a partir de la primera patente de radio, de la que él era autor, inicia comercialmente su explotación. A modo de precisión cabe decir que en la década de los sesenta el Tribunal Supremo de los Estados Unidos dictaminó que la patente relativa a la radio era legítimamente propiedad de Tesla, sin embargo esto no tuvo mayor trascendencia y en todo caso fue Marconi quien desarrolló una Ingeniería radio apta para ser explotada comercialmente.

Los usos civiles de la Ingeniería radio en Comunicaciones Móviles empiezan con la instalación del primer sistema para la comunicación entre vehículos en la banda de 2 MHz realizada a cabo por la policía de Detroit en 1921. Su uso sin embargo fue limitado por la falta de canales, dada la baja frecuencia utilizada, y por las limitadas prestaciones de los sistemas existentes. No fue hasta 1933, cuando Amstrong inventó la Modulación de Frecuencia (FM), que se hizo posible una comunicación de calidad y con una Ingeniería radio eficiente resolviendo por una parte los problemas derivados de la presencia de ruido e interferencias y permitiendo, al mismo tiempo, la construcción de equipos de radio de tamaño mucho más reducido que los existentes. Después de la Segunda Guerra Mundial, en que las comunicaciones móviles se perfeccionaron hasta alcanzar un gran nivel, pronto apareció el primer sistema comercial, desarrollado por ATT en EEUU en 1946, que permitió su conexión a la red fija de telefonía pú-

blica conmutada. Sin embargo, la extensión de estas comunicaciones a un elevado número de usuarios requería, por su naturaleza bidireccional, una cantidad de espectro radioeléctrico no disponible, lo que impidió, en último extremo, que las comunicaciones móviles llegaran al gran público.

Las comunicaciones móviles celulares, en tanto que un nuevo concepto, fueron inicialmente concebidas en los laboratorios Bell (EEUU) por W. Rae Young y Douglas H. Ring en 1947. La idea se basaba en un sistemático e inteligente reuso del espectro disponible asignado al servicio a través de miles de celdas, con áreas de cobertura reducidas, desplegadas por todo el territorio. Cada celda estaría cubierta por una estación de base equipada con las antenas y los equipos de radio pertinentes para la correcta transmisión y recepción de señales hacia y desde los usuarios móviles respectivamente. Este concepto se hizo realidad por primera vez con el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone System) propuesto por AT&T en la década de los setenta del siglo XX. El sistema AMPS fue el comienzo de la denominada primera generación de comunicaciones móviles (1G), caracterizada por sus principios de funcionamiento analógicos impuestos por la modulación de frecuencia (FM) y la técnica de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). En 1973 Martin Cooper introdujo lo que podríamos denominar el primer radioteléfono portátil. En 1981 el fabricante Ericsson lanza el sistema NMT 450 (Nordic Mobile Telephony 450 MHz), que era el primer sistema del mundo de telefonía móvil tal como se entiende en la actualidad y de la que arranca una supremacía europea en este sector que ha llegado hasta nuestros días.

Sin embargo, limitaciones derivadas básicamente de la tecnología analógica usada propiciaron en la década de los ochenta el lanzamiento del sistema GSM (Global System for Mobile Communication) y con él la segunda generación de comunicaciones móviles (2G). Una comunión de intereses propiciada por la Comunidad Europea entre fabricantes, operadores, todavía monopolios en la época, y reguladores, hicieron posible la aparición de este sistema sustentado en cuatro pilares: tecnología digital, transmisión de datos (9,6 kb/s), "roaming" internacional y seguridad tanto en las comunicaciones como en la autenticación de usuarios. Factores políticos derivados de la liberalización del sector dieron el impulso definitivo a un sistema que es quien inicia de facto el despliegue verdaderamente espectacular de las Comunicaciones Móviles a principios de la década de

los noventa y en el que todavía continuamos instalados. Internet era en aquel tiempo (años ochenta) todavía un concepto en elaboración en los centros de investigación, por lo que no se pudo incorporar inicialmente a GSM. Se hizo más tarde una extensión del sistema GSM que dio lugar al sistema GPRS (General Packet Radio System) pudiendo así conectar con la red Internet global. Esta evolución GSM/GPRS se conoce como la generación 2.5 (2.5 G), si bien mantenía todavía las velocidades de transmisión reducidas impuestas por la tecnología nativa GSM. GPRS representó sólo un pequeño salto adelante en la evolución de los sistemas 2G. GSM/GPRS es, no obstante, un sistema todavía en activo con años por delante y un estándar de facto a nivel mundial.

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) es el sistema más importante de la denominada tercera generación de comunicaciones móviles (3G). UMTS es un nuevo sistema que pretendía resolver los problemas planteados por GSM en términos de tecnología, servicios y capacidad. Su génesis viene impulsada por la Comunidad Europea desde el 2º Programa Marco a principios de los noventa con la ambición de mantener el liderazgo europeo al que GSM había encumbrado. Incorpora conceptos nativos de Internet y que no fueron posibles con GSM, una mejor capacidad en términos de despliegue y en particular permite dar un salto cualitativo en la velocidad de transmisión alcanzada. La nueva tecnología, basada en WCDMA (Wideband Code division Multiple Access) es otro aspecto clave de cara a introducir la inherente flexibilidad requerida para incorporar tecnologías multimedia, por ejemplo, para cambiar fácilmente la velocidad de transmisión proporcionada al servicio en un cierto momento. Con ello se inicia un primer eslabón en la gestión eficiente de los recursos radio al permitir a diferentes usuarios compartir un espectro, asignando a cada uno, y de manera transparente, la velocidad justa necesaria para mantener un determinada Calidad de Servicio (QoS). Durante la evolución de la 2G a la 3G de los sistemas de comunicaciones móviles celulares, un número apreciable de otros sistemas inalámbricos se han ido desarrollando, destacando en particular por su difusión el sistema Bluetooth y los sistemas WLAN (Wireless Local Area Network) o WiFi. Todos estos sistemas, incluido el WCDMA, fueron diseñados de manera independiente por distintos organismos de estandarización, como el 3GPP (3rd Generation Partnership Project) para WCDMA, el IEEE para WiFi, y el Bluetooth, apuntando a diferentes segmentos de negocio y pro-

porcionando diferentes tipos de servicio, velocidades de transmisión, etc., no habiendo un único sistema óptimo para operar en todos los posibles escenarios imaginables. La rápida evolución de la tecnología hace que los sistemas mencionados no sean estáticos y entre generación y generación aparezcan saltos evolutivos significativos como es el caso paradigmático en UMTS del HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) denominada generación 3.5, (3.5G) que permite alcanzar velocidades de transmisión de hasta unos 14 Mb/s e incluso superiores, es decir, al menos un orden de magnitud superior a la inicialmente prevista en WCDMA. Similares saltos evolutivos se han dado con los sistemas de comunicaciones móviles no celulares estandarizados por el IEEE.

Actualmente y siguiendo una corriente evolutiva similar a las generaciones anteriores, la "International Telecommunications Union Radio" (ITU-R) está impulsando el "Advanced IMT 2000 systems" o cuarta Generación de Comunicaciones Móviles (4G). Los sistemas 4G serán redes completamente basadas en el protocolo Internet, y está previsto su despliegue inicial para 2015. Entre los aspectos relevantes de estos sistemas, merece la pena destacar sus velocidades de transmisión de pico desde 100 Mb/s a 1 Gb/s con retardos extremo a extremo en la entrega de los paquetes de datos inferior a 10 ms, siendo el sistema OFDMA ("Ortogonal Frequency-Division Multiple Access") la técnica de acceso múltiple seleccionada. Este hecho hace que haya un salto tecnológico relevante con relación a los sistemas de 3G con el que es totalmente incompatible con relación a la red de acceso radio.

La Figura 1 muestra un diagrama de los sistemas más importantes que han ido poblando las distintas generaciones, y en particular los ya men-

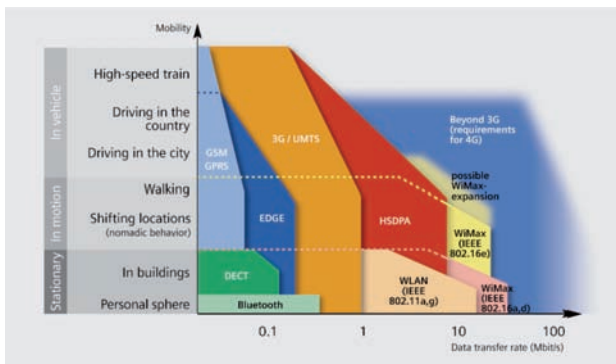


Figura 1. Movilidad versus velocidad de transmisión en los sistemas inalámbricos.

cionados. Básicamente es remarcable constatar el compromiso asociado al binomio movilidad (asociado a la cobertura)-velocidad de transmisión. En este terreno, las leyes de la naturaleza se imponen en el sentido de que no es posible aumentar cobertura y velocidad de transmisión al mismo tiempo, sino que por lo contrario el aumento de una siempre es a costa de la disminución de la otra.

TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES: ALGUNAS RESEÑAS HISTÓRICAS

Como notó Adam Smith en *La Riqueza de las Naciones*, los dos factores más importantes que han propiciado el avance económico a lo largo de la historia han sido el disponer de un transporte de mercancías y de un transporte de información baratos. Ambos propician el encuentro de compradores con vendedores. En un principio, estos bajos costes se conseguían con asentamientos propicios cercanos al lado del agua, en mares o ríos. Bienes e información, a menudo, viajaban mejor por el agua que por tierra. Ya más tarde, la aparición de las ciudades fue un salto cualitativo en esta dirección de progreso. Sin embargo, tenemos que llegar a la primera revolución industrial para poder hablar propiamente de un transporte a bajo coste con la aparición de la máquina a vapor: La segunda revolución industrial consolidó esta tendencia con la explotación de la energía eléctrica, y en particular con la explotación de las redes telegráficas al principio y las Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones (TIC) más adelante. Una característica remarcable de las TIC es que no sólo permiten un intercambio de información barato, con la eliminación definitiva de las barreras espaciales, y en cierto modo temporales, sino que su penetración en todos los sectores productivos las ha convertido en el componente de progreso por antonomasia de nuestros tiempos.

Yendo un poco más lejos de lo que la aproximación economista anterior sugiere, y de la evolución cultural consecuente que todo progreso acarrea, tendríamos que buscar en la interacción de suma no-cero entre las personas¹, en la que sólo hay ganadores, el verdadero motor que ha impulsado a la humanidad al estado final de progreso económico y social actuales. Es decir, como resultado del infinito número de interacciones habidas a lo largo de la historia, de modo que la suma de las ganancias ob-

tenidas o percibidas resultado de cada una de ellas es superior a la que teníamos antes del inicio de las mismas, nace un vector neto de progreso que nos ha conducido a la sociedad actual. En una pura interacción de suma cero, unos ganan y otros pierden, sea por ejemplo en los términos dramáticos de una batalla en una guerra o bien en términos más cotidianos de la adjudicación de un contrato. No hay ninguna razón para que se establezca una comunicación entre las partes antes del desenlace en estos supuestos. No hay progreso en este tipo de relación. No hay necesidad de comunicar ninguna información. La comunicación es, de por sí, un habilitador de progreso mas allá a la propia predisposición gregaria de los humanos a la asociación o a la manifestación de los sentimientos y pensamientos. La información que esta comunicación transporta, por otra parte, ha pasado a ser con el tiempo un bien en si mismo. Las primeras manifestaciones relevantes de las Tecnologías de la Información, que aparecieron con la escritura cuneiforme en la antigua Mesopotamia unos dos mil años antes de Cristo, y posteriormente con el dinero acuñado en forma de monedas en el siglo VI a.C. en Asia Menor, y en tanto que herramientas depositarias de información muy relevante y perdurable, han ido ampliándose a lo largo de la historia. Después de un largo camino, merece la pena notar cómo finalmente, en la sociedad moderna, el concepto de información adquiere también especial relevancia como saber, con valor propio, con un valor de mercado y cuya transacción es un elemento de progreso, de suma no cero en definitiva, y que está en los cimientos de lo que se ha acuñado como sociedad del conocimiento.

Facilitar la transmisión de la información, como elemento conducente de todo progreso conlleva sin embargo siempre la superación de dos barreras: la del aislamiento y la de la confianza. "El dilema del prisionero" es un clásico de la teoría de juegos que nos puede ilustrar en este sentido. La policía arresta a dos sospechosos. No hay pruebas suficientes para condenarlos y, tras haberlos separado, los visita a cada uno y les ofrece el mismo trato. Si uno confiesa y su cómplice no, el cómplice será condenado a la pena total, diez años, y el primero será liberado. Si uno calla y el cómplice confiesa, el primero recibirá esa pena y será el cómplice quien salga libre. Si ambos confiesan, ambos serán condenados a seis años. Si ambos lo niegan, todo lo que podrán hacer las autoridades será encerrarlos durante seis meses por un cargo menor. Si los prisioneros son capaces de superar la primera barrera de la incomunicación, eminentemente a base de tecnología, todavía les queda

la segunda, la de la confianza, eminentemente social o política, para lograr lo que más les convenga. Es decir, no hay comunicación fructífera sin confianza en lo comunicado. Las primeras noticias de las que se tiene constancia de una acción en el sentido de generar confianza hay que buscarla en la antigua Mesopotamia con la aparición de la escritura, la primera tecnología de la información como tal, que permitió la plasmación en un soporte sólido y preciso los códigos legales de Eshmuna, un siglo antes que los famosos de Hammurabi (1760 a.C.). En tal escenario no hay duda que la sistematización de los códigos de justicia con la certeza que los que cometían delitos (exponentes de las interacciones de suma cero) serían condenados por ello, incrementó las interacciones fructíferas de suma no cero antes mencionadas, poniendo a la humanidad en la senda del progreso.

La constante superación de la incomunicación física y social ha tenido múltiples manifestaciones a lo largo de la historia. En este sentido, las comunicaciones móviles nos ofrecen en la actualidad una última manifestación de la superación de las barreras primarias de aislamiento y confianza en países del tercer mundo, fomentando de este modo el progreso en estas regiones². Las comunicaciones móviles rompen aislamientos y posibilitan primero una comunicación barata, haciendo válida la premisa de Adam Smith: un transporte de información barato es uno de los pilares en los que se sustenta la riqueza de las naciones y su progreso. Por otra parte, los terminales móviles hacen las veces de escritura, al modo de los primeros cuneiformes mesopotámicos, creando los vínculos básicos de confianza y seguridad jurídica, en que sustentan todo progreso. Es un hecho constatado, en países en vías de desarrollo, que las comunicaciones móviles, al permitir denunciar actos de corrupción local sin miedo, en muchos casos pudiendo acceder y depositarse en registros de voz seguros, ponen así un freno a poderes locales arbitrarios y dictatoriales de diverso tipo. No es menos importante mencionar también cómo los terminales móviles, seguros, hacen las veces de dinero en sociedades donde la liquidez y el acceso a una simple oficina bancaria, a la que estamos habituados en sociedades avanzadas, no es posible. Una consecuencia práctica y cuantificable del impacto de todo lo anterior es la constatación de un crecimiento del 0,8 % del PIB por cada 10 móviles extra por cien personas. O bien, a un 10% de incremento en la penetración de las comunicaciones móviles corresponde un 1,2% de aumento anual del PIB³. De manera más concisa, sirva como ilustración que los ingresos en un hogar de Kenya han crecido

entre un 5-30% simplemente con la incorporación de M-PESA que utiliza el móvil a modo de cajero automático en nuestras sociedades avanzadas.

A lo largo de la historia de las Telecomunicaciones, la tecnología la de las comunicaciones móviles ha sido la que ha permitido cambios rotundos en la manera de vivir a más gente y en más poco tiempo. Desde la invención del telégrafo en 1791, las comunicaciones móviles han sido sin duda las que han hecho más por la democratización de las telecomunicaciones, estando llamadas a continuar siendo un elemento clave de progreso. En efecto, no parece difícil proyectar la evolución de las comunicaciones móviles, desde las comunicaciones personales a las comunicaciones omnipresentes, donde el terminal móvil, con distintas y variadas formas, estará presente en prácticamente todas nuestras actuaciones cotidianas y pasarán a ser el vehículo de acceso mayoritario a Internet. En este sentido, recientes estudios, han evaluado en un incremento del 0,6% anual en el PIB hasta el año 2020 si se pudiera disponer de la banda UHF (790-862 MHz), surgida tras la desaparición de la TV analógica, para la explotación de servicios de comunicaciones móviles 4G⁴. Actualmente el valor económico de los servicios derivados del uso del espectro radioeléctrico se estima ya en un 2,5% del PIB agregado de la EU.

ALGUNAS CONSIDERACIONES Y TENDENCIAS DEL MERCADO

La computación es una parte cada vez más importante de las comunicaciones móviles. La digitalización nos ha enseñado que todo lo que puede hacerse de modo numérico es conveniente hacerlo. La industria microelectrónica, con la ley de Moore todavía vigente, hace posible el tratamiento de las señales digitalizadas hasta límites de computación y complejidad todavía por dilucidar. Los terminales móviles más avanzados son prueba de ello. Las firmas informáticas crean el *Software* (SW) para las plataformas *Hardware* (HW) producidas por los fabricantes de microchips. Esta dualidad industrial, si bien no rompe la estructura productiva del sector de terminales móviles, hace que las barreras de entrada tecnológicas sean cada vez más bajas. De ello somos testigos en la actualidad con el consiguiente desplazamiento del mercado desde los principales fabricantes de principios de los noventa, por cierto, europeos gracias al liderazgo obtenido con el GSM, a un cada vez mayor número de fabricantes de HW

asiáticos con tecnología de SW americana. El desplazamiento de valor desde la infraestructura, con arquitecturas planas, no hace más que profundizar esta tendencia. Nuevos modelos de negocio, en los que el vendedor del terminal participe del hasta ahora ámbito controlado por los operadores, ya se han iniciado con el terminal de Apple "iPhone". Esta cesión de soberanía por parte de los operadores abre nuevas fronteras de las que también quiere participar el gigante del *software* Google con su terminal "Nexus One", introduciendo un modelo de publicidad en los terminales móviles. Ambas firmas poseen el atractivo que les da su marca comercial. Nuevos productos, como los libros electrónicos, con conexión móvil que acechan con revolucionar el negocio del libro tal como lo conocemos, no serían ajenos tampoco a este nuevo mercado con muchos más agentes que el tradicional, aunque muy poderoso, del operador. Los operadores, por otra parte, tendrán que aumentar sus infraestructuras a corto plazo para poder vehicular el enorme flujo de tráfico de música e imágenes que el Internet móvil acarrea. Éstos tienen aquí una base de negociación en la que poder actualizar su nuevo papel, y a la que en todo caso parecen estar abocados los principales actores del mercado de comunicaciones móviles.

En la línea anterior, no es ajeno el hecho que los terminales móviles tal como los hemos conocido hasta hace poco, en que la voz era el servicio dominante, están evolucionando hacia verdaderas plataformas depositarias de servicios multimedia. En cierto modo estamos presenciando un proceso parecido a lo que acaeció con la aparición del PC con la resultante de todos conocidos que alumbró la aparición del sistema operativo dominante de Microsoft y las consecuencias subsiguientes en términos de dominancia de mercado por pocos actores. Actualmente estamos de lleno inmersos en este proceso, con las corporaciones líderes en el mundo del *software* postulándose para conquistar este nuevo mercado de terminales móviles denominados *inteligentes*. Es sabido que la industria de ordenadores, desde hace dos décadas está desplazando el centro de gravedad desde el HW al SW y básicamente sólo IBM ha sobrevivido con este nuevo paradigma. No sería de extrañar por lo tanto el trasladar a la industria de móviles, actualmente todavía con Nokia a la cabeza, similares desplazamientos hacia el mundo del SW tal como ya vislumbran las recientes apariciones del "iPhone" de Apple y "Next one" de Google, con terminales móviles cada vez más alejados de aquellos terminales iniciales,

que fueron una mera extensión del teléfono convencional con su oferta del servicio de voz. Este nuevo paradigma emergente en el mercado de terminales representa ciertamente un desafío a las firmas líderes de la industria europea, tanto en el mercado de terminales como de infraestructura.

Finalmente, dentro de esta línea evolutiva anteriormente apuntada, sería lícito argumentar, al menos en el plano teórico, que una vez digitalizadas las señales de radio, por cierto cada vez en puntos más cercanos a la antena, estos trenes numéricos de unos y ceros se pudieran transportar por fibra óptica, a costes muy asequibles, a un centro de granjas de servidores o “cloud computing”, que podrían pasar a ocupar en parte, o incluso en su totalidad, el núcleo actual de la red de telecomunicaciones. En este hipotético escenario, los costes de capital (CAPEX) de las redes se sustituirían por costes operativos (OPEX) inferiores, que se podrían, por otra parte, ajustar a los picos de demanda sin mantener capacidad de red ociosa. Si bien las reservas en esta dirección son todavía muchas, principalmente por la percepción de una falta de seguridad total que puedan tener los actores implicados en el control sobre sus activos, aparte de la aparición de una problemática derivada de los derechos de uso de espectro, en lo que me extenderé más adelante, es cierto que tal paradigma, llevado al extremo, convertiría la red de acceso de los operadores, que es donde está el grueso de sus inversiones, en una *commodity*⁵. Sin llegar en cualquier caso a cambios radicales de paradigma, parece en todo caso plausible que la aparición del *cloud computing* va a dar un impulso al aparente continuado desplazamiento del sector de la industria de telecomunicaciones hacia el sector de la industria del software. Los operadores de telecomunicaciones, si como es natural pretenden ser algo más que transportistas de señales, no serían inmunes a este cambio de paradigma en el mundo del SW, en el que en todo caso ya están inmersos. Ciertamente los terminales móviles de última generación (*smartphones*) actuales permiten ya tener registros de ciertas aplicaciones de usuarios en tales granjas de servidores, que resultan transparentes a los operadores, lo que parece ya evidenciar a cierta escala el desplazamiento aludido.

EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

La naturaleza tiene perfecciones para demostrar que es imagen de Dios e imperfecciones para probar que es sólo una imagen.

Blaise Pascal

Espectro radioeléctrico es un término utilizado para describir una banda de frecuencias electromagnéticas que se extiende aproximadamente de 10 kHz a 300 GHz, tal como indica la Tabla 1, con las abreviaturas para las bandas correspondientes.

Cada banda está a su vez subdividida en diferentes partes que son usadas para diferentes aplicaciones. El espectro radioeléctrico se considera en todos los países un bien de dominio público, cuya titularidad, gestión, planificación, administración y control corresponde al Estado. Una licencia espectral es una concesión administrativa que otorga a su propietario el derecho a acceder o transmitir en la parte de espectro o banda asignada

TABLA 1. Bandas de frecuencia espectrales

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias Inferior a 3 Hz	Longitud de onda > 100.000 km
Extra baja frecuencia	ELF	1	3-30 Hz	100.000 km – 10.000 km
Súper baja frecuencia	SLF	2	30-300 Hz	10.000 km – 1.000 km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300–3.000 Hz	1.000 km – 100 km
Muy baja frecuencia	VLF	4	3–30 kHz	100 km – 10 km
Baja frecuencia	LF	5	30–300 kHz	10 km – 1 km
Media frecuencia	MF	6	300–3.000 kHz	1 km – 100 m
Alta frecuencia	HF	7	3–30 MHz	100 m – 10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30–300 MHz	10 m – 1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300–3.000 MHz	1 m – 100 mm
Super alta frecuencia	SHF	10	3-30 GHz	100 mm – 10 mm
Extra alta frecuencia	EHF	11	30-300 GHz	10 mm – 1 mm

y para una determinada área, en las condiciones preestablecidas en la concesión. Es un hecho típico que cuando dos o más usuarios transmiten en la misma frecuencia y suficientemente cerca unos de otros, se causan interferencias en los extremos de recepción correspondientes. Dependiendo de la frecuencia, entorno y potencias transmitidas, esta proximidad puede variar desde varios metros a cientos de kilómetros de separación. El espectro radioeléctrico, del que se valen todas las comunicaciones que usan la radio como medio de transporte, y en particular las comunicaciones móviles, es un recurso escaso, inalterable, que no se agota, como es el caso de las materias primas utilizadas en la fabricación de bienes y equipos, aunque tampoco es posible ampliarlo en cantidad.

El uso masivo del espectro que podría esperarse por un uso multitudinario del mismo había estado recluido a la radiodifusión sonora inicialmente y a la radiodifusión de televisión a partir de los años cincuenta del siglo pasado. Ambas aplicaciones, siendo unidireccionales, permiten el reúso de la misma banda de frecuencia para todos los usuarios, pasivos, de una determinada emisión difundida. Es decir, multitud de usuarios usan la misma banda, no requiriendo por lo tanto un número de bandas mayor que el ofertado. Por otra parte, el resto de aplicaciones que no ha implicado un número de usuarios masivo, tal como aquellas de índole privada, gubernamental, redes de telecomunicaciones entre nodos de los operadores, enlaces corporativos, etc., se han podido acomodar con más o menos dificultad a través de asignaciones administrativas. En todos los casos, las bandas de frecuencia se han asignado históricamente en modo a facilitar la ausencia de interferencias entre sus distintos usuarios y con independencia del uso que se pudiera hacer del espectro. En la práctica, tal procedimiento se ha traducido en un esquema que ha funcionado satisfactoriamente a lo largo de los últimos cien años, si bien a costa de ocupaciones espaciales y temporales del espectro muy inferiores a las máximas obtenibles.

Las comunicaciones móviles, con índices de penetración en muchos países ya superiores al 100%, requieren de unos elevados recursos espectrales, al ser los usuarios no sólo receptores pasivos de las comunicaciones, como ocurre en radiodifusión, sino emisores activos y diferenciados de las mismas. La ingeniería celular plantea una solución consistente en la implantación de muchas estaciones de base, con una cobertura reducida

que abarca una célula, de modo que una determinada banda de frecuencias, se pueda reutilizar muchas veces en la distintas estaciones de base a las que los móviles se conectan. Esta estrategia debe asumir el coste asociado de incremento de la infraestructura consiguiente, en lo que constituye la red de acceso de la red y que contabiliza la mayor parte del coste de la misma, y apenas puede satisfacer los requisitos para las nuevas aplicaciones emergentes que van más allá de la voz. Las todavía recientes asignaciones de frecuencia para el UMTS o tercera generación de móviles, ilustra de manera concluyente, quizás por primera vez, el valor económico del recurso escaso que es el espectro. Ciertos operadores tuvieron que afrontar enormes costos, equiparables al propio despliegue de la red, para adquirir las licencias correspondientes.

NOTAS DE INGENIERÍA RADIO

Veamos ahora las limitaciones que se ponen de manifiesto en los sistemas de comunicaciones móviles planificados conforme a una tecnología celular y las posibles soluciones, habitualmente de compromiso, existentes a partir de un simple ejercicio numérico. Desde la perspectiva de un usuario de un sistema de comunicaciones móviles, éste contrata el acceso a una serie de servicios, con capacidad de movilidad y sobre una cierta extensión geográfica, a los que asocia un cierto nivel de calidad a nivel cualitativo y/o cuantitativo. Desde la perspectiva del operador de la red, éste debe realizar un ejercicio de dimensionado de red con el fin de satisfacer la demanda agregada del conjunto de usuarios del sistema. A modo ilustrativo, considérese una densidad de usuarios U [usuarios/km²], cada uno de ellos generando en término medio un tráfico T [bits/s/usuario]. Para satisfacer esta demanda, considérese que el operador tiene asignado un ancho de banda B [Hz], que pretende explotar mediante una tecnología caracterizada por una cierta eficiencia espectral E [bits/s/Hz]. Considérese que una estación base tiene capacidad para cubrir una superficie S [km²]. Así, la capacidad desplegada por el operador es $B \times E / S$ [bits/s/km²]. El dimensionado adecuado corresponde al caso en que la capacidad desplegada por el operador permite cubrir la demanda de tráfico de los usuarios, esto es, cuando $B \times E / S = U \times T$.

A partir de la igualdad anterior, se desprende que el aumento de la demanda (sea por la incorporación de un mayor número de usuarios, con lo

que aumenta U , y/o por el aumento en el uso de las comunicaciones móviles por ejemplo con la incorporación de nuevos servicios, con lo que aumenta T) requiere de una respuesta por parte del operador para satisfacer dicha demanda. En estas circunstancias el equilibrio podría restablecerse:

1. Aumentando B , esto es, accediendo a una mayor cantidad de espectro radioeléctrico.
2. Aumentando E , esto es, utilizando una tecnología espectralmente más eficiente.
3. Reduciendo S , esto es, desplegando una mayor número de estaciones base para reducir la superficie cubierta por cada una de ellas.

La capacidad de las comunicaciones radioeléctricas se ha doblado cada 30 meses sobre los últimos 107 años de acuerdo con la observación realizada por Martin Cooper, uno de los padres de la telefonía celular, lo que se traslada en aproximadamente un incremento de un millón de veces desde 1957, cuando las comunicaciones móviles celulares se empezaron a desarrollar precisamente por Martin Cooper en los Bell Lab (EEUU). De este millón de veces, un aumento de capacidad de 25 proviene del acceso a más banda disponible, otro aumento de 25 proviene del paso de las comunicaciones analógicas a las digitales y de la mejor eficiencia espectral conseguida en bits/s/Hz. Finalmente, la opción que ha resultado más factible ha sido reducir la superficie S de una célula. Con esta estrategia la capacidad de la red de acceso móvil se ha incrementado en unas 1.600 veces. No obstante, razones de coste de infraestructura y de movilidad de los usuarios terminan por imponer un límite en el tamaño mínimo que puede tener una célula.

El aumento de la eficiencia E tiene en muchos casos impacto en la estandarización, cuyas latencias son del orden de magnitud de años. La evolución de la tecnología de transmisión, por otra parte, ha supuesto una mejora de sólo 25 veces en el valor de la eficiencia en el transcurso de tiempo en el que las comunicaciones móviles celulares han estado operativas. Si bien el desarrollo y despliegue de nuevas tecnologías, actualmente algunas en fase pre-operativa (MIMO, redes cooperativas, etc.), permiten albergar esperanzas de mejorar la eficiencia espectral ofrecida por las redes existentes (aumentar E), el incremento no será seguramente suficiente. De hecho, no hay previsiones en un horizonte de 10-20 años de ninguna tecnología de acceso que vaya a revolucionar las comunica-

ciones inalámbricas. La tecnología MIMO, ciertamente atractiva en entornos de largo alcance por la riqueza multicamino que comporta la propagación de las señales radiadas, sin embargo no puede competir a nivel de eficiencia espectral con el uso de coberturas o celdas de corto alcance. La naturaleza, por otra parte, impone límites en la capacidad de los enlaces radioeléctricos, tal como estableció Claude E. Shannon⁶, y tales valores están ya muy al alcance de la Ingeniería. En esta situación, cabría pensar que la red móvil ha llegado, o está próxima, a su límite de capacidad por lo que respecta a aumentar la eficiencia E , y los incrementos de demanda podrían satisfacerse a través de cambios regulatorios que permitieran la asignación de mayor cantidad de espectro (aumentar B) o con nuevos despliegues que exploten hasta donde sea posible la disminución de la superficie por célula S . El despliegue de celdas de radio de cobertura reducido, que pueden multiplicar en órdenes de magnitud la eficiencia espectral, se vislumbra en consecuencia como la solución más factible, en la medida que no implica cambios regulatorios basados en un aumento de banda (B) asignada, aunque su coste no es menor.

En el contexto de una red GSM en la que el tráfico es básicamente voz, las células de reducido tamaño, denominadas microcélulas, con radios de cobertura de a lo sumo algunos centenares de metros, responden a la necesidad de satisfacer a una fuerte concentración de usuarios. Es decir, la superficie por célula $S=(B \times E)/(U \times T)$ [km^2] debe reducirse debido a que U es muy elevado. No obstante, con la llegada de HSDPA, la 4G y el uso masivo de acceso a Internet, se prevé un aumento muy significativo del volumen de tráfico de datos generado por usuario, habitualmente estático, con lo que aparece la necesidad de reducir todavía más S a causa del incremento de T . La respuesta a este desafío ha sido el despliegue de celdas con radios de cobertura de apenas algunas decenas de metros, denominadas femtocélulas, con estaciones de base de bajo coste desplegadas en los propios domicilios del usuario. En tal caso, la femtocélula proporcionaría un enlace vía radio al usuario desde cualquier ubicación en su entorno doméstico y la propia femtocélula proporcionaría conectividad con el mundo exterior a través de una conexión fija del tipo ADSL o de otra naturaleza. Nótese que, al estar la movilidad del usuario confinada en su entorno doméstico la mayor parte del tiempo de utilización del servicio, la problemática de los cambios en el punto de acceso de un terminal móvil debido a su movilidad, no aparece como elemento limita-

tivo, por lo que la S ciertamente puede resultar muy reducida. Así, diferentes estimaciones⁷ otorgan a las femtocélulas un papel destacado en el marco de los sistemas 3G avanzados y los sistemas 4G.

Como resultado de lo anterior, en un escenario real de comunicaciones móviles pueden estar desplegadas un número muy elevado de estaciones base de todo tipo, máxime si se incluye un despliegue intensivo de femtocélulas domésticas. Tal conglomerado de redes aliviaría sin duda el problema de la elevada capacidad de comunicaciones móviles requerida y puede ser el principio de una solución a corto-medio plazo, por los costes que acarrea, pero es sólo parte de la solución a largo plazo, y que seguramente se sustentará en dos grandes pilares: la actualización paulatina de un nuevo marco regulatorio que libere una mayor banda B para el servicio y la introducción de estrategias de gestión de los recursos radioeléctricos existentes que mejoren la eficiencia espectral y al mismo tiempo reduzcan el OPEX (Operational Expenditures) y CAPEX (Capital Expenditures).

GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

La gestión de recursos radio, en tanto que limitados a una banda asignada B , es consustancial a la teoría económica. De hecho, siguiendo la lógica propia de esta teoría, aparentemente, la situación económica debería empeorar con el agotamiento paulatino de los mismos. Afortunadamente existe otra fuerza que va en sentido contrario y que no es otra que la ciencia y la tecnología, y en su acepción más actual, la generación de conocimiento. Es decir, hay que continuar innovando y descubriendo cosas que produzcan más valor. En la medida que esta capacidad de descubrimiento es ilimitada, contrariamente a la limitada capacidad de recursos que la naturaleza brinda, ésta nos marca la salida natural de progreso.

Hoy día, más que en ninguna época pasada, tendemos, y no por casualidad, a una sociedad del conocimiento en la que los bienes producidos serán cada vez más el resultado del diseño de personas con un alto nivel de formación, y que conferirán la mayor parte del valor a los mismos. Los productos hechos con espectro radioeléctrico no escapan a esta tendencia e incluyen, en sentido amplio, la práctica totalidad de los nuevos

equipos de radio. Descendiendo a tipos de recursos más concretos y que son parte esencial de esta exposición, nos encontramos en efecto con el espectro radioeléctrico. Éste, ciertamente, es un recurso escaso que podemos explotar a modo de materia prima con la que nutrir, en particular, las comunicaciones móviles. El espectro radioeléctrico es hoy, más que nunca, un recurso cuya escasez le convierte en muy caro, todo y que no se reduzca su cantidad al explotarlo dada la naturaleza etérea del mismo. Al final, detrás de cualquier sistema de comunicaciones móviles, siempre encontraremos que su eficiencia en términos de utilización del espectro es uno de los objetivos clave que marcan su aceptación definitiva.

El espectro radioeléctrico, continuando con el símil anterior de materia prima insustituible para la sostenibilidad de las comunicaciones móviles, no se puede explotar en estado puro. La hostilidad que presenta un canal de comunicaciones móviles en términos de dependencia espacio-temporal y de desvanecimientos profundos de la señal recibida en el extremo receptor es la causa de ello. Tal como apuntaba el académico Miguel Ángel Lagunas en su discurso inaugural en la RAI, la diversidad es el arma más potente de que la Ingeniería dispone para vencer esta hostilidad y está presente en la práctica totalidad de los sistemas actuales, a través de las distintas estrategias de Ingeniería Radio, que sucesivamente se han ido introduciendo. El tratamiento de las señales radioeléctricas que tales estrategias permiten, hace posible el uso finalista y ya elaborado de este espectro en la forma de un sistema de comunicaciones, apto para satisfacer las expectativas de sus usuarios.

A medida que las redes de comunicaciones móviles han ido incrementando sus capacidades y grados de flexibilidad, ha ido aumentando en paralelo su complejidad operativa en relación con la gestión de recursos radio. Las funciones típicas a implementar para la gestión de los tales recursos en una red de comunicaciones móviles van más allá de la asignación del espectro correspondiente en los sistemas convencionales. Los propios recursos espectrales existentes, una vez asignados, deben gestionarse de manera eficiente. En este sentido debe entenderse la Gestión de Recursos Radio. Entre sus funciones típicas destacamos: Control de Admisión de nuevos usuarios con demandas específicas de tipos y calidad de servicio, en tanto que consumidores de unos recursos radio necesariamente limitados, Gestión de la Potencia emitida por los dis-

tintos transmisores radio involucrados, "Handover" (traspaso de usuarios entre estaciones de base o puntos de acceso contiguos al irse moviendo un usuario a lo largo de una trayectoria), Control de Congestión necesario para gestionar las demandas de tráfico excesivas de usuarios ya admitidos, "Scheduling" utilizado para gestionar el momento preciso que a un usuario admitido en el sistema se le concede el recurso más adecuado, etc.

En los sistemas 1G y 2G a un usuario se le asigna un recurso radio (canal) con idénticas propiedades de banda y potencia. Dado un número de canales disponible determinado por el punto de acceso a la infraestructura del operador, la gestión de recursos es simple y la mayor dificultad reside en la asignación de frecuencias a las diferentes estaciones de base o puntos de acceso de la red. Sin embargo, en los sistemas 3G y 4G la presencia de señales de voz y datos, con sus distintas manifestaciones y diferentes velocidades de transmisión posibles, además de una calidad de servicio (QoS), a garantizar entre varias posibles (por ejemplo, recepción de mensajes con retardos inferiores a un determinado valor o velocidad de transmisión media superior a una velocidad garantizada, por citar algún caso), hacen de la gestión de recursos una operación compleja.

La historia de las comunicaciones móviles nos enseña que cada generación presenta una flexibilidad operativa mayor que la anterior. Las estrategias de gestión de recursos radio utilizadas son, en consecuencia, cada vez más elaboradas. En particular esto ha sido así con la 3G (UMTS) en relación con la 2G (GSM) y lo será todavía más en la 4G denominada LTE con relación a generaciones anteriores. Los nuevos desafíos planteados en 4G son enormes debido a la extrema granularidad con la que se pueden asignar trozos de banda (entre la banda total asignada por el regulador a cada operador) e intervalos de tiempo (en múltiplos de la duración de una trama) a los usuarios que demandan establecer una comunicación, con independencia de otros grados de libertad a nivel de transmisión (modulación, potencia, codificación, etc.) que el sistema ofrece. Los futuros sistemas 4G, por otra parte, habilitan un uso dinámico de la banda asignada a un operador, que debe repartir apropiadamente entre los distintos puntos de acceso. En este sentido merece especial atención el potencial despliegue masivo de femtocélulas. Estas áreas de muy reducidas dimensiones no tendrán una banda asignada a priori sino que va a tener

que ser asignada dinámicamente, en función del tráfico existente, con el objetivo de conseguir una máxima eficiencia espectral garantizando al mismo tiempo una calidad satisfactoria a los usuarios.

Una nueva componente, clave en los actuales y futuros sistemas de comunicaciones móviles es la gestión de los recursos radio derivada de la propia existencia de redes heterogéneas operando según estándares distintos y probablemente con servicios distintos. De hecho es ya usual disponer de terminales móviles que pueden operar en distintos modos: GSM, UMTS, Bluetooth y WIFI. En este nuevo escenario, es conocido que una gestión conjunta de los recursos existentes conduce a una mejor utilización de los mismos, gracias a la ganancia troncal ("trunking gain") resultante de una gestión compartida frente a una segmentada. En concreto, el acceso conjunto garantiza menores probabilidades de bloqueo o de no concesión de los recursos solicitados. Un operador ha de poder ofrecer, en respuesta a la demanda de servicio, una solución que satisfaciendo las expectativas de QoS contratadas por el usuario vehicule la comunicación mediante la tecnología existente de modo más apropiado. Esta asignación por otra parte ha de ser dinámica atendiendo tanto a las coordenadas espacio-temporales del usuario como a la carga de tráfico existente en cada modo de operación. La gestión de los recursos con redes heterogéneas, debe afrontar mayores grados de complejidad que los correspondientes para redes homogéneas.

Siguiendo el mismo argumento anterior en el contexto de redes heterogéneas, una posible cooperación entre los operadores compartiendo parte de sus recursos entre varios, posibilitaría la aparición del efecto ganancia troncal antes mencionado, lo que conduciría sin duda a una mejor eficiencia espectral. La contrapartida a esta ganancia de cooperación reside en la introducción de una complejidad adicional de gestión a la ya existente en redes heterogéneas y en un marco de competencia entre operadores.

Si a todo lo anterior le sumamos la gestión de interferencias en puntos de acceso vecinos, inexistentes en 1G o 2G, el aumento sostenido del número de nodos de red propiciados por tecnologías como las microcélulas y femtocélulas, así como la propia incertidumbre que genera la movilidad de los usuarios a través de su área de cobertura, enseguida concluimos que estamos en presencia de un problema no menor. La tendencia anterior con-

duce a una brecha entre los ingresos y costes en que incurren los operadores difícil de sostener en un mercado ávido en servicios de banda ancha (vídeos, imágenes, etc.) y sin embargo con operadores restringidos a unas tarifas planas. Gestionar este tipo de redes presenta serios desafíos, hasta el punto de que su coste (OPEX) presenta ya un riesgo muy elevado de no ser abordable, de continuar aplicándose las técnicas intensivas en intervención humana (trabajo manual de operarios) en el manejo de las redes actuales. Es habitual, por otra parte, que los fabricantes de infraestructura se centren inicialmente en el propio funcionamiento y test de los equipos en escenarios más o menos controlados. La operativa real de los operadores para gestionar sus redes con millones de usuarios es algo que siempre aparece con posterioridad debido a que hasta que el número de usuarios no es importante, no aparece la necesidad real de la gestión optimizada, lo que agudiza el problema si cabe.

En resumen, la gestión de recursos radio debe caminar inevitablemente hacia nuevos paradigmas capaces de abordar la complejidad creciente del problema. Son demasiados los actores en juego para que se puedan seguir manteniendo las estrategias actuales, desprovistas en la mayoría de casos de mecanismos automáticos, y generadoras de un OPEX excesivo para los operadores, en parte generado por la divergencia entre el continuo aumento de velocidad en el acceso a Internet y las tarifas planas demandadas por el usuario. Los escenarios son también cada vez son más heterogéneos, con distintos sistemas radio de distintas generaciones, incluida la 4G ya de por sí muy sofisticada, cuyo acceso ha de poder hacerse de modo transparente, y donde previsiblemente confluirán usuarios y máquinas, operadores primarios y secundarios del espectro, distintos grados de cooperación entre usuarios y operadores, distintos grados de servicio y distintos modelos de negocio. Esta gestión todavía puede ser más complicada para aquellos sistemas en que no hay infraestructura en forma de puntos de acceso fijos (redes "ad-hoc") y que incluyen la decisión de la ruta entre los extremos finales por los que debe vehicularse la comunicación. Los sistemas de radio y redes cognitivas en conjunción con las estrategias cooperativas que esbozaremos a continuación son unos de los paradigmas que más aceptación están despertando en los últimos años y donde se depositan grandes esperanzas para ocupar el centro de mando de todas aquellas iniciativas encaminadas a una gestión eficiente de los recursos radio en términos de prestaciones y coste.

REGULACIÓN DEL ESPECTRO

La asignación de frecuencias, objeto de la Regulación del espectro, opera tanto a nivel nacional como internacional en la medida que la radiación electromagnética es ajena a las fronteras entre estados. De ahí se deriva el hecho de que haya organismos internacionales que habiéndose creado con la idea de regular las interferencias en zonas fronterizas han acabado siendo instituciones a nivel mundial o regional de cuya guía se nutren las agencias reguladoras nacionales. Éste es el caso de la "International Telecommunication Union" (ITU) que es una agencia especializada de las Naciones Unidas (asigna bandas a usuarios, e.g. satélites, móviles, etc., que opera a nivel mundial) o bien de la "Confederation of European Post and Telecommunication Agencies" (CEPT) que, proveyendo armonización de frecuencias a nivel europeo, es una copia a escala local de la ITU, y por lo tanto puede ser más específica, e.g. asignación no sólo a usuarios (e.g. móviles), sino a tecnologías (e.g. GSM).

El crecimiento de la demanda de espectro ha sido una constante a lo largo de la historia reciente, sin embargo, ha sido en los últimos años, coincidiendo con la explosión de las comunicaciones móviles, que ha adquirido tintes preocupantes. El modelo tradicional "command-and-control" o de Uso Exclusivo, en el que se han basado las agencias reguladoras desde sus orígenes, se discute cada vez más que sea una manera óptima de asignación de espectro. Este mecanismo de asignación espectral reside en una concesión territorial a gran escala a nivel de estados y continentes y por periodos temporales de decenas de años. Esta estrategia ciertamente ha sido capaz de controlar las interferencias, objetivo clave para el regulador; de una manera concluyente y con unos mecanismos de gestión de la misma fácilmente realizables. No es menos cierto, por otra parte, que tal asignación espectral se hace a partir de unos criterios maximalistas (diseño de peor caso) y a la existencia de una tecnología radio de control de interferencias ya superada. Las asignaciones a gran escala del modelo de Régimen en Uso Exclusivo del espectro son demasiado conservadoras para la realidad de nuestros días en los que la tecnología permite asignaciones a pequeña escala tanto en el dominio espacial como temporal. Tales asignaciones, de hacerse, eliminarían muchos de los huecos de ineficiencia que la falta de ocupación real del espectro inevitablemente conlleva y nos conduciría a una maximización de su valor. No es de extrañar

pues que seamos testigos actualmente, y desde distintos ámbitos (tecnológicos, sociales, empresariales, etc.), de una cada vez mayor presión hacia un cambio de paradigma en lo que ha venido siendo la ya casi centenaria regulación en el uso y explotación del espectro. Ya no es sólo el coste económico del espectro, que el continuado incremento de la demanda configura al alza, sino el hecho quizás tan o más importante de que la falta del mismo simplemente constituye una barrera al progreso.

Otro paradigma regulatorio existente es el conocido como modelo de uso común del espectro. En este caso se promueve el acceso compartido por parte de una serie de usuarios a una determinada banda del espectro radioeléctrico. La responsabilidad de la gestión de la interferencia en este caso recae directamente entre los propios usuarios. Dentro de este caso puede distinguirse el modelo de uso público (en el que el espectro está abierto a todos los usuarios con los mismos derechos, como sería el caso de la banda "Industrial, Scientific and Medical" (ISM) y el privado (en que es el adjudicatario de una licencia quien permite el acceso de un conjunto de usuarios al espectro licenciado, bajo una condiciones establecidas por el propio adjudicatario). Se arguye en este sentido el enorme beneficio social y avance de la actividad económica que ha representado, a modo de ejemplo, el uso de las WIFI para el acceso inalámbrico a Internet en ámbitos residenciales, comerciales, corporativos, etc. con sólo una reducida banda espectral asignada de modo no licenciado, a diferencia del uso exclusivo mencionado, y con limitadas carencias en relación al QoS ofertado. La ligera regulación establecida, centrada fundamentalmente en la limitación de la máxima potencia emitida por un equipo WIFI, conduce inevitablemente a un alcance o cobertura reducidos, y por consiguiente, al reuso intensivo de las mismas bandas de frecuencia en puntos no demasiado separados. Por otra parte, los huecos temporales de silencio radioeléctrico, que la mayor parte de emisiones conllevan, se utilizan de manera no coordinada por otros usuarios WIFI, en virtud de una tecnología de acceso basada en el previo sensado de la energía radiada en las bandas permitidas y su posterior uso, en caso de encontrarlas desocupadas.

Lamentablemente, los costes asociados al uso no regulado en el modelo de uso común del espectro afectan a todos. Si se prefiere, se pagan entre todos, pudiéndose llegar al extremo de que lo que es gratis no tiene valor. La anteriormente banda no licenciada no está tampoco exenta de

inconvenientes. Es evidente que el uso indiscriminado del espectro no licenciado, aun limitando la potencia máxima emitida por los equipos a los que aplica y en consecuencia su cobertura espacial y la posibilidad de que muchos usuarios coincidan en tales entornos confinados, no evita la conocida tragedia de los comunes⁸ o destrucción de recursos compartidos limitados, en entornos densos de zonas residenciales urbanas, centros de ocio, etc. por un exceso de interferencias, ya que los bienes comunes pueden ser utilizados por mucha gente al dictado de su propio beneficio. Hay ejemplos en este sentido que van desde las tierras de pasto comunales, que se inician en la época medieval y todavía persisten en ciertas zonas rurales, a los ejemplos más próximos antes mencionados con relación a las bandas no licenciadas usadas para el acceso inalámbrico a Internet con la tecnología WIFI (IEEE 802.11) y otros sistemas tales como Bluetooth, DECT, etc. Hay además otras razones en relación con estos sistemas o análogos. Así, sabemos que los esfuerzos encaminados a la mejoría en eficiencia espectral de cualquiera de los sistemas que usan tales bandas comunes ciertamente conduciría a una mejora de la capacidad ofertada, de la que se beneficiarían los otros sistemas que no han hecho nada por mejorar su eficiencia. Es fácil concluir, no obstante, que el supuesto anterior no se dará, debido a la falta de incentivos que supone para un sistema aislado mejorar su eficiencia espectral si no se beneficia de ello en exclusividad.

Además de los inconvenientes técnicos, en el sentido de optimización de la eficiencia espectral que plantean los usos regulatorios tanto de uso exclusivo como de uso común, también es necesario mencionar que la regulación actual asigna bandas a usos obedeciendo también a criterios no técnicos de asignación de recursos, que conviene reconsiderar en la medida que no se maximicen el valor ni la eficiencia del espectro asignado. Así, a modo de ejemplo, podemos testimoniar situaciones dispares, tales como la enorme dificultad de acceso al espectro para usuarios de TV móvil o, por otra parte, la asignación quizás de bandas excesivas para la explotación del radar en aviación; lo que ha propiciado a su vez un desarrollo de la tecnología subyacente menor que el de otras tecnologías radio por falta de incentivos para hacerlo.

El aumento del número de usuarios y aplicaciones de las comunicaciones móviles, en tanto que nuevo paradigma tecnológico que ha calado pro-

fundamente en la sociedad, y el consiguiente aumento del ancho de banda requerido para tales comunicaciones, ha puesto desde hace unos años en tela de juicio el marco regulatorio actual, ante la escasez de espectro ofertada. En realidad, sin embargo, recientes y sucesivas medidas de la ocupación del espectro radioeléctrico han demostrado que no es ésta la situación, ya que la mayor parte del espectro radioeléctrico no está en uso o está notablemente infrautilizada⁹. Hay que decir también, en honor a la verdad, que las medidas de ocupación espectral antes mencionadas, con valores tan bajos en algunos casos del 5%, no tienen presente aquellas radiaciones recibidas con valores extremadamente pequeños, tal como sucede con las procedentes de algunos satélites de comunicaciones. Este sería el caso del GPS o los sistemas que requieren antenas de más de 10 metros de diámetro para comunicaciones comerciales, por citar algunas en que los equipos de medida utilizados no tienen la suficiente sensibilidad para poder detectarlas. Otras situaciones que escaparían a estas medidas realizadas están en el dominio del radar, donde las mediciones en radar pulsados efectuados sólo capturan ciclos de trabajo del 0,1% pero por la propia naturaleza del radar el receptor debe estar libre de otras radiaciones el 100% del tiempo. No obstante tales contraejemplos, es un hecho que la ocupación espectral es muy poco eficiente, y aún lo es más en zonas confinadas en interiores de edificios. Estos hechos han sugerido que una mejora en la utilización del espectro es ya no sólo necesaria sino plausible con la tecnología hoy disponible. Los órganos reguladores, siempre cautelosos y conservadores ante el impacto que originan sus decisiones, se enfrentan ante el reto ineludible de dar respuestas a estas supuestas ineficiencias de uso espectral.

Con objeto de mejorar la asignación actualmente vigente, se ha estado discutiendo ya desde hace muchos años que deberían ser aplicados los mecanismos de mercado en la asignación de las bandas del espectro radioeléctrico¹⁰. La teoría económica sugiere que un mercado del espectro que funcione bien conduce a una división del espectro que maximiza su valor económico. En este escenario la tarea de un regulador sería establecer las reglas oportunas para que el mercado actúe, interviniendo cuando sea necesario, y asegurando el preceptivo control de las interferencias. La forma más simple y primaria de activar esta filosofía de mercado la constituyen las subastas. Es conocido el uso que se ha hecho de las mismas para la asignación de licencias en 3G. Sin embargo, con inde-

pendencia de otros condicionantes que pudiera haber, ésta es una estrategia que lo que acaba decidiendo es quien es el nuevo propietario, pero no resuelve el problema derivado de la escasez y uso poco eficiente del espectro. Es en esencia una manera rígida de asignación para un determinado periodo de concesión de la licencia, que no cambia esencialmente el paradigma regulatorio.

La mecánica regulatoria ha tomado sin embargo un nuevo impulso desde que en febrero de 2004, el "Radio Spectrum Policy Group" de la Comisión Europea realizara una consulta pública para sondear el nivel de interés por parte de los Estados Miembros en la creación de un mercado secundario de derechos de uso del espectro radioeléctrico como un medio o herramienta más flexible de gestión del mismo. La posibilidad de comercializar el espectro radioeléctrico y convertir los derechos de uso del mismo en un derecho negociable entre los operadores de telecomunicaciones ha generado un interesante debate a nivel nacional y europeo, por la relevancia social y económica de este recurso natural escaso. Fruto de esta fuerte corriente de opinión, va a confeccionarse un Reglamento para el mercado secundario del espectro radioeléctrico que, a nivel europeo, debería estar adoptado para el año 2010, con el propósito de incrementar la eficiencia de este recurso escaso. La CE opina que el modelo tradicional de concesión administrativa ha llegado a su límite y propone que la futura regulación del sector permita a los adjudicatarios utilizar sus frecuencias con casi total libertad. En particular, la liberalización del uso, contempla como elemento clave el *refarming*. La CEPT define *refarming* como "una combinación de medidas administrativas, financieras y técnicas, presentes y futuras, dentro de los límites de regulación de frecuencias, con el objeto de hacer una banda de frecuencia específica disponible a otro tipo de uso o tecnología. Estas medidas pueden ser a corto, medio o largo plazo". En la práctica el *refarming* implica la posibilidad de utilizar cualquier tecnología en una banda de espectro (neutralidad tecnológica) y de utilizar el espectro asignado para proporcionar cualquier servicio de comunicaciones electrónicas (neutralidad de servicio), para el que esté autorizado. El debate del *refarming* en la banda de GSM, con objeto de reutilizar tales bandas asignadas originariamente a GSM con UMTS, se está ya llevando a cabo en los diversos países de la Unión Europea, dadas las fuertes implicaciones asociadas en términos de competencia y desarrollo del sector.

El mercado secundario es otra consecuencia de este nuevo impulso regulatorio y permitirá a los operadores de los sistemas de comunicaciones móviles obtener en él frecuencias adicionales o incrementar el uso de las que ya tienen. Pueden ser cesiones a largo plazo, con lo que los problemas que se plantean son básicamente administrativos y legales o bien a corto plazo, con escalas temporales incluso inferiores a un día, lo que requiere además poner el acento en la disponibilidad de la tecnología asumible. Será el reglamento el que finalmente fije los términos, condiciones y alcance de las transmisiones de derechos de uso del dominio público radioeléctrico. Con esta nueva regulación se eliminan los dos elementos centralizados alrededor de los que orbita la regulación actual: qué hay que hacer (Atribución de bandas a servicios que se establece detalladamente en el CNAF) y quién lo puede hacer (Asignación: otorgamiento de los títulos que habilitan para usar el espectro). Además, con la reventa en un mercado secundario de unos derechos de uso, definitivamente se descentraliza el marco regulatorio existente.

La aparición del conocido dividendo digital a consecuencia de la liberación que supone de la banda liberada de 790-862 MHz asignadas a la difusión de TV analógica, tras el cambio de ésta a la difusión de TV digital vía TDT, representa también una oportunidad para la paulatina implantación de nuevos marcos regulatorios. La Comisión Europea, con el objeto de maximizar el potencial social y económico del dividendo digital, recomienda que los Estados miembros apoyen la labor reguladora tendente a establecer en la Comunidad unas condiciones de uso armonizadas de la banda liberada para servicios de comunicaciones electrónicas distintos y adicionales a los servicios de radiodifusión. En todo caso, la explotación del dividendo digital en Europa se materializará con un retraso significativo respecto a Estados Unidos, donde la transición a la TV digital ya está completada y la mayor parte del espectro liberado ya ha sido subastado, incluyendo los nuevos paradigmas regulatorios.

Notemos que, siendo un salto cualitativo relevante el que se puede derivar de la nueva Reglamentación en cuestión, su concepción es básicamente economicista, no tecnológica. Es cierto sin embargo que al poner los operadores bandas de frecuencia en un mercado secundario del espectro se abre una puerta de fuertes connotaciones tecnológicas. Un operador podría poner en alquiler una parte del espectro en un dominio temporal-es-

pacial (una franja horaria y una determinada área) de baja carga de tráfico que reportase más beneficios que los derivados del propio tráfico de sus clientes, que podría satisfacer en cualquier caso con menos banda. Este alquiler oportunista, al ser aprovechado por otro actor cuyas necesidades encajan en la ventana temporal-espacial mencionada, sin duda aumenta la eficiencia espectral de un bien escaso y su explotación en la creación de riqueza. Su gestión, por otra parte, en una escala espacial-temporal que puede llegar a ser de elevada granularidad conlleva nuevas prácticas tecnológicas de detección, implementación, automatización y comercialización de las bandas que pueden llegar a ser complejas y que solamente una Ingeniería de gestión de recursos compleja puede abordar.

Nótese también que la gestión del espectro implica aspectos relevantes que van más allá de la introducción de un mercado secundario y la flexibilización de uso del espectro ya licenciado. Se demanda a los responsables de los órganos reguladores la anticipación del impacto económico y social que se puede derivar de las políticas regulatorias emprendidas, buscando el equilibrio entre el interés público y el estrictamente privado, lo que necesariamente conlleva largas constantes de tiempo. Las instituciones reguladoras deben, por otra parte, promover los avances técnicos, la diversidad de oferta de servicios, la disponibilidad del servicio y un precio asequible para los consumidores asumiendo la escasez y limitación espectral existentes. Por todo ello, el proceso de cambio de paradigma en la regulación espectral será necesariamente lento, gradual y no exento de dificultades. Este cambio parece inevitable si queremos una gestión eficaz, no asentada en escenarios estáticos y con tecnologías de monitorización de interferencias actualmente superadas. Ineficiencias en el uso del espectro licenciado deberán ser cuidadosamente examinadas y reconducidas según nuevos procesos de monitorización habilitados con las tecnologías más modernas y apropiadas existentes. Aspectos derivados del uso social del espectro también van a tener que ser objeto de reflexión en un futuro más o menos lejano. Los servicios a partir de los que se asignan bandas de frecuencias deberán replantearse en algunos casos, según su impacto económico y social. A título de ejemplo, las comunicaciones que pueden acometerse con medios de soporte físico, tales como cables o fibras ópticas, cuyo *stock* de recursos es prácticamente ilimitado, podrían acabar desplazando en determinadas situaciones a las actualmente realizadas con el escaso y limitado soporte radio. Éste es el caso por ejemplo de la radiodifusión

radioeléctrica de TV en los núcleos urbanos más densamente poblados donde el despliegue de cables/fibras ópticas es ya rentable o en su caso no plantearía problemas irresolubles de falta de rentabilidad.

En definitiva, un nuevo marco regulatorio asoma en el horizonte y con él un nuevo mecanismo de asignación de recursos escasos. En este sentido, el mercado secundario del espectro está llamado a tener cada vez una mayor presencia, si bien contando con la oportuna supervisión pública del mismo.

ASIGNACION DINÁMICA DEL ESPECTRO

La asignación dinámica del espectro o DSA (Dynamical Spectrum Assignment), asociada a un nuevo paradigma regulatorio, está basada en una idea simple. Cuando una banda espectral no es usada, sea con relación a un determinado confinamiento geográfico o bien durante una determinada ventana temporal, cobra sentido el habilitar, en modo secundario, aquellas comunicaciones que puedan hacer uso de este espectro no usado, aumentando así la oferta de espectro, y en consecuencia, la eficiencia espectral de un recurso escaso. Naturalmente, cuando el poseedor de la licencia o usuario primario pase a ocupar su banda licenciada, el usuario secundario debe interrumpir el uso de la misma, que estaba ocupando, y migrar a otra disponible en aras de asegurar una continuidad en su servicio. Es decir, los usuarios secundarios del espectro ya no emiten siempre en la misma banda a la misma frecuencia, procedimiento habitual en las comunicaciones actuales, sino que se va cambiando de frecuencia buscando entre aquellas opciones disponibles. Cabe constatar que la tecnología actual, si bien todavía incipiente en términos de productos comerciales, ya permite afrontar este tipo de operación de modo que se propicien soluciones factibles, económicamente sostenibles y aceptadas por el regulador.

Por razones de diversa índole, las aplicaciones militares han sido las primeras en vislumbrar el potencial de la asignación dinámica del espectro. En un escenario militar, cuya operativa está inmersa en áreas no controladas radioeléctricamente, el concepto DSA constituye un soporte remarkable al uso no licenciado de comunicaciones tal como ha introducido el "Defense Advanced Research Projects Agency" (DARPA) en Estados Unidos¹¹. A corto plazo, al menos los reguladores más dinámicos están

procediendo al estudio de estas iniciativas tecnológicas como es el caso de la "Federal Communications Commission" (FCC) en Estados Unidos y OFCOM en el Reino Unido para su aplicación en el campo civil. La misma estrategia ha sido adoptada por organismos de estandarización tan importantes como la "International Telecommunication Union" (ITU), "Instituit of Electrical and Electronic Engineering" (IEEE), ECMA (European Computer Manufacturers Association), la "European Telecommunication Standard Institute" (ETSI), y actualmente en sus etapas iniciales por el Task Group 4 del "European Conference of Postal and Telecommunications Administrations" (CEPT).

Un campo abonado en el uso civil de la Asignación Dinámica de Frecuencias y utilización secundaria del espectro están siendo las bandas de TV. Cada estación de TV operando en una cierta región geográfica sólo usa un cierto número de canales en la banda de TV. Haciendo un mapa geográfico de coberturas de la señal de TV y asignando colores distintos a niveles distintos de señal recibida en cada punto, aparecen áreas en blanco que denotan ausencia, o valores muy reducidos, de la señal recibida. Estos espacios son precisamente los denominados *white spaces*, de modo que los canales no utilizados en estas regiones son candidatos para su uso en modo secundario por terceros sin dañar la calidad obtenida en las emisiones de TV inexistentes en estas áreas y rentabilizando así un espectro no ocupado. En efecto, el 28 de Junio de 2006, el "Senate Commerce Committee" en EEUU adoptó 'The Advanced Telecommunications and Opportunity Reform Act of 2006' (S. 2686), que permitía a terceros sin licencia ocupar los anteriores *white spaces* (zonas geográficas con niveles de señal extraordinariamente bajos) en las bandas de TV, lo que hizo efectivo el 4 de noviembre de 2008 la FCC, desplegando un conjunto de reglas correspondientes e iniciando de este modo un nuevo paradigma regulatorio en la gestión del espectro.

Nótese que la Asignación dinámica de Frecuencias es esencial en este nuevo tipo de escenarios ya que si bien las bandas de TV tienen cierto carácter de permanencia, no pasa necesariamente con todas ellas, en particular las de carácter local, que tienen sus periodos de actividad. Por otra parte, nuevas asignaciones en la ubicación de las bandas de TV, como por ejemplo las resultantes del desplazamiento de la TV analógica a la TV digital, obligan a cambiar la frecuencia de los usuarios secundarios. Finalmente, al poder ha-

ber más de un operador en modo secundario accediendo a las mismas frecuencias no ocupadas, los distintos usuarios secundarios pueden verse forzados a gestionar de manera optimizada sus frecuencias de trabajo en aras a evitar interferencias entre sí, adaptarse mejor al tráfico existente o incluso cambiar de banda por la aparición de un primario que transmite de manera discontinúa en el tiempo. Estudios realizados por el regulador del Reino Unido OFCOM estiman que puede haber entre 100 y 150 MHz liberados para uso secundario del espectro. Si los comparamos con los 80 MHz de banda disponible para WI-FI o los 140 MHz subastados, en ciertos países, para UMTS en 2000, concluiremos fácilmente que la aparición de un paradigma regulatorio basado en el uso secundario del espectro en las bandas de TV aporta un aumento sustancial del mismo que se puede poner a disposición de nuevos usuarios y mercados. Éste es un primer paso, ciertamente revolucionario en lo que a nuevas formas de entender la regulación del espectro radioeléctrico se refiere.

Las nuevas y sucesivas regulaciones difícilmente van a consistir sólo en la detección desde el equipo de usuario secundario de la presencia o ausencia de actividad del entorno radioeléctrico. Va a haber un claro factor de desconfianza de los usuarios primarios hacia un uso secundario si no se puede garantizar la inocuidad del mismo. Las manifestaciones en el sentido contrario de favorecer la presunción de inocencia del terminal móvil en la generación de interferencias dañinas para los usuarios primarios, tal como se ha propuesto en un ejercicio quizás demasiado entusiasta de confianza en la tecnología, no parece tener una base argumental suficientemente sólida. Cuando un usuario barre con un sensor apropiado el canal radioeléctrico en la búsqueda de una banda libre donde poder ubicarse, no está exento de imperfecciones. La presencia del ruido térmico de los sensores y los desvanecimientos de la propia señal recibida típicos en un entorno de propagación hostil, como es el entorno de comunicaciones móviles, pueden dar lugar tanto a falsas alarmas, cuando creemos que hemos detectado la actividad de un primario y no es cierto, como a pérdidas de detección, cuando existiendo un primario activo no lo detectamos. Existe aún otra barrera, quizás más importante, constituida por la presencia de obstáculos interpuestos entre el transmisor primario y el sensor en el terminal secundario. Tales obstáculos, naturales o no, pueden atenuar suficientemente la señal del primario a detectar de modo que ésta pase desapercibida por el sensor, que decide la ausencia de primario

cuando no la hay, en consecuencia, la habilitación de esta frecuencia originaría una casi segura interferencia al receptor primario activo.

De manera alternativa, un receptor secundario podría medir su posición geográfica y hacer uso de una base de datos radioeléctrica de la que previa consulta del secundario, ésta le devolviese las frecuencias apropiadas a usar sin dañar a los primarios. Esta estrategia, si bien resuelve muchas de las incertezas del canal, no está exenta de dificultades con relación a quién mantiene la base de datos, cómo se actualiza, con qué frecuencia se hace, cuál es la carga radioeléctrica que su uso presupone, etc. El canal de comunicaciones para acceder a la base de datos debería ser seguro, tal como un canal móvil convencional por ejemplo.

A raíz de todo lo anterior y al menos en muchos de los escenarios potenciales identificados para poder operar con asignación dinámica de frecuencias, no será seguramente suficiente a nivel regulatorio una detección de espectro no ocupado basada solamente en su detección por sensores autónomos, al menos de manera general. La incorporación de un mecanismo adicional de supervisión o control, de carácter declarativo, que permita superar las incertezas de la detección autónoma de bandas de primarios inactivas y que permitan fijar límites concretos a las frecuencias y potencias posibles de utilizar, se presume una condición inexcusable y comprensible exigida por los operadores/usuarios primarios al regulador para el uso secundario del espectro. Los nuevos marcos regulatorios que vayan surgiendo, por otra parte, incluirán paulatinamente asignaciones distintas a las actuales, basadas en grandes zonas geográficas de uso para periodos de tiempo muy elevados, y que con seguridad, vez van a ser más difíciles de sostener de manera genérica. La granularidad espacial y temporal tomarán forma de manera que es posible que los derechos de uso en su versión más amplia acaben configurando espacios 4D, es decir, zonas espaciales 3D, en lugar de las actuales 2D, acompañadas además de una dimensión de uso temporal. La incorporación de la geolocalización de los usuarios de espectro cada vez tendrá mayor presencia en la regulación, lo que en conjunción con potencias transmitidas máximas por los equipos secundarios permitirá habilitar los recintos de usos espacio-tiempo 4D de manera más precisa con ayuda de bases de datos radioeléctricas. La nueva regulación en definitiva permitirá una ágil adaptación a las constantes de tiempo tecnológicas, muchísimo más pequeñas que las actuales constantes de tiempo regulatorias.

Si bien no existe todavía ningún sistema comercial funcionando como resultado de los nuevos paradigmas regulatorios que se van perfilando, ya se ha desarrollado un primer estándar, el denominado "IEEE 802.22", para comunicaciones fijas punto multipunto, que permite el uso secundario del espectro sin dañar la calidad percibida por los usuarios de TV. Esta tecnología se ha validado y con ella se inicia un camino que presumiblemente ha de conducir con el tiempo hacia un nuevo marco regulatorio del espectro radioeléctrico. Es decir, con independencia del acceso al uso secundario del espectro anteriormente expuesto, y a la luz de las carencias espectrales manifiestas, se están dando de modo firme las primeras iniciativas, tanto a nivel regulatorio como tecnológico, para que el derecho de uso exclusivo del espectro, tal como actualmente está diseñado para el uso primario del mismo, deje paso, al menos en escenarios de TV por ahora, a otros modos de uso. En esta misma línea, otro estándar cuyo objetivo son las comunicaciones en entornos de interiores, el "ECMA-392", ha sido también lanzado recientemente.

Finalmente, cabe señalar también que el uso dinámico del espectro se prevé una herramienta de gestión de recursos radio muy adecuada para mejorar el uso de las propias bandas de frecuencia asignadas a cada operador. El hecho de que cada operador pueda gestionar mejor sus bandas licenciadas en el dominio espacial, en consonancia con la demanda de tráfico en cada momento y en función de los distintos servicios y las distintas redes operadas, es un arma poderosa que está llamada a paliar, en parte, la escasez de oferta espectral y optimizar la banda disponible por cada operador. El uso dinámico del espectro está también implícito en el mercado secundario del espectro, si bien con distintas motivaciones a las antes aludidas de aprovechar los *white spaces*.

RADIO COGNITIVA

Everything should be as simple as it is, but not simpler

Einstein

Actualmente el terminal móvil ha dejado de ser solamente un elemento de comunicación para pasar a ser un asistente personal, donde las comunicaciones ciertamente juegan un papel básico pero ya no único. El terminal móvil, con sus diferentes factores de forma, camina en la dirección de extender nuestras capacidades sensoriales y en cierto modo nuestra inteligencia. Un primer paso significativo en esta dirección lo dio Joseph Mittola III al introducir junto con Gerald Q. Maguire en 1999¹² el concepto de Radio Cognitiva como un equipo de radio que es consciente del entorno en la que está inmerso y puede conducir el proceso de la comunicación para satisfacer las necesidades del usuario. Las radio cognitiva plantea un horizonte ambicioso que va más allá de la propia gestión de las comunicaciones en su acepción radioeléctrica, que también las incluye necesariamente, pero añadiendo una capa adicional a la pila de protocolos convencional y por encima de la de aplicaciones, encargada de gestionar contextos de usuario y convertirse de hecho en un apéndice de su inteligencia. La tradicional medida de calidad (QoS) de servicio de los sistemas de comunicaciones tal como actualmente la concebimos, se ampliaría entonces con una nueva medida mucho más exigente, acuñada como Calidad de la Información (QoI), que si bien incorpora la Calidad de Servicio como condición necesaria, pretende entrar en las interioridades del contexto informativo y valorar su calidad en tanto que satisfaga expectativas de usuario.

Un primer prototipo sobre Radio Cognitiva puede ilustrar a modo de ejemplo las potencialidades de este nuevo paradigma. Este prototipo pretendía intercambiar tarjetas de presentación sobre una radio Bluetooth de modo transparente a dos personas a las que estaban presentando. Para ello, primero el prototipo detectaba el entorno, en este caso el diálogo entre usuarios a través del reconocimiento de voz. Simplemente, filtrando fra-

ses tales como “le presento a”, “encantado de conocerle”, etc., la base de conocimiento instalada en el equipo podía “razonar” y tomar la decisión oportuna. En este caso, era el envío de las tarjetas de presentación correspondientes. En este nuevo escenario, la comúnmente todavía utilizada Calidad de Servicio (QoS) ofertada al usuario vendría acompañada por la Calidad de la Información intercambiada (QoI). Ésta ya no mide parámetros de sistema sino el hecho, en el ejemplo anterior, de que las tarjetas de visita se hayan intercambiado como consecuencia del conocimiento contextual de la conversación vocal mantenida. La calidad del contenido de la información, medida en parámetros de usuario, es la contrapartida a la propia calidad de servicio medida todavía con parámetros de sistema.

En términos generales, una Radio Cognitiva requeriría el incorporar como mínimo una serie de conocimientos declarativos, capturados en un conocimiento de base que el terminal no puede alterar de manera autónoma y que marca al mismo tiempo las propias restricciones a la operativa del mismo que la regulación plantea (e.g. cerca de aeropuertos, radares, otros usuarios del espectro). La capacidad de percepción del entorno exterior, en el que está inmerso el terminal, activaría el funcionamiento del mismo en una determinada dirección óptima, entre las muchas posibles. En realidad, ésta es la base de los sistemas con asignación dinámica de frecuencias actuales. Una verdadera radio cognitiva en sentido amplio debe incorporar también elementos de “Machine learning”. El concepto de “Machine learning” puede definirse de manera concisa como un proceso en el que una máquina (e.g. un programa de ordenador) cambia su estructura en respuesta a un entorno, de manera que el conocimiento declarativo anteriormente mencionado se ve ampliado/enriquecido con una nueva base de conocimiento, esta vez aprendida. Es decir, el terminal móvil se va rediseñando y evolucionando de manera autónoma. La radio cognitiva puede considerarse en este sentido uno de los primeros usuarios de la tecnología de Inteligencia Artificial con el objetivo de integrar ambos conocimientos: declarativo y aprendido en un único marco lógico.

Una primera aplicación práctica y circunscrita al dominio de la gestión radioeléctrica de este nuevo paradigma se encuentra en la Asignación o Acceso Dinámico de Frecuencias (DSA) anteriormente introducida. La Cognición es utilizada aquí en asociación con una tecnología radio que opera en el entorno del congestionado espectro electromagnético. Un

terminal radio que incorpore esta nueva funcionalidad estaría en condiciones de detectar las bandas de frecuencia no ocupadas por el usuario primario, o poseedor de la licencia de uso del espectro, y entender cuál de estas bandas le resulta más conveniente para sus fines, mediante el uso de una base de conocimiento declarativa y las optimizaciones consiguientes. Si bien el DSA incorpora ya el denominado ciclo cognitivo, estrictamente sólo incorpora un subconjunto de sus componentes y en particular la Base de Conocimiento declarativa. Este ciclo cognitivo se iniciaría al detectarse la necesidad de espectro para efectuar una comunicación, se detectaría a continuación una banda espectral dentro de la banda/bandas para las que el terminal de radio está diseñado, supuestamente, encontraría una banda libre, la ocuparía y se terminaría el ciclo cognitivo. Esta ocupación por otra parte terminaría cuando se activase el usuario primario con licencia de uso y el consiguiente traslado de la comunicación del usuario secundario a otra de las bandas detectadas y decidida para poder dar continuidad al servicio.

Si bien hay una asociación implícita entre radio cognitiva y el aumento de prestaciones, la radio cognitiva puede ser usada también para reducir la complejidad de algunos componentes de la misma, y en consecuencia la complejidad de los terminales radio, manteniendo las mismas prestaciones que con sistemas radio no cognitivos. Un ejemplo de ello lo encontramos en el diseño de radios multibanda en presencia de fuertes interferencias, como puede ocurrir en comunicaciones directas (“peer to peer”) típicas en escenarios militares o de seguridad pública. En equipos convencionales, el cabezal de radiofrecuencia (RF) debe tener suficiente linealidad para garantizar la no presencia de espurios en cualquiera de las bandas. Con la radio cognitiva, es posible reducir tal linealidad, y por lo tanto la complejidad del cabezal de RF, ya que se podría elegir una frecuencia apropiada de trabajo en cada caso alejada de la zona de las interferencias, provocadas o no, que se eliminarían con un preselector.

No sería estrictamente necesario el recurrir al “machine learning” para realizar un DSA, aunque esquemas más elaborados ciertamente lo puedan usar, por ejemplo, para aprender patrones de comportamiento de usuarios primarios a la hora de seleccionar frecuencias óptimas de uso secundario. Ésta es la situación habitual en la que se encuentra un terminal radio cuando debe seleccionar una banda espectral concreta como paso

previo al propio proceso de detección con objeto de averiguar su estado. El aprendizaje del entorno puede llevar a la radio cognitiva a clasificar las frecuencias más convenientes para su uso, por ejemplo seleccionando aquellas que tienen una más baja ocupación en el dominio temporal. Los terminales radio tienen habitualmente un único cabezal de RF y no varios en paralelo, al ser muy costosa esta solución en términos de *hardware*. En caso de que haya muchas bandas candidatas, se plantea entonces un problema de sensado no obvio de banda, problema que se agudiza cuando el tiempo de que se dispone para efectuar la decisión de banda libre u ocupada es muy limitado. El “machine learning” permitiría, partiendo del aprendizaje de experiencias pasadas, establecer una priorización óptima de las bandas candidatas a detectar, que por otra parte puede ir cambiando en el tiempo. Esta información se traslada a la base de conocimientos y se integra de este modo en el ciclo cognitivo anterior. Este ciclo sustenta la radio cognitiva observando el entorno, eligiendo comportamientos, y recibiendo una retroalimentación. Todo lo anterior se ejecuta al mismo tiempo que aprende del entorno, completando una nueva base de conocimiento que ayudará a decidir futuros comportamientos.

REDES COGNITIVAS

El concepto de radio cognitiva se ha ido extendiendo más allá del terminal radio al conjunto de la red de acceso y de los sistemas de gestión de recursos radio consiguientes. Nace así el concepto de Redes Cognitivas, “Cognitive Network”, como una generalización lógica del concepto de Radio Cognitiva. Ni el DSA, ni tampoco la Radio Cognitiva, por sí solos, en su acepción última de inteligencia implantada para explotar el máximo volumen de contexto adquirido, proporcionan una comprensión de las redes, global o parcialmente, en la que estos terminales cognitivos están inmersos.

Merece la pena notar, llegado a este punto, que la línea de separación entre cognitivo y no cognitivo no es absoluta. Así, por ejemplo, adaptar la modulación utilizada en transmisión a las características de los desvanecimientos existentes en un entorno móvil o seleccionar automáticamente si se debe operar en WIFI o UMTS en una red heterogénea, no deja de ser un ejercicio usado ya en terminales o redes convencionales que po-

dríamos denominar todavía no cognitivas. Una diferencia importante, sin embargo, reside en la capacidad que los radios o redes cognitivas presentan de inferir del conocimiento del entorno nuevos marcos de comportamiento, no definidos en su diseño, y de los no pueden salirse los sistemas exclusivamente adaptativos, que no tienen capacidad de aprender y ampliar nuevas bases de conocimiento. Es decir, no pueden rediseñarse a sí mismos. Un elemento subyacente a todo proceso cognitivo, tanto a nivel de terminal como de red de acceso, es la captura de conocimiento que sea comprensible para una máquina y los procesos de razonamiento consiguientes, conducentes a la deducción y/o inferencia de las conclusiones, necesarias para la toma de decisiones finales. El aprendizaje, en definitiva, proporciona a las redes cognitivas la capacidad de evolucionar de una manera no previamente planificada.

Por otra parte, los operadores actuales constatan con preocupación cómo el continuo incremento de la capacidad, conectividad y oferta de servicios diferentes y personalizados de las redes de acceso móviles incrementan enormemente la complejidad de las mismas. Es un hecho actual que con la creciente demanda de conectividad, los modelos estándar de conectividad ya no funcionan. Los modelos basados en una sola radio para realizar una sola tarea están en retroceso. La creciente complejidad, derivada tanto de la heterogeneidad de sistemas radio existentes coexistiendo en un mismo entorno como de la inherente enorme flexibilidad con la que los nuevos sistemas se están diseñando hace, por otra parte, inabordable la gestión de este ecosistema sin la decidida introducción de un número elevado de elementos de inteligencia autónomos. Los terminales móviles actuales es sabido que ya permiten en muchos casos conectarse a distintas redes de acceso: GSM, UMTS, WIFI, etc., persiguiéndose una mejora de la eficiencia espectral, no ya de un elemento en particular sino del conjunto de ellos, a través de la reutilización conjunta de los recursos radio existentes disponibles en el conjunto de tales redes heterogéneas. Tampoco es ajena a esta tendencia la previsible alta densidad de puntos de acceso (e.g femtocélulas) a la que conduce la creciente demanda de capacidad y conectividad inalámbrica. El aumento de capacidad consiguiente, con su gestión asociada, induce a su vez una presión de costes (OPEX) al alza. El desarrollo de redes cognitivas en estos nuevos escenarios ya se juzga como una necesidad. Los elementos de inteligencia adicional que pueden aportar capacidad cognitiva, en el sentido de resolver

problemas complejos y no previstos, es un camino que permite vislumbrar una solución, ya que como señalaba Einstein, cuando las soluciones son simples, Dios ya las muestra.

No es pues de extrañar que actualmente hayan aparecido, de manera todavía incipiente como un nuevo paradigma, las redes autoorganizadas o autonómicas (self-x). Éstas corresponderían a una primera generación de redes cognitivas, en la misma manera que la asignación dinámica del espectro ha propiciado una primera generación de radio cognitiva. La naturaleza autonómica o autoorganizada de las mismas se constata en los distintos nombres con los que han ido apareciendo: *self-healing*, *self-configuration*, *self-optimization*, *self-learning*, etc., incorporando cada vez en mayor medida componentes cognitivos, minimizando en consecuencia la intervención humana al automatizar las tareas operativas y abaratando los costes de operativos de explotación (OPEX).

En general, las funcionalidades “self-x” se basan en un bucle consistente en reunir datos de entrada, procesar estos datos y derivar la optimización de parámetros correspondiente. Las funcionalidades “self-x” mejoran la usabilidad de las redes inalámbricas a través de soluciones “plug&play” y acelerarán la introducción y desarrollo de nuevos servicios. Desde la óptica de una gestión de recursos radio, lo más importante es que pueden contribuir a la mejora de la eficiencia espectral ya que se puede usar la capacidad donde realmente se necesita, en contraposición a las redes actuales, cuyo diseño está pensado para manejar la máxima capacidad esperada en cualquier lugar del área desplegada. Finalmente las funcionalidades “self-x” apuntan también a la mejora de la calidad de servicio (QoS) percibida por el usuario minimizando la interferencia y mejorando las condiciones de cobertura. De hecho, los organismos de estandarización, e.g. 3GPP, están centrando actualmente sus esfuerzos en es los aspectos funcionales y de arquitectura de tales redes autoorganizadas. Todos los sistemas “self-x” actuales se basan mayoritariamente en soluciones *ad-hoc*, y poco sistematizadas todavía desde el punto de vista algorítmico. Recientemente¹³, sin embargo, ya se pueden ir vislumbrando en el dominio de las futuras comunicaciones 4G esquemas inteligentes automatizados, basados en estrategias de “Reinforcement Learning”. Tales estrategias permitirían asignar a cada celda la banda espectral necesaria solamente en función del tráfico existente, pudiéndose incluso ofertar la banda no usada

en un potencial mercado del espectro, incluido el oportunista y contemplado por los nuevos paradigmas regulatorios. Las ganancias obtenidas en el uso de los recursos radio, independientemente de la facilidad de explotación conseguida, pueden llegar a multiplicar significativamente la eficiencia en el uso del espectro.

En un entorno de uso oportunista del espectro, en la medida que puede haber muchos terminales secundarios móviles, una gestión de recursos no es óptima si se hace a nivel individual y hay que hacerla a nivel colectivo, ya que otros terminales secundarios, a su vez, podrían estar detectando las mismas bandas libres y pasar a ocuparlas. Es decir, ahora son ya las redes cognitivas, en tanto que asociación de muchos terminales radio cognitivos, las que se dotan de la estructura de gestión de una elevada complejidad en la medida que puede incluir distintas redes de usuarios secundarios (distintos operadores, distintos grupos temporales de usuarios, etc.), usuarios secundarios con infraestructura (dotadas de estaciones de base o puntos de acceso estáticos) o sin infraestructura (redes *ad-hoc* con rutado de la información a través distintos terminales intermedios antes de llegar el punto de destino). En el caso de redes sin infraestructura, hay un nuevo elemento, actualmente todavía no resuelto satisfactoriamente, que corresponde a cómo elegir las distintas rutas entre los dos móviles extremos de la comunicación, que constituyen el origen y destino de la misma, utilizando para ello otros terminales móviles intermedios. A la propia complejidad del enrutado convencional, ahora hay que añadir la incerteza derivada de la frecuencia a utilizar en las distintas rutas y la gestión de la interferencia en un entorno hostil en términos de propagación sin infraestructura.

Llegado a este punto, quizá merezca la pena reseñar la pregunta formulada en el año 2000 a la Academia de Ingeniería de América con motivo del cambio de siglo: ¿cuál es el logro más importante de la Ingeniería del siglo XX?, la respuesta de la misma fue que era la vasta red de electrificación. Se argumentaba que esta red hizo posible la mayor parte de los otros logros que la Ingeniería ha conseguido en este siglo. Ciertamente sería totalmente pretencioso hacer predicciones en esta línea para el futuro. Me atrevería no obstante a apuntar un paralelismo entre las redes eléctricas del siglo XX, como hilo conductor que han sido de la revolución industrial habida, e Internet, que se postula como el nuevo sistema circulatorio de la sociedad

post-industrial o del conocimiento. En este sentido, el Internet del futuro, del que se está empezando a poner los primeros cimientos, tendrá la tarea ingente de abordar la enorme complejidad que las redes actuales ya no pueden solventar. Una vez más, las soluciones a problemas complejos se juzga que deberán basarse en la agregación de elementos cognitivos a las máquinas, incluso más allá de los usados en la ingeniería de la radio, aunque la radio, tal como ampliaremos posteriormente, va a ser el soporte natural del Internet del futuro, capaz de proporcionar la ubicuidad y la movilidad demandada. Curiosamente, las radiocomunicaciones, que fueron en su inicio el origen del desarrollo de los tubos de vacío electrónicos y más tarde de los componentes de estado sólido, como el transistor, y con él, de toda la microelectrónica que constituye el cuerpo de las TIC, puede que estén propiciado ahora, a través de la necesaria gestión inteligente de los recursos radio escasos, los nuevos paradigmas cognitivos y con ellos un paradigma clave en la Ingeniería del futuro.

COOPERACIÓN EN LA GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

El modelo de uso compartido en la gestión del espectro, como ya apuntábamos, genera toda una serie de problemas derivados de la tragedia de los comunes. El problema persiste de una u otra manera incluso en los sistemas de comunicaciones móviles que operan bajo la regulación de uso exclusivo del espectro, en la medida que este espectro debe atender a un número elevado de usuarios que lo comparten. Para evitar la tragedia de los bienes comunales, aparte de las dos conocidas soluciones por obvias: la privatización y la regulación de uso, ciertamente, hay una tercera solución: la cooperación entre los usuarios. El premio Nobel de economía de 2009 se concedió a Elinor Ostrom por los trabajos desarrollados en esta dirección. Curiosamente y de manera, debo pensar, totalmente independiente, estas ideas de cooperación han tendido su eco tecnológico en los últimos años para mejorar la eficacia del uso del espectro. Es común, actualmente, hablar de redes móviles cooperativas para las futuras redes inalámbricas de comunicaciones móviles, mediante las que, y expuesto de modo simplificado, un móvil que esté más cerca del destino final de la comunicación, por ejemplo una estación de base, puede utilizarse como repetidor de las señales emitidas por otros móviles más lejanos. De este modo, se consiguen mejores eficiencias espectrales (número de usuarios

por unidad de área y por unidad de espectro), al tiempo que se evitan elevadas potencias de transmisión y se requieren menos estaciones de base con los siguientes ahorros en costes de infraestructura. Siendo todo esto cierto, la cooperación a nivel de usuario, como actor económico, es sin embargo un aspecto clave. Los usuarios deberán pensar en ceder parte de la potencia de su batería o quizás cierta limitación en el uso de las capacidades del canal, en aras de que otros usuarios puedan usar su móvil y de esta manera hacer un sistema mejor en su conjunto, técnicamente sostenible y económicamente factible. La celebrada afirmación de Roosevelt en 1937, “siempre supimos que el egoísmo sin límites es una mala moral y ahora sabemos que es una mala economía”, cobra también ahora pleno valor en este mundo específico, pero de impacto global, de las comunicaciones móviles o inalámbricas.

La cooperación entre los distintos actores del ecosistema radioeléctrico, si bien es un concepto con vida propia e independiente al de las propias redes cognitivas, es previsible que acabe siendo en ciertos casos un componente importante en el despliegue de estas redes. La cooperación puede ser a distintos niveles, si bien podríamos simplificar reduciéndola a tres niveles de cooperación: nivel de transmisión, cooperación social y cooperación entre operadores.

La cooperación a nivel de transmisión, que es la más conocida, explota la diversidad espacial derivada de la presencia de uno o más nodos intermedios, ubicados entre el terminal de origen y el de destino de una comunicación, que actúan a modo de repetidor o repetidores. Las mencionadas redes sin infraestructura (redes *ad-hoc*) o los nodos repetidores para extender coberturas de redes celulares serían ejemplos típicos de estas comunicaciones. Tales nodos pueden ser, en su caso, otros terminales móviles. Es sabido, por otra parte, que los distintos caminos paralelos de propagación de la señal radioeléctrica entre origen y destino, vehiculados a través de distintos nodos intermedios, están asociados a distintas características de propagación. Se podría explotar entonces la diversidad espacial asociada a este posible conjunto de caminos, traduciéndose en unas mejores prestaciones del enlace para la misma cantidad de recursos utilizados. En este sentido, se ha propuesto el uso de redes cooperativas en los próximos sistemas 4G con el objetivo de ayudar a alcanzar las elevadas velocidades operativas de transmisión requeridas en entornos

macrocelulares y sin embargo todavía mantener una densidad de estaciones de base similar a la de los actuales sistemas desplegados de 2G y 3G.

Las redes cooperativas se han revelado también como una componente esencial a explotar en redes cognitivas. En efecto, las conocidas probabilidades de detección y falsa alarma en la actividad de los primarios, cuya ausencia o inactividad propicia las comunicaciones secundarias, pueden estar lejos de los valores requeridos debido a la presencia de los típicos desvanecimientos de la señal radioeléctrica en los entornos inalámbricos. En particular, en tales redes, la cooperación se plantea entre terminales secundarios de manera que un número de ellos actúan cooperativamente como sensores de la actividad de un primario. La diversidad espacial inherente entre los diferentes caminos existentes entre el primario y cada uno de los sensores secundario se puede explotar haciendo que las prestaciones medidas a través de las probabilidades de detección y falsa alarma antes mencionadas sean ya aceptables, previa fusión de los datos aportados por cada sensor. En la medida que tengamos un número suficiente de sensores/terminales en ubicaciones suficientemente alejadas entre sí, como para poder considerar las señales detectadas estadísticamente independientes, la cooperación de todos ellos conduce a una información agregada de superior calidad y que es suficiente para una toma de decisiones mucho más fiable.

A diferencia de aplicaciones cooperativas más conocidas, como por ejemplo en redes *ad-hoc*, donde los mecanismos cooperativos son del todo transparentes al usuario, los sistemas cooperativos que interactuarían en un entorno celular requieren de los permisos de los terminales intermedios, ya que sus usuarios se verán implicados necesariamente en la comunicación con una cesión de parte de sus recursos, sea banda o sea energía almacenada. Es decir, aquí la cooperación es entre individuos que deciden libremente cooperar confiando que de ello obtendrán ventajas operativas. Se trata de una cooperación social. Todos los usuarios se convierten en parte importante de esta ecuación cooperativa. Incentivos para propiciar la cooperación son entonces parte esencial del concepto, independientemente de otros ligados a la confianza, es decir, la garantía de seguridad y privacidad correspondientes de los usuarios implicados.

Finalmente existe también la cooperación entre los operadores proveedores de las redes de comunicaciones móviles. Tras una primera etapa de im-

plantación de tales redes, en la que la competencia guiaba en solitario las decisiones con relación a otros operadores y no había espacio para la cooperación, más allá de la mínima de carácter administrativo, la cooperación, en la actualidad, ya ha tomado cuerpo de presencia y es habitual el que distintos operadores compartan infraestructuras. Queda sin embargo todavía pendiente la parte más compleja de la cooperación que es compartir usuarios. El usuario continúa siendo cliente de un operador al que se suscribe y con el que se relaciona administrativamente. Sin embargo, varios operadores pueden cooperar de manera que realmente este usuario utilice la red más conveniente en cada momento. Puede haber aquí una ganancia derivada bien de la distinta naturaleza de las redes explotadas que pueden ser complementarias (ej. en cobertura, tecnología, carga de tráfico que soporta, etc.). Tal es el caso con las redes heterogéneas actualmente desplegadas, por una parte, y el hecho de que los terminales de usuario sean multimodo, es decir, capaces de operar con distintos sistemas (GSM, UMTS, WIFI, etc.). Más explícitamente, la cooperación entre operadores podría beneficiarse de la conocida teoría de las ventajas comparativas ("Ricardo's law") en economía, que establece que dos actores capaces de comerciar entre ellos deberían especializarse y producir el servicio en el que son más eficientes, de lo que resultaría un coste social más bajo. O bien, yendo más a aspectos de ingeniería, el beneficio que la cooperación traería sería, bien en términos de ganancia troncal o bien de ganancia de cobertura. Para usuarios cuyos puntos de acceso sean coincidentes o casi coincidentes, la ganancia vendría de la conocida ganancia troncal, es decir, un conjunto de servidores (operadores con sus redes en nuestro caso) que sirven al conjunto de clientes ofrecen mejores prestaciones de acceso (e.g. menor probabilidad de bloqueo, más banda ofertada, etc.) que servidores que actúen en modo aislado sirviendo a clientes segmentados. Por otra parte, para usuarios cuyos puntos de acceso están espacialmente distantes, la ganancia derivada del efecto troncal descendería pero aumentaría la ganancia de cobertura, al poder asegurarse ésta en mayor medida, cualquiera que sea la ubicación del terminal móvil.

COGNICIÓN Y COOPERACIÓN EN REDES MÓVILES

Los principios cognitivos y cooperativos son complementarios y no es entonces extraño que se pretenda explotar sus sinergias naturales aplicándolos conjuntamente. La cooperación eficiente reside en el conocimiento

previamente adquirido, mientras la aprehensión del entorno y la adquisición correspondiente de conocimiento pueden ser alcanzadas a través de la cooperación. Las restricciones existentes de espectro radioeléctrico, unidas a la existencia de una infraestructura (puntos de acceso) limitada y a las propias restricciones de energía disponible, especialmente en los terminales móviles, obliga a unos diseños eficientes de la gestión de recursos, y en especial en los futuros sistemas de comunicaciones cuya heterogeneidad y previsible complejidad irán en aumento. La gestión de la complejidad de tales sistemas conduce a la introducción, cada vez en mayor medida, de componentes cognitivos y de cooperación conjunta con las distintas redes, operadores y usuarios implicados.

La asignación dinámica de frecuencias ha hecho que el mercado secundario de las comunicaciones móviles sea factible. Sin embargo, esta asignación dinámica de frecuencias no agota todas las posibilidades existentes. La cooperación en sus diversas manifestaciones, sea entre operadores, usuarios, primarios y secundarios, etc., será otro ingrediente que acompañará a la gestión cognitiva de recursos radioeléctricos en este nuevo marco regulatorio. Un ejemplo de esta asociación lo tenemos en la explotación del espectro secundario, donde más allá de la detección de una señal primaria con su frecuencia asociada, se requiere estimar contextos de este primario, tales como su localización, potencia transmitida, diagramas de radiación, patrones de tráfico cursados, etc., bien sean emisiones fijas o móviles. Los terminales secundarios, una vez conocido el contexto del primario, pueden ajustar sus propias potencias transmitidas para no causar interferencias al primario y explotar el espectro al máximo no sólo en el dominio espacial sino también en el temporal. Un tema no menor de la gestión de la complejidad asociada a las redes que hacen un uso oportunista del espectro es la señalización, sea entre terminales de la misma red o entre redes oportunistas diferentes, con objeto de armonizar sus usos espectrales. La agregación de informaciones de control que la propia cooperación introduce conduce a una señalización en las redes secundarias que puede añadir una complejidad adicional en la medida en que no existe una banda de frecuencias estable por donde vehicularla. La asignación de un piloto en una o varias bandas fijas para este fin¹⁴ es en la actualidad objeto de atención por los organismos de estandarización (ITU-R, ETSI), a la vista de las potencialidades que presenta.

El uso conjunto de la cognición y la cooperación facilita también el desarrollo de nuevos paradigmas de comunicaciones, en la actualidad todavía incipientes. Así, por ejemplo, a pesar del enorme despliegue investigador de que han sido objeto las redes *ad-hoc* o redes sin infraestructura, su éxito comercial, sin embargo, ha sido moderado por no decir escaso. Una de las razones que explicarían esta poca implantación radica en el hecho de que tales redes se han desarrollado de manera aislada a otras redes inalámbricas, sin que se haya hecho esfuerzos sistemáticos para establecer una relación mutua entre ambas. Las obvias sinergias entre las redes *ad-hoc* y las redes comerciales inalámbricas han estado ignoradas y por consiguiente prácticamente inexploradas. La conjunción de la cognición y cooperación se postula como una gran oportunidad para que las redes *ad-hoc* exploten sus grandes potencialidades. Sin pretender explotar todas las posibilidades existentes, escenarios muy plausibles estarían ligados a la fuerte irrupción de las redes sociales o a las comunicaciones domésticas. En ambos casos tendríamos una agrupación de terminales (*cluster*) que requieren conectividad habitualmente en entornos de interiores o bien confinados a áreas cubiertas con comunicaciones de corto alcance. Las comunicaciones, supuestamente intensivas dentro del *cluster* y en muchos casos con carácter no permanente (e.g. grupo de amigos en una determinada área de proximidad), no estarían limitadas en su conectividad hacia el exterior si se pudiese establecer un marco de cooperación con redes comerciales de cobertura global, y de manera transparente, al usuario. La asignación de una banda espectral adecuada para tal fin podría basarse en las mencionadas estrategias cognitivas de búsqueda y uso del espectro en modo secundario, que vendría facilitado por el confinamiento geográfico de tales comunicaciones. Estaríamos en este caso en presencia de un paradigma de funcionamiento similar al de la producción de energía eléctrica desde los propios clientes, vía por ejemplo placas solares, que revierten a la red de transporte de energía eléctrica. Estas redes oportunistas en cooperación con la infraestructura pueden no sólo ayudar a aliviar picos de congestión en la misma, sino que permite incorporar el nuevo papel que los clientes van adquiriendo, particularmente a través de nuevos servicios de Internet, que les convierte en proveedores de información y consumidores al mismo tiempo. La cooperación entre terminales y usuarios se aplicaría tanto a la cooperación a nivel de transmisión como social, en este último caso, emulando la compartimentación de recursos que arquitecturas de red fija "peer to peer" como "bit-torrent", entre otras,

han introducido. Finalmente, la conexión a la red global de modo permanente y transparente al usuario proporcionaría la movilidad necesaria, verdadera razón de ser de las comunicaciones móviles.

Otro terreno abonado para la colaboración en sus tres niveles y la cognición se da en los escenarios heterogéneos, operando en bandas actualmente reguladas y que incluyen la presencia de varios operadores. Para ilustrar este punto, si bien de modo no exhaustivo, considérese un escenario con distintas tecnologías habilitadas (ej. GSM, UMTS, WIFI, etc.), con las correspondientes distintas estaciones de base o puntos de acceso, con usuarios provistos de terminales multimodo y distintos perfiles (e.g. residencial o negocios), con percepciones distintas del servicio ofrecido y el coste asociado, con distintos operadores cada uno con su base de clientes y la correspondiente infraestructura desplegada y finalmente con distintas cargas de tráfico para cada estación de base o punto de acceso. De modo natural, cabría entonces plantearse la pregunta: un usuario con un perfil determinado y que demande una velocidad de transmisión determinada con la que establecer una comunicación, ¿qué estación de base, qué operador (supuesto trabajan en un entorno colaborativo) y qué tecnología es la más conveniente seleccionar de modo que este usuario quede satisfecho, según su percepción del coste del servicio ofrecido, y al mismo tiempo, que los operadores maximicen su beneficio? A todo ello hay unos datos de entrada adicionales como nivel de señal radioeléctrica recibido por el terminal móvil, velocidad del mismo, carga de tráfico en cada punto de acceso a la infraestructura, nivel de carga de la batería, etc. No parece que haya una metodología óptima para responder a esta pregunta correctamente más allá del uso conjunto de la cooperación y las técnicas cognitivas. Veré a continuación a modo ilustrativo sólo algunos posibles ingredientes clave de este esquema. Supuestas unas bases de entendimiento entre los operadores de cómo gestionar la colaboración (e.g. teniendo en cuenta costes de infraestructura propios, retornos por cliente cedido, etc.), se podría disponer en tal caso de una base de conocimiento realizada mediante una lógica difusa, alimentada por las variables lingüistas de entrada tales como: nivel de señal radioeléctrica, carga de tráfico, velocidad del móvil, etc. Esta metodología que se ha revelado una estrategia adecuada para tomar decisiones, mejora enormemente con una base de conocimiento cambiante que incorpora elementos cognitivos de aprendizaje. Tal es el caso de utilizar "Reinforcement learning" no supervisado

como estrategia que modularía la base de conocimiento de la lógica difusa en modo a obtener una calidad de servicio especificada cuantificable. Unos primeros resultados obtenidos¹⁵ muestran con claridad que los beneficios en términos tanto de eficiencia espectral como económicos que se obtienen con las estrategias conjuntas mencionadas pueden ser muy significativos.

LA RADIO COMO VEHÍCULO DE LA INTERNET DEL FUTURO

El éxito de las tecnologías inalámbricas, con toda probabilidad, no sólo va a continuar sino que va a acelerarse, ampliándose las aplicaciones y servicios que las hacen atractivas al mismo tiempo que aumentará su penetración en esferas de uso mucho más recónditas. Si pretendemos posicionar tales tecnologías adecuadamente, éstas ya no estarán sólo limitadas a las tradicionales comunicaciones personales de voz y aplicaciones de datos. El acceso masivo Internet propiciará la diseminación a gran escala de contenidos, cada vez más de banda ancha, generados y consumidos por los propios usuarios. Veremos cómo las tecnologías de la computación y de las comunicaciones inalámbricas se integrarán en multitud de objetos cotidianos. Los ejemplos son muy extensos y variados: desde simples sensores y accesorios interactivos integrados en tarjetas, lentes, vestidos, artilugios médicos, productos, etc. hasta grandes pantallas con realidad aumentada en entornos de trabajo o terminales integrados con factores de forma diversos. El principal impulsor para estas nuevas tecnologías inalámbricas está siendo (a diferencia de los sistemas desplegados para las comunicaciones móviles tradicionales o personales) ya no necesariamente la movilidad global, sino más bien, la conveniencia de una funcionalidad mejorada y la capacidad de evitar cables y conectores para un despliegue rápido y flexible. En este proceso la tecnología inalámbrica sufrirá una transformación, pasará de ser cara y altamente visible, como con los terminales móviles actuales, a ser una "tecnología invisible" presente en todas partes, masivamente extendida y fácil de operar gracias al uso de las funcionalidades "self-x" ya descritas. Hemos ya visto recientemente este desarrollo en equipamiento electrónico y computacional, pero queda todavía el incorporarlo también a las redes de comunicaciones inalámbricas en la medida en que las infraestructuras de acceso estén disponibles.

En la actual era Internet, todo va muy rápido. Con crecimientos exponenciales. La conectividad no se sustrae a esta dinámica endiablada. La conectividad dominante en el Internet del futuro será vía radio, en la medida en que lo será la red de acceso o la más cercana al usuario, sea en la última milla o el último metro. En 2011 se prevé que en el mundo haya 2.000 millones de usuarios inalámbricos por 1.000 millones de usuarios con conexión fija. En definitiva, las comunicaciones inalámbricas, omnipresentes, serán mayoritariamente comunicaciones vehiculadas por Internet, o más concretamente por otra generación de Internet ya denominada Internet del futuro. Probablemente para entonces las personas dejarán de ser los actores dominantes de las comunicaciones ocupando su lugar sensores y máquinas de todo tipo.

El éxito de Internet se ha articulado desde su flexibilidad para aceptar múltiples formas de acceso por una parte y disparidad de aplicaciones por otra. El acceso masivo a Internet y desde medios muy dispares, tanto vía radio como vía cable, con sus distintas manifestaciones, es hoy algo usual. Por otra parte, la existencia de muchas y variadas aplicaciones que incluyen *e-mail*, transferencia de ficheros y las contenidas bajo el paradigma cliente-servidor en web han ido creciendo hasta ser dominantes. Esto ha creado un cuello de botella en el corazón de Internet, en su núcleo duro, en sus protocolos TCP/IP, haciendo que la gestión de la interconexión de redes, que la Internet actual posibilita, sea inadecuada para el Internet del Futuro. Internet no fue diseñado para vehicular las innumerables aplicaciones que cubrirán la práctica totalidad de facetas en nuestras vidas (salud, aprendizaje, relaciones sociales, entretenimiento, medio ambiente, relaciones con la administración, etc.), además con calidad garantizada y además en entornos principalmente inalámbricos (donde movilidad y ubicuidad es algo inherente), con garantías plenas de seguridad. Sin embargo es a todos estos objetivos a los que aspira la Internet del futuro.

La raíz del problema seguramente reside en que Internet ha funcionado a partir del esquema clásico de diseño basado en unos requerimientos pensados para unos casos de estudio, a los que han seguido las consiguientes fases de estandarización. Es el conocido paradigma clásico newtoniano-cartesiano. La realidad técnica de Internet ha sido a lo largo de su evolución el ir desarrollando un continuo de soluciones a los problemas inicialmente no planteados ni previstos, propiciados por el propio

éxito de Internet. Desgraciadamente, de seguir por este camino se ha llegado a la conclusión que conduciría a Internet simplemente a morir de éxito¹⁶. Es por ello que el Internet del futuro se plantea bajo unas estrategias distintas basadas en la de un paradigma darwiniano. Es decir, en las propias entrañas de los sistemas que van a confeccionar el Internet del futuro, han de incluirse elementos cognitivos, plataformas multi-uso con funcionalidades “self-x” que pueden evolucionar según las circunstancias a partir de su propia experiencia. Nuevos paradigmas de telecomunicación distintos del transporte extremo a extremo, existentes en telefonía en el momento de la aparición de Internet, están surgiendo. No se trata ya sólo de transportar paquetes de datos entre extremos terminales claramente localizados. Por citar sólo algunos tenemos el entorno de las redes de sensores (modelo de difusión), el mundo de los contenidos (P2P), puntos de información o grupos de distribución como destino final en lugar de direcciones del punto terminal. Todo ello apunta a que Internet ha de caminar en la dirección que le lleva desde interconectar nodos físicos hacia interconectar simplemente información sobre la base de la computación en red (“cloud computing”). Internet se ha de hacer más inteligente y, sin embargo, teniendo presente algo que, si bien escondido a la mirada de sus usuarios finales, sustentará en última instancia la red de redes, como es la capacidad de espectro radioeléctrico suficiente para su despliegue. El espectro será en definitiva, una vez más, la materia prima escasa y que se necesitará en abundancia para acceder a estas redes globales y ubicuas, en conjunción con el Internet del futuro. A los Ingenieros les está encomendado resolver este aparente conflicto y con ello asentar las bases para la creación de riqueza de las futuras generaciones.

REFERENCIAS

- ¹ Robert Wrigh, *Nonzero: History, Evolution and Human Cooperation*, Pantheon Books, 2000.
- ² *The Economist*, September 26th 2009
- ³ Deloitte. 2007. *Global Mobile Tax Review 2006-2007*.
- ⁴ <http://www.mityc.es/telecomunicaciones/Espectro/consulta/Paginas/consultabandas.aspx>, ref. Espectro radioeléctrico Consulta pública sobre uso y explotación de bandas de frecuencia.
- ⁵ 1st CR-SDR Europe-Korea Joint Workshop; Seoul (Korea), 7-8 de Octubre de 2009.
- ⁶ C. E. Shannon, A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October, 1948.
- ⁷ <http://www.femtoforum.org/femto/publications.php>.
- ⁸ Garrett Hardin, "The Tragedy of Commons", *Science*, v. 162 (1968), pp. 1243-1.
- ⁹ M. López-Benítez, A. Umberto, F. Casadevall, ' Evaluation of spectrum occupancy in Spain for cognitive radio applications', *IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC 2009 Spring)*, Barcelona(España), 26-29 April.
- ¹⁰ M. Clave, C. Doyle, W. Webb, *Essentials of Modern Spectrum Management*, Cambridge Wireless Essentials Series, Cambridge University Press, 2007.
- ¹¹ The DARPA Next Generation Communications (XG) program.
- ¹² J. MITOLA III AND G. Q. MAGUIRE, JR. "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal" *IEEE Personal Communications* August 1999
- ¹³ F. Bernardo, R. Agustí, J. Pérez-Romero, Oriol Sallent, " An Application of Reinforcement Learning for Efficient Spectrum Usage in Next Generation Mobile Cellular Networks", *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics--Part C:Applications and Reviews*. Accepted to be published.
- ¹⁴ Reconfigurable Radio Systems (RRS): Cognitive Pilot Channel (CPC)
Draft ETSI TR 102 683 V0.1.1 (2009-8)
- ¹⁵ Lorenza Giupponi, Ramón Agustí, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent, " Fuzzy Neural Control for Economic-Driven Radio Resource Management in Beyond 3G Networks", *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics--Part C:Applications and Reviews*, Volume 39, Issue 2, Page(s):170 - 189, March 2009.
- ¹⁶ P. Stuckman, R. Zimmerman "European Research on Future Internet Design" *IEEE Wireless Communication*, October 2009

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. MIGUEL ÁNGEL LAGUNAS HERNÁNDEZ

Excelentísimo señor Presidente
Excelentísimos Académicos
Señoras y Señores

Esta es la primera vez que tengo la oportunidad de dar la bienvenida a esta Real Academia a un nuevo académico. Además del honor que esto conlleva, he de manifestarles la gran satisfacción que me produce la participación directa en uno de los actos más bonitos de nuestra Academia. A ello he de añadir que se trata de una persona con la que mantengo una amistad desde hace ya más de treinta y cinco años, y con el que he compartido, tanto momentos difíciles, como los más dulces de mi vida profesional. Tengo frente a mí la tarea de responder a su brillante presentación sobre la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, así como su extraordinaria capacidad para identificar su evolución futura y el papel que la investigación y el desarrollo tienen en dicha evolución.

Conocí a Ramón Agustí como estudiante de segundo curso de ingeniería de telecomunicaciones en la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid. Me siento obligado de aprovechar la ocasión para rendir un tributo sentimental a este centro que ostenta al día de hoy la exclusiva de haber proporcionado todos los miembros con el grado de Ingeniero de Telecomunicación de esta Real Academia de Ingeniería. Creo sinceramente que la educación que recibimos, al menos mis contemporáneos, quedo marcada muy favorablemente por la ilusión y el ánimo por cambiar que una nueva generación de profesores supo trasladarnos. Vaya pues mi reconocimiento a esos profesores y a una escuela de ingeniería que, aun hoy, sigue siendo una referencia para propios y ajenos.

Ramón Agustí Comes nació en Tarragona en 1951 y, como ya he comentado curso sus estudios en el ETSI de Telecomunicación de Madrid (UPM)

obteniendo su graduación el año 1973. Por iniciativa del recientemente fallecido Ricardo Valle Sánchez, primer director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de Barcelona entonces en la denominada Universidad Politécnica de Barcelona (UPB), al finalizar sus estudios de grado se traslado a dicho centro para la realización de su tesis doctoral. He de recrearme en estos años, del final de la década de los setenta, en las circunstancias que rodearon la formación de Ramón. En el curso 73-74 se trasladaron nueve recién graduados a la ETSIT de Barcelona seis de ellos en un grupo de amigos, entre los que se encuentran tanto el nuevo académico como el que les habla. El comienzo de la vida académica de Ramón Agustí fue el asumir muchas horas de docencia semanales, distribuidas hasta en tres materias diferentes, realizar cuatro cursos de doctorado formales y el apremio por obtener el grado de doctor si no se quería prolongar una precariedad laboral fuerte. Lo exiguo de la retribución de los entonces encargados de curso, obligaba a compartir alojamiento en una casa de campo en Valldoreix, un lugar en los alrededores de Barcelona. Recuerdo también que hasta encontrábamos divertido como cambiaba la vida de la primera quincena a la segunda quincena de cada mes. Con todo, la ilusión por el trabajo científico y la vida académica se instaló en el, comenzando esa fase divertida en el que la frontera entre su trabajo y su diversión se difumina, que ha durado hasta la actualidad. Si hubiera de definir como veía a Ramón Agustí entonces, diría que, siempre estaba quejándose pero contento, divertido y sonriente.

Los comienzos de la ETSIT de Barcelona marcaban el comienzo del doctorado formal en ingeniería de telecomunicaciones pero con la ilusión de sus profesores y estudiantes como única medida de acompañamiento. La carencia y limitaciones obligaban a un planteamiento más decantado hacia la oportunidad que a la viabilidad. Se trataba de llegar a formar parte de la comunidad científica internacional más por la originalidad y perseverancia en el trabajo que por la calidad de lo realizado. Era pues un problema de ser admitido en un club, a sabiendas de carecer de los meritos de sus miembros, cuya solución se basaba tan solo en la esperanza de ganarse su confianza. Confianza que solo podía venir basada, como ya he mencionado, en la originalidad de lo realizado. El nuevo académico comenzó a definir sus preferencias en el ámbito denominado entonces como emisores receptores y radioenlaces. La evolución de contenidos en ese ámbito parecía orientarse, de un modo más general, a electrónica de co-

municaciones o subsistemas de comunicaciones. Es en estos momentos donde Ramón exhibe la capacidad para acertar en lo que a perspectiva tecnológica se refiere. Su trabajo se centra en contemplar la capa física como un ente global en estrecha relación con las capas superiores de acceso y de red y de las tres palabras con las que se definió su ámbito de actuación se decanta hacia las dos últimas. Todo cuando lo normal era quedarse en la primera. Pronto esa visión empezó a plasmarse y diría que tuvo lugar por primera vez en un curso que preparó de radioenlaces.

Bien puede decirse que a los tres años de finalización de su tesis doctoral en 1978 el nuevo Académico era de las pocas personas, tal vez la única, que se desenvolvía perfectamente y ganaba reputación internacional tanto en producción científica como ingeniería de desarrollo en el ámbito de sistemas radio. Sin duda animado por esa incipiente reputación ganada a fuerza de trabajo y originalidad, Ramón realizó una segunda apuesta que fue el intuir que el transporte radio en comunicaciones crecería hasta formar parte integral, a la par con el transporte físico o por cable, del volumen de actividad de los operadores de comunicaciones. Realmente una premonición confirmada por la explosión de las generaciones de radio celular, primero analógica y luego digitales que se produjeron casi una década más tarde de su brillante decisión. Actualmente es considerado el mejor y tal vez único referente en nuestro país en el ámbito de gestión de recursos radio en redes de acceso o RRM por sus siglas en inglés. Referencia que se traslada al ámbito europeo rápidamente siendo actor destacado en las distintas contribuciones europeas a sistemas de comunicaciones móviles, que pueden considerarse evoluciones de la segunda generación de radio celular conocida como GSM. Actualmente, se considera GSM, junto con el sistema de codificación MPEG, como los dos mayores éxitos del Programa Marco Europeo. No en vano, ambos sistemas han producido mucho más empleo, implantación de dispositivos y cuota en sistemas de información que la industria del PC en todo el mundo.

También en honor a esa perspectiva, diría que olfato, que Ramón ha poseído siempre, tuvo la ocasión de conversar con él acerca del desarrollo y despliegue de la tercera generación o UMTS. He de decir que sus críticas a su nacimiento, su desarrollo e implantación las suscribí completamente y diría que todas se han cumplido. Una crítica que podría resumirse en que GSM fue desarrollado por ingenieros y UMTS por gestores

de negocio. Hoy en día, y a pesar del salto conceptual que UMTS represento sobre GSM, vemos languidecer UMTS cuando todo el desarrollo y trabajo científico ya permite comenzar el despliegue de la cuarta generación denominada LTE. Un sistema cuyo transporte en OFDM le hace compatible con el resto de servicios implantados, versátil y mejora todas las características técnicas del anterior. Sin duda debido al éxito de GSM, y casi a la par del desarrollo de UMTS, han aparecido otros sistemas como WiFi y Bluetooth que amplían el modo de uso de la tecnología radio a lo que se denominan sistemas no asistidos. Dicha calificación obedece a que, hasta el día de hoy, estos sistemas de comunicaciones no necesitan de un operador para su despliegue. Como muy bien nos ha sido presentado, estos sistemas abren el despliegue de sistemas de comunicaciones a proveedores de tecnología. El aumento de la generación de tráfico radio no asistido ha sido espectacular y continua siéndolo. El enlace típico se desarrolla en distancias cortas, conocidas como comunicaciones de alcance corto ("Short Range Communications"), y en general, en modo punto a punto, sin requerir su paso por puntos de acceso. Esta segunda explosión entra en conflicto con la regulación y en concreto con el modelo tradicional de uso y acceso al espectro radioeléctrico.

Otra vez el nuevo académico nos descubre su intuición. El término de radio cognitiva o CR fue acuñado por J. Mitola III en su tesis doctoral presentada en KTH en el 2000. La Comisión Europea organiza el primer debate público entre operadores, proveedores de tecnología y centros de investigación en 2002. Desde ese año CR constituye el tema central de la mayor parte, o una parte importante, de la planificación estratégica de los centros de I+D en sistemas de comunicaciones de todo el mundo. Como muy bien se ha descrito en el discurso de ingreso que me ha precedido, es la primera vez que el desarrollo tecnológico provoca una auténtica revolución en el regulador. Una regulación que implanto reglas de juego imposibles de burlar cuando se concibieron, pero que hoy en día se muestran vulnerables al vertiginoso avance del desarrollo tecnológico en ingeniería de comunicaciones. Básicamente las tecnologías que hacen la regulación vulnerable pueden clasificarse en dos familias. La primera familia la componen aquellas técnicas que permiten esconder su espectro por debajo de los umbrales obsoletos de la regulación. La segunda familia tiene su raíz en sistemas oportunistas de acceso al medio. Dentro de esta segunda familia es donde se encuadra CR. Claramente,

la mayor parte de los operadores ya podrían desplegar sistemas de carácter oportunista para sus servicios, la diferencia con CR es que en el caso del operador, el que hace un uso oportunista de su espectro es su propietario directo. En el caso de CR es un ajeno y tal vez con tecnologías de acceso y transporte diferente. Aun no es claro si CR representa una amenaza o una oportunidad para los operadores, digamos tradicionales, lo que si es cierto, como muy bien ha apuntado en su discurso Ramón Agustí, es que es la mayor oportunidad para el entorno científico y tecnológico, así como para los proveedores de tecnología. La regulación y el estricto diseño de las sucesivas generaciones de radio no han proporcionado una oportunidad para la investigación y el desarrollo tecnológico como CR nos proporciona. En el debate organizado por la Comisión Europea de 2002, R. Steele llegó a comparar las generaciones radio como autopistas con altas barreras en los arcones de modo que ni la imaginación ni la innovación podían ver mas allá del camino adelante. En cambio, y en una defensa encendida de una nueva regulación y un nuevo paradigma de las comunicaciones, comparo los sistemas que incorporan CR y P2P como el campo abierto donde imaginación e innovación evolucionarían a sus anchas sin más restricciones que las que sus desarrolladores se impusiesen.

Nacida como, diría yo, la única carga conceptual que entraña el denominado "Software Defined Radio", la radio cognitiva revoluciona absolutamente todos los niveles de la capa de protocolos. Es de destacar que el carácter no regulado de CR la vincula sistemáticamente en sus desafíos y soluciones al otro gran entorno no regulado que es el de las comunicaciones tácticas. No en vano, la requerida monitorización del espectro para el "scheduling" de los usuarios secundarios en CR, comparte al cien por cien, las técnicas de detección y clasificación automática que, hace treinta años, fueron desarrolladas para escenarios de guerra electrónica. Radio cognitiva conlleva el actualizar muchos de estos desarrollos de hace tres décadas a sus problemas y con la ventaja tecnológica que representan los treinta años de desarrollo tecnológico acaecido. Como ya he mencionado el nombre del nuevo académico se asocia al del mejor experto en gestión de recursos radio. En su exposición ha relacionado brillantemente el despliegue de redes heterogéneas, que operan en base a estándares diferentes y la necesidad de que, manteniendo un modo asistido a estas redes, el operador ha de proveer una respuesta a la corres-

pondiente demanda de servicio mediante la tecnología existente, de manera eficiente y dinámica y manteniendo la calidad de servicio comprometida. Todo ello conduce a nuevas estrategias en la gestión de recursos radio enfrentada, sin duda, a la actual regulación. Incluso, como ha afirmado Ramón Agustí, no es tanto que la red es heterogénea sino también los usuarios lo que aun introduce nuevos y llamativos desafíos. Cada día más las maquinas necesitan compartir mas información que las personas y está en vías de producirse una explosión en los sistemas de comunicación maquina a máquina M2M. Se vaticina que el despliegue tecnológico y el volumen económico que M2M representara serán superiores en órdenes de magnitud al que significo 2G en el mundo.

También ha aludido al despliegue de las denominadas femtoceldas. El despliegue de femtoceldas conlleva que el despliegue de los sistemas radio, en su estricta afección, cruza las puertas de nuestras casas y lugares de trabajo. Sin embargo plantea desafíos de ingeniería tremendos en todos los ámbitos como gestión de interferencia y asignación dinámica del espectro entre otros. Femtoceldas son el síndrome de que la autopista que antes mencionaba comienza a salir al campo. Es curioso que, tan solo hace cinco años, un ingeniero afirmase que estos sistemas no serian viables pues necesitarían más software que la película de la guerra de las galaxias, famosa por el despliegue de software que requirió su producción. Hoy nadie duda de que este despliegue se va a producir. Curiosamente la noción de femtoceldas fue bien acogida en los operadores, sin duda estimulados por la reducción de su factura eléctrica. El hecho es que si el operador quiere ampliar el dominio de comunicaciones asistidas a productos y servicios que ahora no lo son, su único e inmediato recurso es el desarrollo de femtoceldas.

El discurso nos ha paseado por los temas de regulación y asignación dinámica del espectro un recurso limitado pero a la vez inagotable. Nos ha insistido en que la asignación de espectro tiene mucho que ver con la localización y que tal vez es el momento de pasar a licenciar frecuencia por kilometro cuadrado, es decir, introducir el aspecto geográfico en el uso del espectro. La cesión a terceros, la liberalización del sistema de acceso y tecnología se acercan inevitablemente, por presión de lo que hoy en día se puede hacer, a pedir su sitio en una nueva regulación. De todos modos, y de nuevo incidiendo en la visión del autor, es interesante y acer-

tado su apuesta por las denominadas redes cognitivas. Es claro que a lo largo de estos años la tecnología se ha centrado en clamar que la licencia a terceros o el uso oportunista del espectro mejoraría su eficiencia pero no se ha analizado más allá. En concreto, supuesto la posibilidad de que existan un gran número de usuarios secundarios con acceso oportunista a la comunicación, es claro que estamos ante una nueva red que en el discurso se ha denominado red o redes cognitivas, y con toda seguridad ante un nuevo desafío en el tema que a Ramón Agustí más le gusta que es como sería la gestión de recursos en este tipo de escenarios. Al mismo tiempo que ha apuntado al papel clave de la cooperación entre usuarios secundarios y tal vez al despliegue de infraestructura específica. Si es así estamos ante diez años al menos de trabajo de investigación y desarrollo que introducirá más vértigo a la carrera en el desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones.

Su discurso ha terminado con una breve visión del papel de las comunicaciones radio en el despliegue de la red. Sin duda, ninguno de los dos, somos imparciales pero sin duda el ahorro energético pasa por el despliegue de contadores inteligentes y millones y millones de sensores, varios órdenes de magnitud sobre el número de terminales de telefonía móvil, cuya comunicación en la monitorización de la red de distribución cercana al usuario va a ser vía radio. Aun cuando el "road-map" tecnológico de la denominada "smart-grid" no está decidido, resulta obvio que la comunicación de sensor a concentrador será vía radio y seguramente usando de los conceptos de radio y red cognitiva.

En definitiva, e insistiéndoles en que ni personalmente ni científicamente soy imparcial con Ramón Agustí, he disfrutado mucho de la lectura de su discurso y de tener la oportunidad de hacer justicia a su calidad científica y perspectiva tecnológica al preparar esta contestación.

También me parece obligada una reseña breve a su productividad docente, industrial y científica. A lo largo de treinta y cinco años Ramón posee un número similar en sus logros docentes, estudios dirigidos, producción científica y contratos directos con empresas del sector de comunicaciones. Siendo lo más destacable su papel pionero en la participación en proyectos del Programa Marco casi desde la entrada misma de España en la Unión Europea.

Así pues, Señoras y Señores damos la bienvenida a un nuevo académico cuya formación, conocimientos y ánimo ayudaran a la promoción e implantación científica y técnica de esta Real Academia de Ingeniería. Su presencia entre nosotros enriquecerá el papel de referente que corresponde a nuestra Real Academia en todos los aspectos de la ingeniería que afecten a nuestro país. Por último y en relación a Ramón Agustí, espero y deseo que disfruten de su amigable carácter y su intuición tecnológica tanto como yo lo he disfrutado desde hace casi cuarenta años.

Muchas gracias por su atención.

