

Antonio Puerta Notario

**PRELUDIO SOBRE ONDAS,
LUZ, UNIVERSO Y TECNOLOGÍAS
DE TELECOMUNICACIÓN**



ANTONIO PUERTA NOTARIO

PRELUDIO SOBRE ONDAS, LUZ, UNIVERSO
Y TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

SPICUM - UNIVERSIDAD DE MÁLAGA - 2011

Autor: Antonio Puerta Notario

Edita: SERVICIO DE PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Diseño de cubierta y maquetación: María Luisa Cruz. SPICUM

Esta obra se encuentra depositada en el repositorio institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA)



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:

Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):

[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta obra también está disponible en ePub y en papel.

*A quienes siempre ocupan
mi pensamiento y mi memoria*

INDICE

Los inicios: el telégrafo de Morse	9
Electromagnetismo, ondas y luz	13
Electromagnetismo y Relatividad	20
Algunas notas sobre las radiocomunicaciones	22
La radiocomunicación en el espacio	27
Ondas de radio desde el universo: la radioastronomía	30
Las comunicaciones ópticas	35
La telecomunicación cuántica	39
Epílogo.....	44
Bibliografía	46

PRELUDIO SOBRE ONDAS, LUZ, UNIVERSO Y
TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

*Señora Rectora Magnífica, Señor Presidente,
autoridades, señoras y señores:*

PARECE indudable que nuestra especie humana, que comenzó a gestarse sobre el planeta Tierra hace unos dos millones de años con el género Homo y que, además de seguir teniendo graves problemas de equilibrio social e, incluso, contemplar hambrunas, se ve zarrandeada por profundas crisis económicas, que sus propios modelos organizativos provocan, ha alcanzado, sin embargo, entre otros evidentes logros, unos niveles de poderío tecnológico realmente espectaculares.

Resulta que, hoy día, introduciendo un simple código numérico sobre el teclado de un diminuto terminal portátil, se puede establecer una conversación o incluso una videoconferencia con interlocutores, que podrían estar situados a miles de kilómetros de distancia. Para el establecimiento de cada uno de esos enlaces, el proceso debe iniciarse con la localización automática de cada uno

de los interlocutores solicitados, sin contacto físico alguno, entre miles de millones de potenciales receptores. Es entonces cuando, a través de la antena más próxima de la red de telefonía móvil en la localidad del interlocutor remoto, que ya sabe que éste se encuentra en su zona de influencia, se procede a realizar la pretendida conexión inalámbrica.

También, utilizando ese mismo terminal, o mediante otra gran diversidad de artilugios, omnipresentes en la publicidad que nos llega a través de los medios de difusión, y de enorme éxito comercial, se puede navegar por la red de redes, INTERNET, recibiendo y transmitiendo información de cualquier tipo: audio, vídeo o datos entre puntos muy distantes. Esa información para ser transmitida se fragmenta en pequeños paquetes de bits, que viajan por la red gestionados por la telemática, a través del diálogo automático entre los computadores que gobiernan los nodos. Una vez en destino, los paquetes se ordenan de nuevo automáticamente para recuperar la estructura del mensaje original.

Aunque apenas sorprendan ya estas posibilidades, por formar parte de lo cotidiano, a poco que se reflexione sobre ello, en contraste con la historia de la humanidad de hace sólo algunos siglos, se alcanzan a percibir como auténticos prodigios.

Las redes de telecomunicación de cobertura mundial, inmensas maquinarias de dimensiones realmente

planetarias, suelen considerarse en la actualidad como las manifestaciones más visibles y significativas de las modernas tecnologías de telecomunicación. Por su evidente impacto en la sociedad a todos los niveles, representan en buena medida la culminación de la denominada tercera revolución industrial. Su funcionamiento entraña el desarrollo de procesos físicos de enorme complejidad, que se apoyan en gran medida en avances científicos y tecnológicos producidos durante los últimos doscientos años, un periodo de tiempo, no obstante, bastante más dilatado que el que se asigna a la mencionada revolución -finales de la II Guerra Mundial hasta nuestros días.

La enorme complejidad de los logros tecnológicos señalados, en general, resulta casi imperceptible para el usuario medio, no suele valorarse adecuadamente, y queda eclipsada tras las pantallas táctiles de los dispositivos. Ello se debe, por una parte, a la familiarización actual con la utilización extensiva y permanente de las tecnologías de la telecomunicación, al menos en los países más desarrollados, dada su profunda penetración actual, prácticamente, a niveles de saturación en muchos entornos. Y, por otra parte, esa transparencia para el usuario también viene propiciada por los espectaculares avances en las propias tecnologías de integración de dispositivos electrónicos a muy altas escalas. Estas tecnologías permiten hoy día compactar en minúsculos espacios enormes volúmenes de funcionalidad, de tales magnitudes que, sólo unas décadas atrás, no habrían cabido en un

salón de tamaño medio. Hablamos de la capacidad actual de integrar cientos de millones de transistores en un único chip (circuito integrado) con unas dimensiones de pocos milímetros, del tamaño de una moneda.

El propósito de las breves palabras que siguen es la evocación de algunos de los fundamentos y de las aplicaciones de las tecnologías de telecomunicación, en mayor proximidad con las ondas electromagnéticas, y de sus conexiones con parte de las leyes que, según el conocimiento actual, rigen el comportamiento del universo. Estas conexiones siguen abriendo actualmente nuevas y excitantes vías de investigación y desarrollo.

Los inicios: el telégrafo de Morse

Remontándose a los orígenes, y tal como universalmente se reconoce, el hito inicial en el desarrollo de los modernos sistemas de telecomunicación, tal como se entienden hoy día, es el telégrafo de Morse. Se trata del primer sistema patentado, que, basándose en la utilización de la corriente eléctrica como vehículo para el envío de mensajes, consiguió una extensa y perdurable implantación. En 1844 se inauguró la primera línea para su explotación comercial.

Aparte de por el evidente impacto social que produjo en su época, el telégrafo de Morse tiene una muy

notable importancia desde el punto de vista puramente tecnológico. Se trata del primer sistema para transmitir mensajes a distancia que resulta de la confluencia entre la electricidad y el magnetismo. En apariencia, dos manifestaciones naturales muy distintas, entre las que sólo muy recientemente se había establecido una clara correlación, plasmada en las correspondientes leyes.

Durante milenios, los intentos por explicar los fenómenos relacionados con la electricidad –la atracción de ciertos objetos ligeros por una piedra de ámbar frotada por un paño, que ya describe Tales de Mileto- y los fenómenos magnéticos –la atracción de objetos de hierro por la magnetita, mineral natural, y su aplicación en la brújula, utilizada en China desde tiempos remotos- han seguido caminos disjuntos. La cuantificación de estos dos tipos de fenómenos y el establecimiento de leyes plasmadas en las correspondientes formulaciones matemáticas, que describían su interacción mutua, ya entrado el siglo XIX, fue el inicio de un conjunto de avances científicos de enorme transcendencia, que se desarrollaron a lo largo de algo más de un siglo, y que constituyen una parte muy significativa de los fundamentos de la ciencia moderna.

Fue en 1819, cuando Hans Christian Oersted, físico y químico danés, descubrió que la corriente eléctrica circulando por un conductor crea a su alrededor un campo magnético capaz de desviar, por lo tanto, una aguja

magnetizada situada en su proximidad. Este relevante descubrimiento, según parece, se produjo en el curso de una demostración práctica, que realizaba a sus alumnos. Los experimentos de Oersted condujeron poco después a Ampère, físico y matemático francés, a la formulación de la importante Ley que lleva su nombre, y que describe cuantitativamente la relación entre corriente eléctrica y el campo magnético que efectivamente produce. De esta forma, se sentaron las primeras bases de lo que se empezó a denominar electromagnetismo.

Para valorar suficientemente la importancia y el impacto de estos avances, resulta conveniente descender al detalle de su primera aplicación práctica: el electroimán, dispositivo inventado por el físico británico Sturgeon en 1824. El electroimán representa nada menos que la posibilidad de producir acción mecánica, movimiento, mediante la corriente eléctrica (principio del motor eléctrico). El electroimán consiste básicamente, tal como se describe en todos los libros elementales de física, en un devanado de hilo de cobre debidamente esmaltado en torno a un núcleo de hierro. Este sencillo dispositivo, que puede ser activado por una simple pila, con tan sólo unas decenas de espiras crea un campo magnético de apreciable intensidad.

No obstante esta aproximación elemental al fenómeno, la generación del campo magnético por la corriente eléctrica, es decir, por cargas eléctricas en movimien-

to es, en realidad, nada menos que un efecto relativista del campo eléctrico producido por esas cargas, y parte de sus manifestaciones, como el magnetismo natural o el inducido, nos sumergen además hacia la estructura subatómica de la materia, dominio que queda bajo el control de los operadores de la mecánica cuántica.

Se tenían ya, entonces, los medios tecnológicos suficientes para que surgiera el Telégrafo de Morse. Por una parte, la corriente eléctrica, que, suministrada por las pilas (Volta, 1800), se comportaba como un fluido cuyo desplazamiento, aparentemente, se transmitía de forma instantánea por los conductores, incluso de varios Km de longitud, constituyendo, por lo tanto, un vehículo de transporte ideal. Y, por la otra, la posibilidad de producir movimientos acordes a los pulsos eléctricos transmitidos, mediante el electroimán, en el extremo receptor. En concreto, de imprimir símbolos sencillos –el punto y la raya- sobre una tira de papel.

En el Telégrafo de Morse, además de estos importantes aspectos físicos concurren otras características relevantes, como la codificación del lenguaje en texto mediante dos únicos símbolos: el punto y la raya, igual que ahora, en la era digital, que toda la información –no sólo el texto- se codifica también con dos únicos símbolos lógicos: “1” y “0”. Paradójicamente, este primer sistema eléctrico de telecomunicación fue ya digital.

Pero, quedaba aún por llegar la magia de las comunicaciones inalámbricas. Es decir, sin los hilos de cobre necesarios hasta entonces para conducir las señales eléctricas.

Electromagnetismo, ondas y luz

En 1831, Faraday, físico y químico experimentalista, personaje de enorme dimensión e impacto en el desarrollo de la ciencia moderna, formuló su célebre Ley de Inducción, completando así el conocimiento sobre el electromagnetismo fruto de las aportaciones de Oersted y Ampère, entre otros, pero en sentido inverso. Es decir, descubriendo que la variación en el tiempo del campo magnético crea, a su vez, campo eléctrico. La formulación matemática de este efecto constituye lo que se conoce como Ley de inducción de Faraday. Este principio es tan imprescindible que, si la naturaleza bloqueara transitoriamente su cumplimiento, se apagaría completamente el planeta, ya que la inmensa mayor parte de la energía eléctrica que consume la humanidad procede directamente de su aplicación. Pero tampoco nos llegaría la luz de las estrellas... Tal como se reconoce textualmente en muchas fuentes, *"el descubrimiento de Faraday fue fundamental para transformar la electricidad, considerada en aquella época como una mera curiosidad*

de carácter científico, en una potentísima nueva tecnología". En esta línea, Faraday, entre otros muchos logros, inventó el primer motor electromagnético rotativo.

Pero la obra de Faraday, además de constituir en sí un importantísimo legado, es aún mucho más trascendental. Parte de sus resultados fueron la clave para avances posteriores realmente extraordinarios.

Siguiendo esta trayectoria, décadas después, James Clerk Maxwell, físico y matemático escocés, nacido justo en el año, 1831, en que se publicó la Ley de Inducción, apoyándose fundamentalmente en los trabajos de Faraday, y completando la Ley de Ampère, en el sentido de simetrizar la interacción entre los campos eléctrico y magnético, mediante la introducción de la denominada corriente de desplazamiento, logra armonizar todo el conocimiento adquirido hasta entonces sobre el electromagnetismo, mediante la formulación de sus célebres y universalmente conocidas Leyes de Maxwell. Estas Leyes constituyen el núcleo de la denominada Teoría Electromagnética Clásica, uno de los esquemas conceptuales más sólidos y de mayor repercusión en la ciencia y la tecnología creados hasta el momento.

No en vano, este monumental trabajo de Maxwell se suele reconocer como la segunda gran unificación en el campo de la física, después de la llevada a cabo por Isaac Newton en el ámbito de la mecánica.

En su trascendental artículo: "*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*", publicado en 1865, Maxwell, aplicando sus Leyes, predice teóricamente la posibilidad de generar ondas electromagnéticas, veintitrés años antes de que este descubrimiento pudiera ser verificado experimentalmente (Heinrich Hertz, 1888).

Este formidable hallazgo pone de manifiesto de forma ejemplar la importancia de la formulación matemática de los fenómenos naturales para el progreso científico. Feynman, premio Nobel de física en 1965, afirmaba que "*las matemáticas son el lenguaje en el que se expresa la naturaleza*". En efecto, los modelos matemáticos de los fenómenos naturales, obtenidos mediante la abstracción, han permitido alcanzar en otras muchas ocasiones cotas de conocimiento muy avanzadas respecto a la capacidad tecnológica del momento para su contraste experimental.

Las ondas que predijo Maxwell, como consecuencia directa de sus ecuaciones, consisten en una distribución ondulatoria en el espacio de un campo eléctrico y un campo magnético imbricados entre sí, que se desplaza por ese mismo espacio a la enorme velocidad de 300.000 km/s. De igual forma que en las ondas de naturaleza mecánica, se denomina longitud de onda a la distancia entre crestas consecutivas del mismo signo en el valor del campo eléctrico o magnético, y frecuencia al número de ciclos de esa onda que desfilan ante un observador

fijo en un segundo. Obviamente, $f=c/\lambda$. Así, por ejemplo, a una longitud de onda de 30 cm le corresponde una frecuencia de 1 GHz, es decir, de mil millones de ciclos por segundo.

Además, y tal como no se comenzó a asumir hasta bien entrado el siglo XX, esas ondas, sorprendentemente, se propagan también en el vacío absoluto, sin ningún medio material que les de soporte. No en la nada, sino en el espacio vacío. Mejor aún, en esa realidad espacio-temporal que define la Relatividad Especial de Einstein, en la que nos encontramos inmersos y, seguramente, constreñidos sin remedio en nuestra capacidad de percepción directa.

Maxwell, en sus conclusiones, asignó a la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas un valor que dependía, a través de una expresión muy sencilla, de la permeabilidad magnética y de la constante dieléctrica del medio. Como ambas constantes físicas ya habían sido determinadas entonces de forma experimental en el estudio de otros fenómenos, Maxwell pudo llegar de forma inmediata al mencionado valor numérico.

Cuando Maxwell hizo su magistral predicción, ya se había determinado con bastante exactitud la velocidad de la luz (Fizeau y Foucault, 1849). Aunque, desde 1676, ya se conocía su orden de magnitud y una buena estimación para su valor, gracias, por una parte, al trabajo pre-

liminar del astrónomo Romer basado en las ocultaciones de Io, uno de los satélites de Júpiter, cuando se afanaba en la búsqueda de un procedimiento para la determinación de la longitud terrestre en navegación. Y, por otra parte, por el cálculo de la velocidad de la luz basado en la denominada aberración de la luz estelar, fenómeno de gran relevancia, descubierto por James Bradley en 1728. Este efecto consiste en la variación en el ángulo bajo el que se observa una estrella determinada a causa del cambio de velocidad relativa respecto a esa misma estrella, que experimenta la tierra en su movimiento orbital alrededor del sol, a una velocidad de unos 30 Km/s. Se trata, sin duda, de importantes aportaciones desde la astronomía, ciencia tan vinculada al conocimiento y al progreso de la humanidad, a lo largo de toda su historia.

La extraordinaria coincidencia entre el valor para la velocidad de las ondas electromagnéticas, al que había llegado Maxwell, y el valor obtenido experimentalmente, de forma directa, para la velocidad de la luz le hizo concluir brillantemente (a Maxwell) que la luz tenía que ser también una onda electromagnética. Se trata, evidentemente, de un descubrimiento de gran repercusión, de una enorme trascendencia científica.

Para respaldar su conclusión de la naturaleza electromagnética de la luz, en el artículo antes mencionado, Maxwell alude a la absoluta independencia con la que se habían desarrollado las dos líneas experimentales -me-

dida de la velocidad de la luz y medida de las constantes físicas, que le permitieron llegar a la velocidad para sus ondas electromagnéticas-. Aludiendo a la determinación de la velocidad de la luz por Fizeau y Foucault afirma que, en los correspondientes experimentos, “*no se ha hecho ninguna utilización de la electricidad ni del magnetismo*”, y respecto a la última línea sobre la medida de las mencionadas constantes físicas, cuyos experimentos le concernían directamente, dice, con cierto sentido del humor, que “*la única utilización de la luz que se había hecho fue para ver los instrumentos de medida*.”¹

1 Reproducción del párrafo original extraído del artículo mencionado, donde Maxwell presenta su conclusión sobre la naturaleza electromagnética de la luz.

(97) Hence the velocity of light deduced from experiment agrees sufficiently well with the value of v deduced from the only set of experiments we as yet possess. The value of v was determined by measuring the electromotive force with which a condenser of known capacity was charged, and then discharging the condenser through a galvanometer, so as to measure the quantity of electricity in it in electromagnetic measure. The only use made of light in the experiment was to see the instruments. The value of V found by M. Foucault was obtained by determining the angle through which a revolving mirror turned, while the light reflected from it went and returned along a measured course. No use whatever was made of electricity or magnetism.

The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws.

James Clerk Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", Philosophical Transactions. R. Soc. Lond. 1865 155, 459-512.

La posibilidad de propagación de ondas en ausencia de soporte material no era ni siquiera concebible en tiempos de Maxwell. Ya que, entonces, las ondas conocidas con mayor profundidad eran las ondas de tipo mecánico. Ello reforzó la idea del éter lumínico, medio sobre el que, ya hacía tiempo, se suponía que se propagaba la luz, cuya naturaleza ondulatoria se postulaba desde Huygens, en el siglo XVII, y había sido respaldada muy recientemente por Fresnel, a principios del mismo siglo XIX. Este medio, el éter, debería ser un fluido invisible, imponderable y elástico, extraordinariamente sutil, distinto a cualquier medio material conocido, que, sin embargo debería rellenar todo el espacio para dar el necesario soporte a la luz, que nos llega desde las estrellas, y, por consiguiente, ahora también debía dar soporte a las nuevas ondas electromagnéticas.

Mediante el célebre experimento de Michelson-Morley, realizado en 1887, se pretendió medir el viento del éter, que debería producirse sobre la tierra en su movimiento orbital alrededor del sol, alterando la velocidad de propagación de la luz para distintas direcciones en relación con el movimiento de la tierra. Como se sabe, nunca se detectó la presencia del éter. Este hecho provocó una profunda perplejidad entre la comunidad científica de la época.

Electromagnetismo y Relatividad

Pero, además, las Leyes de Maxwell abrieron el camino hacia la Teoría de la Relatividad Especial (A. Einstein, 1905). Siguiendo el trabajo fundamental de Lorentz, Albert Einstein pretendió con gran acierto, según refleja el primer postulado en el que basó su teoría, que el principio de la relatividad de Galileo -la ausencia de un sistema de referencia absoluto-, que consecuentemente cumplía la mecánica de Newton, debía ser extensivo también al electromagnetismo.

Efectivamente, todos los efectos de las Leyes de Maxwell resultan ser covariantes con las transformaciones de Lorentz, que rigen la Teoría de la Relatividad Especial, para los sistemas de referencia inerciales.

Además, a través de esta teoría, se establece, finalmente, la idea de campo electromagnético como una única realidad, que se manifiesta con distintas apariencias dependientes del movimiento relativo de los observadores. El campo magnético, en definitiva, resulta ser un efecto relativista del campo eléctrico producido por las cargas eléctricas en movimiento. Incluso a nivel subatómico, bajo la perspectiva, entonces, de la mecánica cuántica.

Pero, resulta que como consecuencia de la Relatividad Especial, el espacio y el tiempo se contraen de-

pendiendo de la velocidad relativa entre los sistemas de referencia. Por lo tanto, había que corregir la mecánica de Newton.

Por otra parte, el segundo postulado de esta teoría, es decir, el mantenimiento del valor de la velocidad de la luz, independientemente del sistema inercial de referencia considerado, era contradictorio con la existencia del éter lumínico. Es que, sencillamente, el éter no existía.

De hecho, tanto el experimento inicial de Michelson–Morley, como los otros muchos, de mayor precisión, que se sucedieron hasta bastante avanzado el siglo XX, se interpretan en sentido positivo como una sólida ratificación de ese segundo postulado. Todo ello, a pesar de su evidente contradicción con nuestra capacidad de percepción intuitiva de la realidad, es decir, con el denominado sentido común.

En esta ocasión, en la Relatividad, los modelos matemáticos creados para armonizar y explicar de forma coherente fenómenos naturales de distinta índole trascienden de forma muy considerable los límites de nuestros patrones de percepción directa aunque crítica de la realidad, que inspiraron, no obstante, los sólidos modelos clásicos.

Algunas notas sobre las radiocomunicaciones

Las ondas electromagnéticas de Maxwell son, efectivamente, el fundamento del prodigio de la radiocomunicación. Es decir, de la posibilidad de transmitir información, incluso a enormes distancias, sin cables, sin medio material alguno que de soporte a los enlaces que se establecen.

En 1888, 22 años después de la publicación de los trabajos de Maxwell, el científico alemán Heinrich Hertz constató experimentalmente y de forma irrefutable la realidad de las ondas electromagnéticas, con su generación y su detección. Poco después, se iniciaba la historia de la radio.

Los nombres de Marconi, Tesla, Popov y Fessenden, entre otros, están asociados, no sin complicadas controversias, a las primeras demostraciones y patentes para la aplicación práctica en radiocomunicaciones de las ondas electromagnéticas, también denominadas ondas hercianas, en honor del científico alemán que demostró experimentalmente su existencia.

En 1896, Marconi patentó el primer sistema completo de radio-telegrafía y en 1902, junto con sus colaboradores, realizó el primer enlace a través del océano Atlántico.

Los primeros transmisores empleados para radiotelegrafía eran de los denominados de chispas eléctricas. No por ninguna propiedad mágica de ese fenómeno, ciertamente espectacular, de efectos especiales, sino porque era la única forma conocida en los inicios para excitar oscilaciones de radiofrecuencia en circuitos resonantes, aunque éstas fueran de muy rápido amortiguamiento. Después, vinieron los alternadores de alta frecuencia y, finalmente, fue la electrónica, que surgió en este marco, la que abrió las vías hacia las soluciones conceptualmente definitivas.

En todo este proceso, tal como es frecuente en las etapas más recientes de la evolución de nuestra civilización tecnológica, se observa la secuencia encadenada de las siguientes fases: avance científico con carácter de propuesta teórica, muchas veces de complejidad que supera la capacidad tecnológica del momento para su materialización; verificación experimental, cuando el estado de la tecnología lo permite; y posterior desarrollo y explotación comercial. Es en esta última fase donde se encuentra precisamente el papel del emprendedor tecnológico, muy ligado a la figura del ingeniero actual en algunas de sus vertientes profesionales.

Tal como se apuntaba antes, en el desarrollo de las radiocomunicaciones, pero también en el desarrollo de la telefonía de larga distancia, tuvo un papel fundamental la electrónica, que nació realmente en el ámbito

de las tecnologías de telecomunicación. Los dispositivos electrónicos, primero las válvulas de vacío -el triodo de Lee De Forest, 1906- y después los dispositivos de estado sólido -el transistor, 1947, Shockley, Bardeen y Brattain-, constituyen el núcleo de bloques funcionales básicos en todos los equipos de telecomunicación, como los osciladores y los amplificadores.

Adicionalmente, la utilización del comportamiento no lineal de estos dispositivos abrió la posibilidad, por una parte, de realizar funciones más complejas dentro del propio ámbito de las tecnologías de telecomunicación, como la conversión de frecuencia y la modulación. Por otra parte, ese comportamiento no lineal condujo también al diseño de otros bloques funcionales básicos de muy distinta orientación, como el almacenamiento de información y las operaciones lógicas binarias, lo que abrió el camino hacia la computación electrónica y, posteriormente, a todas las complejas funciones actuales que permite el procesamiento digital de señales.

Posteriormente, la vertiginosa carrera llevada a cabo durante las últimas décadas en las tecnologías de integración de circuitos electrónicos ha conducido a una situación actual de enorme capacidad. Piénsese, por ejemplo, que mientras un receptor de radio elemental -años 70 del siglo anterior- necesitaba en torno a 10 transistores, hoy día, en un circuito integrado de muy

elevada escala de integración, pueden localizarse más de mil millones de transistores.

Pero, ¿cómo puede transmitirse la información mediante las ondas electromagnéticas? Una onda continua sólo transmite la información asociada a su presencia y, por lo tanto, de su frecuencia o longitud de onda y de intensidad. Lo que puede resultar suficientemente valioso en muchas ocasiones. Para transmitir más información, se procede a modificar en el tiempo al menos uno de esos parámetros de la onda, de acuerdo con las variaciones de la señal, reflejo del mensaje a transmitir. Es lo que se denomina modulación. De esta manera, las ondas se transforman en auténticas portadoras de información.

Aún hoy día, gran parte de la investigación en el ámbito de las tecnologías de telecomunicación está dedicado al diseño de complejos procedimientos de modulación, buscando la mayor robustez en las comunicaciones, por ejemplo, frente a las interferencias, y la mayor eficiencia en la utilización del denominado espectro radioeléctrico, como se denomina al margen total de frecuencias disponibles para las todas las posibles aplicaciones de la radiocomunicación.

Por otra parte, en la época actual, dada la proliferación de aplicaciones inalámbricas y la densidad de su utilización, todo nuestro medio circundante está inun-

dado por infinidad de ondas electromagnéticas, que se propagan en todas las direcciones.

Como consecuencia de esta situación de complejidad creciente, durante los últimos tiempos ha surgido incluso el concepto de contaminación electromagnética. Y se ha extendido cierta inquietud social al respecto de potenciales efectos biológicos nocivos para la salud a causa de estas radiaciones. Hasta la fecha, se ha venido dedicando un importante esfuerzo por parte de muchos organismos, y en el seno de la comunidad científica, para tratar de cuantificar esos posibles efectos. Por el momento, los estudios realizados aunque no concluyentes en muchos aspectos, sí han conducido a la elaboración de una serie de normativas de carácter preventivo, que definen niveles de seguridad para las distintas bandas de frecuencia, y que las administraciones tienen la obligación de aplicar y de velar por su escrupuloso cumplimiento.

En cualquier caso, conviene remarcar que, por su propia naturaleza, la radiación electromagnética no se difunde al albur de la inclemencias meteorológicas, como puede ocurrir con los contaminantes químicos, biológicos o nucleares, que, además, desgraciadamente, permanecen aunque se desactive el foco emisor que los ha generado.

Por el contrario, la radiación electromagnética depende de la geometría de todo el escenario de su aplica-

ción, como consecuencia de las leyes del electromagnetismo, y, desde luego, desaparece instantáneamente, si se apaga el transmisor que la genera.

Por otra parte, en campo abierto, obviando así el efecto de las posibles reflexiones, la intensidad de la radiación depende inversamente del cuadrado de la distancia a la antena transmisora. Es decir, que, multiplicando por 10 la distancia a ese foco emisor, se divide por 100 la intensidad de la radiación. Este comportamiento tan característico sugiere por si mismo criterios sobre medidas de precaución.

La radiocomunicación en el espacio

En relación con lo anterior, la situación respecto a los 24 satélites de la constelación del sistema de posicionamiento global GPS es muy distinta a la de otras aplicaciones. Estos satélites iluminan la superficie de la Tierra con sus señales, mientras recorren sus órbitas a 20.000 Km de altitud. En este caso, las señales recibidas en tierra son extremadamente débiles a causa de la lejanía de los satélites y de la obvia necesidad de optimizar el consumo de energía en los transmisores embarcados. La distribución de los satélites es tal que cualquier receptor sobre la superficie terrestre, o en su cercanía -piénsese en las aeronaves-, divisa permanen-

temente al menos 4 de esos satélites. El procesamiento de las señales recibidas permite medir las diferencias de distancias a cada uno de los satélites observados y, a partir de ello, determinar la posición del receptor sin ambigüedad. Pero en el sistema GPS se da una peculiaridad sutil pero muy importante. Allí arriba, a bordo de cualquier satélite en órbita, el tiempo transcurre más rápidamente. Es decir, observados desde la Tierra, por extraño que parezca, todos los relojes, incluidos los biológicos, laten más deprisa. Es una consecuencia del efecto combinado de la Relatividad Especial, debido a la velocidad de los satélites respecto a la superficie terrestre, y de la Relatividad General, por la acción del campo gravitatorio de nuestro planeta. La diferencia es de tan sólo 38 μ s al día, pero resulta absolutamente imprescindible tener en cuenta este efecto en la sincronización de las señales para conseguir la precisión actual del sistema. Se trata de una de las muchas verificaciones experimentales de la Teoría de la Relatividad con las que se cuenta actualmente.

Pero, desde mucho más lejos que las señales GPS llegaron en su día las espectaculares fotografías enviadas por las sondas Voyager desde Saturno, a 1400 millones de Km de la Tierra, hace ya 30 años. En aquella ocasión, las correspondientes señales –las fotografías codificadas mediante unos y ceros-, tardaron en recorrer su cami-

no 1h 29m. Tal como se ve, la enorme velocidad de la luz, es decir, la máxima velocidad posible en el universo –recursos de ciencia-ficción aparte-, empieza a resultar dramáticamente lenta a escala interplanetaria. No se podría mantener una conversación fluida, ni mucho menos. Transcurrirían tres horas entre pregunta y respuesta. Actualmente, Voyager 1 ya se encuentra a una distancia de 17.000 millones de km de la Tierra –unas 16 horas-luz-, en su viaje hacia otras estrellas, de las más próximas, a cuyas inmediaciones llegará dentro de unos 80.000 años. Desde allí, imaginando que aún dispusiera de energía, sus señales tardarían en llegar hasta la Tierra unos 5 años. Por el momento, se siguen recibiendo datos desde Voyager 1 y 2 sobre las capas más externas de la helioesfera.

La telecomunicación en el espacio, y en particular los enlaces con las sondas automáticas, que han explorado el sistema solar, mediante prodigiosas carambolas gravitatorias, diseñadas, no obstante, aplicando la mecánica de Newton, inspirada a su vez en los descubrimientos de Galileo, ha representado un importante desafío tecnológico, con importantísimas aportaciones extensivas a otros campos. Ello es debido, obviamente, a la extremada debilidad de las señales que se reciben desde tan lejanos ingenios, junto con el efecto interferente que ejercen sobre estas señales multitud de factores.

Una buena parte de los algoritmos de codificación digital orientados a hacer más robustas las comunica-

ciones, minimizando la generación de errores, se han desarrollado en este marco. En el ámbito de la transmisión digital, en los denominados canales convencionales, entre los que se encuentran los canales de radiocomunicaciones, el objetivo consiste en conseguir la mayor aproximación al conocido como Límite de Shanon, que establece la capacidad alcanzable teóricamente, es decir, la mayor velocidad de transmisión sin errores, en función de las condiciones del canal.

Ondas de radio desde el universo: la radioastronomía

Pero, las ondas hercianas, es decir, las ondas electromagnéticas en las bandas de frecuencia utilizadas en radio, han estado presentes desde siempre en la naturaleza, igual que la luz. Como se sabe, los rayos de las tormentas en la atmósfera terrestre generan potentes frentes de ondas de radio, que se percibían muy apreciablemente como sonoros e inquietantes chasquidos en los antiguos receptores de AM, en lógica sincronización con los relámpagos. Más lejos de nosotros, las denominadas tormentas solares generan auténticos torrentes de radiación electromagnética, que, a pesar de la distancia, pueden llegar a comprometer seriamente las radiocomunicaciones terrestres. En fechas recien-

tes, se han registrado algunos episodios de este tipo especialmente intensos.

Igual que el Sol, gran parte de los objetos astronómicos que nos rodean emiten radiaciones electromagnéticas en las bandas de radio, con mayor o menor intensidad. Este hecho se sospechaba, desde que se conoció la naturaleza electromagnética de la luz y que, consecuentemente, no había razones para suponer que no hubiera ondas de esa naturaleza a cualquier frecuencia. Sin embargo, su descubrimiento no se produjo hasta 1933, y fue de forma involuntaria.

Así, mientras Karl Jansky, ingeniero de la Bell Telephone, investigaba mediante una gran antena fija, especialmente sensible para la época, el efecto del ruido atmosférico sobre ciertos enlaces, a través del océano Atlántico, descubrió una débil señal ruidosa, que variaba con un periodo de 23 h. 56 m., 4 minutos menos que un día solar, es decir, un día sidéreo. Ello condujo a la conclusión de que el desconocido y misterioso foco emisor no podía ser el Sol, tenía que ser un punto fijo en la bóveda celeste. Resultó estar situado sobre la constelación de Sagitario. Nació así la Radio-astronomía. Es decir la observación del cosmos en el espectro de las ondas de radio.

Se supo después que el centro de nuestra galaxia, La Vía Láctea, se encuentra en la dirección de la cons-

telación de Sagitario y que allí se localizan varias radiofuentes astronómicas de singular potencia, entre ellas un agujero negro superdenso. Circunstancia, al parecer, bastante frecuente en galaxias del tipo espiral como la Vía Láctea.

Pero, además, si se escucha con un radiotelescopio el fondo del universo, en cualquier dirección, sin astros próximos interpuestos, se recibe una persistente, aunque muy débil, y hasta hace relativamente poco, misteriosa, radiación con la densidad espectral característica de la radiación del cuerpo negro, a una temperatura de $2,7\text{ }^{\circ}\text{K}$, que corresponde a una longitud de onda de 1.9 mm . Este sorprendente fenómeno, que se denomina Radiación de Fondo de Microondas del Cosmos (CMBR) se considera hoy día como una contundente prueba del Big Bang, como origen del universo actual, hace unos 13.700 millones de años.

Según este modelo, esa radiación ha estado propagándose por el universo en expansión desde la fase remota de su evolución en la que se produjo el desacoplamiento entre materia y radiación. Precisamente, el rango de frecuencias en el que se detecta está en concordancia con el desplazamiento hacia el rojo, es decir, el aumento de longitud de onda, producido en los fotones iniciales a causa de la referida expansión del propio espacio desde los orígenes.

La CMBR fue descubierta por Arno Penzias y Robert Wilson en 1965 y, junto con su estudio posterior, les hizo merecedores del premio Nobel de Física en 1978.

En la actualidad, el estudio de las sutiles anisotropías que presenta la distribución espacial de esta radiación de fondo es un tema candente de investigación en cosmología, con importantes contribuciones de las tecnologías de telecomunicación, del que se esperan importantes resultados sobre la estructura inicial del universo. En esta línea, la Agencia Espacial Europea, ESA, lanzó en 2009 la sonda espacial Planck, que, situándose en órbita alrededor del Sol, tiene como principal objetivo el levantamiento de un mapa de alta resolución tanto angular como espectral de la CMBR. Precisamente, el referido lanzamiento pudo ser observado en directo desde este mismo Salón de Actos, por deferencia de la ESA, que nos facilitó la correspondiente señal.

Pero, a medida que avanza nuestro nivel de conocimiento sobre el cosmos, la especie humana y todo su hábitat resultan cada vez más dramáticamente insignificantes en la realidad espacio-tiempo del universo. Como breve ilustración de esta turbadora realidad, basta pensar que la luz y las demás ondas que recibimos ahora desde Andrómeda, la galaxia espiral más próxima a la nuestra, observable a simple vista en las noches claras sin luna y lejos de la polución lumínica de las ciudades, esa luz partió desde allí cuando el *Australopithecus* aún

poblaba nuestro planeta, antes de que cediera el relevo al género Homo, del que procedemos.

Efectivamente, las medidas de la distancia a Andrómeda, basadas en las Cefeidas tipo II, auténticas candelas de referencia en el universo -y, precisamente, utilizando la ley de disminución de la intensidad de la radiación con el cuadrado de la distancia, de aplicación en las antenas de radio- sitúan a esta relevante galaxia a una distancia de 2.5 millones de años luz. Por lo tanto, recibimos información desde Andrómeda, en efecto, aunque de aquella lejanísima época, por lo menos, a escala humana.

El límite impuesto por la velocidad de propagación de la luz, en el contexto de las inconmensurables distancias que se miden en el universo, nos permite así viajar al pasado. Y, a través del análisis de las señales que nos llegan -piénsese, por ejemplo, en la espectrografía-, conocer cómo eran los objetos astronómicos de muy distintas categorías en diferentes épocas de su evolución.

Pero, según estimaciones científicas muy fiables, basadas en observaciones de espacio profundo del telescopio espacial Hubble, en el universo visible hay entre 100.000 y 200.000 millones de galaxias. Es decir, tantas galaxias como estrellas se estima que hay en nuestra Vía Láctea. Sin duda, un panorama realmente estremecedor, muy difícilmente concebible.

Las comunicaciones ópticas

Regresando a asuntos más terrenales, la diferencia entre lo que entendemos por luz visible y las ondas hercianas radica en la enorme diferencia entre las respectivas longitudes de onda implicadas. Así, la luz, es decir, las ondas electromagnéticas que podemos ver, tienen longitudes comprendidas entre 390 y 790 nm, valores que son por término medio, 500.000 veces inferiores a las utilizadas ahora típicamente en radio. Esta banda se denomina espectro visible, está centrada aproximadamente en torno a 555 nm, valor de máxima sensibilidad para el ojo humano -que produce la sensación de color verde-, al que le corresponde una frecuencia de 540 THz (terahercios). Valor este, por el contrario, unas 500.000 veces superior al de las frecuencias utilizadas en radio.

Esta enorme diferencia implica formas muy distintas de interacción con la materia. Así, la luz no permite la magia de la radio. Sólo se pueden establecer enlaces con línea de visibilidad directa. Es decir, al contrario de lo que ocurre con las ondas hercianas, la luz no atraviesa los muros, ni tan siquiera la vegetación. A veces, ni la niebla.

Sin embargo, precisamente, esos elevadísimos valores de frecuencia confieren a la luz una ventaja de igual magnitud frente a las ondas de radio en lo que se refiere a la capacidad para transmitir información. Tal como se

desprende de los principios básicos sobre las modulaciones, la cantidad de información que una onda portadora puede transportar por unidad de tiempo, para un mismo procedimiento de modulación, es decir, el régimen binario, es proporcional a la frecuencia de esa portadora. Por lo tanto, una portadora de luz sería en promedio unas 500.000 veces más capaz que una portadora de radio.

Pero, según puso de manifiesto la mecánica cuántica, posiblemente, la teoría que mayor convulsión ha provocado históricamente en la ciencia, la energía y, por lo tanto, la luz que emiten todas las fuentes no tiene naturaleza continua, no se puede subdividir indefinidamente, sino que está cuantificada. Es decir, compuesta por pequeñas porciones indivisibles: los cuantos. Los cuantos de luz son los fotones, las partículas de luz. Partículas denominadas relativistas, sin masa pero con momento lineal. En buena medida, la mecánica cuántica armoniza la vieja teoría corpuscular sobre la luz, mantenida también por Newton, con la teoría ondulatoria.

Aunque desde una perspectiva semi-clásica, los fotones pueden considerarse como pequeñas ondas de muy corta duración, que son emitidas aleatoriamente por las fuentes naturales. Su frecuencia o longitud de onda determina el color. Aún suponiendo que todos los fotones emitidos por una fuente sean del mismo color, la aleatoriedad de su emisión provoca la total incorrelación de las respectivas fases. Ello motiva que su superposi-

ción produzca finalmente una especie de ruido óptico, que, aún conservando el color, aunque de menor pureza, es un resultado muy distinto a una onda sinusoidal sostenida.

Pues bien, mediante el láser, a través del fenómeno que se denomina emisión estimulada y la utilización de una cavidad resonante a la correspondiente frecuencia óptica, se ordenan los fotones, se sincronizan y se superponen en perfecta concordancia de fase. El resultado es una onda electromagnética continua casi perfecta, similar a las generadas en radiocomunicaciones mediante los osciladores electrónicos, pero a frecuencias ópticas.

Se entiende fácilmente que, cuando en los años 70 del siglo anterior, se dispuso de dispositivos láser eficientes, de espectro convenientemente estrecho y, además, rápidamente modulables –la modulación más sencilla es el troceado en el tiempo, es decir, todo o nada, así funcionaba la radiotelegrafía- surgiera la aspiración de trasladar a frecuencias ópticas muchas de las técnicas desarrolladas con tanto éxito en el margen de las frecuencias de radio.

En este contexto y para superar la necesidad de visión directa, principal limitación de los potenciales enlaces ópticos de gran capacidad, resurgió con fuerza la idea de canalizar la luz, de guiar la luz, tal como se venía haciendo ya durante décadas con las ondas de radiofre-

cuencia, mediante las guías coaxiales de cobre, que daban soporte, fundamentalmente, al servicio de telefonía.

Así irrumpieron las fibras ópticas, estructuras de vidrio de simetría cilíndrica, de diámetro comparable al de un cabello humano, por las que, no obstante, en la actualidad, puede transmitirse muy eficientemente la información a enormes velocidades, y que han ido sustituyendo progresivamente a los cables coaxiales en muchas aplicaciones.

Hoy en día, el mayor volumen de la información transportada a escala global circula en forma de pulsos de luz por las fibras ópticas que enlazan entre sí ciudades, países y continentes. En este último caso, tendidas sobre el fondo de los océanos. Esos pulsos de luz, en el espectro IR próximo, en torno a los 1500 nm de longitud de onda, se transmiten a ritmos vertiginosos de muchos miles de millones de pulsos por segundo.

Pero, también hay aplicaciones de gran interés para las comunicaciones ópticas no guiadas, en espacio libre, para enlaces punto a punto con línea de visión directa. En estos casos, además de mantenerse la enorme capacidad de transmisión asociada al espectro óptico, se suma la gran ventaja, también respecto a los sistemas a frecuencias de radio, para conseguir enlaces fuertemente directivos, ya que esta capacidad depende de la relación entre tamaño de la antena y longitud de onda de

la radiación utilizada. Con ello se consigue una reducción muy elevada en las pérdidas asociadas al trayecto.

Una importante aplicación actual en este campo son los enlaces ópticos tierra satélite, para cuya optimización se hace necesario el desarrollo de técnicas que compensen los efectos adversos introducidos por las turbulencias atmosféricas a frecuencias ópticas. En este contexto, una de las líneas abiertas de trabajo consiste en la adaptación a los enlaces ópticos atmosféricos de técnicas inicialmente desarrolladas en el contexto de la observación astronómica, para mejorar sus prestaciones. Estas técnicas están basadas, fundamentalmente, en la utilización de dispositivos de óptica adaptativa para compensar en tiempo real la distorsión que las turbulencias atmosféricas inducen en los frentes de onda de la luz que se recibe, reduciendo las prestaciones alcanzables por el sistema.

La telecomunicación cuántica

Por otra parte, en multitud de aplicaciones con base en la física, la comunidad científica lleva ya muchas décadas trabajando con leyes de naturaleza estadística que, sin embargo, emanan directamente de la mecánica cuántica, y que describen el comportamiento de sistemas en los que suele haber involucrado un gran número

de partículas. Pero la descripción estadística que realizan hace que se comporten como sombras proyectadas de otra realidad mucho más extraña, que queda así difuminada en sus detalles. Ello contribuye, al mismo tiempo, a racionalizar, a hacer más asumibles los principios de la mecánica cuántica, profundamente desconcertantes. Uno de los ejemplos más relevantes de este tipo de leyes por su repercusión histórica es el relativo a la densidad espectral de la radiación del cuerpo negro. El descifrado de los resultados experimentales a través de la hipótesis de la cuantificación de la energía, que resultó ser uno de los principios fundamentales de la mecánica cuántica, condujo a Plank a la formulación de su célebre Ley.

Pues bien, hoy día, el estado de la tecnología permite descender al mundo de las partículas elementales de forma prácticamente individualizada y experimentar directamente con los fundamentos más característicos y exclusivos de la mecánica cuántica, y plantear con ello el desarrollo de nuevas aplicaciones. Principios, los de la mecánica cuántica, en general, frontalmente contrarios al denominado sentido común. Claramente absurdos, desde ese punto de vista. Hablamos de estados tales como estar y no estar en una localización, al mismo tiempo, o estar en dos localizaciones, simultáneamente -sólo en lo relativo a partículas subatómicas, por supuesto-. El mismo Feynman, Premio Nobel de física en 1965, por sus aportaciones en la electrodinámica cuántica, decía poder

afirmar con rotundidad que, “realmente, nadie entendía la mecánica cuántica”. Una vez más, los modelos matemáticos de la realidad, nos transportan mucho más allá de lo que permite nuestra capacidad de percepción e, incluso, de lo que puede admitir nuestro sentido común.

Veamos un ejemplo de interés actual. La mecánica cuántica establece la posibilidad de generar lo que se ha dado en denominar pares de partículas subatómicas entrelazadas, que pueden ser también fotones. Según predice esta teoría, aunque las mencionadas partículas, que conservan su individualidad, se separen a enormes distancias entre sí -en los tratados clásicos se habla de los extremos de la Galaxia-, mantienen una misteriosa ligadura que provoca que la interacción ejercida -por una tercera partícula- sobre una de ellas, instantáneamente, esa interacción se refleje en la otra. Independientemente de lo lejos que se encuentren entre sí. De esta forma, se establecería lo que ahora se denomina canal cuántico de comunicaciones. Instantáneo, en principio, y absolutamente inviolable. Su mecanismo, completamente oculto, parece deberse a misteriosos resortes de la propia naturaleza.

Se trata del efecto EPR, en referencia a Einstein, Podolski y Rosen, presentado inicialmente como paradoja, que cuestionaba la completitud de la mecánica cuántica. El mismo Einstein rechazaba su posibilidad real, lo denominaba “efecto fantasmal a distancia”, y lo atribuía

a un posible error por resolver en el entramado de ese nuevo modelo de la realidad. Sin embargo, primeramente, desde la elaboración teórica, representada fundamentalmente por el denominado Teorema de Bell (John Bell, 1964) y, sobre todo, por su posterior verificación experimental, esta desconcertante posibilidad, finalmente, se ha manifestado como absolutamente real.

Sin embargo, la incertidumbre que gobierna los estados cuánticos, también en los pares de partículas entrelazadas, impide utilizar el canal cuántico aislado para transmitir información en sentido clásico. Es decir, de acuerdo con el efecto EPR, la determinación mediante la medida correspondiente del estado de la partícula local, instantáneamente, determina el estado de la partícula remota. Pero es que el primero está afectado por la incertidumbre. Es como si la naturaleza, aceptando interacción instantánea, no permitiera utilizarla para lo que serían comunicaciones super-lumínicas, protegiendo así al límite de Einstein de una vulneración total.

No obstante, se demuestra que la combinación según un protocolo adecuado del canal cuántico descrito con un canal clásico –óptico o de radio- permite la transmisión absolutamente inviolable de información, a través de un procedimiento que se ha denominado teletransporte cuántico.

En septiembre de 2005, un grupo de investigadores de la Universidad de Viena, en el marco de un proyecto

de la ESA, realizaron con éxito el primero de una serie de experimentos con fotones entrelazados entre las islas de Tenerife y La Palma, con un vano de 144 km, distancia record hasta la fecha en este tipo de experimentos. Con ello, se ha verificado la posibilidad de enviar fotones a través de un vano atmosférico de esa longitud, manteniéndose, sin embargo, el entrelazamiento generado previamente con los fotones que se retienen en el extremo transmisor. Este resultado tiene una gran trascendencia porque demuestra la viabilidad de enlaces ópticos cuánticos tierra-satélite y satélite-tierra absolutamente inviolables, según el procedimiento antes perfilado.

Se puede considerar que se abre así una auténtica nueva era en el ámbito de las comunicaciones seguras. Piénsese, por ejemplo en la posibilidad de desplegar una red de cobertura mundial, apoyada por una constelación de satélites, que retransmitirían entre las estaciones terrestres situadas en los nodos claves criptográficas totalmente inviolables (criptografía cuántica). Naturalmente, este macroproyecto supone también un reforzamiento del interés en las comunicaciones ópticas inalámbricas con vanos atmosféricos y de las técnicas asociadas para la compensación de los efectos de las turbulencias.

Tal como puede comprobarse, a medida que se va progresando en la capacidad tecnológica para la manipulación de la materia a escala atómica, se van abriendo excitantes posibilidades de desarrollo incluso de revolu-

cionarias aplicaciones en muchos campos y, por supuesto, en el de las tecnologías de telecomunicación.

Epílogo

Finalmente, de lo aquí presentado se desprende que las ondas electromagnéticas, descubiertas de forma teórica por Maxwell, constituyen uno de los principales fundamentos del desarrollo de las tecnologías de telecomunicación y de gran parte de sus aplicaciones actuales.

Pero también, como manifestaciones directas de las propias leyes de la naturaleza, su estudio, la búsqueda de la armonización con esquemas conceptuales anteriores ha sido el factor desencadenante de la creación de teorías de enorme impacto en el desarrollo de la ciencia moderna. Conduciendo con ello, en definitiva, al logro de extraordinarios avances en el conocimiento científico del universo en el que nos desenvolvemos, en todas sus escalas.

Por otra parte, las Tecnologías de la Telecomunicación y la Electrónica, que siguen en continua evolución, son propiamente el ámbito de la Ingeniería de Telecomunicación. Ámbito de carácter marcadamente transversal, por su presencia en todos los escenarios que requieran la captación de señales, su procesamiento, su transmisión,

su análisis o su visualización. Por consiguiente, además de Internet y las comunicaciones móviles, las tecnologías relacionadas con la imagen y el sonido, la radiodifusión, la televisión digital terrestre, las telecomunicaciones espaciales, los sistemas de posicionamiento global (GPS, Galileo), la observación astronómica, la defensa, la seguridad y, muy importante y evidente –aunque a veces se ignore–, las aplicaciones biomédicas, entre otros, son campos directamente relacionados con las tecnologías de la telecomunicación y la electrónica.

Por último, resulta bastante evidente que, si en la actualidad se quiere participar con contribuciones reales en la vanguardia de las tecnologías de la telecomunicación, hay que conocer en profundidad los fundamentos y las claves de toda esa realidad enormemente compleja, que se oculta tras las pantallas y las carátulas de los terminales de usuario

Subrayo, en consecuencia, la importancia de seguir manteniendo una enseñanza y una investigación de alto nivel en ingeniería, así como en el resto de ramas del conocimiento, como factor imprescindible para la construcción de ese nuevo marco, que permita la diversificación y el fortalecimiento de nuestra economía, y que favorezca también, con más amplias miras, orientar la tecnología hacia el servicio de toda la humanidad.

Muchas gracias

BIBLIOGRAFÍA

James Clerk Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", *Philosophical Transactions. R. Soc. Lond.* 1865 **155**, 459-512

James Clerk Maxwell,, "A treatise on Electricity and Magnetism", *Unabridged Third Edition*, Clarendon Press, 1891. Dover, 1951, 486-60636-8.

Albert Einstein, "On the Electrodynamics of Moving Bodies", English translation of his original 1905 German-language paper (published as *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, in *Annalen der Physik*.17:891, 1905). Disponible de dominio público en <http://www.fourmilab.ch/>

John S. Belrose, "Fessenden and Marconi: Their Differing Technologies and Transatlantic Experiments During the First Decade of this Century", International Conference on 100 Years of Radio, Communications Research Centre Canada, 5 -7 September 1995

Ministerio de la Presidencia, RD 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radio-eléctricas.

B. Blake Levitt and Henry Lai, "Biological effects from exposure to electromagnetic radiation emitted by cell tower base stations and other antenna arrays", *Environ. Rev.* Vol. 18, 2010

John S. Bell, "On The Einstein Podolsky Rosen Paradox", *Physics*, 1, pp. 195-200, 1964.

John S. Bell, "On the problem of hidden variables in quantum mechanics" *Reviews of Modern Physics* **38** #3, 447, July 1966.

- Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl, Harald Weinfurter & Anton Zeilinger, "Experimental quantum Teleportation", *Nature*, Vol. 390, December 1997
- J. Perdigues-Armengol, Z. Sodnik and C. De Matos, "Leap Ahead in Space Communications, Quantum Technologies for Space Systems", ESA, European Space Agency, Bulletin 137, February 2009.