



REIAL ACADEMIA DE DOCTORS

Les telecomunicacions en la societat de la informació



Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari electe

Excm. Sr. Àngel Cardama Aznar

Doctor en Enginyeria de Telecomunicacions

A l'acte de la seva recepció, 26 de novembre de 2002, i

discurs de contestació de l'acadèmic de número

Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra

Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona

2002

Dr. Àngel Cardama Aznar

Les telecomunicacions en la societat de la informació

REAL ACADEMIA DE DOCTORS

-Publicacions-



Excm. Sr. Degà President,
Excms. Srs. Acadèmics,
Senyores i Senyors:

Aquesta cerimònia d'ingrés a l'Acadèmia em produeix una gran emoció i no puc deixar de començar agraïnt de tot cor als seus membres que m'hagin ofert la possibilitat d'entrar a formar part d'aquesta corporació i que m'hagin honorat amb la seva confiança. Sempre és motiu de satisfacció personal i d'orgull ésser invitat a formar part d'una institució tan prestigiosa com aquesta que en el dia d'avui m'acull, i no vull amagar l'alegria que em produeix. Desitjo poder correspondre amb el meu treball a l'honor que em feu amb aquest acte i satisfer les expectatives que haureu dipositat en elegir-me.

Tota la meua vida professional ha girat al voltant de la Universitat i ha estat centrada en una àrea molt concreta de la tècnica; per aquest motiu té un valor molt especial per a mi la interdisciplinarietat de la Reial Acadèmia de Doctors i és un privilegi poder participar en aquest microcosmos d'una institució universal.

També voldria reconèixer explícitament la infinita paciència que ha tingut el Degà amb els reiterats retards que

ha sofert la preparació del meu discurs; sempre he rebut de l'Excel·lentíssim Dr. Casajuana paraules de suport i comprensió, que he agraït vivament. La vostra amabilitat i generositat us fa realment entranyables, a vos i a la institució que presidiu.

Quan vaig començar a plantejar-me el contingut del meu discurs vaig descartar enfocar-lo cap a un tema especialitzat, més adequat per un altre auditori, i vaig optar per tractar, amb la visió que donen uns quants anys d'experiència, la nova realitat social en la que ens trobem ara com a conseqüència del formidable desenvolupament dels medis de telecomunicació que ha tingut lloc a les darreres dècades. Vull compartir amb vosaltres, amb una certa nostàlgia, que justament aquests dies fa quaranta anys que vaig començar els meus estudis d'enginyeria de telecomunicacions, que en aquell moment es trobaven sòlidament arrelats en el telègraf, el telèfon i la ràdio, però que només començaven a incloure la televisió, les comunicacions per satèl·lit, la microelectrònica i la informàtica. Vaig triar aquesta carrera convençut del seu interès i amb una il·lusió i curiositat per les tecnologies que fan possibles les comunicacions que mai ha decrescut. En aquell moment no podia pas imaginar que viuria canvis tan ràpids i que afectarien tan profundament la nostra manera de fer i de viure com els que s'han produït fins ara. La meva intenció és presentar-vos una panoràmica de tots ells, distanciant-me, tot el que em sigui possible, dels alts i baixos cíclics d'aquest sector, com el que ens ha portat en un període inferior a dos anys d'una exagerada eufòria a un greu sentiment de crisi.

LAS TELECOMUNICACIONES

EN LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN

Las telecomunicaciones pretenden, básicamente, soportar el intercambio de información entre personas, personas y máquinas, o directamente entre máquinas, y están muy condicionadas por el tipo de contenidos que se quieran transmitir. En nuestra vida cotidiana, la forma de relacionarnos con personas de nuestro entorno gravita sobre el uso de diversos mecanismos de expresión corporal (que son captados por nuestros sentidos); el principal de ellos es el lenguaje. El soporte de estas comunicaciones es un medio físico con el que estamos familiarizados, el aire, por el que viajan las ondas acústicas y las luminosas que nos permiten percibir con un extraordinario abanico de detalles el mundo que nos rodea.

Desafortunadamente, la dimensión espacial de ese mundo es muy reducido, del orden de decenas de metros para la voz y de decenas de kilómetros para la vista.

Cuando la comunicación ha de hacerse más allá de esos horizontes naturales se necesitan nuevos instrumentos que sean capaces de recrear a distancia las condiciones habituales de nuestras comunicaciones próximas. Hasta ahora, hemos estado muy lejos de poder reproducir mínimamente esas condiciones debido, en primer lugar, a que se necesitan nuevos medios capaces de sortear la limitación espacial, y en segundo lugar, a que son necesarios equipos terminales o interfaces que hagan una conversión de nuestras formas de lenguaje natural a otras específicas y adaptadas a esos medios. Limitaciones tecnológicas y económicas han provocado que al comunicarnos a distancia se pierda la

mayor parte de la gran riqueza de elementos presentes en las comunicaciones próximas. Si algo caracteriza a las telecomunicaciones en el momento actual es haber hecho de ese anhelo de aproximación a ese ideal el motor de su desarrollo.

La escritura dotó a la información de una dimensión temporal, al permitir su registro en cualquier momento y el acceso a ella en un tiempo posterior, y el correo aportó una espacial, al poder transportarla de un lugar a otro. La convergencia tecnológica del almacenamiento y la transmisión de la información es el eje motriz de las telecomunicaciones en nuestros días.

Hay un aspecto fundamental en el que los avances de la electrónica han ampliado magníficamente nuestras capacidades, el almacenamiento de información. De disponer sólo de nuestro cerebro, de la escritura y de las manifestaciones artísticas, hemos pasado a poder emplear diversos medios de grabación de información. Almacenar información permite poder acceder a ella in-situ, inmediatamente o al cabo del tiempo, pero además, las telecomunicaciones permiten poder hacerlo desde la lejanía. Las cintas y los discos compactos de audio y de vídeo son de uso cotidiano y permiten recrear sonidos e imágenes de gran calidad y fidelidad respecto a sus originales; lo mismo se espera del libro electrónico.

Los beneficios de almacenar información son bien conocidos. Un libro puede ser leído en cualquier momento y también, dado que puede ser transportado, en cualquier lugar; si además se encuentra depositado en una biblioteca, podrá ser prestado y leído por muchas personas. Ese acceso diferido en el tiempo y por muchas personas a la vez, desde diversas ubicaciones, hace posible que esa información se difunda con un volumen y una rapidez nunca contemplada

hasta ahora. Este esquema básico de producción, almacenamiento y difusión de contenidos es el núcleo central de la explosión de las comunicaciones a la que estamos asistiendo.

Las comunicaciones entre personas no suelen ir acompañadas de grabación de información. Hay una gran inmediatez en una conversación telefónica y no es habitual grabarla. Lo mismo ocurre con las emisiones de radio o los programas de televisión. Están caracterizadas por flujos continuos de información que han de entregarse al receptor sin demoras y conforme va llegando nueva información se pierde la anterior; no se produce acumulación de información en los equipos y somos nosotros los que asimilamos el contenido de los mensajes. Cuando en las comunicaciones uno de los corresponsales es una máquina, la situación es completamente opuesta y el almacenamiento de información y su recuperación se convierte en un aspecto importante. Es ingente la cantidad de datos que están acumulados en los sistemas de información de las organizaciones, pero al existir potentes herramientas de búsqueda y correlación de aquellos datos que sean relevantes para las aplicaciones o para conocer en detalle a los usuarios, las posibilidades de uso de esos bancos de datos se incrementan a unos niveles insospechados.

La mayor parte de nuestras comunicaciones se realizan instantáneamente, lo que técnicamente se suele denominar en tiempo real, para distinguirlo de la difusión diferida en el tiempo de información previamente grabada. El teléfono y la radio son ejemplos de esta modalidad y en la televisión conviven programas emitidos en directo con otros pregrabados, pero han aparecido también nuevos sistemas de comunicaciones que combinan ambos. El telégrafo, el correo electrónico y la mensajería de voz, por ejemplo, funcionan en un modo de almacenamiento y reenvío de

información totalmente diferente del que estamos habituados en las conversaciones cara a cara. Un mensaje se genera en tiempo real y se envía; puede ser almacenado en una serie de nodos intermedios y retransmitido a su destino final para ser entregado inmediatamente o almacenado en un buzón hasta que el destinatario lo solicite.

Los medios de transmisión que se emplean son de dos tipos: eléctricos y ópticos. Los primeros utilizan señales eléctricas para transmitir la información, los segundos ondas lumínicas. Cuesta imaginar que puedan emplearse en el futuro otras formas de transporte de energía diferente a ellas para crear sistemas de telecomunicación. Por una línea telefónica fluyen corrientes, que replican las ondas acústicas de la voz en el caso analógico, o representan una ráfaga de ceros y unos a partir de los cuales se podrá reconstruir la voz, en el caso digital. Los cables coaxiales, al igual que los radioenlaces y los satélites, transmiten ondas electromagnéticas, en el primer caso guiándolas con conductores metálicos y en los otros dos radiándolas directamente al espacio, procedimiento que también emplean las emisoras de radio y las de televisión. Las fibras ópticas constituyen hoy en día la red troncal de todas las comunicaciones y mediante longitudes de ondas situadas en el infrarrojo próximo transportan la mayor parte de la información que se intercambia a alta velocidad en el mundo. Estos cables (bifilares, coaxiales o fibras ópticas), así como las antenas que radian y reciben las ondas radioeléctricas son los portadores de la información.

Los terminales realizan la transposición de los mensajes desde su medio original al de transmisión. Los teléfonos y las cámaras de vídeo transforman ondas acústicas y ópticas en señales eléctricas. Los receptores de radio y los televisores crean sonidos e imágenes a partir de ondas eléctricas. Sus prestaciones actuales son posibles gracias a haber

incorporado en todos ellos avanzados circuitos microelectrónicos. Un teléfono móvil o un fax contienen microprocesadores de una elevada potencia de cálculo, próxima a la de los ordenadores. Los teclados, los ratones y los monitores son los elementos de comunicación con los ordenadores y en ellos se ha buscado siempre la mayor sencillez y economía posible.

Se han de combinar de una forma eficiente, tanto desde el punto de vista técnico como del económico, los terminales y un medio de transmisión para constituir un canal de comunicación adecuado para la prestación de un servicio basado en el intercambio de mensajes entre los usuarios.

Existe un grado muy diverso de complejidad en los servicios, derivado de la estructura de los mensajes. Los más simples que podemos imaginar provienen de una transmisión secuencial de símbolos que representan las letras y los números de un texto, generados con un teclado y reproducidos en una pantalla o impresos en papel; son unidimensionales. La incorporación de gráficos en un documento o una reproducción facsímil da al mensaje un carácter espacial bidimensional; lo que también ocurre en la transmisión de la voz, donde el tiempo se añade como una segunda dimensión a la intensidad del sonido. Las imágenes son multidimensionales en el sentido que incorporan información espacial y color, y si además hay movimiento, el tiempo. Si combinamos sonido e imagen para crear información audiovisual, alcanzamos un grado mayor de complejidad, y si además la indexamos mediante datos y añadimos texto nos encontraremos inmersos en un universo multimedia que está, cada vez más, al alcance de la tecnología actual. Cuánto más complejo y rico en contenido es el mensaje más elaborado ha de ser el canal que ha de emplearse para transmitirlo.

Pero las mejoras en los servicios no dependen sólo de los avances tecnológicos en los canales de transmisión; los terminales juegan un papel relevante también. Los teletipos permitieron que personas con mucha menor cualificación profesional que los primeros telegrafistas pudieran hacer funcionar los sistemas telegráficos y, al permitir el envío simultáneo de varios mensajes por las líneas, aumentaron significativamente el rendimiento de esas redes. Durante años, se emplearon en las primeras generaciones de ordenadores como equipos de entrada y salida de datos y convivieron, hasta los años setenta, con las máquinas perforadoras de fichas como equipamiento básico de las instalaciones informáticas. Otro ejemplo digno de mención es el de la telefonía móvil, sus fundamentos y principios son bien conocidos desde hace décadas, pero no fue hasta la creación de un gran mercado único europeo de terminales cuando se produjo el gran despegue de este sistema. El éxito del GSM se debe en mucha mayor medida a los fabricantes de teléfonos que a los operadores de las redes.

Las telecomunicaciones son sólo una adaptación de la ciencia y de la técnica al servicio del hombre. Los ordenadores también, pero han introducido nuevos modos de comunicación al poder interaccionar con ellos. Una descarga de información en Internet, una consulta bancaria, o el establecimiento de una conexión con un teléfono móvil, son actos realizados por máquinas residentes en las instalaciones de esos proveedores de servicios. Pero si observamos también el interior de un ordenador o la forma de conectarse a sus periféricos o a otros ordenadores mediante una red de área local, encontraremos siempre una red de comunicaciones.

Durante la mayor parte de su historia las telecomunicaciones han tenido básicamente dos patas, inventadas en el siglo diecinueve. La primera de ellas es el

telégrafo, un invento al que contribuyeron diversos científicos durante el primer tercio de ese siglo, y que Samuel Morse logró convertir en 1837 en un aparato de gran aplicación. Transmitía información modulando la amplitud de la corriente (ASK) mediante un pulsador que abría y cerraba el paso de la corriente y producía en los receptores clics de mayor o menor duración que los telegrafistas bien entrenados podían distinguir a oído. La segunda es el teléfono, que fue descubierto por Alexander Graham Bell cuando experimentaba sobre la transmisión de voz por hilos telegráficos y trataba de producir un telégrafo armónico, enviando tonos de distintas frecuencias; su patente original estaba clasificada como referida a un telégrafo. La historia se ha repetido y en los años setenta se invirtió el proceso, transmitiendo datos sobre la red telefónica y, hoy en día, de nuevo volvemos a esos orígenes al contemplar la transmisión de voz sobre internet.

Antes de construir el teléfono, el principal interés de Bell era el telégrafo y había contratado a un joven mecánico Thomas A. Watson. Trabajando en un telégrafo en 1875, Bell explicó a Watson una idea que describe perfectamente el principio básico de funcionamiento de la telefonía analógica y está recogida en forma de anécdota en el libro "Three degrees above zero" de Jeremy Bernstein (un periodista científico del New Yorker que hace en este texto una descripción excepcional de las actividades de investigación en los Laboratorios Bell): "Watson, tengo una idea de la que no te he hablado que creo te sorprenderá. Si consigo un mecanismo que haga variar la intensidad de la corriente eléctrica de la misma forma que cambia la densidad del aire al paso del sonido, puedo telegrafiar cualquier sonido, incluso el del habla"

Una característica primordial de ambos sistemas es su robusta sencillez y la clara especialización que siempre han

tenido, impuesta por las limitaciones tecnológicas de su tiempo. Progresivamente, ambos sistemas fueron convergiendo. Por un lado los telégrafos comenzaron a emplear múltiples portadoras para enviar simultáneamente varias comunicaciones (multiplexar) y transmitir las por cables de tipo telefónico, y por otro, las señales telefónicas comenzaron a digitalizarse mediante un proceso de modulación por pulsos codificados según un esquema similar al empleado en los telégrafos. Esta idea había sido propuesta en 1937 por Alec Reeves de la ITT (International Telephone and Telegraph, la compañía norteamericana que explotaba redes de comunicaciones en el extranjero, y que había creado, entre otras, la Compañía Telefónica Nacional de España) pero se tardarían veinticinco años en poder llevarla a la práctica. Su planteamiento es conceptualmente simple: si se puede obtener en origen una descripción completa de la onda sonora, es decir la información que la caracteriza, no es realmente necesario enviar por las líneas una réplica exacta de la onda, bastará transmitir la información y reconstruir la onda sonora en el destino. La transmisión de la información podía hacerse de forma discreta, codificándola en símbolos de un cierto alfabeto, el más simple de los cuales es el binario de unos y ceros. Esto liberaría a las redes de la servidumbre de tener que mantener durante toda la transmisión la señal sin distorsión; es mucho más simple transmitir y regenerar pulsos binarios. Los sistemas con modulación por pulsos codificados (PCM) hicieron su aparición en 1962 y convirtieron esta idea en realidad; muestrean la intensidad de la voz en diversos instantes y su valor se codifica en dígitos binarios que se transmiten por la red. Se abrieron entonces las puertas de las comunicaciones digitales tal y como las conocemos hoy en día, y comenzó una lenta pero constante migración de los sistemas analógicos hacia los digitales.

En la actualidad, las redes de comunicaciones se asemejan progresivamente cada vez más al comportamiento humano y a la forma de funcionar de nuestro sistema nervioso central. Tenemos una gran capacidad para integrar diversos tipos de información sensorial: sonidos, color, imágenes, olor, textura, etc. Esto también empieza a ocurrir en las redes de telecomunicación con lo que hoy denominamos contenidos multimedia, la combinación de señales de audio, vídeo y datos. Nuestro sistema nervioso proporciona un único tipo de medio de transmisión para enviar todas las señales eléctricas desde las terminaciones sensoriales hasta el cerebro y también para mandar desde él las órdenes hacia los nervios que controlan toda la actividad muscular. Los impulsos nerviosos enviados por la vista, el oído, o el tacto no se diferencian entre sí y tampoco lo hacen los que controlan el sistema locomotor. De la misma manera si se analiza el tráfico de señales en los modernos sistemas de comunicaciones tampoco es posible identificar si los bits provienen de una conversación, del envío de un fax o de las instrucciones que estén intercambiando ordenadores.

Desde mediados de los años sesenta se produjo un cambio gradual en los sistemas informáticos, pasando de ordenadores en torno a los que se establecían centros de cálculo a una repartición de los recursos empleando máquinas que se conectaban entre sí. Se inició entonces un debate sobre si los recursos de cálculo tenían que estar concentrados en los sitios donde eran necesarios para resolver problemas científicos o financieros, por ejemplo, o si esos cálculos se podían realizar empleando ordenadores lejanos a los que se accedería mediante una red de comunicaciones; es decir: ¿tenemos que ubicar el ordenador en el lugar en el que se plantea un problema que se ha de resolver o solucionamos el problema acudiendo a un ordenador que puede estar en el otro extremo del mundo? Progresivamente, los centros de cálculo perdieron su

carácter dominante en las organizaciones, pasando de ser los monopolizadores iniciales de los recursos a ser también proveedores de servicios y finalmente, en la práctica, han desaparecido. Este debate todavía perdura, si bien hoy los términos se plantean de forma diferente: ¿cuánta inteligencia deben tener los terminales y cuánta ha de residir en la red?

El término Sociedad de la Información es empleado asiduamente por la Unión Europea desde 1993 para compendiar la profunda transformación social que están introduciendo las nuevas tecnologías y representar los nuevos vínculos que se crean continuamente entre la innovación tecnológica y la organización económica y social. Con el Libro Blanco sobre “Crecimiento, competitividad y empleo. Retos y pistas para entrar en el siglo XXI”, de Diciembre de 1993, la Unión Europea, bajo la presidencia de Jacques Delors, manifestó su firme decisión de liderar la creación de la Sociedad de la Información. Para ello encargó a un grupo de expertos, encabezado por el Comisario Martin Bangeman, entre los que se encontraban el Alcalde de Barcelona, Pasqual Maragall, y el Presidente de Telefónica, Cándido Velázquez, la elaboración del informe “Europa y la sociedad de la información. Recomendaciones al Consejo Europeo”, con medidas específicas para llevar a la práctica las ideas recogidas en el Libro Blanco. Este informe fue presentado en Mayo de 1994 y se le denomina “Informe Bangeman”; en él se insta a la Unión Europea a confiar en los mecanismos de mercado como fuerza motriz que conducirá hacia la Sociedad de la Información.

El informe sigue teniendo plena vigencia en la actualidad, pues no puso el énfasis en los aspectos tecnológicos, que los describe, sino en las implicaciones sociales del cambio que ya se estaba produciendo. Indudablemente, es el progreso tecnológico el que hace posible que la información aporte a nuestra inteligencia nuevas capacidades y se haya

constituido en un recurso que está modificando la forma en que vivimos y trabajamos, pero las repercusiones sociales y económicas de esta nueva revolución industrial son de mucho mayor calado. Una revolución que propicia profundas transformaciones en la forma de concebir nuestras sociedades y en la manera de organizarlas y cohesionarlas. Proponía un plan de acción que identificaba claramente los problemas de fragmentación de los mercados, la protección de la intimidad, la garantía del mantenimiento de la confidencialidad, la integridad, la seguridad y la autenticidad en las comunicaciones, o la defensa de los derechos de propiedad intelectual, y lo concretaba en diez acciones movilizadoras para lanzar Europa hacia la Sociedad de la Información. Su listado es muy interesante, ya que contiene el teletrabajo, la educación a distancia, la interconexión de centros académicos y de investigación, los servicios telemáticos para pequeñas y medianas empresas, la gestión de tráfico por carretera, el control y la navegación aérea, las redes de asistencia sanitaria, la licitación electrónica, una red transeuropea de administraciones públicas y por último las autopistas urbanas de la información o la Sociedad de la Información en casa.

Desde ese momento, el uso de la expresión Sociedad de la Información ha ido extendiéndose rápidamente en Europa desde el núcleo de gobierno de la Unión Europea hacia los diferentes Gobiernos y está presente continuamente en los medios de comunicación. No es un término nuevo, su origen se remonta a los años sesenta, cuando se comenzó a atisbar que el dominio y el manejo de la información se estaba abriendo camino en el entorno industrial, centrado hasta entonces en el control y la optimización de los procesos productivos.

Durante el último cuarto de siglo se produjo una transición gradual, inicialmente en el lenguaje técnico y

posteriormente en los medios de comunicación, para significar la convergencia que se estaba produciendo de forma continuada de las telecomunicaciones, la electrónica y la informática, hacia nuevos términos como tecnologías de la información y de las comunicaciones, primero, y tecnologías para la sociedad de la información en el momento actual. En ese periodo de tiempo se ha producido una revolución en las telecomunicaciones, que pasó desapercibida para los usuarios en los primeros años, basada en la digitalización de las centrales de conmutación telefónica y en el tendido masivo de cables de fibra óptica en las redes de interconexión de ellas. Por el contrario, la liberalización del sector ha provocado una presencia informativa diaria en los medios de comunicación en estos últimos años y ha mantenido en un segundo plano esos cambios tecnológicos, que se continúan produciendo todavía.

Con el término Sociedad de la Información se condensa y destaca la importancia social que tienen los nuevos servicios que posibilitan las infraestructuras informáticas y de telecomunicación. La visión suele centrarse principalmente en el uso de esas tecnologías avanzadas y suele quedar relegada a un segundo plano la complejidad de la creación de esos servicios. La digitalización de las redes ha permitido tratar homogéneamente señales diversas e integrar variadas aplicaciones sobre diferentes plataformas. Los distintos medios de transmisión (cable, satélite, radio) comienzan a ser transparentes y soportan todos los servicios (telefonía, datos, televisión). La estandarización de terminales y la normalización de sistemas abiertos ha sido un factor clave en el desarrollo actual, al permitir el acceso al mercado a múltiples fabricantes y poner al alcance de los usuarios un amplio abanico de aplicaciones.

El empleo cotidiano del concepto de la Sociedad de la Información no conlleva una coincidencia generalizada de su

significado, motivada principalmente por el desarrollo tecnológico, que provoca una continua ampliación del horizonte bajo el que se contempla ésta sociedad y, en consecuencia, nos sitúa ante un escenario cambiante. Telefónica, en su informe "Perspectiva 2001-2005" define la Sociedad de la Información como "un estadio de desarrollo social caracterizado por la capacidad de sus miembros (ciudadanos, empresas y Administración Pública) para obtener y compartir cualquier información, instantáneamente, desde cualquier lugar y en la forma que se prefiera". Es una definición finalista, en el sentido que centra todo su contenido en la generación e intercambio de la información, algo que siempre ha existido, pero nunca a la escala que los medios electrónicos de producción, transmisión y difusión de la información permiten hoy en día.

La Sociedad de la Información representa un cambio de paradigma en la organización social y se contempla como una evolución de las sociedades postindustriales, caracterizada no sólo por la disponibilidad de bienes y servicios, sino también por la capacidad de acceso a la información generada por otros. Hace ya muchos años que la actividad científica e intelectual descansa sobre un empleo masivo de ordenadores, tanto de uso compartido como personal, y de Internet como medio de comunicación. De igual manera, las transacciones económicas, el ocio y la vida cotidiana gravitan sobre una evolucionada red de comunicaciones o de transporte de la información.

Diversos cambios tecnológicos han hecho posible esa situación. Por un lado, la introducción de medios de transmisión de gran ancho de banda y la digitalización (en las redes de telecomunicación) han reducido drásticamente los costes de las comunicaciones. Por otro lado, el continuo avance de la tecnología microelectrónica, que ha permitido

doblar en progresión geométrica, cada dieciocho meses, la capacidad de los microprocesadores, manteniendo los precios prácticamente constantes, y construir de forma integrada sobre un mismo chip complejos sistemas; o también el gran progreso en la creación de programas informáticos que permiten procesar, de forma automática, ingentes volúmenes de información y ejecutar algoritmos muy complejos. Subyace en los sistemas actuales una gran complejidad que el usuario no percibe.

El Observatorio Europeo de las Tecnologías de la Información (EITO) ha estimado el mercado global de telecomunicaciones en el año 2001 de los quince estados miembros en doscientos dieciocho mil millones de euros, de los que aproximadamente la décima parte corresponden a España; los servicios móviles aportan ochenta y dos mil millones de euros a esa cantidad. La facturación del sector español de las telecomunicaciones, según los datos de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, alcanzó en el año 2000 la cifra de cuatro billones de pesetas y en el 2001 veintiocho mil millones de euros, representando un 4,3% del producto interior bruto. Los operadores de telefonía fija aportaron la mayor contribución, la mitad de esa cifra, siguiéndoles en importancia los de móviles y los de servicios audiovisuales, con una facturación de aproximadamente un tercio y un sexto del total, respectivamente. Es un mercado que tradicionalmente crece con tasas de dos dígitos en periodos de bonanza (19,1% en 1999 y 17,8% en el 2000) y de uno en los de crisis, si bien en el año 2001, considerado ciertamente difícil en el sector, el crecimiento se ha mantenido próximo al 15%. Esas tasas de crecimiento van acompañadas de grandes inversiones, que por ejemplo en el año 2000 representaron 1,7 billones de pesetas, cayendo un 19,6% en 2001 y una cifra todavía mayor en el año en curso, habiendo aportado la mayor parte de ellos los operadores de telefonía fija y cable, que duplicaron la inversión realizada

por los operadores móviles. Estas cifras cambiarán significativamente cuando comiencen a desplegarse las redes de UMTS.

La inversión de los proveedores de servicios de Internet sólo representa el 1% del total, veinte mil millones, y sus ingresos son del mismo orden de magnitud; de hecho ingresan aproximadamente la misma cantidad los operadores telefónicos por el tráfico que estos servicios generan. Estas cifras muestran lo incipiente que es el desarrollo de los servicios telemáticos y su reducido peso actual en el mercado global de telecomunicaciones.

Contrariamente a lo que generalmente se cree, el empleo en el sector ha disminuido continuamente y se sitúa actualmente en torno a las 90.000 personas, lo que representa un 0,6% del empleo total español y un 1% del empleo en el sector servicios. Si bien los nuevos operadores habían sido creadores netos de empleo, mientras que Telefónica disminuía sus plantillas significativamente, en el año 2002 se ha iniciado una acelerada destrucción de empleo en todos ellos. Estas cifras indican lo poco ajustada a la realidad que está la percepción general de que este sector es una mina significativa de empleo y fuente de grandes oportunidades y de carreras profesionales fulgurantes.

El consumo telefónico medio per cápita en nuestro país se sitúa actualmente ligeramente por encima de las cien mil pesetas al año y el teléfono es sin duda el gasto doméstico que más ha crecido en el pasado reciente, duplicándose en los últimos cuatro años. La facturación de los operadores de telefonía fija a los hogares supera en ocho puntos porcentuales (54%/46%) a la de las empresas, lo que hace patente el peso significativo de las telecomunicaciones en el entorno familiar. Ha de tenerse en cuenta además que la cuarta parte de la facturación proviene directamente de la

cuota de abono, que es una cantidad fija independiente del tráfico, que se está incrementando de forma continuada, y una cifra algo inferior a los ingresos por llamadas realizadas desde el teléfono fijo a los móviles, que tienen unos precios desproporcionados.

En cuanto al arrollador éxito de la telefonía móvil poco hay que decir que no sea ampliamente conocido; con 32 millones de usuarios, frente a los 18 millones de líneas telefónicas fijas, que abarcan desde la adolescencia hasta la tercera edad, y una facturación que supera ampliamente el billón y medio de pesetas. Aquí se da también la misma situación, el 58% de los ingresos por tráfico provienen de los particulares y un 42% de las empresas.

En contra de lo que podría parecer, la aportación de las familias sigue siendo el trozo mayor de la tarta del negocio de las telecomunicaciones. Conforme la penetración de Internet en los hogares vaya acentuándose esta situación va a mantenerse, si no a incrementarse; en otras palabras, los ciudadanos, seguiremos siendo los principales actores en esta nueva sociedad.

Las redes de telecomunicaciones actuales son de una gran complejidad práctica, pero conceptualmente son simples de comprender, pues han ido evolucionando sobre la topología inicial: como era impensable conectar directamente todos los teléfonos entre sí, un par de hilos de cobre unía cada uno de ellos con una central local, situada en su vecindad, donde un grupo de telefonistas interconectaban manualmente las líneas para poder establecer las comunicaciones entre los teléfonos. Esta estructura, que perduró en muchos pueblos y pequeñas ciudades españolas hasta los años 70, tenía un cierto grado de inteligencia, dependiente de la buena voluntad de la telefonista, pues solía conocer los hábitos horarios de los usuarios y podía desviar llamadas o

localizarlos en otros números; hoy en día, los servicios de red inteligente, los conocidos números 900, realizan automáticamente estas funciones: cobro revertido, información, desvíos de llamadas, televoto, etc. También es curioso que fue el sistemático desvío de clientes hacia una funeraria competidora lo que provocó en 1896 que un ingenioso enterrador, Almon Strowger, concibiese el disco de marcar giratorio de los teléfonos y la primera centralita automática, que con el tiempo provocaría una gran eliminación de empleo en el sector y la completa desaparición de una profesión, ya que se requería un operador por cada 120 líneas telefónicas. Estos sistemas de conmutación fueron pronto empleados por diversas compañías telefónicas en todo el mundo, salvo por la Bell, que no los introdujo hasta veinte años más tarde, en 1919, ya que en un exceso de celo tecnocrático no creían deseable que los abonados marcaran directamente los números y controlaran ellos el proceso de conmutación, es éste uno de los escasos errores de apreciación cometidos por este gigante de las telecomunicaciones. No obstante, recientemente, ha reaparecido un numeroso colectivo de trabajadores empleados en los centros de atención de llamadas o de servicio a los clientes, en los que las clavijas han sido sustituidas por ordenadores conectados a bases de datos. Al igual que ocurrió con las operadoras telefónicas, serán reemplazados en el futuro por máquinas capaces de reconocer y sintetizar la voz.

En las redes de comunicaciones móviles la función del par de hilos la realiza un enlace vía radio del terminal con una base cercana. Estos enlaces, mediante conductores metálicos o radio, de una longitud típica del orden del kilómetro, constituyen lo que se conoce como la red de distribución o de acceso, o también el bucle de abonado, cuya apertura a la competencia está de plena actualidad en estos momentos.

Las centrales locales, o urbanas, se interconectan entre sí mediante centrales tándem, o de tránsito, con el fin de permitir las comunicaciones entre usuarios de distintas centrales, y también a centrales interurbanas e internacionales.

La red de transporte permite todo el intercambio de tráfico entre estas centrales, y está formada básicamente por cables de fibra óptica y radioenlaces. La longitud de la red española de alta capacidad es en el momento actual de unos trescientos mil kilómetros, sin contar cables submarinos ni satélites de comunicaciones. Si se normaliza a una capacidad básica de dos megabits por segundo, que se corresponde con treinta conversaciones telefónicas simultáneas o un programa de televisión digital de buena calidad, se obtendría la distancia de ida y vuelta de la tierra al sol. Esa capacidad de referencia nos puede parecer ridícula hoy en día, en que las comunicaciones telefónicas de gran capacidad y el intercambio de información en los buses de los ordenadores se hacen a velocidades del orden del gigabit por segundo y ya nos vamos aproximando al terabit, pero es la que se considera básica en este sector. Para hacerse una idea de su significado, el primer cable telefónico transatlántico se tendió en 1956, cuando ya los cables telegráficos intercontinentales llevaban casi cien años funcionando satisfactoriamente, lo que da idea de los formidables retos tecnológicos que representó el teléfono en comparación con el telégrafo; pues bien, ese primer cable sólo permitía realizar 60 comunicaciones simultáneas. Hoy en día, los cables submarinos que arrancan de las costas españolas son capaces de cursar simultáneamente un millón de conversaciones telefónicas.

Este conjunto de elementos: terminales, cables, centrales y centros de control y de gestión, constituyen un sistema semejante a nuestro sistema sanguíneo. Una estructura

capilar llega a todos y cada uno de los usuarios y progresivamente se van agregando sus caudales hasta llegar a los grandes vasos troncales. Esta inmensa capilaridad de la telefonía es el gran elemento que la diferencia de la telegrafía y ha dado fundamento a la consideración del teléfono como un servicio universal, al que todos los ciudadanos tienen derecho con independencia de donde estén ubicados. Recientemente se ha declarado también el acceso a Internet un servicio universal, pero pasará mucho tiempo hasta que se alcance una penetración comparable.

Como la red telefónica se creó con el único y exclusivo fin de transmitir la voz humana, se tomaron una serie de decisiones que definieron desde sus inicios la forma en la que se ha desarrollado.

La primera característica que se observó fue que para recibir la voz de forma inteligible y con una calidad subjetivamente satisfactoria, bastaba con transmitir el margen de frecuencias sonoras comprendidas entre 300 y 3.400 Hz. Si bien se considera convencionalmente que nuestro oído percibe los sonidos comprendidos entre 20 y 20.000 Hz, el máximo de sensibilidad está en torno a 3.000 Hz. Como en la voz humana las frecuencias inferiores a 1.000 Hz contienen el 80% de la energía sonora, mientras que las inferiores a 3.000 Hz el 80% de la articulación, se optó por asignar al sistema un ancho de banda de 4.000 Hz por circuito telefónico. La duración media de una conversación telefónica es inferior a los tres minutos, y el uso medio de la línea es de un cuarto de hora al día; estos datos, junto con el conocimiento de la distribución estadística en el tiempo de las llamadas han permitido dimensionar adecuadamente las redes para que puedan soportar el tráfico telefónico. Las redes telefónicas se han dotado de recursos adecuados para poder cursar el tráfico en la hora más cargada, por lo que salvo circunstancias excepcionales en las que la red se

congestiona (daños producidos en la red por condiciones meteorológicas, desastres naturales o momentos especiales como la medianoche de fin de año, por ejemplo) siempre es posible obtener tono para marcar al descolgar el teléfono; esto trae inmediatamente a colación la infrautilización de la red durante una parte importante del día. Basta con observar la distribución horaria de las tarifas telefónicas para identificar los picos y los valles del tráfico. Desde el punto de vista económico, ese equilibrio entre congestión e infrautilización, que se traduce en el primer caso en insatisfacción del cliente y en el segundo en pérdida de ingresos, ha sido siempre difícil de establecer, si bien la calidad del servicio ha sido en general muy buena. En estos momentos, la conexión desde casa a Internet mediante un módem telefónico está cambiando totalmente los esquemas de distribución de tráfico, dando rápidamente al traste con esta situación y haciendo que las primeras horas de la noche sean de gran intensidad de tráfico.

Por otro lado, para mantener una conversación telefónica normal se requiere que el retardo de tiempo con el que se escucha al interlocutor sea inferior a ciento cincuenta milisegundos. Este es un condicionante fundamental de la red telefónica, que obliga a establecer un circuito físico entre ambos teléfonos y mantenerlo para su uso exclusivo mientras dure la comunicación; es una situación semejante a la de un tren que tiene reservados unos derechos de paso a lo largo de un tramo de vía. Cuando descolgamos un teléfono, la central comprueba si puede cursar esa llamada, lo que normalmente ocurre y en ese caso envía el tono para marcar; una vez marcado el número, la red identifica su localización, que puede estar en el otro extremo del mundo, busca una ruta no ocupada, ordena toda la secuencia de interruptores para poder establecerla, y una vez hecho esto suena el timbre del teléfono llamado. Todo este proceso transcurre de forma prácticamente instantánea y su gran

complejidad pasa desapercibida para los usuarios, dada la aparente sencillez del proceso de marcado. Para que todo funcione correctamente se requiere que todos los componentes estén estandarizados y la existencia de una red de señalización o control superpuesta a la de los canales que transportan la información; si usamos el mismo símil ferroviario, es la red que controla todas las señales y los cambios de agujas. Hasta hace una veintena de años esta red de señalización estaba solapada con la de tráfico; hoy en día están separadas y se utilizan canales diferentes para ambas funciones.

El uso de hilos de cobre en las líneas telegráficas se trasladó inmediatamente a las líneas y cables de teléfono, por lo que el omnipresente cable formado por un par de hilos de cobre de medio milímetro de diámetro ha llegado hasta nuestros días como el medio más económico y robusto de conexión de los teléfonos con las centrales. El despliegue actual por parte de los operadores de cable de fibras ópticas y cables coaxiales significa un salto cualitativo de extraordinaria magnitud, multiplicando por un factor de diez mil la capacidad real del par de hilos de cobre, si bien, el operador de cable también aprovecha para tender, además del coaxial, el par de cobre hasta el domicilio del cliente.

Una conversación telefónica, un facsímil, una emisión radiofónica, un programa de televisión, o bien un correo electrónico, un vídeoclip o una canción enviados por Internet, consisten básicamente en un mensaje, que bajo la forma de una señal eléctrica, se envía entre personas o máquinas. Los usuarios, desconocemos en general la forma en que se realiza esa comunicación, pero esperamos siempre la entrega a tiempo, y con un costo razonable, de una réplica precisa del mensaje enviado. Las señales que transportan los mensajes por las redes de telecomunicación son tensiones y corrientes eléctricas en el caso de los cables y radioenlaces, o

bien intensidades luminosas en el espectro infrarrojo en el caso de las fibras ópticas, pero las fuentes que los producen y los receptores a los que llegan no son en general eléctricas, necesitándose un transductor para realizar las conversiones: micrófonos, auriculares, altavoces, teclados, tubos de rayos catódicos, son ejemplos de ellos.

En los sistemas analógicos las señales son en general réplicas de los mensajes, ya que pretenden seguir su variación temporal; por ejemplo, en una emisión radiofónica los micrófonos crean una copia eléctrica del sonido y en los receptores de radio los altavoces realizan la función inversa. En todos ellos esperamos una reproducción fiel del mensaje, concepto clave que se incorpora en el término alta fidelidad, sinónimo de sonido de alta calidad.

En los sistemas digitales el mensaje está codificado en la forma de una secuencia de símbolos pertenecientes a un conjunto discreto y finito de elementos. Un texto escrito con las letras y símbolos de un alfabeto es un ejemplo de un mensaje discreto; para producirlo hemos podido utilizar un teclado y al recibirlo vamos a leerlo en una pantalla de ordenador o impreso en papel; en este caso queremos exactitud al reproducir el mensaje, es decir, que no haya errores en los símbolos recibidos. Los sistemas digitales de hoy en día están basados en una codificación de ceros y unos.

Curiosamente, el primer sistema de telecomunicación, el telégrafo, es un sistema digital dotado de un robusto código Morse de operación, que se ha mantenido oficialmente en uso hasta el año 2000. Bell concibió un sistema telefónico analógico que los avances tecnológicos de las dos últimas décadas han permitido transformar paulatinamente en digital, proceso que todavía no ha concluido en España (mi teléfono ha estado conectado a una central analógica hasta

hace unos meses). Internet es un sistema digital, pero no debe olvidarse que el Morse ya lo era e incorporaba además compresión.

Un sistema de telecomunicaciones consta esencialmente de tres partes: un transmisor, un medio y un receptor.

El transmisor procesa la señal eléctrica de entrada para adecuarla a las características del canal de transmisión. Realiza siempre una función de modulación de una señal portadora con la información que se desea transmitir: cuando oímos una emisora de radio anunciar que transmite “en los 95.5 del dial de la frecuencia modulada”, nos está diciendo que su transmisor emplea un esquema de modulación de frecuencia para imprimir su programa sobre ese valor (95,5 MHz) y poder radiarlo de forma compatible con las otras emisoras, a las que se les asignan otras posiciones o canales en el dial de esa banda de frecuencias. En muchos casos se produce también una codificación de la señal, para poder adecuarla mejor al canal, y también puede ser cifrada para proteger su contenido.

El medio de transmisión es el canal por el que se envían esas señales y físicamente es el aire para la radio, la televisión o la telefonía móvil, o bien los cables conductores y las fibras ópticas en el caso del teléfono, la televisión por cable o Internet. El canal introduce siempre una pérdida de señal, que va aumentando progresivamente con la distancia.

Al receptor llega la señal transmitida por el canal y ha de ser inmediatamente amplificada para compensar las pérdidas del medio, e invirtiendo los procesos seguidos en el transmisor es preparada para poder ser presentada en el dispositivo de destino.

Desafortunadamente, los sistemas que podemos construir no son perfectos y en este proceso de transmisión la señal también se distorsiona. Para mitigar este efecto se recurre al uso de ecualizadores, que son filtros que intentan corregir la distorsión.

En todos los sistemas de comunicaciones, y muy en particular en los de radio, los cables y las antenas captan otras señales, generadas por otros usuarios o producidas por equipos eléctricos, que contaminan la señal. Esto es lo que ocurre cuando hay un cruce de líneas y se superpone otra conversación telefónica, o si en un televisor se ve superpuesta en la imagen sombras o vestigios de otros canales. Filtros e ingeniosos sistemas de preacondicionado de las señales, como los que emplea el sistema de grabación Dolby, ayudan a combatir este efecto.

Finalmente, la naturaleza se encarga de añadir ruido a todas las señales, superponiendo sobre ellas variaciones aleatorias que perturban o incluso arruinan la información contenida en los mensajes. No hay forma de eliminar el ruido de los sistemas de comunicación y su presencia es siempre un factor limitador de su calidad.

Todos los ingenieros eran conscientes de la importancia del ruido, pero no dispusieron de herramientas para estudiar sus efectos hasta que Norbert Wiener resolvió genialmente este problema aplicando métodos estadísticos al control de servomecanismos. Modeló la señal y el ruido como procesos aleatorios y consideró que en un sistema de comunicaciones lo que se recibe es la suma de ambas y encontró el filtro óptimo que permitía separar la señal del ruido aditivo con un retardo predeterminado. Su interés por tratar matemáticamente el caso de un retardo negativo, le condujo a formular, junto con Kolmogorov, la teoría de predicción de series temporales estacionarias. Ambos trabajos, de gran

influencia en los campos de las comunicaciones y del control son la base de su formulación de los conceptos de la cibernética.

Un mensaje, o una señal temporal, puede caracterizarse de diversas maneras, siendo la más clásica y sencilla el estudio de sus componentes frecuenciales. Antes de la aparición del primer telégrafo eléctrico, Jean Baptiste Fourier había publicado en 1822 sus investigaciones sobre la conducción del calor y el descubrimiento que cualquier forma de onda podía ser descompuesta en una suma de ondas armónicas. El análisis de Fourier ha sido la forma tradicional de estudiar los sistemas de telecomunicación, descomponiendo la señal en una serie de ondas sinusoidales cuyas frecuencias definen su espectro. Como los otros dos parámetros que caracterizan cualquiera de estas ondas son su amplitud y su fase, se pueden representar de forma simple mediante un número complejo, por lo que las teorías de la comunicación siempre han ido de la mano de la física matemática. Es una coincidencia que muchos sistemas de comunicaciones analicen las señales mediante sus componentes armónicos, de la misma forma que lo hacen los ojos y los oídos. Nuestra visión se basa en interpretar las distintas frecuencias de la luz como colores diferentes, y el oído distingue los tonos acústicos con tan gran nitidez, y en un margen tan amplio de intensidades, que ningún sistema de comunicaciones ha logrado aproximar todavía.

La representación frecuencial de las señales lleva inmediatamente al concepto de ancho de banda, un parámetro básico en el diseño de los sistemas de comunicaciones y sobre todo en el precio que vamos a tener que pagar los usuarios por utilizar esa red; los términos de "banda estrecha" y sobre todo hoy en día de "banda ancha" se emplean cotidianamente, muy frecuentemente con fines publicitarios y comerciales, con una frontera poco definida.

El ancho de banda está íntimamente ligado con el contenido de información de las señales, ya que para poder transmitir información una señal ha de variar súbitamente en el tiempo. Una señal que varíe lentamente en el tiempo y de forma periódica tiene un comportamiento totalmente predecible y no transporta información. Una nota musical es un ejemplo de esta situación, no es más que un tono que pronto resultará insoportable si se mantiene sonando durante unos cuantos segundos; pero cuando escuchamos una sinfonía percibimos una melodía y una armonía que nos deleita y produce todo un mundo de sensaciones, estamos en este caso ante una señal compleja, con fluctuaciones rápidas, rica en información y que ocupa un ancho de banda del orden de dos decenas de kilohercios, muy superior al de un canal telefónico.

Pero este método de análisis frecuencial, aún siendo un poderoso medio instrumental de estudio de las señales y de los circuitos eléctricos que conforman el sistema de telecomunicaciones, no permite medir el contenido de información del mensaje ni la capacidad de transmisión de información del medio. Es como si conociéramos en una red de carreteras la ubicación y los parámetros estructurales y constructivos de todas las vías, accesos e intercambiadores, pero desconociéramos la capacidad de tráfico rodado que esa red es capaz de soportar.

Claude Shannon se enfrentó a este problema y lo resolvió mediante la formulación matemática de una teoría de la comunicación, que pronto pasó a ser denominada la Teoría de la Información, y que ha dejado también una imperecedera impronta en las ciencias sociales, como magistralmente pusieron de manifiesto el Dr. Alsius en su discurso de ingreso en esta Academia y el Dr. Oñate en el de contestación. El sistema de comunicaciones incluye todos los elementos ya comentados. El elemento fundamental es una

fuente de información, que puede ser, por ejemplo, la voz humana, el sonido de una orquesta, una escena, un texto escrito, una tarjeta de crédito, o un ordenador que contiene una base de datos. La fuente genera los mensajes que el transmisor codifica para ser convenientemente enviados por el canal de comunicación, que es el segundo elemento clave de esta teoría y que, por la presencia de ruido e interferencias, va a alterar de forma impredecible el contenido del mensaje. Finalmente, un receptor reconstruye el mensaje con la calidad y exactitud exigidas por el destinatario o usuario final de esta cadena.

La cuestión fundamental que se plantea es como representar los mensajes para poder transmitirlos por un medio de comunicación real, teniendo en cuenta todas las perturbaciones y limitaciones inherentes a ese sistema. Shannon trasladó el énfasis de las señales hacia el mensaje en sí, introduciendo tres conceptos nuevos: la medida de la información que genera la fuente, la capacidad de información que puede transmitir el canal, y la manera como han de codificarse los mensajes para poder utilizar el máximo de esa capacidad.

El elemento crucial es la medida de la información, término que en telecomunicaciones tiene un significado técnico muy preciso. Cuando se habla de la información que contiene un mensaje no se está considerando si ese mensaje es inteligible o no, da lo mismo que sea un texto correctamente escrito que uno cifrado, ni importa el significado que puedan tener los símbolos allí representados, ni mucho menos el conocimiento que pueda generarse a partir de él. Si, por ejemplo, escuchamos las tres siguientes previsiones del tiempo que va a hacer al día siguiente:

- Las temperaturas bajarán a lo largo de la tarde en la mitad este peninsular.

- Chubascos de intensidad variable irregularmente distribuidos en el tercio norte peninsular.
- Fuerte temporal de levante en la costa catalana.

Resultan tres mensajes comprensibles, pero para un vecino de la ciudad de Barcelona, el contenido de información es muy diferente. A lo largo de la tarde y conforme el sol se va poniendo siempre bajan las temperaturas, quizás ese día sea más pronunciada la disminución, quizás no; si los chubascos son dispersos en un amplio territorio y su intensidad es variable, lo más probable es que no llueva en la ciudad; ahora bien, si hay un temporal de levante, lo que ocurre con poca frecuencia, y está bien localizado, la previsión sí nos da una información valiosa. Los tres mensajes han sido listados en orden decreciente de probabilidad de que ese suceso ocurra y en orden creciente de contenido de información. El mensaje cuyo contenido es más improbable es el que contiene mayor información; Shannon se planteó medir matemáticamente el caudal de información que genera una fuente de mensajes, y vio que esta medida tenía que basarse en la incertidumbre respecto al mensaje que se va a emitir, por ejemplo, que el sol sale por la mañana y se pone por la tarde es una expresión desprovista de información, ya que sabemos de antemano que eso se va a producir indefectiblemente.

Desde el punto de vista del receptor, el contenido de información del mensaje tiene que ser medido estimando lo impredecibles que sean para él los mensajes que la fuente genera. Analizado desde la fuente, debe de ser la medida de los grados de libertad que tenga para generar el mensaje. En ambos casos entra inmediatamente en juego un análisis estadístico del proceso de la comunicación. La medida más simple de información se basa en la fuente más básica que podemos considerar, aquella que puede generar sólo dos

mensajes con igual probabilidad; un ejemplo familiar es la tirada de una moneda al aire; la probabilidad de que salga cara vale $\frac{1}{2}$ y es la misma de que salga cruz. La incertidumbre en el resultado de dos sucesos equiprobables es la unidad básica de medida de información y se denomina bit, que es un acrónimo inglés derivado de la contracción de *binary digit*. Un bit puede también considerarse como la información requerida para poder elegir entre dos estados equiprobables. Los dígitos binarios entran de forma natural en este proceso, ya que cualquier par de cosas o eventos pueden ser representados mediante un cero y un uno; además hoy en día todos los sistemas digitales tratan básicamente con ristra de ceros y unos. En telecomunicaciones los bits aparecen normalmente en un proceso de transmisión, por lo que suelen asociarse con una velocidad que indica el número de bits que se transmiten por segundo. En los sistemas informáticos es un elemento que se almacena o procesa y la unidad habitual es el byte, un acrónimo inglés derivado de *binary terms* que en la actualidad contiene ocho bits (fueron cinco o seis en el pasado y quizás sea un nuevo valor en el futuro), que también se denomina un octeto (para distinguirlos se suele recurrir a representar los bytes con B y los bits con b).

Si en el ejemplo anterior la probabilidad de los dos eventos P_n fuera desigual, el contenido de información de cada uno de ellos también lo sería y estaría dado por

$$I_n = -\log_2 P_n$$

La cantidad de información que genera una fuente depende del número de mensajes que pueda producir y de la probabilidad de cada uno de ellos. Para escribir un texto en catalán necesitamos un alfabeto de 27 letras, 10 dígitos decimales, y signos de puntuación, acentos, mayúsculas y espacio (.,!;:~'"?!(){}+-x÷*/=<>M_), un total de unos 64

elementos. Si todos ellos aparecieran en un texto el mismo número de veces, es decir, tuvieran la misma probabilidad de ser empleados, y consideramos inicialmente que un mensaje es la generación de uno de estos elementos, la información asociada con la escritura de una letra o símbolo vale $\log_2 64 = 6$ bits. Ahora bien, hay letras que se emplean mucho más frecuentemente que otras, por lo que el valor real de información, también llamada la entropía de la fuente, es inferior a esos 6 bits y se puede calcular a partir de la probabilidad o frecuencia de uso P_n y del contenido de información I_n de cada uno de los n caracteres mediante la expresión $H = \sum P_n I_n$ que daría un valor en torno a cuatro bits. Si se consideran las palabras, resulta que las reglas de ortografía y las normas gramaticales imponen restricciones que condicionan las secuencias de letras, ya que al escribir una letra (o una palabra) condicionamos las que le seguirán. Esta redundancia del lenguaje, que en los sistemas de comunicaciones se conoce como memoria de la fuente, representa una reducción del contenido de información del idioma a la mitad, unos dos bits por letra. Esto era bien conocido por Morse y por ello creó un código que asignaba diferente número de puntos y rayas a cada letra, reservando los más cortos para las de uso más frecuente (un punto para la e, y una raya para la t) y los más largos (5-6 signos) para la ñ, los números y los signos auxiliares. De nuevo estamos ante un sistema binario, con un código de longitud variable que reducía apreciablemente la cantidad de símbolos que el telegrafista debía transmitir.

Nuestra comunicación con los ordenadores se realiza mediante un teclado que tiene que convertir los símbolos en señales eléctricas. Se emplea para ello un código binario básico estándar de intercambio de información (ASCII) de siete dígitos por carácter, a los que hay que añadir bits de paridad, inicio y fin. En este caso, a diferencia de lo que ocurre con el alfabeto Morse, se prefiere utilizar un número

fijo de bits por letra, ya que facilita los protocolos de comunicación, lo que representa un uso poco eficiente de la capacidad del canal.

La manera más común de transmisión de información digital se conoce como modo de transmisión serie; en él todos los bits se transmiten secuencialmente por un único canal. Cuando se emplean varios canales para transmitir simultáneamente varios bits, el modo recibe el nombre paralelo y con él se consiguen mayores velocidades de transferencia de datos en conexiones de escasa longitud; esta técnica es la que se emplea en la conexión de una impresora a un ordenador personal mediante un conector de 36 patillas, que permite enviar simultáneamente ocho bits por ocho líneas. Atendiendo al sentido de las comunicaciones entre ordenadores o con periféricos se distinguen tres modos de operación, que se designan empleando la misma terminología de las radiocomunicaciones: simplex, dúplex y semidúplex. En una comunicación simplex sólo se transmite en un sentido y es la que se emplea, por ejemplo, en los sistemas de radiodifusión y de televisión, en el sistema de posicionamiento GPS, y en los sistemas de telecontrol y telemedida. Cuando el intercambio de información se realiza simultáneamente en ambos sentido, estamos ante un sistema dúplex, que es el utilizado en telefonía y en aplicaciones interactivas como la videoconferencia, que requieren disponer de un flujo bidireccional permanente de información. En una situación intermedia se encuentra el modo semidúplex, en el que se transmite alternativamente en uno u otro sentido; ésta ha sido la forma habitual de las comunicaciones con aeronaves y entre los radioteléfonos, conocidos habitualmente por el término inglés de walkie-talkie, donde la palabra cambio invita al otro terminal a iniciar la transmisión, y es también la forma que se emplea para acceder a bases de datos y en aquellos procesos que

pueden enmarcarse en una tipología de pregunta - respuesta.

¿Qué ocurre con las fuentes que generan señales continuas, como la voz o una imagen? La opción más simple es digitalizarlas, tomando distintas muestras en el tiempo y cuantificando su valor con un cierto número de bits. A diferencia de lo que ocurre en un sistema de comunicaciones analógico, en el que se envía la señal y se quiere que no se distorsione al transitar por la red, en un sistema digital lo que se envían son los números que representan el valor de esas muestras, y podrán llegar a destino distorsionados siempre y cuando podamos todavía reconocerlos. Para tener una representación fiel de una señal han de tomarse un número de muestras por segundo igual al doble de su ancho de banda. Si se toma un número inferior de muestras se pierde información; si se toma un número superior, las muestras en exceso contendrán información redundante. Puede decirse que el número de grados de libertad de una señal continua o analógica es el doble de su ancho de banda. En un canal telefónico la voz se filtra para dejar pasar sólo un espectro o ancho de banda de 4.000 Hz, por lo que han de tomarse 8.000 muestras por segundo para no perder información. Al tomar cada muestra se mide un valor de tensión que se codifica con 8 bits, es decir con $2^8=256$ valores, por lo que resulta una señal de 64 kbit/s, que es un valor universal en todas las redes digitales de comunicaciones.

Desde el punto de vista de la comunicación, además de conocerse la velocidad de generación de información de la fuente, ha de establecerse la capacidad de transmisión de información del canal, medidas ambas en bits por segundo. Si el caudal de información que genera la fuente excede la capacidad del canal no se podrá establecer una comunicación fiable, en caso contrario sí se podrá hacer, pero siempre y cuando se acompase el flujo de información. Esto

puede verse empleando un símil de una escalera mecánica, si pretenden utilizarla más usuarios que su capacidad, se creará una cola y no se podrá utilizar; si el número es menor, funcionará correctamente siempre y cuando se mantenga un flujo ordenado de personas accediendo a la escalera. La presencia de ruido en los sistemas de comunicaciones complica sobremanera el problema, pues no se pensaba que se pudieran realizar transmisiones exentas de errores. Shannon demostró que si no se excede la capacidad del canal se puede realizar una transmisión libre de errores, ya que existen códigos que los detectan y los corrigen.

La capacidad del canal (C) depende de dos factores: su ancho de banda (B) y la relación que guardan los niveles de la señal que queremos transmitir por él y el ruido presente (S/N) y está fijada por la ley de Hartley-Shannon

$$C = B \log_2 (1 + S/N)$$

que establece el máximo de información que se puede transmitir.

El canal podrá transmitir información en la medida de que disponga del ancho de banda necesario para hacerlo y pueda realizar la comunicación con un nivel de señal que sobresalga sobre el umbral de ruido presente. Si por un canal telefónico, de un ancho de banda de 3.100 Hz, se envía una señal cuya energía está 1.000 veces por encima de la del ruido en la línea, la máxima capacidad del canal será de 30 kbit/s. Los módem actuales que permiten la conexión a Internet mediante la línea telefónica normal se aproximan a este límite cuando la calidad de la línea lo permite, si bien en la práctica difícilmente superan los 9,6 kbit/s.

En la ingeniería de las telecomunicaciones la ley anterior de Shannon fija la meta a la que se ha de tender: el número

máximo de bits por segundo que se podrán transmitir por cada hercio de ancho de banda disponible. Salvo en los sistemas de comunicaciones ópticas, en todos los demás, y en particular en los que se basan en el empleo de ondas radioeléctricas, nos estamos acercando a ese límite empleando sistemas de modulación y decodificación de elevada complejidad, ecualizadores y técnicas de corrección de errores.

La red telefónica, con unos mil millones de líneas fijas instaladas en todo el mundo, a las que hay que añadir las de telefonía móvil, que prácticamente han alcanzado también esa misma cifra, es el sistema más complejo ideado y construido por el hombre. Uno de sus grandes méritos es la sencillez de uso y la universalidad del sistema; los usuarios empleamos los mismos terminales, y los procedimientos de llamada y las señales son prácticamente idénticos en cualquier lugar del mundo. Esta sencillez enmascara la complejidad y la diversidad de las redes existentes, que se interconectan gracias a unos procedimientos de normalización que permiten hacer compatibles instalaciones muy heterogéneas y que consiguen establecer las comunicaciones entre cualquier par de teléfonos en una breve fracción de tiempo, de manera prácticamente instantánea.

Ahora bien, esa red centenaria especializada en transmitir la voz humana, tiene una estructura inadecuada para intercambiar eficientemente datos, cuya principal característica es que contienen un caudal muy variable de información y que se envían generalmente a ráfagas. Las necesidades de transmisión de datos, principalmente de los sectores financieros primero, y de intercomunicación de ordenadores después, han ido creciendo de forma progresiva y puesto en evidencia las limitaciones de las redes telefónicas para satisfacerlas. De hecho, muestran unas

características más próximas a las redes telegráficas que a las telefónicas e hicieron reaparecer conceptos ya conocidos, como la transmisión asíncrona, y el empleo de datagramas, bloques o paquetes de datos que, al igual que los telegramas, se dotan de un encabezamiento en el que figura el destinatario y se envían por una ruta que esté disponible. Son redes que funcionan de manera similar a como lo hace una empresa de paquetería o el servicio postal, enviando paquetes de datos desde una fuente hasta un destinatario, que pueden ser terminales, ordenadores, impresoras o cualquier dispositivo de comunicaciones. La red es en este caso una inmensa cinta transportadora a la que se van entregando paquetes de muy diversa procedencia, que son encaminados hacia sus correspondientes destinos en los centros de clasificación; durante su viaje van pasando por diferentes nodos donde pueden ser almacenados hasta el momento en que se puede asegurar su envío al siguiente nodo de su ruta. La principal característica es que los paquetes provienen de diversos usuarios y comparten los medios de transmisión; como además para poder completar la comunicación dependen de la disponibilidad de una ruta, no se asegura una recepción instantánea; por otra parte, los mensajes de gran tamaño se dividen en bloques que se envían separadamente y que pueden ser recibidos desordenadamente, y no es hasta el momento en que se han recibido todos ellos que se puede reconstruir el mensaje completo y presentarlo al destinatario. Estas redes, conocidas como de conmutación de paquetes, son el esqueleto de todos los sistemas de intercambio de datos, que incluyen desde pequeñas redes que interconectan en despachos algunos ordenadores y periféricos, hasta redes extensas de nivel metropolitano, nacional, regional o mundial, y muy en particular de Internet.

Internet funciona gracias a un protocolo de comunicación que permite la interconexión del conjunto más variopinto de

ordenadores y de redes que se pueda imaginar. Surge en los años 60 para posibilitar la interconexión de una veintena de grandes ordenadores centrales académicos de EE.UU., de este modo, cada uno de ellos podría tener una función específica y se facilitaría el acceso a todos ellos desde cualquier lugar del país. El proyecto, denominado ARPAnet, fue financiado por la agencia de proyectos avanzados de investigación (ARPA) del Departamento de Defensa y dirigido por Lawrence Roberts. Su razón de ser es bastante simple: limitaciones económicas. La agencia estaba financiando proyectos de investigación en las áreas de inteligencia artificial, ciencias de la computación y tecnologías de la información que podían ser de utilidad militar pero no quería financiar en cada universidad los ordenadores que se necesitaban, por ello en 1968 solicitó ofertas para la creación de una red que permitiera un uso compartido de los recursos y adjudicó el contrato a una empresa de Boston (Bolt, Baranek y Newman), muy próxima al MIT y Harvard. En la Universidad de California en los Angeles (UCLA) se le encargó al Profesor Leonard Kleinrock la puesta en marcha de un centro de medida de la red y en septiembre de 1969 se instaló un procesador de mensajes, que hoy conocemos como un conmutador de paquetes, convirtiéndose en el primer nodo de la red.

Para mejorar el rendimiento de la red los mensajes grandes se dividieron en paquetes de menor extensión que eran enviados separadamente por la red; es en este contexto cuando se acuña el término conmutación de paquetes. La puesta en marcha de la red requirió desarrollar los concentradores o procesadores que actúan como interfaces entre los ordenadores que crean o reciben los mensajes y dotan a los paquetes de las direcciones adecuadas para realizar su travesía por la red; se concibieron también los conmutadores o encaminadores que organizaban el tránsito de los paquetes durante ese viaje. Hubo que diseñar también

algoritmos de direccionamiento de los datos y de control de su flujo en la red. La red se estructuró en capas, en las que se aplicaban diversos protocolos; los de alto nivel permitían la comunicación entre los diferentes ordenadores, los de bajo nivel la correcta composición de los paquetes de datos y su satisfactoria transferencia.

La primera demostración pública de la red tuvo lugar en 1972 y ARPA continuó financiando activamente la extensión de la tecnología de conmutación de paquetes a las redes de comunicaciones por satélite y a las de comunicaciones por radio que estaba desarrollando y tenían un marcado interés militar. Coetánea de ella en España fue la red especial de transmisión de datos, creada por Telefónica para interconectar oficinas bancarias. En paralelo, se estaban sentando también las bases de la creación de las redes locales que iban a permitir la interconexión de ordenadores próximos y que culminarían con la invención de Ethernet en 1973, por lo que aparecía un nuevo problema, la conexión entre redes o *internetting* en inglés, que daría su nombre a Internet, también definida posteriormente como la red de redes.

Vinton Cerf y Robert Kahn son reconocidos como los padres de Internet por haber concebido los protocolos de comunicación que la han hecho posible. La publicación en 1974 del Protocolo para la Interconexión de Redes de Paquetes hizo posible el desarrollo posterior de los protocolos de Internet que hoy se utilizan y que fueron instalados sobre ARPAnet, Packet Radio Net, Packet Satellite Net y Ethernet en 1982, marcando así la viabilidad final de Internet. El gran mérito de estos protocolos radica en su robustez y en que hayan permitido el crecimiento de la red sin necesidad de ser modificados sustancialmente. A finales de esa década ARPAnet había cumplido con creces todo lo que se esperaba de ella veinte años antes y concluyó su

existencia en 1990, no sin antes haber dado paso a una red académica soportada por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) norteamericana de amplio uso por la comunidad científica y universitaria.

En ese mismo año Tim Berners-Lee creó en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas en Ginebra, el World Wide Web para facilitar el intercambio de información entre investigadores, marcando el nacimiento de todas las potencialidades actuales de Internet. En ese laboratorio se daban los problemas, habituales en muchos otros centros, que provoca la existencia de una gran disparidad de redes de ordenadores, generalmente incompatibles entre sí. Conviven en él un numeroso grupo de investigadores residentes junto con otros dispersos por todo el mundo que acuden periódicamente para realizar experimentos, lo que comporta que la comunidad de físicos de altas energías haya sido siempre una de las que mayor uso hace de Internet. El Web es la conjunción de dos tecnologías preexistentes, que habían vivido separadas hasta ese momento: las redes de ordenadores y un formato no lineal de escritura llamado hipertexto; aderezada con el triunfo ya evidente en esa época de los ordenadores personales. Un hipertexto es un texto no secuencial con múltiples nexos de unión entre los párrafos y que puede ser leído de muchas maneras, en distintos órdenes; había sido considerado el elemento fundamental de un libro electrónico, un término acuñado por el profesor de la Universidad de Brown, Andy Van Dam, con un sentido diferente al que se le da hoy en día, asociado con la búsqueda de un soporte que permita representar textos con la misma calidad y facilidad que lo hace el papel. Berners-Lee creó una forma simple de representar los vínculos en los documentos y de navegar entre ellos y concibió un sistema distribuido que hiciera posible la incorporación de nuevos

documentos y vínculos sin necesidad de modificar los anteriores.

El Web representa un salto cualitativo importante en comparación con la imprenta, la prensa escrita, el correo (postal o electrónico), el teléfono, la radio o la televisión. En todos estos casos la información fluye desde una única fuente hasta uno o muchos destinatarios finales, pero no tiene la capacidad de ser intercambiada en todas las direcciones, como permite el Web. En 1993 comenzaron a aparecer diversos navegadores, y Marc Andreessen, un estudiante de la Universidad de Illinois, creó Mosaic, que le sirvió de base para lanzar dos años más tarde Netscape, un producto ya comercial. Ese periodo marca para muchos la irrupción pública, y en cierta forma el nacimiento de Internet con el sentido y valor que ahora le damos: un gigantesco supermercado de la información en el que tanto individuos como organizaciones comercian e intercambian libremente información y servicios.

Mientras esto ocurría, la tecnología desarrollada para permitir la conexión en red se incorporó masivamente en los ordenadores y aparecieron proveedores de servicios privados que comenzaron a ofrecer sus servicios. Cuando Internet pasó en 1995 a ser completamente privada se habían sentado las bases para la aparición arrolladora de un nuevo medio. Según el Departamento de Comercio de EE.UU., Internet sólo tardó cuatro años en alcanzar la cifra de 50 millones de usuarios, mientras que la televisión necesitó trece y la radio treinta y ocho.

A diferencia de la red telefónica, que fue normalizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, un organismo de las Naciones Unidas en el que si bien la representación de cada nación la ostentan los estados, era básicamente el club que agrupaba a los operadores

nacionales, que fue capaz de definir de forma satisfactoria todos los protocolos que permiten que la red telefónica opere a escala mundial), Internet ha estado autorregulado y se ha convertido en un estándar de facto gracias a su carácter abierto y a que ha sabido dotarse de unos robustos protocolos de comunicaciones (IPS, aunque suelen conocerse por las siglas de dos de ellos: TCP/IP) que son la lengua franca de la red.

El Protocolo de Internet (IP) define la forma como deben construirse los paquetes de datos o datagramas y la manera de encaminarlos por la red. Los dos elementos principales del paquete son los datos y las direcciones del destinatario y del remitente; éstas se establecen mediante cuatro octetos o 32 bits, que normalmente se escriben en su notación decimal separados por puntos. Esto representa un total de unos cuatro mil millones de direcciones diferentes, un valor inferior a los cien mil millones de números telefónicos que permite el actual sistema de numeración internacional con once cifras. Es una estructura jerárquica que define la red a la que pertenece el servidor. La escasez de direcciones de la versión actual hace que muchos usuarios no dispongan de una dirección IP fija, y se les vaya asignando una dinámicamente cada vez que se conectan. Este problema se resolverá con la nueva versión del protocolo IPv6, que aumentará su tamaño a 128 bits, y cubrirá la demanda que pueda haber con un total de 2^{128} direcciones, permitiendo que todos los usuarios puedan solicitar una IP fija, es decir, que un ordenador tenga siempre la misma dirección. Esto es especialmente útil para la transferencia de ficheros y para los juegos en red, y hará también posible el sueño de que cualquier dispositivo electrónico pueda tener su propia identidad en Internet.

El otro protocolo reseñado, TCP, ejerce el control de las transmisiones por la red y es el que asegura un correcto

transporte de los datagramas, asegurando la recepción, el acuse de recibo y la corrección de errores. También controla el estado de la red y disminuye el tráfico cuando se producen congestiones. Estos protocolos aseguran una transmisión fiable por la red, pero no pueden garantizar el tiempo que va a transcurrir hasta que un mensaje sea entregado en el ordenador de destino.

Las redes de conmutación de paquetes pueden funcionar de dos maneras diferentes, según sea la forma en que transmiten los datos. Un primer modo de transmitir los paquetes consiste en enviar los datagramas sin establecer previamente una ruta fija entre el origen y el destino. Los datagramas se van acumulando y poniendo en colas en nodos de la red y pueden seguir distintos caminos para llegar a destino en función de la carga de tráfico, por lo que también pueden llegar desordenados; esto es lo que ocurre con el protocolo IP. La otra forma implica establecer previamente una ruta única entre el emisor y el destinatario y asegurar que los datos viajan por este “circuito virtual”, se dice en este caso que la transmisión está orientada a conexión, y los nodos de la ruta reciben los datos y los almacenan hasta el momento en que pueden reenviarlos al siguiente punto del camino; se reciben ordenados en consecuencia, pero no se garantiza el tiempo que va a emplearse en completar la transmisión. ATM y Frame Relay son claros ejemplos de este tipo, en los que se establece previamente un circuito virtual.

Desafortunadamente, de la misma manera que las redes de conmutación de circuitos no son adecuadas para transmitir datos, las de conmutación de paquetes tampoco lo son en la actualidad para transmitir voz, dado que no garantizan que puedan cumplir las limitaciones de retardo que se requieren para que una conversación resulte inteligible.

Hacer compatible ambos tráficos, voz e Internet, plantea un formidable reto tecnológico para los operadores de telecomunicaciones. Durante un tiempo, la red convencional pudo soportar el tráfico de Internet sobre los mismos circuitos vocales, pero dado que los tiempos de conexión a Internet son mucho más dilatados, las sobrecargas en la red son inevitables, ya que no está dimensionada para soportarlo. Ambos tráficos han de separarse y se tienen realmente dos redes diferentes.

La integración de los tráficos de voz e Internet es una situación muy próxima a lo sucedido en los transportes terrestres con las redes ferroviarias de alta velocidad. Las vías tradicionales no permiten la circulación de trenes a alta velocidad por lo que han de tenderse nuevas líneas; estas nuevas vías, además, no deberían soportar tráficos lentos de cercanías o pesados mercancías que dañarían las vías. Disponemos de ordenadores personales y de aplicaciones informáticas que nos permiten una gran capacidad de manipulación y de representación de datos, que son maravillas tecnológicas comparables a los trenes de alta velocidad, pero requieren para poder funcionar correctamente una nueva red de comunicaciones.

Esta situación de dualidad de redes no se quiere mantener en el futuro, y se va a tender a que una única red de conmutación de paquetes se utilice para transportar también la voz. Un ejemplo de esta tendencia es el esfuerzo que se está haciendo para desarrollar la transmisión de voz sobre el protocolo IP.

La red troncal de transporte de los operadores hoy en día está digitalizada, por ella viajan de la misma manera la voz y los datos. De hecho, la voz se digitaliza en la central telefónica y se transmite multiplexada con otras conversaciones telefónicas o con paquetes de datos, por lo

que el problema principal está en la red de acceso y en las centrales de conmutación si se quiere usar una única red. Si se tiene en cuenta además que aproximadamente la mitad del valor de un operador telefónico está enterrado en las zanjas que contienen los cables, se comprende fácilmente su interés en aprovechar al máximo su red convencional de pares trenzados de hilo de cobre.

A comienzos de los años setenta, y mientras se desarrollaba Arpanet para conectar ordenadores de centros académicos alejados, comenzaron a aparecer también de forma precisa los problemas de comunicación entre ordenadores próximos, situados en varios edificios o incluso en diferentes habitaciones del mismo lugar. Xerox, una empresa que en aquellos momentos controlaba el mercado de máquinas fotocopadoras, fue pionera en el estudio de los posibles procedimientos de comunicación entre máquinas interconectadas en unas redes que hoy denominamos de área local. Gran parte del mérito de este trabajo corresponde a Robert Metcalfe que en 1973 configuró Ethernet e identificó una regla básica de las redes de telecomunicación, conocida como la ley de Metcalfe, que tiene un profundo impacto económico: el valor de una red crece proporcionalmente al cuadrado del número de nodos que la forman. La ley se sustenta en el hecho de que cuando se incorpora un nuevo usuario se puede comunicar inmediatamente con todos los anteriores, y pone de manifiesto el efecto de avalancha que se crea cuando se dispara el crecimiento de una red, como ha ocurrido con Internet, o ilustra el lento crecimiento de los fax en los años ochenta (¿de qué servía tener un terminal si no había a quien mandarle un fax!). También explica por qué las redes que no son capaces de crecer están abocadas al fracaso y a desaparecer.

Para conectar ordenadores de forma eficiente se necesita un protocolo que gobierne el proceso de comunicación y la

forma en la que se accede al medio de transmisión. El acceso siempre resulta ser un elemento limitador, ya que está ligado a la escasez de algún recurso. En estas redes, para organizar el tráfico se optó por un mecanismo de escucha, conocido como de detección de portadora, mediante el cual todas las máquinas observan continuamente si el canal está desocupado. Un ordenador que desee transmitir sólo lo podrá hacer cuando detecte que no hay transmisiones en curso en la línea, pero cuando lo haga es posible que aparezcan conflictos, ya que al estar separadas físicamente las máquinas es inevitable que en algún momento más de una esté a la espera de transmitir, detecte que el canal está libre e inicien la transmisión simultáneamente, produciéndose entonces una colisión que destroza los mensajes y se han de abortar las transmisiones mediante una señal de bloqueo. Cuando esto ocurre, los nodos han de parar todas las transmisiones y esperar un intervalo de tiempo aleatorio antes de volver a reiniciarlas. Si al reintentarlo se vuelven a producir colisiones, este intervalo de tiempo se duplica en cada ocasión para disminuir drásticamente la probabilidad de ocurrencia, pero si al cabo de un número máximo de intentos la situación persiste, abandonarán y notificarán a la red la congestión.

Ethernet tiene una estructura de bus, en la que todos los terminales cuelgan de un único tendido y la forma más simple y típica de construirlo es mediante un cable coaxial al que se van pinchando todas las estaciones. Su primer impulsor fue Xerox, que junto con Digital e Intel desarrolló el primer estándar que vio la luz en 1980, y a partir de 1983 fueron incorporados a la familia de estándares del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), la sociedad profesional norteamericana del sector, denominándose IEEE 802.3.

En paralelo, IBM desarrolló una estructura en anillo conocida como Token Ring con una estrategia de acceso determinística. En ella un testigo va pasando de un nodo a otro y cuando uno de ellos tiene información para transmitir captura el testigo y se la añade junto con la dirección de destino. El mensaje va pasando por los nodos, como si estuviera en un carrusel, y al hacerlo por el de destino es copiado y marcado como recibido antes de continuar su recorrido por el anillo. Cuando llega de vuelta, el emisor comprueba si su mensaje ha sido recibido correctamente y libera el testigo para que pueda ser utilizado por otro. Estandarizado como IEEE 802.5, ha sido una configuración que ha quedado relegada prácticamente a las redes de IBM.

En 1982 Xerox renunció a los derechos de marca registrada que ostentaba sobre la denominación Ethernet y esta tecnología ha dominado completamente el mercado por la gran diversidad de tarjetas de red disponibles y el bajo coste que han alcanzado; el éxito de Internet se debe también en gran medida a la existencia de estos equipos. Tradicionalmente, Ethernet funcionó a 10 Mbit/s sobre cables coaxiales de diferente grosor, pudiendo conectar hasta un centenar de usuarios con un cable de hasta quinientos metros de longitud, si bien se emplean también pares trenzados de cobre y fibras ópticas. A partir de 1995 la velocidad de transmisión se amplió hasta 100 Mbit/s sobre los mismos soportes anteriores en una configuración llamada Fast Ethernet y que ha permitido una migración natural de las redes instaladas hacia otras mucho más rápidas. En la actualidad la apuesta es ofrecer una velocidad de 1 Gbit/s con la sencillez y el bajo coste característico de las dos anteriores, tanto sobre fibra como sobre pares de cobre, si bien en este último caso limitado a distancias inferiores al centenar de metros. Conocida como Gigabit Ethernet es la tecnología preferida para las redes de área local de alta velocidad y, con funciones adicionales que permitan

garantizar la calidad del servicio, podrá extender su ámbito de actuación hacia redes de mayor extensión geográfica.

Además de estas redes de cable han aparecido también otras que emplean enlaces de radio para configurar la red local. De éstas, la más importante es la familia basada en el estándar IEEE 802.11, conocidas como redes inalámbricas. En su forma más simple permiten velocidades de 1 Mbit/s y están teniendo cada vez mayor aceptación en comunidades de usuarios que quieren establecer su propia red de forma cooperativa; al hacerlo mediante radio se evitan los impedimentos que comporta la obra civil de cualquier red de cable y como emplean las bandas de frecuencia de uso libre, las destinadas a usos científicos, médicos o instrumentales, entre las que se incluye la frecuencia de 2,45 GHz a la que funcionan los hornos de microondas, no se requiere una licencia para instalarlas. El protocolo de acceso es muy semejante al de Ethernet, aunque más elaborado para evitar la aparición de colisiones, que son más difíciles de gestionar en un entorno radioeléctrico, en el que se transmite y recibe por el mismo canal, que en el caso de un cable.

Estas redes se diferencian de las de telefonía móvil en que no están concebidas para dar cobertura en grandes áreas ni a vehículos en movimiento, pero tienen la gran ventaja de que intentan crear productos de bajo coste con un gran potencial para hacerse con importantes mercados y pueden llegar a ser formidables competidores de los sistemas móviles, que muy frecuentemente se usan sin estar en movimiento. Entre estos mercados están las redes internas en edificios empresariales, complejos hospitalarios, accesos a bases de datos, o el control y seguimiento de mercancías en grandes almacenes. Al utilizar principalmente frecuencias de uso libre, se evitan todos los aspectos económicos conocidos de los concursos y subastas de licencias, si bien al precio de la posible aparición de interferencias. Su desarrollo está siendo alentado por los

fabricantes de equipos de interconexión de redes y esconde una batalla silenciosa entre ellos y los fabricantes de equipos de telecomunicación. Son redes que atacan directamente el modelo de negocio de los operadores monolíticos que ejercen un rígido control de los servicios ofertados. En 1999 se publicó un segundo estándar de mayor velocidad, el 802.11b, denominado Wi-Fi, parafraseando las conocidas siglas de la alta fidelidad (Hi-Fi), y que permitirá a los usuarios velocidades de hasta 11Mbit/s.

La familia de estándares de redes 802 es la más exitosa que se conoce y refleja el papel preponderante del IEEE en este terreno y muestra, al igual que ha ocurrido con la estandarización de Internet, el dinamismo que organizaciones ajenas a los estados pueden imponer en estos campos. Todos los miembros de esta serie están concebidos con aplicaciones de Internet en mente, en las que la estandarización que estas normas introducen se está convirtiendo en la razón fundamental de su triunfo, más incluso que la velocidad o las prestaciones específicas que cada una de ellas aporta. Dentro de esta familia se incluyen otras estructuras de red, de las que merece la pena destacar dos inalámbricas: la 802.16, que pretende ampliar la cobertura de estas redes al entorno metropolitano, asegurando el acceso mediante estaciones base y antenas en los tejados de los edificios, y la 802.15 que se encamina en la dirección opuesta, creando redes de corto alcance que permitan la conexión de ordenadores y sus periféricos, teléfonos fijos y móviles, y en general de cualquier dispositivo electrónico, situados en un radio de hasta algunas decenas de metros. Esta última aplicación, conocida como Bluetooth, fue iniciada por los fabricantes escandinavos de telefonía móvil y tras diversos retrasos en su desarrollo estamos ya a las puertas de ver su irrupción en el mercado. Cualquier dispositivo equipado con Bluetooth puede comunicarse con otros siete dispositivos, formando

una red en la que uno de ellos actúa de maestro y supervisor de una estructura de comunicaciones donde los restantes son esclavos de él, con una capacidad total de 720 kbit/s. Diez de estas redes pueden funcionar simultáneamente en la misma zona, permitiendo una capacidad total de 6 Mbit/s.

En contraste con estas redes totalmente liberalizadas, las administraciones han asignado espectro a los operadores para que puedan suministrar acceso mediante radio a la red telefónica. Se basan en tecnologías inicialmente previstas para la distribución de programas de televisión en comunidades de población dispersa o escasa, donde en términos económicos no es viable desplegar una red de distribución por cable, pero que están siendo instaladas en entornos urbanos y polígonos industriales. Además de telefonía, la razón principal de su instalación es que pueden ser empleadas también para obtener acceso de banda ancha a Internet o para interconectar sistemas ubicados en múltiples edificios, ya que pueden llegar a suministrar servicios de datos con velocidades de hasta 8 Mbit/s. Una base sirve una zona distribuyendo señales a múltiples estaciones dispersas, por ello estos sistemas se conocen con las siglas LMDS, acrónimo inglés de Local Multipoint Distribution Service. En España funcionan en dos bandas de microondas, a 3,5 GHz y a 26 GHz y los operadores han dirigido sus estrategias comerciales, principalmente, hacia el mercado empresarial, pero están encontrando serias dificultades para consolidar su modelo de negocio.

Hace ahora veinticinco años la UIT concibió la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) con un ambicioso objetivo, hacer converger las redes de datos y de telefonía. Tras más de diez años de esfuerzos de especificación y diseño y una gran inversión económica RDSI tuvo una lenta implantación en el mercado y las líneas básicas instaladas en todo el mundo nunca alcanzaron cifras espectaculares; en el año

1996 sólo se habían instalado seis millones de estas líneas en todo el mundo. El poco éxito fue debido a que seguía siendo un sistema basado en conmutación de circuitos y sólo podía transmitir paquetes a baja velocidad; es un sistema de banda estrecha. Su pretencioso nombre no hace realmente honor a los servicios que ofrece, dos canales de 64 kbit/s, en su configuración básica, y no fue hasta el reciente despegue de Internet que este tipo de líneas tuvieron un respetable y efímero incremento de demanda gracias a las campañas publicitarias y a las ofertas de los operadores telefónicos. En la actualidad hay instaladas en España unos dos millones de estas líneas, que en muchos casos migrarán a ADSL.

Pero el uso de la red telefónica convencional para transmitir vídeo al hogar abría nuevas posibilidades de negocio para los operadores telefónicos y merecía la pena ser explorado en profundidad, máxime cuando los operadores de televisión por cable querían también entrar en el mercado de telefonía. Las películas estarían cargadas en potentes servidores y los usuarios podrían demandar la descarga en cualquier momento, interrumpirla para atender otros menesteres y retomar la visión del film en la escena en que se había interrumpido. La realidad es siempre el mejor banco de prueba de estas ideas y diversos proyectos piloto, en particular uno muy extenso en Florida, pusieron de manifiesto el formidable reto tecnológico que representaba el desarrollo de esos servidores, sobre los que descansaba el sistema, y sobre todo que no parecía que el suministro de vídeo bajo demanda ilusionara a los usuarios.

Ahora que nos encontramos a las puertas de una revolución multimedia, conviene recordar que hace treinta años una experiencia similar, salvando las distancias del avance tecnológico que desde entonces se ha producido, se saldó con un sonoro fracaso. En la Feria Mundial de Nueva York de 1964, ATT presentó el *Picturephone*, un

videoteléfono que empleaba un grupo básico de transmisión de 1,5 Mbit/s (T1) y permitía videoconferencias. Tras múltiples experiencias en diversas ciudades, el sistema se ofreció comercialmente en 1970 y no tuvo prácticamente acogida ni en el entorno empresarial ni en el doméstico, a pesar de que se le auguraban buenos resultados. El precio fue ciertamente un factor, pero probablemente no el determinante. Tuvo mucho más que ver con ello el hecho de que las empresas no estaban dispuestas a cambiar la presencia física por la telepresencia y los usuarios domésticos no le veían un valor añadido a poder recibir la imagen de su interlocutor. Desde entonces, se ha seguido insistiendo en las grandes posibilidades de la videoconferencia y su claro impacto económico en el ahorro en viajes y tiempo, y se espera que la telefonía móvil de tercera generación tenga en la incorporación de imágenes a la voz uno de los elementos clave que justifique su implantación. Esperemos que la historia no se repita en este caso y tenga el éxito que de ella se espera.

Es bien conocido el liderazgo europeo en el desarrollo de sistemas de telefonía móvil, pero quizás no lo sea tanto su dominio de las técnicas de compresión de imágenes. En la segunda mitad de los años 80 se avanzó significativamente en la compresión digital de señales de vídeo y en 1988 se creó en el CSELT, el centro de investigación del operador telefónico italiano, el Moving Picture Expert Group que comenzó a desarrollar el estándar MPEG1 con la finalidad de codificar vídeo a 1,5 Mbit/s con la misma calidad de señal que da el sistema VHS. Esto permitía contemplar el uso de redes de telecomunicación para transmitir vídeo directamente a los hogares, lo que permitiría eliminar el trasiego de cintas y haría desaparecer el floreciente mercado de los videoclubs. Como todos hemos podido observar, esto no ocurrió y vale la pena señalar que cuando se idearon los grabadores de vídeo la aplicación que se contemplaba era la

reproducción de programas de televisión que se grabarían cuando se estuviera ausente del hogar; no se consideró que el alquiler de películas sería el uso preferido y que podría constituir un próspero negocio. Una vez más, los propietarios de contenidos, en este caso los estudios cinematográficos, son los que han marcado las pautas de este negocio.

Para poder transmitir las imágenes por el par de cobre tradicional se requería una nueva filosofía de transmisión y un estudio muy cuidadoso de la calidad de los circuitos.

La ruptura de ATT en 1984 afectó a los Laboratorios Bell, que quedaron formalmente adscritos a ATT, por lo que las siete operadoras regionales resultantes de la desmembración crearon su propio centro de investigación en comunicaciones, Bellcore, con la finalidad de establecer su propia estrategia tecnológica. Entraron de lleno en el desarrollo de terminales RDSI y para simplificar la instalación de líneas de banda ancha (2 Mbit/s) entre las centrales y los usuarios, eliminando la necesidad de intercalar repetidores y de tener que seleccionar pares específicos dentro de los mazos de cables, concibieron los módem HDSL (High bit rate Digital Subscriber Line), que forman parte de una constelación de dispositivos que se conocen con las siglas xDSL, que vienen a significar bucle de abonado digital, y un prefijo que indica la velocidad o el carácter simétrico o asimétrico del enlace.

Quince años más tarde, estas últimas Navidades, uno de los miembros de esta familia, el ADSL, se ha convertido en un término tecnológico de moda, como consecuencia de las campañas de lanzamiento que han realizado todos los operadores de este módem de conexión a Internet. Es una tecnología bien valorada por los operadores telefónicos y por los usuarios, pues permite ofrecer un mayor ancho de banda

para acceso a Internet con costes de instalación relativamente bajos. Está además bien adaptada a los esquemas actuales de tráfico en Internet, donde los datos fluyen principalmente desde los servidores de la red hacia el ordenador del usuario.

Estas líneas digitales son sistemas bidireccionales, conocidos como dúplex con cancelación de ecos. En los sistemas simétricos (HDSL, SDSL) se solapan las frecuencias de las comunicaciones en ambos sentidos, cosa que no ocurre en los asimétricos (ADSL, VDSL), por lo que presentan diferentes problemáticas en cuanto a diafonías, es decir el acoplamiento o interferencia entre distintos usuarios (lo que en términos coloquiales se conoce en las líneas telefónicas como “cruce de líneas”). Asimismo, los simétricos pueden utilizar uno o dos pares de hilos de cobre para transmitir dos megabits por segundo hasta distancias de unos cuatro kilómetros, empleando modulaciones 2B1Q (un código en el que dos bits se representan por un símbolo cuaternario) y CAP (modulación de amplitud y fase con portadora eliminada). Los asimétricos permiten al usuario bajar de la red un gran caudal de datos, a velocidades de hasta 8 Mbit/s en ADSL, por ejemplo, mientras que la transmisión hacia ella se realiza a mucha menor velocidad, 640 kbit/s como máximo, si bien el sistema que se popularizará permite unas velocidades de pico teóricas en ambos sentidos de 256/128 kbit/s, en la práctica no se obtienen transferencias de datos a velocidades superiores al 10-20% de esos valores por la calidad de los cables y el tráfico en la red.

ADSL emplea un concepto de modulación diferente a los reseñados, basado en el adagio romano de “divide y vencerás”. La red telefónica no se ha construido tendiendo un par nuevo de hilos entre un hogar o una empresa y una central cada vez que se instalaba una nueva línea, sino

empleando grandes mazos de cables de pares trenzados tendidos previamente, que se van empalmando en diversas cajas de distribución. Eso implica que el circuito físico que une la central y el terminal incluye varias secciones de cables con ramales, puentes y empalmes. En la transmisión analógica de voz esto no presenta problemas, pero cuando se quiere emplear el mayor ancho de banda posible para realizar una transmisión digital de datos surge una gran complicación, la selectividad con la frecuencia que introducen todos los empalmes y los cabos sueltos de cable, que hace que ciertas frecuencias se atenúen fuertemente. Para combatir este fenómeno, en lugar de emplear una única frecuencia portadora modulada con todo el flujo de datos, se utiliza un gran número de portadoras, cada una de las cuales transporta una porción de esos datos. Esto permite adecuar la transmisión al estado de la línea, no enviando prácticamente información en aquellas frecuencias que vayan a ser maltratadas por ella. Consiste básicamente en dividir el espectro, como si dividiéramos un único par de hilos en muchos pares. La técnica se conoce como DMT, de modulación de múltiples tonos discretos y fue propuesta por el Profesor de Stanford John Cioffi, fundador de Amati Communications, la empresa que desarrolló inicialmente esta tecnología y que fue absorbida por Texas Instruments en 1997. En pruebas de equipos realizadas por Bellcore DMT demostró ser la codificación de línea que ofrecía mejores prestaciones y fue seleccionada como estándar y adoptada por la UIT para la normalización internacional de ADSL, pero a lo largo de todo el desarrollo de xDSL han competido los dos esquemas de codificación, CAP y DMT, y existen servicios en uso que han empleado el primero de ellos; la falta de un estándar definido ha lastrado su implantación, si bien no ha sido un factor determinante. De hecho, el poco interés que han tenido las operadoras en desplegar líneas xDSL ha sido debido en gran parte a que Internet representaba un crecimiento continuo del 3-5% de demanda

de segundas líneas convencionales en domicilios y del orden del 30% en líneas RDSI. Finalmente, han sido condicionantes de tipo político y socioeconómicos los que han conducido a la implantación del ADSL, derivados de la competencia que representan los accesos por cable y por radio, y de la ausencia de interés por parte de Telefónica de desplegar la red de fibra óptica que exigía la licencia de operador de TV por cable que se le había concedido.

ADSL utiliza el par de cobre convencional para inyectar los datos sobre la voz. Para ello se requiere instalar en el domicilio un combinador, o un filtro en las versiones de bajo coste y baja velocidad, que permite superponer el módem ADSL al que se conecta el ordenador con el teléfono. El proceso ha de completarse a la entrada de la central telefónica con un equipo similar y compatible en el que se separan las señales de voz de los datos, los multiplexadores de acceso de los bucles digitales de abonados (DSLAM). Las conversaciones telefónicas son cursadas a través de la red telefónica conmutada y el tráfico de datos multimedia de Internet se descarga inmediatamente y se envía por una red de datos diferenciada, de tipo IP sobre ATM.

Uno de los grandes avances históricos del desarrollo del teléfono consistió en cargar periódicamente las líneas de cobre intercalando inductancias cada cierta distancia. Norbert Wiener en su obra "Inventar. Sobre la gestación y el cultivo de las ideas" describe como AT&T tramó aprovechar las ideas de Oliver Heaviside poniendo a trabajar, en busca de resquicios que le permitieran patentarlas, a G. A. Campbell, un ingeniero de la casa y a Michael Pupin un profesor universitario que aparecería como autor de las patentes para aparentar la independencia del descubrimiento y reforzar su posición en caso de litigios; Campbell realizó el trabajo, Pupin se llevó la fama y el dinero, y Heaviside fue el gran burlado en todo este asunto.

Esta técnica permitió mejorar el comportamiento de la línea al ecualizar la respuesta a las distintas frecuencias de la voz e hizo posible dar servicio a usuarios cuyos domicilios estaban situados a varios kilómetros de distancia de las centrales y tender líneas telefónicas interurbanas. Estas bobinas de carga se han mantenido en servicio hasta la actualidad, si bien en entornos urbanos como los españoles las cortas distancias entre las viviendas y las centrales, inferiores a cinco kilómetros, no exigían en general su empleo. ADSL requiere la eliminación de estas bobinas con el fin de poder aprovechar al máximo el ancho de banda del cable y firmará la partida de defunción de ese dispositivo centenario. Asimismo, ADSL precisa de una red de cable moderna, ya que la calidad de los pares y el acoplamiento entre ellos limita en gran medida el aprovechamiento de las líneas existentes, al provocar interferencias con las líneas próximas. No se conoce con precisión el límite del número de pares de un cable que pueden emplearse simultáneamente con ADSL, si bien algunas estimaciones lo reducen a no más del 30% del total de pares. Ha de considerarse también que en edificios de una cierta antigüedad los cableados telefónicos existentes requerirían ser remozados para constituir la base de una red de área local.

Para poder funcionar correctamente ADSL requiere reservar los primeros cuatro kilohercios del espectro para la señal telefónica analógica, situando los datos a frecuencias superiores en dos canales separados, uno de salida de los datos que envía el ordenador del usuario hacia la red, que se conoce también como enlace ascendente, y otro de entrada, para recibir los datos que envía la red, denominado enlace descendente. Las subportadoras están separadas entre sí 4,3125 kHz y su espectro se asemeja a los dientes de un peine, por lo que si la modulación DMT emplea 32 tonos en el enlace ascendente ocupará 138 kHz, mientras que los 256 en el enlace descendente requerirán 1,104 MHz; cada uno de

estos tonos o portadoras puede transportar entre 0 y 2^{15} bits por segundo, dependiendo de la respuesta de la línea a esa frecuencia. Al iniciar una comunicación, el módem mide la relación de la señal respecto al ruido en cada una de las portadoras y determina el número de ellas que se van a emplear en la sesión. La ocupación espectral típica de ADSL reserva los primeros 20 kHz para la señal analógica de voz, y si se trata de una línea digital RDSI los primeros 138 kHz; situándose a continuación el canal de datos ascendente, seguido del descendente, pudiendo ocupar hasta dos megahercios.

La gran ventaja de ADSL para un operador telefónico es que le permite separar el tráfico de Internet del telefónico, cosa que no puede hacer con los módem de ordenador tradicionales y que están provocando sobrecargas de la red a determinadas horas. Para reducir significativamente el coste de instalación, las compañías están ofreciendo kits autoinstalables en los que el combinador se ha sustituido por un filtro y no se requiere el envío de un operario para comprobar el cableado, tender nuevos hilos e instalar los equipos. Los filtros se necesitan para proteger la transmisión de datos de las interferencias que se puedan producir al utilizar simultáneamente el teléfono; al sonar los timbres de llamada, durante la conversación o al colgar se producen transitorios en la línea que pueden provocar la pérdida de datos o la interrupción de la sesión, teniendo que reiniciarse la comunicación.

De los sistemas simétricos, HDSL permite un flujo de datos en ambos sentidos de 2 Mbit/s empleando dos pares de cobre. No es compatible con la telefonía analógica y no está optimizado para Internet, por lo que su uso futuro se localizará en las comunicaciones en entornos empresariales, a diferencia de ADSL, que lo hará en el mercado residencial o de pequeñas oficinas. Si bien puede soportar aplicaciones

de interés como la videoconferencia, que necesitan flujos de datos simétricos para poder enviar imágenes bidireccionalmente, las aplicaciones contempladas son la interconexión de redes de área local o de centralitas telefónicas o el acceso a redes de datos de alta capacidad. HDSL garantiza ese ancho de banda hasta distancias de cuatro kilómetros, pero es mucho más costoso por la complejidad técnica de los módem. A título de ejemplo, la cancelación de ecos en un módem RDSI requiere realizar dos millones y medio de operaciones por segundo, mientras que en uno HDSL esa cifra aumenta a un centenar de millones; a ello hay que añadir que los procesadores digitales de señal que se emplean poseen una capacidad de proceso del orden de 250 MIPS y ofrecen una calidad de transmisión comparable a la habitual en sistemas de fibra óptica, resultando en la pérdida de un solo bit de cada diez mil millones enviados, lo que equivale a una tasa de error de 10^{-10} .

Aplicaciones futuras que requieran enormes anchos de banda (hasta 52 Mbit/s en el sentido central - usuario y de 12 Mbit/s usuario - central) en cortas distancias (200-1.000 m), como podría ser la transmisión de imágenes tridimensionales o de realidad virtual, podrían ser acomodados en VDSL, si bien previsiblemente en este caso, la fibra desbancará siempre a los pares de cobre.

A la espera de la llegada de unos accesos rápidos y baratos a Internet, la inmensa mayoría de los internautas continúan conectándose mediante un módem telefónico, un antiguo dispositivo que es junto con el fax, y al margen del teléfono, el terminal conectado con más frecuencia a una toma telefónica. Los operadores siempre han tratado de mantener el máximo control posible sobre sus redes y conservar la propiedad de los terminales. Diversas razones técnicas avalaban esta actitud y una de las principales se

remonta a los orígenes del teléfono, cuando estos contenían sus propias pilas para suministrar la corriente necesaria para poder llamar y comunicarse. El continuo trasiego de pilas condujo en un primer paso, a finales del siglo XIX, a su sustitución por una magneto, un generador de corriente continua que funcionaba mediante una manivela que puede observarse en muchos modelos de teléfonos antiguos, y posteriormente a la alimentación eléctrica de todos los teléfonos desde baterías situadas en las centrales. Esto dio una gran autonomía al sistema, al permitirle funcionar con independencia del suministro eléctrico de los hogares y oficinas, pero reforzó el control de las compañías telefónicas, pues los teléfonos no sólo debían ser adecuados desde el punto de vista de las comunicaciones, sino también del suministro eléctrico, prohibiéndose a los abonados realizar cualquier acción que perturbara o dañara la red. En 1968, motivado por el desarrollo que iban adquiriendo los ordenadores, el regulador norteamericano consideró que no era razonable mantener la prohibición a los usuarios de conectar libremente terminales a las líneas telefónicas, y abrió este nuevo mercado, con estrictas restricciones de los equipos inicialmente y un simple proceso externo de homologación más tarde.

Como la red telefónica estaba preparada para tratar señales de voz, que son analógicas, para transmitir por ella las señales digitales que producen los ordenadores o los terminales de datos se necesita convertirlas en analógicas, para que su espectro caiga dentro del ancho de banda del canal telefónico y sean tratadas por la red de la misma forma que lo hace con la voz humana. Este proceso se realiza mediante una modulación de las señales que se envían y una demodulación de las que se reciben, de ahí el acrónimo de módem que se emplea para designar estos equipos. Es un claro ejemplo de adaptación al medio, pero que va en

sentido opuesto a la tendencia actual, que es digitalizar la voz.

Los primeros módem datan de los años cincuenta y en ellos se aplicaban técnicas radiotelegráficas como la modulación por desplazamiento de frecuencia, en la que cada bit representa un cambio de la frecuencia portadora. Apenas alcanzaban a transmitir unos cientos de bits por segundo y así se mantuvieron durante un par de décadas. La primera normalización internacional ocurrió en 1964 con la recomendación V.21 de la UIT, con una velocidad de 300 bit/s que se empleó durante mucho tiempo y que todavía se mantiene en la fase inicial de la llamada, cuando los módem negocian las condiciones en que van a establecer la comunicación. Quedaba un gran margen de mejora para acercar estas velocidades al límite de Shannon, situado en torno a 30 kbit/s, que se alcanzó mediante técnicas más complejas de modulación, cancelación de ecos y la incorporación de códigos en enrejado correctores de errores. El primer salto significativo fue hasta 14,4 kbits/s con el estándar V.32, cifra que ha ido aumentando paulatinamente hasta llegar en 1996 a los 33,6 kbit/s del V.34, gracias también a la mejora que se estaba produciendo entonces en las redes telefónicas. Las familias actuales, basadas en los estándares V.90 y 92 pueden alcanzar asimétricamente los 56 kbit/s si la línea es de gran calidad y uno de los extremos es digital, y sólo en el sentido del terminal digital al analógico; en el sentido opuesto la velocidad se mantiene como máximo en los valores anteriores.

La oferta de estos dispositivos, la sencillez de su instalación y la facilidad de uso de la red telefónica hacen que un módem sea la forma más simple y económica de acceso a Internet, por ello más del 80% de los usuarios siguen empleándolo en la actualidad, y no se prevé hasta el año 2005 que esta cifra caiga hasta el 50%. Gracias a ellos y al

Web, Internet ha podido llegar al nivel actual de penetración. El competidor mayor de estos dispositivos, y de los módem ADSL, son los módem que los operadores de cable conectan en los domicilios de los usuarios para dar acceso a Internet por medio de su red de distribución de cable. Estos dispositivos, conocidos como módem de cable (o cablemódem), son los que hoy en día pueden suministrar el acceso de mayor ancho de banda.

En las redes de distribución de televisión por cable, las fibras han ido sustituyendo progresivamente en las redes troncales a los cables coaxiales, para evitar sus grandes pérdidas y el uso frecuente de amplificadores, que sólo se han mantenido por su menor coste en la parte final de la distribución, a nivel de edificio o manzana. Esta configuración híbrida de fibra y cable coaxial (HFC) es la que están desplegando los operadores de cable en nuestras ciudades, y si bien el propósito inicial era la distribución de programas de televisión, permiten también suministrar acceso a la red telefónica y, sobre todo, a Internet a alta velocidad. Para proveer estos servicios han de emplearse unos módem específicos de cable que funcionan como enrutadores de los paquetes de datos. El gran ancho de banda de la fibra y del coaxial hace que esta forma de conexión sea la que ofrezca la mayor capacidad, si bien el coste y la dificultad de cablear las ciudades es una empresa de tal envergadura que hace que la consolidación de esta tecnología sólo pueda ser contemplada en un dilatado horizonte temporal. Los operadores de cable actuales deben de afrontar también la conversión de sus cabeceras de televisión de analógicas a digitales. Este cambio les va a permitir aumentar todavía más la capacidad, ya que el espectro que ocupa un único canal de televisión analógico ahora puede ser compartido por entre seis y ocho canales digitales, si bien, al igual que ocurre con la televisión digital terrena, hasta que se disponga en el futuro de los televisores

digitales, se ha de reconvertir a analógica para poder ser vista en los equipos actuales.

Los tiempos de cambio han llegado también a la televisión, que no podía sustraerse a la tendencia general hacia la digitalización. Los sistemas de televisión analógicos han estado siempre lastrados por su ciclo de mejora, que siempre se asentaba sobre la base de hacerlos compatibles con los formatos existentes. Gracias a la incorporación de circuitos digitales, hace ya tiempo que se alcanzaron los escasos límites de mejora que eran posibles, por lo que dentro de una década deberán ser sustituidos por un sistema totalmente digital, si se cumplen los calendarios de la planificación vigente, cosa que resulta cuando menos dudosa. Donde ya se ha instalado es en las plataformas digitales que se difunden desde satélite y pronto lo hará en las de cable, si bien la ausencia de receptores digitales hace que la señal que reciben los dos millones de clientes que tienen en España, deba reconvertirse a analógica para ser presentada en las pantallas del televisor tradicional. Europa está embarcada desde 1993 en un ambicioso proyecto de desarrollo de televisión digital, conocido bajo las siglas DVB (Digital Video Broadcasting), que partiendo de la posición de liderazgo en las técnicas de compresión que ostenta, va a significar una mejora de calidad comparable a la que representó la introducción del color. Este proyecto partía de un costoso fracaso anterior, que pretendió desarrollar una nueva televisión de alta definición para la que la tecnología no estaba madura.

La digitalización de los tres colores básicos de una señal de televisión, o lo que es habitual, de la luminancia y su diferencia con las imágenes de color azul y rojo, genera un caudal del orden de doscientos setenta millones de bits por segundo, totalmente inmanejable por los sistemas de difusión, por lo que ha de comprimirse.

Cuando se habla de compresión han de distinguirse dos situaciones totalmente opuestas, unas en las que no se puede perder información, lo que ocurre en el tratamiento de datos, y otras en las que es inevitable perderla si se quiere reducir drásticamente el flujo de bits, que es el caso de la televisión.

Los programas de compresión de datos que se emplean en los ordenadores son del primer tipo, ya que en un texto o en una hoja de cálculo no es aceptable que se pueda cambiar un sólo dígito; tampoco estaría permitido perder información en imágenes médicas, en balances contables o en datos extraídos de procesos de medida o control. Empleando códigos de longitud variable se puede minimizar el tamaño de la información que se repite con más frecuencia. Existen varios esquemas para realizar codificaciones que reducen el contenido total de bits y permiten una decodificación única, con la restricción de que el código de un carácter nunca sea el inicio del de otro; estos códigos pueden ser representados como caminos desde las raíces hasta las hojas de un árbol. Si el proceso de compresión y descompresión se ha de hacer directamente sobre el flujo de datos, como ocurre por ejemplo en un módem, se requieren algoritmos adaptables que vayan aprendiendo conforme se van procesando los datos. En otras aplicaciones, como en la distribución de datos en CD-ROM o por el Web, o la distribución de vídeo bajo demanda, los datos se graban comprimidos mediante algoritmos que pueden requerir mucho mayor tiempo de proceso, pero que resultan ventajosos.

En el mundo audiovisual, la compresión de las imágenes y del sonido se realiza con pérdida de información, aprovechando las características del oído y de la vista para que esta pérdida nos resulte inapreciable. El estándar MPEG-2 es capaz de reducir los 270 Mbit/s de la señal de televisión a la salida del estudio hasta unos 6 Mbit/s, conservando un

alto nivel de calidad de imagen e incorporando media docena de canales de sonido. Para ello, elimina las redundancias espaciales, estadísticas y temporales de la señal. En una imagen hay grandes áreas que tienen el mismo color y luminosidad, como por ejemplo el cielo o el fondo en un estudio, y en las que los elementos (también llamados pixels) próximos están correlados espacialmente; en este caso podría reducirse mucho la cantidad de información a transmitir describiendo sólo un elemento e indicando en cuantos se repite; MPEG elimina esta redundancia espacial aplicando a la imagen una transformada discreta del coseno y posteriormente reduce estadísticamente el número de bits resultantes aplicando esquemas de codificación de longitud variable similares a los empleados en los compresores que no pierden información. Hay también en las imágenes redundancia temporal, en el sentido que muchas partes de la imagen no cambian o lo hacen muy lentamente en el tiempo; en este caso se comparan las imágenes y sólo se envía la información de los cambios. También las partes lejanas de una imagen pueden resultar más borrosas que las próximas, ya que el ojo no las aprecia con detalle; de la misma manera, el sonido se puede comprimir eliminando los detalles que el oído no es capaz de captar y se transmite con la misma calidad que la de un disco compacto.

Al aplicar estos niveles de compresión a diversos programas resultan distintas velocidades en función de los contenidos y de que predominen imágenes estáticas o en rápido movimiento, por ello se pueden acomodar dinámicamente hasta ocho canales digitales en el ancho de banda que ocupa un único canal analógico, lo que resulta en una eficiencia espectral muy atractiva que puede en el futuro llegar a reducir el espectro de frecuencias asignados a la televisión. Por otro lado, la digitalización de los receptores va a permitir su fabricación con una completa integración de sus circuitos que mejorará su calidad y abaratará los costes,

quedando la reducción de tamaño a expensas de los avances que se produzcan en la consecución de pantallas planas y la desaparición de los tubos de rayos catódicos.

Además de la mejora de calidad de la imagen y el sonido, la televisión digital ofrece la ventaja de poder incorporar servicios interactivos (utilizando el canal de retorno del cable o una línea telefónica en otro caso) permitiendo la televisión de pago o a la carta. Será posible también acceder a Internet desde el hogar y si bien se considera que puede resultar una forma atractiva de hacerlo, por el bajo coste del televisor y su gran penetración actual, hay serias dudas de que pueda resultar compatible con su uso común como vehículo de información y entretenimiento.

El desarrollo de las telecomunicaciones está íntimamente ligado al de los medios de transporte y juntos han configurado las sociedades industriales. Sin el telégrafo no habrían podido funcionar los ferrocarriles, necesitados de un sistema de comunicaciones capaz de transmitir con rapidez las señales de unas estaciones a otras a fin de mantener un tráfico regular y seguro de trenes. El tendido de los hilos telegráficos se realizó a la par que el de los raíles de hierro y los procesos de creosotado de las traviesas sirvió también para proteger los postes y crucetas de madera que constituían el esqueleto de las líneas telegráficas. La colonización del Oeste Norteamericano es el ejemplo más claro de la simbiosis del telégrafo y el ferrocarril, pero también en Europa los tendidos de ambas redes transcurrieron en paralelo.

El desarrollo del telégrafo fue acometido por los Estados, en aquellos casos en que ya existían enlaces telegráficos ópticos que fueron convirtiéndose a eléctricos, o por empresas privadas, sobre todo en el continente americano.

El telégrafo tuvo un profundo impacto en la organización social en el siglo diecinueve, al permitir disponer de un medio de comunicaciones rápido, y los cables fueron determinantes en la creación de una red global. Sus efectos se dejaron sentir inmediatamente en el comercio, en la prensa y en el gobierno de los estados. Internet y las redes de comunicaciones personales van a modificar en una forma similar las relaciones sociales y su efecto será mucho más importante, pues llegará hasta el nivel del individuo.

La primera demostración que Samuel Morse intentó hacer de las ventajas de su telégrafo como medio de comunicación a grandes distancias fue tendiendo en 1842 un cable de dos kilómetros entre Manhattan y la Isla del Gobernador. Este cable fue cortado por el ancla de un barco antes de poder llegar a transmitir mensajes por él y no fue hasta dos años más tarde, una vez tendida, con el apoyo económico del Congreso de Estados Unidos, la línea de 55 km entre Washington y Baltimore, que pudo transmitir el histórico mensaje "What hath God wrought!" con el que se inicia la era de las telecomunicaciones. El tendido de las líneas terrestres y de cables se produjo con inusitada rapidez y el Canal de la Mancha se cruzó con un cable en 1851.

En España se publicó un decreto en la Gaceta de Madrid del 24 de abril de 1855 para unir la corte con todas las capitales de provincias y con los departamentos marítimos; en 1857 quedaban unidas Madrid y Barcelona y en 1860 las Islas Baleares ya estaban comunicadas por cable entre sí y con Barcelona y Jávea.

El reto más importante era cruzar los océanos y realizar el enlace entre continentes, tarea que los Estados no podían acometer y que fue dejada plenamente a la iniciativa privada. Una vez más, la combinación de los empeños de unos soñadores, la visión comercial de unos emprendedores,

la participación de unos científicos y el descubrimiento de un nuevo material, la gutapercha, hicieron realidad un sueño impensable. Arthur C. Clarke, maestro incomparable de la ficción científica describe genialmente en "El mundo es uno" la historia de los cables submarinos y de los satélites de comunicaciones y rinde homenaje al genio de William Thomson, Lord Kelvin, que situó a la ciencia y a la ingeniería británica en un papel dominante de las comunicaciones en el siglo XIX, e hizo que constituyeran un pilar fundamental del poderoso Imperio Británico.

Las ecuaciones de los telegrafistas conservan hoy en día toda la belleza de la sencillez con la que representan la propagación de las señales eléctricas por los cables y ponen de manifiesto los retardos de tiempo que se producen desde que se inyecta la señal en un extremo de una línea hasta que se recibe en el otro. Cuando Maxwell se planteó la síntesis de todo el conocimiento existente de la electricidad, el magnetismo y la luz, uno de sus principales puntos de partida fueron los trabajos de Kelvin. De nuevo, al igual que ocurrió con los trabajos de Fourier, el conocimiento del flujo del calor en sólidos tuvo un gran impacto en el establecimiento de las bases teóricas de las telecomunicaciones.

Kelvin fue capaz de aplicar todo su bagaje matemático y su conocimiento científico de la física al estudio de la propagación en cables, centrándose en el análisis de los transitorios. Al transmitir un pulso en una línea, antes de recibir una réplica del pulso enviado, distorsionada pero reconocible, se reciben una serie de perturbaciones precursoras, que es lo que se considera bajo el nombre genérico de transitorios, y concibió un instrumento muy sensible capaz de detectar estos cambios, el galvanómetro de espejo, en el que la débil corriente inducida en una bobina provoca un desvío apreciable de un haz de luz reflejado en el

espejo. Su vinculación con la Atlantic Telegraph Company es un ejemplo señero de cómo la aplicación de conocimientos científicos permite romper círculos viciosos resultantes de aplicar experiencias limitadas de desarrollos ingenieriles previos; la experiencia adquirida con el funcionamiento de las líneas telegráficas terrestres no era extrapolable a cables submarinos de miles de kilómetros de longitud. Cyrus Field realizó a partir de 1857 cuatro intentos fallidos de tendido de cables transatlánticos y no fue hasta 1866, año en el que el *Great Eastern*, el mayor barco de casco de acero de la época, capaz de almacenar los 3.200 km de cable requeridos para enlazar Irlanda con Terranova, consiguió tender con éxito el cable. La participación de Kelvin en el diseño de los cables y en el tendido permitió que en menos de diez años se pudiera pasar de una idea que parecía descabellada y propia de soñadores a una red telegráfica que podía extenderse por todo el globo.

En 1866 y con dos cables telegráficos transatlánticos funcionando correctamente se había iniciado una nueva era y poco después todos los continentes quedaron unidos telegráficamente y surgió la necesidad de aumentar la capacidad de los cables existentes. Para aprovechar mejor la capacidad del cable se introdujo en las transmisiones oceánicas un concepto que ha estado presente en las telecomunicaciones desde entonces, la transmisión dúplex, que consiste en emplear el mismo cable para transmitir simultáneamente mensajes en los dos sentidos; ello requiere que mediante un duplexor el receptor esté aislado del transmisor situado en el mismo extremo de la línea. Nuestros sentidos operan de este modo, pudiendo oír la voz de otra persona al mismo tiempo que estamos hablando nosotros, y una prueba de la presencia de ese aislamiento es que la percepción que tenemos de nuestra voz es muy diferente de cómo suena realmente, lo que siempre sorprende al escuchar una grabación de la propia voz.

A la introducción de los dúplex en 1871 siguió en 1874 la invención de Thomas Edison del cuadruplexaje o transmisión de dos mensajes en cada sentido. En ese mismo año Emile Baudot inventó un ingenioso sistema de multiplexaje mecánico con el que entrelazaba partes de diferentes mensajes en un flujo continuo de símbolos. En él, un sistema de escobillas recorría anillos concéntricos de cobre divididos en tantos sectores como mensajes se iban a transmitir, dieciséis inicialmente; cada sector contenía cinco contactos que podían estar abiertos o cerrados (cinco bits en la terminología actual) con los que se representaban las 32 (2^5) letras y símbolos del código Baudot. Este código es el origen de los modernos sistemas de codificación de las redes de alta capacidad, en las que un símbolo, o señal que indica un estado de la línea, es portador de varios bits de información. En su honor, se ha denominado Baudio a la unidad con la que se mide la velocidad de modulación, que es el número de señales que se envían por unidad de tiempo.

Un segundo concepto que aparece tiene que ver con el proceso de codificación. El código Morse se asocia con puntos y rayas que resultan de mantener cerrado el circuito con el pulsador más o menos tiempo, pero un código de este tipo, en el que la distinción entre los símbolos ha de hacerse en función de su duración temporal es poco práctico, sobre todo si resulta que en el extremo de la línea los pulsos llegan distorsionados de forma tan desafortunada que los puntos se alargan pareciéndose a las rayas y éstas se acortan confundiéndose con los puntos. Este fenómeno de ensanchamiento y solapamiento de los pulsos al viajar por los medios de transmisión, provoca lo que se denomina interferencia intersimbólica y es un elemento limitador de la cantidad de información que puede transmitirse por ese canal de comunicación.

Para evitar este problema, en los cables telegráficos no se diferenciaban los dos símbolos por la duración de los pulsos; en su lugar se optó por transmitir pulsos de igual duración pero de polaridades opuestas. Un punto estaría representado por un pulso de corriente negativa y una raya por uno de corriente positiva. Este esquema de codificación mediante dos niveles, asociados con dos estados de la línea, es el precursor de todos los sistemas digitales binarios y el primer ejemplo de uso de un esquema de modulación multinivel que hoy aparece en todos los sistemas digitales de comunicaciones.

Los cables submarinos demostraron tener una longevidad envidiable y pusieron de manifiesto una constante en el comportamiento de todos los operadores de los sistemas de comunicaciones: si funcionan correctamente no son sustituidos por otros más modernos a menos que sea necesaria la renovación por envejecimiento del sistema, que es cuando se produce la actualización tecnológica. El coste de tendido de los cables, sean transoceánicos, de pares desde una central telefónica, o de fibra óptica desde una cabecera de difusión hasta el domicilio de un usuario, sólo puede ser contemplada en un marco temporal de uso muy dilatado; los cambios se producen con mayor rapidez en los equipos terminales, transmisores y receptores. Todos los sistemas de telecomunicación tienen una muerte lenta y son sustituidos de forma progresiva por los nuevos con largos periodos de convivencia. El desarrollo informático se ha basado en un paradigma diferente: la sustitución generacional de los sistemas con unos ciclos de vida muy cortos y cuando éstos se encuentran todavía en pleno uso; con la paradoja añadida de que parte de lo que se utiliza deja de funcionar y muchas de las nuevas funciones que incorporan no se emplean.

Otro aspecto que ilustran meridianamente bien los cables telegráficos es el salto cualitativo que implica el aumento de

ancho de banda requerido por las aplicaciones. Los primeros sistemas telegráficos transmitían unas pocas palabras por minuto dependiendo de la habilidad de los telegrafistas. Este esquema de funcionamiento, válido en las redes terrestres, fue pronto puesto en entredicho en las redes submarinas, donde con el fin de mejorar la capacidad se establecieron equipos múltiplex. La idea era sencilla pero de gran alcance: situar en el mismo extremo varios transmisores que iban siendo conectados secuencialmente en el tiempo por un conmutador, disponiendo cada uno de una fracción de segundo para realizar la transmisión; en el otro extremo de la línea se debían conmutar sincronamente los receptores. En el pico de su capacidad estos cables llegaron a transmitir por cada circuito algunas decenas de bits por segundo. Esta técnica de multiplexaje temporal, llamada TDMA, es la misma que se emplea en el sistema de telefonía digital GSM, en el que ocho usuarios comparten el mismo canal radioeléctrico, transmitiéndose los bits de su voz digitalizada en intervalos de tiempo preasignados a cada usuario; una técnica que se asemeja a la concesión de un tiempo definido a los oradores para que expongan o comuniquen por turno sus ideas.

Cuando hoy en día reclamamos la disponibilidad inmediata de grandes anchos de banda para las nuevas aplicaciones se nos oculta habitualmente la enorme dificultad tecnológica que entraña poder disponer de ella. Pasar de la capacidad de unas decenas de kilobits por segundo de un módem a disponer de algunos megabits por segundo implica un factor de escala de aproximadamente mil, el mismo que media entre las capacidades de un cable telegráfico y de uno telefónico, que en el caso de las comunicaciones transatlánticas se tardó prácticamente un siglo en alcanzar. La velocidad de vértigo del desarrollo de Internet va a permitir realizar ese salto en una pequeña fracción del tiempo anterior, pero la entidad del desafío es

de tal magnitud que nunca llegará a poder realizarse con la rapidez que los usuarios deseáramos.

En una de esas sorprendentes coincidencias que depara la historia, Shannon establecía la Teoría de la Información el mismo año que los laboratorios Bell anunciaban también la invención del transistor. La primera iba a permitir cuantificar la información y la segunda a posibilitar su generación, almacenamiento y distribución. Shannon nos dotó del conocimiento de qué se podía hacer en las comunicaciones modernas y el transistor la tecnología con la que poder hacerlo, pero faltaba todavía saber cómo hacerlo; esto ha sido la gran aportación de la algorítmica, que es quien ha permitido las telecomunicaciones actuales y cuya complejidad pasa totalmente desapercibida para los usuarios.

El transistor era un dispositivo buscado desde los años treinta, momento en que se tomó conciencia de que los tubos de vacío estaban alcanzando su límite tecnológico y debían ser reemplazados por una nueva generación de dispositivos electrónicos. En 1904 John Fleming inventó el diodo, una válvula termoiónica con dos electrodos, un cátodo y un ánodo, que se empleó inmediatamente para rectificar corrientes alternas. Fleming fue alumno de Maxwell y trabajó como ingeniero en la compañía eléctrica Edison de Londres, asesoró a la compañía de radiotelegrafía de Marconi y fue el primer profesor de ingeniería eléctrica del University College de Londres. Dos años más tarde Lee de Forest añadió un tercer electrodo, una rejilla, que permitía el control del flujo de electrones, llamó al dispositivo audión y se llevó todo el mérito de haber inventado los tubos electrónicos. El triodo permitía la amplificación de señales débiles y si se realimentaba a la entrada parte de la señal de salida, se disponía de un oscilador que generaba señales de radio y telefonía, pero durante seis años sólo se utilizó para

detectar ondas de radio, función que también hacía el diodo. A partir de 1915 se comenzaron a utilizar en la red telefónica, permitiendo establecer en ese año el primer servicio costa a costa de Estados Unidos (Nueva York – San Francisco), y junto con la invención por Edwin Armstrong en 1918 del receptor superheterodino abrieron las puertas de par en par a la era de la radio que se inició en 1920. Este tipo de equipo sigue siendo la base de todos los receptores actuales; empleando un oscilador local de frecuencia variable se traslada la frecuencia de la señal recibida a una frecuencia intermedia más baja y fija en la que el filtrado, la amplificación y el tratamiento de la señal puede hacerse de forma mucho más eficiente. Durante medio siglo los tubos estuvieron omnipresentes en los sistemas de telecomunicaciones y en los primeros ordenadores; el Eniac construido en 1945 contenía 18.000 válvulas y fue en su momento la máquina electrónica de mayor complejidad construida hasta esa fecha.

En la actualidad, la mayoría de los tubos de vacío han sido desplazados por equipos de estado sólido, pero mantienen todavía nichos en los que no hay una alternativa más eficiente, como son los transmisores de radiodifusión y televisión de muy alta potencia, los tubos de onda progresiva que se embarcan en los satélites de comunicaciones, los klistron de los equipos de radar o los magnetrones de los hornos de microondas de uso doméstico; estos últimos tubos proceden de los desarrollos militares de la segunda guerra mundial y su estructura y los principios de funcionamiento se asemejan poco a los de los originales de principio de siglo.

El transistor de contacto de germanio de John Bardeen y Walter Brattain demostró sobresalientemente sus características amplificadoras pero resultó imposible de producir de forma repetitiva y no fue hasta 1950, cuando

William Shockley, Stanley Morgan, Morgan Sparks y Gordon Teal construyeron el primer transistor de unión de germanio, que se pudo comenzar la fabricación de grandes series de dispositivos.

Prácticamente todo el desarrollo de la mecánica cuántica primero y de la física de estado sólido después, que hicieron posible la invención del transistor había tenido lugar en Europa, pero entre los muchos desastres que la guerra produjo hay que incluir que los trabajos sobre semiconductores de Walter Schottky en la Alemania de la preguerra y de Nevill Mott en Inglaterra fructificaran en ese desarrollo en la otra orilla del Atlántico.

Al igual que los tubos de vacío, los transistores basan su principio de funcionamiento en que una débil corriente controle una de mucha mayor intensidad. En los circuitos analógicos esto permite obtener una gran amplificación de las señales; en los digitales los transistores actúan principalmente como interruptores, permitiendo mediante una señal de control el paso o el corte de la corriente. A partir de esas dos funciones básicas: amplificación y conmutación se ha construido toda la electrónica moderna.

Los transistores comenzaron a emplearse en la red telefónica norteamericana en 1952 y un año más tarde hicieron su aparición los primeros audífonos equipados con transistores, fabricados por Raytheon bajo una licencia gratuita de ATT, justificada por el conocido interés de Alexander Graham Bell en ayudar a los sordos. En 1954 Texas Instruments comercializó el primer receptor de radio construido con transistores y fue un fracaso de ventas por su elevado precio; fue sólo cuestión de tiempo que ese mercado despegara y que el electrodoméstico presente en mayor número en los hogares sea precisamente el receptor de radio.

Sorprendentemente, el transistor pasó en 1948 los filtros de seguridad sin ser declarado su desarrollo de interés militar, pero sólo ocho años más tarde, en 1956, el mismo año en que Bardeen, Brattain y Shockley recibían el Nobel por su invención, ATT renunciaba a todos sus derechos de patentes a consecuencia de un acuerdo judicial en una más de las diversas demandas antimonopolio que han jalonado su historia. En previsión de esa situación, y quizá para evitarla, ATT había comenzado a ofrecer a finales de 1951 licencias de fabricación de los transistores a un coste simbólico. Esto permitió el florecimiento de la industria de semiconductores y que compañías como Texas Instruments y Fairchild Semiconductor primero, e Intel después, pasaran a ser motores de este sector.

Los primeros transistores fueron realizados con germanio por ser más fácil de purificar que el silicio, debido a que su temperatura de fusión era 500 C más baja, pero pasaron diez años hasta que se desarrolló la tecnología de silicio y en 1958 Jack Kilby de Texas Instruments pudo fabricar en un único chip, difundiendo impurezas para crear las uniones p-n necesarias para obtener con un transistor, unas resistencias y un condensador, un oscilador completo, el primer circuito integrado de la historia. Poco después, en ese mismo año, Robert Noyce y Jean Hoerni de Fairchild desarrollaron el proceso plano que iba a permitir el desarrollo comercial de los circuitos integrados y el inicio de la era de la microelectrónica. Fairchild fue líder indiscutible del mercado con sus circuitos integrados bipolares.

Diez años más tarde, esta tecnología, basada en transistores de unión, fue desplazada por los circuitos de tipo metal – óxido – semiconductor (MOS) que en sus diversas variantes han dominado este campo desde entonces y que hoy en día acaparan más del 75% del mercado de semiconductores. En 1968, dos de los ocho fundadores de

Fairchild, Robert Noyce y Gordon Moore, quien tres años antes había formulado la ley de crecimiento exponencial de la capacidad de los chips que lleva su nombre, y que se ha mantenido válida durante más de tres décadas, abandonan la empresa y crean Intel, que ha sido el actor principal de los desarrollos informáticos que nos han conducido a la era de la información.

Moore observó que el número de transistores en los chips de silicio se duplicaba en un periodo de tiempo que variaba entre dieciocho y veinticuatro meses. Este progreso tecnológico requiere para poder colocar más transistores en el mismo espacio que estos se hagan cada vez más pequeños y el tamaño del menor de ellos es el que define el proceso de fabricación. Se ha ido pasando progresivamente de dimensiones de muchas micras a fracciones de ellas; en la actualidad con tamaños de ciento treinta nanómetros se sitúan del orden de doscientos millones de transistores en los chips de los microprocesadores, permitiendo velocidades de reloj superiores al gigahercio: las memorias dinámicas DRAM han superado también el gigabit de capacidad; si se compara ese valor de mil millones de bits con los 64 bits de la primera memoria bipolar construida por Intel en 1969 y con el hecho de que hasta 1975 no se habían alcanzado los 1.024 bits por chip, se aprecia la impresionante velocidad de avance tecnológico en este campo.

En cada salto generacional el tamaño del dispositivo se reduce aproximadamente a la mitad. Al disminuir el tamaño de los transistores las distancias se acortan y los tiempos de tránsito de las señales entre los elementos se reducen proporcionalmente, lo que permite que el dispositivo funcione a mayor velocidad, disipando menos calor por su menor tamaño y consumiendo menos potencia.

El mayor reto al que se enfrentan los fabricantes de semiconductores es lograr disponer de los recursos tecnológicos y financieros que permitan seguir aumentando la densidad de los chips. El coste actual de una planta se sitúa en los dos mil millones de dólares y al igual que está ocurriendo con la mayor parte de la manufactura del sector se está externalizando porque muchos fabricantes no pueden realizar esas inversiones y acuden a empresas especializadas para fabricar sus productos. La tendencia actual llevará a alcanzar los límites tecnológicos en una decena de años, con microprocesadores que contendrán más de diez mil millones de transistores de 30 nm, y funcionarán a frecuencias de reloj de 3 GHz; las memorias almacenarán un centenar de miles de millón de bits.

Al disminuir el tamaño de los dispositivos, los procesos litográficos que permiten proyectar las máscaras que van definiendo las distintas capas del circuito y grabar los detalles de los transistores y las interconexiones metálicas son cada vez más complejos y se necesitan fuentes de longitudes de onda cada vez más cortas para poder transferirlas con precisión sobre la oblea. Del visible se ha pasado gradualmente hacia el ultravioleta lejano y los rayos X de baja energía generados con sincrotrones, que junto con haces de electrones, son los candidatos identificados en la actualidad para poder fabricar estos circuitos.

La tecnología está de nuevo acercándose a límites fundamentales que impedirán mantener el ritmo de mejora de estos dispositivos. Por un lado están los problemas asociados con los materiales y por otro los relacionados con los procesos de fabricación. El primero de ellos está relacionado con el hecho de que en los transistores actuales son sólo un centenar de átomos dopantes en el canal los que controlan las propiedades eléctricas del dispositivo, por lo que variaciones estadísticas de este número en toda la

extensión del chip pueden alterar su funcionamiento y ha de controlarse de forma muy precisa la uniformidad del dopado. Un segundo elemento es el grosor de la capa aislante de óxido de la puerta, que se ha ido reduciendo en la misma medida en que lo hacía el tamaño de los chips y aumentaban sus prestaciones, pues cuanto más delgada es esa capa mayor es la corriente que se obtiene y menor el voltaje necesario; el grosor de esta capa es del orden de veinticinco átomos y no puede reducirse a menos de cuatro átomos, unos dos nanómetros, ya que entonces los electrones la atravesarían por efecto túnel. Se está considerando la sustitución del óxido de silicio por otros aislantes de constante dieléctrica más alta, como nitruro de silicio, que para el mismo campo eléctrico pueden tener mayor grosor. Por último, al reducir el tamaño y aumentar la densidad de transistores en el chip se produce también un incremento de la cantidad de calor que ha de disiparse, por lo que aparece una nueva limitación del calor que puede generarse en el dispositivo.

El simple enunciado de estas dos cuestiones apunta inmediatamente a que se sitúan ya al nivel del átomo y su solución conduce de manera natural al contexto de lo que se definen como las nanotecnologías, que abrirán en un horizonte de veinte años una nueva ventana tecnológica, en la que la molécula, el átomo, y el electrón, actuando individualmente, crearán los nuevos dispositivos. Habremos pasado en la historia de la electrónica y las telecomunicaciones por un primer medio siglo en el que han reinado grandes dispositivos macroscópicos, como son los tubos de vacío, por los que circulan grandes chorros de electrones; un segundo medio siglo de circuitos microscópicos contruidos en base a transistores que consumen cada vez menos potencia y son capaces de realizar funciones cada vez más complejas, para llegar al nivel

atómico y molecular en el que tan bien se desarrollan todas las funciones vitales de los seres vivos.

El origen de las nanotecnologías se remonta a una conferencia de Richard Feynman en la Sociedad Americana de Física el 29 de Diciembre de 1959 de título "There's plenty of room at the bottom"¹. Con la genial clarividencia que le caracterizaba hizo una descripción de las posibilidades que ofrecería ese campo, que hoy en día conserva toda su vigencia y cuyo eje central era el control y la manipulación de materia a muy pequeña escala. No se trata de miniaturización en el sentido que se ha comentado anteriormente, sino de poder organizar los átomos y las moléculas en el orden que queramos; consiste en suma en poder construir dispositivos átomo a átomo, intentando imitar la capacidad que tiene la naturaleza en este sentido. Estas ideas tardaron en cristalizar, debido a la ausencia de una herramienta que permitiera realizar este trabajo, y no fue hasta la invención del microscopio de efecto túnel y del de fuerzas atómicas, que pudo contemplarse la posibilidad de hacerlas realidad. A diferencia de otras técnicas microscópicas que sólo permiten la observación, éste instrumento permite también extraer o colocar átomos, pudiendo servir de herramienta de construcción de nuevos dispositivos. Esta nanociencia, confinada actualmente en los laboratorios de investigación básica, contiene el potencial de cambiar radicalmente diversos campos, entre los que se encuentran el biotecnológico, los materiales y las tecnologías de la información.

En un dispositivo electrónico actual, cualquier función digital implica un proceso de carga y descarga que moviliza más de un centenar de miles de electrones; con estas tecnologías se espera poder reducir esa cifra a unos pocos,

¹ <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>

con precisión de un electrón y ya se está explorando la viabilidad de diversos dispositivos, entre los que se cuentan memorias y transistores.

A escala molecular se conocen polímeros orgánicos planos que exhiben propiedades semiconductoras o conductoras al doparlos, modificando por sustitución química la afinidad electrónica y el potencial de ionización. Los mecanismos de conducción electrónica en sistemas moleculares comienzan a ser estudiados y nuevas técnicas de fabricación permiten incluir contactos metálicos en esos materiales orgánicos; se contempla ya la posibilidad de crear conmutadores. Dentro de este mismo campo de la electrónica molecular se han fabricado nanotubos de carbono que exhiben interesantes propiedades conductoras y pueden hacer en estas tecnologías el mismo papel de interconexión que hacen los conductores metálicos en los circuitos integrados.

Pero modificar átomos individuales no significa que pueda construirse una estructura compleja, esto va a depender de la capacidad de autoensamblaje que tengan estas moléculas. El modelo aquí es la molécula de ADN, un ejemplo de una máquina capaz de replicarse y crear complejos organismos.

El tiempo que tardará en fructificar la nanotecnología es objeto de todo tipo de especulaciones, pero como indicador, quizás anecdótico, de la importancia futura que se le concede, sirva de ejemplo que en EE.UU. el mandato presidencial de William Clinton comenzó con la National Information Initiative y terminó con la National Nanotechnology Initiative. En menos de una década se ha producido un profundo trasvase de interés desde las tecnologías de la información, la cosmología y el espacio hacia la biología molecular, la secuenciación del genoma

humano, la proteínómica, y la nanotecnología. Hemos pasado de concentrar el foco en el mundo de lo grande a hacerlo en el de lo pequeño.

Los procesos de fabricación de los circuitos microelectrónicos actuales son también cada día más elaborados. Para obtener un mayor rendimiento, los chips se fabrican a partir de obleas que tienen cada vez mayor diámetro; se está pasando de 200 a 300 mm de diámetro y se contemplan los 450 mm como el salto final de la tecnología del silicio. Sobre la superficie de la oblea se construyen los transistores que se interconectan mediante múltiples estratos conductores, hasta siete capas de pistas conductoras correctamente aisladas se emplean en la actualidad y la tecnología ha permitido llegar ya a las once.

Una limitación importante de la todopoderosa tecnología de silicio es la frecuencia máxima o la mayor velocidad a la que pueden funcionar los circuitos; con el cambio del milenio se ha franqueado la frontera del gigahercio. Hasta ahora todos los circuitos de radiofrecuencia, los que se emplean en radioenlaces y en las comunicaciones vía satélite, y los láseres de los sistemas de comunicaciones ópticas se han construido sobre compuestos III-V de la tabla periódica, principalmente arseniuro de galio, en el que los electrones viajan seis veces más rápidamente que en el silicio, pero ambas tecnologías no son integrables. Como los transistores de germanio son más rápidos que los de silicio, estamos asistiendo a un nuevo resurgir de este material semiconductor, pues sobre substratos de silicio se construyen transistores de germanio que funcionan a mayor velocidad y consumen menos potencia, lo que los hace muy adecuados para ser utilizados en equipos de comunicaciones móviles, sector en el que compiten con los de arseniuro de galio. Tienen además la ventaja de ser fácilmente integrables con los circuitos CMOS.

La tecnología de silicio ha abierto un nuevo campo de aplicaciones que en general están pasando desapercibidas y que consiste en fabricar sobre las obleas con la misma tecnología microelectrónica, en lugar de transistores, minúsculos artilugios mecánicos, contactos, láminas, válvulas, sensores, actuadores, que van conectados a circuitos electrónicos. Estos microsistemas electromecánicos, llamados MEMS, están abriendo las puertas a la miniaturización de los elementos mecánicos y han comenzado su andadura en la industria de la automoción. Todos los airbags actualmente instalados en los coches emplean estos dispositivos como acelerómetros para controlar de forma muy fiable el disparo de los cojines de aire, en ellos se combinan las funciones mecánicas y las electrónicas en un único chip y son capaces de realizar un test automático de comprobación de su correcto funcionamiento en el momento de arrancar el coche. En este mismo sector se emplean también en los nuevos sensores de desinflado de los neumáticos y en los sensores de temperatura y de control de emisiones. Otro dispositivo de uso cotidiano es la impresora de chorro de tinta en la que la cabeza de impresión no es más que un circuito integrado MOS que controla unos calentadores resistivos en los que se han mecanizado orificios microscópicos por los que se inyecta la tinta con una velocidad y una finura inigualable por los métodos clásicos de impresión. Pero el campo de aplicaciones es muy extenso, y puede abarcar, entre otros, desde la industria aeronáutica, que incorpora un número cada vez mayor de sensores en las estructuras de sustentación y control, hasta la de la construcción, siempre necesitada de elementos de control de tensiones, deformaciones y fracturas.

La óptica es un área donde estos dispositivos encuentran aplicaciones de gran interés mediante el empleo de microespejos que pueden ser movidos aplicando tensiones

eléctricas. Texas Instruments fue de nuevo pionera en aplicarlas a sistemas de proyección. Su uso en futuros telescopios espaciales es posible y forman parte del programa de la NASA de desarrollo de la nueva generación de telescopios que sustituirán al Hubble al final de esta década. Pero es en los sistemas de comunicaciones ópticas donde su uso tiene un gran interés para poder conmutar ópticamente las señales de unas fibras a otras. En la forma tradicional, los enrutadores han de convertir la señal óptica que transportan las fibras a señales eléctricas para poder conocer hacia donde han de encaminarlas, y reconvertirlas de nuevo a pulsos ópticos para poder ser enviadas por otra fibra. Empleando espejos de menos de un milímetro de diámetro, montados en suspensiones cardán, cuya orientación se controla simplemente aplicando tensiones, se pueden desviar los haces desde una matriz de salida de fibras hacia otra de entrada. Esta conmutación óptica puede hacerse de esta forma unas dieciséis veces más rápidamente y con el consumo de una centésima de la potencia que se requería con conmutadores eléctricos.

Las fibras ópticas empleadas en las redes de telecomunicación son hijas de la tecnología microelectrónica que ha hecho posible los circuitos de silicio. Previamente, las fibras ya habían sido utilizadas desde principios de los años sesenta en equipos médicos (endoscopios) y como elementos decorativos (en lámparas multicolores formadas por un ramillete de fibras). Constan de un núcleo de vidrio revestido de una camisa, también de vidrio o de plástico en ciertas aplicaciones, de un índice de refracción menor, lo que provoca que la luz pueda ser guiada por el núcleo mediante reflexión total.

Estas primeras fibras se construyeron a partir de vidrios convencionales, con la calidad óptica habitual en las lentes fotográficas y en los cristales de las gafas. En aquellas

aplicaciones que requieren pequeños grosores, estos vidrios funcionan satisfactoriamente, pero cuando se construyeron fibras con ellos resultaban atenuaciones de varios decibelios por metro, lo que las hacía útiles para transmitir la luz a cortas distancias, de ahí que se aplicaran inmediatamente en la construcción de fibroscopios que resultaban mucho más ligeros y sobre todo flexibles que los instrumentos ópticos contruidos sólo con lentes. Pero no resultaban útiles en telecomunicaciones, a pesar de los intentos iniciales de los fabricantes de vidrios por purificarlos, pues presentaban atenuaciones elevadísimas, del orden del millar de decibelios por kilómetro. Charles Kao analizó en 1966 los mecanismos responsables de estas pérdidas y los asoció con absorciones debidas principalmente al vapor de agua y a distintos iones metálicos presentes en los silicatos de los que se obtienen los vidrios. Era inviable técnicamente purificar los vidrios naturales a los niveles requeridos para las redes de telecomunicación; ahora bien, la industria de semiconductores tenía una gran experiencia en fabricar silicio a partir de gases cuya pureza sí podía controlarse y a añadir impurezas de forma controlada, por lo que este fue el rumbo tomado por Corning Glass para fabricar en 1970 las primeras fibras con una atenuación de veinte decibelios por kilómetro, cifra que ya abría las posibilidades de uso en las redes. Estas fibras fueron contruidas depositando sobre un mandril de sílice, que posteriormente se retiró, capas sucesivas de vidrio cuyo índice de refracción variaba para formar el núcleo capaz de guiar la luz en la fibra.

Las patentes de este proceso de fabricación por deposición química en fase de vapor convirtieron a Corning en un actor principal en este campo, que se unió a su conocida línea de vidrios de uso industrial y doméstico. No obstante, en su camino se cruzaron los laboratorios Bell, que habían patentado una modificación de este método que en lugar de fabricar la fibra creciendo como una estructura

abierta desde el núcleo hacia afuera, lo hacía a la inversa en un volumen confinado por la misma estructura. Este proceso permite obtener simultáneamente el núcleo y el revestimiento de la fibra, depositando en el interior de un tubo de sílice finas capas de partículas de vidrio obtenidas por la oxidación a la llama de tetracloruro de silicio. Los dopantes habituales de la industria semiconductora aquí han jugado también un papel fundamental, ya que si se incorpora boro en el proceso de deposición se disminuye el índice de refracción, mientras que si se añade fósforo o germanio se aumenta. En consecuencia el revestimiento es la primera capa que se crea con un borosilicato que mantiene un índice de refracción constante; cambiando de tipo de dopante y variando progresivamente su concentración se crea posteriormente el núcleo, cuyo índice de refracción va creciendo gradualmente conforme avanza el proceso de deposición. El proceso requiere un control muy preciso, pues la diferencia relativa de índices es muy pequeña, del orden del uno por ciento. Una vez completado éste, el tubo se recuece y se colapsa a una preforma sólida de vidrio homogéneo que posteriormente se calentará a 2.000 C y se estirará para obtener fibras de 125 micras de diámetro, tamaño comparable al de un cabello humano, pero dotadas de una resistencia superior a la del acero.

Una vez protegidas externamente se agrupan en mazos con los que se fabrican cables que pueden contener centenares de fibras. Su diámetro es más reducido que el de los cables de cobre, lo que facilita su tendido en los conductos ya existentes. Esto, que es una ventaja estratégica de primer orden para los operadores ya establecidos, ha hecho pasar desapercibida la práctica omnipresencia de las fibras en las comunicaciones a grandes distancias.

Dependiendo del tamaño del núcleo, las fibras pueden propagar un mayor o menor número de modos, lo que

establece la distinción habitual en las dos grandes familias de fibras que se emplean en las redes de telecomunicaciones: las de tipo monomodo y las multimodo. Las primeras tienen un núcleo de sólo nueve micras de diámetro y al propagarse en ellas un único modo permiten obtener la máxima velocidad de transmisión de pulsos; se utilizan en la segunda y tercera ventana con láseres de 1.310 y 1.550 nm y constituyen la red troncal de transporte de los operadores telefónicos. En comunicaciones ópticas se utiliza la longitud de onda, ya que tiene mucho mayor sentido físico que la frecuencia y su unidad habitual en óptica es el nanómetro (nm, una millonésima de milímetro). Las fibras multimodo tienen diámetros mucho mayores que las monomodo, normalmente 50 nm en Europa y 62,5 nm en EE.UU, lo que facilita el proceso de fabricación y reduce su precio, si bien a costa de un apreciable sacrificio de la velocidad de transmisión, ya que al ser transportados los pulsos por diferentes modos que viajan con distintas velocidades la llegada no se produce en el mismo instante de tiempo y en consecuencia los pulsos se ensanchan. Se ha realizado un gran esfuerzo de optimización del perfil del índice de refracción a fin de conseguir minimizar este efecto corrigiendo la dispersión de la fibra. Se usan con fuentes de 850 nm y 1.310 nm y predominan en las aplicaciones de cortas distancias, hasta un par de kilómetros y en las redes locales de alta velocidad.

Para minimizar las pérdidas de propagación en la fibra han de controlarse todos los factores extrínsecos en el proceso, en particular las impurezas que puedan haberse incorporado. La presencia de metales, que normalmente dan belleza y valor al cristal, no es deseada en las fibras por las pérdidas que provocan. Los iones de hierro, cromo, cobalto y cobre, y principalmente el grupo OH⁻, que presenta un pico de absorción a 2,7 μm , han podido prácticamente evitarse y la atenuación de las fibras actuales se aproxima al límite

fundamental impuesto por la ley de dispersión de Rayleigh (λ^{-4}) en las tres ventanas de mínima absorción que se emplean en la actualidad (850 nm, 1.300 nm y 1.550 nm) con valores tan bajos como 0,2 dB/km en la última de ellas, que permiten espaciar los repetidores más de un centenar de kilómetros.

Las fibras de vidrio tienen innumerables ventajas sobre las líneas de cobre, además de su incomparablemente mayor ancho de banda y su reducido grosor. Presentan una gran inmunidad a las interferencias eléctricas, ya que están fabricadas con excelentes materiales dieléctricos; sólo a través de los sistemas electrónicos de los equipos terminales y de los repetidores pueden introducirse interferencias. Al transmitir la luz confinada en la fibra no se produce acoplamiento con otras fibras del cable y no es posible captar externamente la señal que se está enviando; la única forma posible de escucha en la parte óptica es cortando la fibra e intercalando derivadores ópticos, lo que dota a este medio de una excelente seguridad intrínseca.

Tuve el privilegio de realizar mi Tesis Doctoral en EE.UU. en este campo y en ese tiempo, 1968 – 1972, en el que se estaba produciendo el paso de una predicción a una realidad. Por extraño que parezca, el desarrollo teórico completo de la propagación de modos y rayos en las fibras y, sobre todo, su aplicación al acoplamiento de luz en ellas, no precedió al desarrollo experimental, si no que transcurrió en paralelo con él. Existían las fibras pero interconectarlas era un problema totalmente nuevo y que tenía que resolverse para que pudieran tener un uso práctico. Aplicando métodos modales pude contribuir al análisis de dos problemas de importancia en aquel momento, el conocimiento de la cantidad de potencia que un láser podía inyectar en una fibra y las pérdidas que se producían en las conexiones por falta de alineamiento de las fibras. Nunca pudimos imaginar

que una nueva tecnología que requería precisiones del orden de la micra pudiera abrirse camino tan rápidamente en un entorno tan habituado a los cables de cobre de grandes dimensiones y a unas instalaciones tan sucias e inhóspitas como son las zanjas y los conductos subterráneos de las líneas y de los cables. En poco más de cinco años se resolvieron satisfactoriamente todos los problemas prácticos de interconexión de los nuevos cables ópticos.

De poco sirve un buen medio de transmisión si no se tienen los emisores y los receptores adecuados para aprovechar su capacidad. Al mismo tiempo que se producían las primeras fibras de bajas pérdidas se desarrollaron los láseres semiconductores de inyección de arseniuro de galio, que con un reducido tamaño y un bajo consumo de potencia eléctrica complementaban las fibras y permitieron tender los primeros enlaces a 850 nm. Para ocupar las siguientes ventanas de transmisión se necesitaron nuevos dispositivos empleándose compuestos ternarios (InGaAs) y cuaternarios (InGaAsP) a 1.310 nm y 1.550 nm. A mediados de los años ochenta comenzaron a emplearse simultáneamente las dos ventanas sobre una única fibra con el fin de doblar su capacidad.

Todos los diodos láser que se emplean en la actualidad en las redes de comunicaciones ópticas siguen fabricándose a partir de los elementos de las columnas III-V de la tabla periódica. La frecuencia de funcionamiento depende de la altura de la banda prohibida y de la estructura física de la cavidad óptica. En unos casos la cavidad contiene la región activa y se construye puliendo y dejando como espejos los bordes del semiconductor; en otros es externa y también limitada por espejos o redes de difracción. La frecuencia la fijan las dimensiones y el índice de refracción de la cavidad, por lo que se puede variar mediante ajustes mecánicos o provocando cambios en el índice.

Por muy avanzados que parecen, los sistemas actuales de comunicaciones ópticas emplean muy pobremente la capacidad del canal, con valores inferiores en muchos casos a una diez milésima de bit por segundo por hercio. La razón es clara, utilizan sencillamente una modulación de amplitud, interrumpiendo el haz de luz para transmitir los ceros y los unos, de una forma similar a lo que se hacía en los sistemas telegráficos, pues la tecnología actual no permite hacerlo de forma más compleja y eficiente, y en los receptores se realiza una detección directa de la amplitud de los pulsos de luz que llegan. Hay razones económicas superpuestas: como los cables disponen de muchas fibras no utilizadas, se puede acudir a ellas para aumentar la capacidad. Como los láseres no admiten ser pulsados directamente, su haz ha de ser modulado externamente por la señal eléctrica que contiene la información, transcribiendo directamente los bits como pulsos ópticos que se inyectan en la fibra. Este proceso lo hacen moduladores electroópticos contruidos sobre neobato de litio en los que mediante dopado con titanio se construyen guías ópticas configuradas normalmente como un interferómetro de tipo Mach – Zehnder. Son elementos claves del sistema y funcionan interrumpiendo o dejando pasar el haz óptico bajo el control de la señal eléctrica; su velocidad máxima ha estado estabilizada desde hace algunos años en 2,5 Gbit/s y han pasado recientemente a alcanzar los 10 Gbit/s.

El máximo aprovechamiento de las pocas fibras que contienen los cables submarinos, primero, y el despliegue de Internet después, han cambiado completamente los esquemas al provocar un incremento pronunciado del tráfico, exigiendo un aprovechamiento mucho mayor de la capacidad de la fibra. A mediados de los años noventa comenzaron a multiplexarse varias señales ópticas en la misma fibra empleando láseres que emitían en distintas longitudes de ondas en la tercera ventana. Este

procedimiento, conocido como multiplexaje en longitud de onda, es equivalente a separar un haz de luz blanca en sus componentes cromáticas, modular cada una de ellas con una señal diferente y enviarlas todas juntas por la fibra; en el receptor se separarían los colores y se recuperarían las diferentes señales. En los sistemas de telecomunicación es la manera clásica de transmitir varias conversaciones telefónicas por el mismo cable o la forma en que radian las emisoras de radiodifusión. Para poder emitir simultáneamente desde una torre de comunicaciones varios programas de televisión cada uno de ellos ha de ubicarse en una determinada frecuencia o canal y todos se radian empleando el mismo medio, el aire; nuestras antenas reciben todos ellos y en el receptor los seleccionamos mediante la botonera de canales. En estos casos el proceso se denomina multiplexaje en frecuencia y el nombre se ha traspasado al dominio óptico describiéndolo, como es tradicional en este campo, mediante la longitud de onda.

Para que estos sistemas funcionen correctamente se requieren láseres de gran pureza espectral, capaces de mantener con gran estabilidad su frecuencia de funcionamiento. Esto se consigue introduciendo una red de difracción en la región activa del láser que refleja y devuelve a la cavidad una única longitud de onda, permitiendo un único modo resonante.

Con un grupo de láseres de este tipo, cuyas frecuencias se sintonizan de forma que la separación espectral entre ellos sea de 0,8 nm (100 GHz) se están construyendo sistemas de gran capacidad sobre fibras preexistentes. Un sistema de 128 canales a 10 Gbit/s permite transportar un terabit por segundo sobre una única fibra con un aprovechamiento espectral de 0,1 bit por segundo por hercio, muy superior al habitual hasta ahora en los sistemas ópticos, pero todavía muy alejada de los valores que se manejarán en un futuro,

todavía muy lejano, cuando puedan construirse sistemas coherentes similares a los que se utilizan en las radiocomunicaciones. Alcanzar ese estado sigue dependiendo de los avances que se puedan producir en el área conocida como óptica integrada, que permitirá realizar ópticamente las mismas funciones que realizan rutinariamente los circuitos integrados electrónicos; es decir, replicar ópticamente los chips microelectrónicos. Desde los años sesenta esta tecnología, de manera paralela a lo que ha sucedido con la inteligencia artificial o la fusión nuclear, ha estado siempre descrita como de un gran potencial con la que se obtendrían resultados revolucionarios en un horizonte de veinte años, ventana temporal que se ha ido desplazando conforme pasaban los años, pues la complejidad de la tarea se ha subestimado sistemáticamente y todavía no se han logrado los avances técnicos que la harán posible; el progreso en este campo ha existido, pero el ritmo de desarrollo ha sido hasta ahora más lento que las predicciones.

El multiplexaje en longitud de onda es la forma más rápida de aumentar la capacidad de la red sin tener que tender nuevas fibras, siempre y cuando las fibras instaladas lo permitan; sólo se sustituyen los equipos terminales. Permite aumentos espectaculares del ancho de banda de la red, que pueden ir poniéndose en servicio de forma paulatina conforme crece la demanda. El motor de esta simple tecnología ha sido inicialmente la fabricación de cables submarinos de gran capacidad, pero recientemente los incrementos de tráfico que ha provocado el desarrollo de Internet la han convertido en la baza fundamental que tienen los operadores para satisfacer la creciente demanda de capacidad que provocan las aplicaciones de banda ancha. Su implantación ha cambiado completamente la economía de este mercado, que ha pasado de estar dominado por la demanda insatisfecha de ancho de banda a una situación de

exceso de oferta, como bien pone de manifiesto la reciente suspensión de pagos de Global Crossing. Uno de los problemas más serios que queda por resolver es la ausencia de una estandarización en cuanto a longitudes de onda y configuraciones de canales, o la gestión de red, lo que conlleva la imposibilidad de integrar equipos de distintos fabricantes.

Este es un campo en efervescencia en la actualidad con múltiples desarrollos en marcha para facilitar el despliegue de esta tecnología. Uno de los mayores escollos son los láseres; al ser su frecuencia fija han de fabricarse especialmente para cada longitud de onda o un pequeño grupo de ellas, ya que el margen de ajuste de la frecuencia (la forma más simple de hacerlo es controlando la temperatura de la cavidad del diodo láser) es reducido, del orden de unos cuatro nanómetros. El dispositivo deseado es un láser que pueda ser sintonizado en un margen de longitudes de onda de al menos un orden de magnitud mayor, ello implicaría una reducción del coste del dispositivo, mayor rapidez en la instalación y sobre todo facilidad de mantenimiento al evitar tener que disponer de repuestos específicos para cada canal. Para variar la frecuencia de funcionamiento de un láser semiconductor existen varias estrategias, que abarcan desde incorporar internamente varias cavidades a fin de ampliar el margen de frecuencias, hasta incluir elementos móviles en cavidades externas al láser. En esta última línea, los microsistemas mecánicos están jugando un papel importante al permitir incorporar elementos móviles en las cavidades que mediante controles externos pueden modificar el ajuste de los láseres.

Las redes ópticas actuales carecen de flexibilidad para cambiar las longitudes de onda de los canales y sólo pueden reconfigurarse con extensos cambios en toda la red. Ello viene motivado por la elección inicial de longitudes de onda;

si en un tramo de la red se quieren incorporar nuevos canales y éstas ya están siendo empleadas en otros, ha de modificarse toda la asignación de frecuencias. Si los dispositivos son ajustables, y mejor aún, si esto se puede hacer por telecomando desde un centro de control, la gestión de la capacidad de la red aumenta considerablemente. Esta capacidad dinámica de ajuste de los canales de la red es una de las características fundamentales de las redes de telefonía móvil. Para lograrla no basta con que los láseres sean sintonizables, lo han de ser también los filtros y los conmutadores ópticos que han de encaminar los distintos canales por diferentes fibras. En un nivel todavía mayor de complejidad se sitúa la integración con los equipos que realizan la conmutación de paquetes en las redes IP o ATM.

En sus comienzos las redes ópticas sólo utilizaron las fibras como enlaces fijos punto a punto, en los que las funciones ópticas se reducían al transporte de la señal. Cuando al cabo de unos cuantos kilómetros la atenuación de la fibra había reducido la señal a un nivel que requería regenerarla, se acudía a convertirla de nuevo a una señal eléctrica, reconstruirla, amplificarla e inyectarla de nuevo ópticamente. Los amplificadores ópticos resolvieron este problema al permitir la amplificación directa de la señal sin necesidad de hacer la conversión electrónica.

En un intento de circunvalar las patentes cruzadas de Corning y Bell el grupo de William Gambling y David Payne de la Universidad de Southampton exploraron, con el apoyo de Pirelli, el uso de otros materiales distintos del silicio para fabricar fibras, pero no llegaron a obtener productos que pudieran competir con él, si bien varios de ellos pueden emplearse en el infrarrojo medio. No obstante, uno de los frutos de ese programa fue el descubrimiento de que en una fibra dopada con erbio se producía emisión estimulada en la tercera ventana cuando se bombeaba con un láser de

arseniuro de galio. Esto permitió regenerar la señal óptica sin más que intercalar un trozo de fibra de poco más de un metro de longitud que actúa como un robusto amplificador óptico. Todos los cables submarinos de última generación utilizan fibras monomodo y emplean estos amplificadores para evitar el uso de repetidores electrónicos, permitiendo enlaces de miles de kilómetros en los que la señal nunca abandona el dominio óptico. En ellos se obtiene amplificación a 1.550 nm con un láser de bombeo de 980 nm.

Las fibras de sílice dopadas con lantánidos no son los únicos tipos de amplificadores ópticos que se emplean. La emisión estimulada de Raman se presenta también de forma natural en las fibras y puede aprovecharse para producir amplificación óptica. El efecto Raman surge por la interacción de la luz con los modos de vibración molecular del material y tiene la ventaja de que puede activarse sobre la misma fibra transmisora creando un amplificador distribuido sobre ella, lo que evita tener que intercalar tramos de fibra de diferentes características. En la sílice, los modos de Stokes permiten una traslación positiva de la longitud de onda de aproximadamente 100 nm y con una potencia de bombeo del orden de medio vatio se puede conseguir amplificar en un factor de diez la señal óptica que viaja por la fibra. Los láseres de bombeo han de tener una gran estabilidad, del orden de 2nm, para permitir una amplificación de las señales sobre una gran anchura espectral; con una fuente de bombeo a 1.450 nm se obtiene amplificación en toda la banda convencional de la tercera ventana (1.530-1.562 nm). Estos amplificadores pueden utilizarse en solitario o combinados con los de fibras dopadas con erbio.

La otra gran familia está constituida por los amplificadores ópticos semiconductores, que al igual que los láseres de este tipo, se basan en la emisión estimulada

provocada por la inyección de portadores. Además de sustituir a los repetidores electrónicos se emplean conjuntamente con los combinadores y los divisores de los sistemas multiplexados en longitud de onda en los que la combinación de señales de baja intensidad o la división de un haz en sus componentes cromáticos requiere una inmediata amplificación.

Una característica común de estos elementos y de todos los que se emplean en los sistemas de comunicaciones ópticas es la necesidad de garantizar vidas medias de los componentes superiores a los veinticinco años.

Los amplificadores ópticos representaron un primer paso de gigante en el camino hacia la consecución de una red de telecomunicaciones totalmente óptica al permitir eliminar de las redes troncales los repetidores electrónicos, pero la conmutación optoelectrónica que existe en las redes actuales introduce una gran complejidad y provoca una apreciable pérdida de ancho de banda por las limitaciones que imponen las continuas conversiones de señales ópticas a eléctricas y viceversa. Recientemente se ha producido un nuevo avance al poder construir multiplexadores y conmutadores ópticos que evitan la aparición de islas electrónicas en la red. Los multiplexadores permiten incorporar o derivar tráfico de una ruta, son como los accesos y las salidas de las autopistas. Para extraer un canal se requiere desplegar el abanico de longitudes de onda que viajan por la fibra y filtrar la deseada; la incorporación al tronco de un nuevo canal podrá hacerse directamente si la longitud de onda no está siendo utilizada, en caso contrario, tendrá que realizarse una traslación espectral para situarlo en una longitud de onda disponible, muy probablemente la misma que la primitiva del canal que ha sido derivado. Este proceso requiere disponer de acopladores, filtros sintonizables y convertidores de frecuencia. En los nodos de interconexión

de varias rutas se necesitan conmutadores capaces de redireccionar los canales de unas a otras; son matrices de conmutación semejantes a las que interconectan los circuitos de una central telefónica.

El anhelo de poder disponer de una red fotónica de telecomunicaciones se ha visto recientemente más próximo a ser satisfecho con la aparición de dispositivos que emplean microsistemas mecánicos para conmutar ópticamente los circuitos. Son sistemas compactos que pueden conmutar hasta 16×16 canales mediante microespejos que pueden moverse en dos ejes y posicionarse en pocos milisegundos para poder transferir el haz entre cualquier par de fibras. Para mover los espejos y alinear los haces con gran precisión se necesitan unos circuitos de control muy avanzados que pueden ser integrados con la matriz de los espejos. Este sistema tiene la indudable ventaja de que la conmutación se realiza con unas pérdidas prácticamente despreciables, lo que no ocurriría si se emplearan prismas u otros elementos ópticos, y si bien se piensa que es posible escalarlos hasta 64×64 canales, queda todavía por demostrar que estos elementos mecánicos son capaces de funcionar correctamente durante los veinticinco años de vida que se requiere tradicionalmente en los sistemas de telecomunicación.

Esta tecnología es muy adecuada para redes de muy alta capacidad, pero no es la única que se contempla en el caso de las de baja o mediana. En ellas pueden usarse MEMS para desplazar las fibras, accionar obturadores o balancear espejos, o también los cristales líquidos, cuya conocida capacidad de reflejar o dejar pasar la luz dependiendo de la polarización permite establecer un conmutador. Estos cristales, que son los reyes indiscutibles del mundo de las pantallas de reducidas dimensiones, presentan problemas de pérdidas, lentitud de conmutación e integración con otros

elementos, por lo que no se prevé su uso masivo en esta aplicación. Quienes si pueden ser formidables competidores en matrices de pocos elementos son los cristales holográficos que se construyen grabando sobre un cristal ferroeléctrico (el mismo neobato de litio que se emplea en los moduladores electroópticos o neobato tantalato de litio potasio) una red de difracción de Bragg que lo hace selectivo con la longitud de onda. Las propiedades ópticas del holograma se cambian mediante la aplicación de un campo electrostático; dependiendo de su valor, el cristal puede pasar de ser totalmente transparente a reflejar una parte variable de la potencia incidente, lo que permite además de conmutar el haz disponer también de un atenuador variable. Previsiblemente serán los MEMS los que ganarán la partida si el incremento de las necesidades de tráfico se mantiene y han de desarrollarse conmutadores fotónicos de un elevado número de canales.

En la actualidad ya es viable una red fotónica que conmuta ópticamente los circuitos; esto añade una nueva tipología de capa física a la eléctrica de toda la vida, que altera la jerarquía tradicional de las redes y crea nuevos problemas de control y gestión que han de solucionarse. Los beneficios de mantener un enlace totalmente óptico de inicio a fin de una red se concretan, básicamente, en un mejor aprovechamiento del ancho de banda, una mayor velocidad de operación, una gran inmunidad a las interferencias electromagnéticas y a las escuchas, ausencia de diafonía entre los circuitos y una mayor sencillez y robustez de la transmisión de la información, lo que inevitablemente implicará un menor coste de operación que el de las redes optoelectrónicas anteriores. Por el contrario, el salto siguiente, que consistirá en una red en cuyos nodos se podrá analizar en el nivel óptico el contenido de los paquetes de datos para encaminarlos individualmente hacia la dirección de envío, se encuentra a muchos años luz de poder darse, ya

que no disponemos de los elementos de almacenamiento y computación óptica que se requieren.

El multiplexaje en longitud de onda es otra tabla de salvación de los operadores ya establecidos, pues les permite aumentar su capacidad de acuerdo con sus necesidades, y capitalizar sus infraestructuras; añadir nuevos canales es cuestión de días, mientras que tender nuevas fibras partiendo de cero, sobre todo en entornos urbanos requiere años. Es también una fuente de oportunidades de nuevo negocio, ya que permite disponer de tantas fibras virtuales como canales tenga el sistema, ya que cada uno de ellos utiliza plenamente la capacidad de la fibra. En el tendido de una red de fibra los derechos de paso, la obra civil y los cables de fibra se reparten de forma prácticamente equitativa los costes de la obra; como además los cables pueden llegar a contener hasta un millar de fibras sin alcanzar dimensiones desmesuradas, la tendencia ha sido siempre a instalar cables con un número de fibras muy superior a las necesidades inmediatas, dejando un gran margen para acomodar crecimientos futuros. Las fibras que no se emplean reciben de forma muy gráfica el calificativo de fibras oscuras, y sus propietarios frecuentemente las han ofertado en alquiler a otros operadores. Poseer derechos de paso ha sido siempre una ventaja competitiva a la hora de tender redes de telecomunicación ya que su concesión ha estado restringida a redes de transporte eléctrico o ferroviario. En las líneas de alta tensión se emplean los cables de tierra para incluir fibras dentro de la armadura de acero, mientras que en las redes ferroviarias el tendido se puede hacer sobre las torres de soporte de las catenarias o enterrado en el balasto. Todos ellos disponían de un exceso de capacidad que podía ofrecerse a los nuevos operadores y este fue el camino seguido en España por Retevisión para entrar en el mercado al contratar el uso de parte de las fibras de Red Eléctrica. A este mercado se han sumado todos los propietarios de

grandes infraestructuras con derechos de paso que pudieran permitirles su conversión en operadores de telecomunicaciones.

Con la liberalización del sector, el aumento de la competencia ha sido el motor que ha disparado la construcción de nuevas infraestructuras de fibras basadas en el multiplexaje de longitudes de onda y ha conducido a una rebaja de los costes operativos y de los precios. Aparecieron nuevos actores en este mercado (Qwest, Williams Communications, Viatel o CTR Group a través del proyecto Oxygen, en los EE.UU. o Hermes en Europa), así como mayoristas (Global Crossing) e intermediarios (Enron) cuya estrategia consistía en suministrar una gran cantidad de ancho de banda para romper los esquemas de precios artificialmente altos de los operadores tradicionales. Al llevar los precios de los megabits a niveles de gran consumo se provocaría un gran aumento de demanda y se incentivaría el desarrollo de nuevas aplicaciones que llenarían rápidamente la capacidad disponible. Se pasaba de un modelo de mercado donde el ancho de banda se consideraba un bien escaso a uno nuevo en el que era abundante y en consecuencia muy barato. La crisis con la que el sector ha inaugurado el nuevo milenio ha puesto de manifiesto lo arriesgado que era apostar por ese cambio de paradigma, muestra de ello es la suspensión de pagos y la quiebra de varias de las empresas citadas.

A finales de los años ochenta sólo el 2% del tráfico transoceánico de voz y datos viajaba por los cables submarinos, el resto era transmitido vía satélite. En la actualidad el panorama está completamente invertido. La razón de este notable cambio ha sido el imparable avance de la tecnología de los cables de fibra y la introducción a partir de 1995 de los amplificadores en fibra y poco después del multiplexaje en longitud de onda, que permiten transportar

un terabit por segundo en cada par de fibras. Un cable submarino es una estructura blindada que contiene hasta ocho pares de fibras monomodo, todos ellos en funcionamiento simultáneo, si bien para tener redundancia es habitual emplear sólo la mitad de la capacidad de cada par para poder reencaminar el tráfico por otros pares si se produce un fallo en el sistema. Los amplificadores ópticos desplazaron a los repetidores electroópticos a principios de la última década, lo que permitió superar las grandes restricciones de ancho de banda que estos imponían y ganar en flexibilidad, ya que al ser transparentes, los amplificadores funcionan independientemente del tipo de señal que viaje por la fibra y permiten incorporar nuevos canales. No obstante, para poder funcionar, los amplificadores necesitan ser alimentados eléctricamente, para lo que se emplea la camisa de cobre que sirve de protección a las fibras, con el circuito de retorno de corriente por el agua del mar (como en los sistemas telegráficos que Salvá i Campillo había concebido a finales del siglo XVIII y comunicado en sus memorias a la Academia de Barcelona). Como las fuentes de alimentación están limitadas en la actualidad a unas tensiones de 12 kV, la potencia disponible está limitada y por ello los cables submarinos transatlánticos llegan a contener hasta ocho pares de fibras y se establecen serias limitaciones a los aumentos de capacidad basados en poner un mayor número de pares de fibras en el cable, la estrategia habitual en los tendidos en tierra.

Otra gran ventaja de los cables sobre los satélites es su longevidad. Los cables se diseñan para una vida mínima de veinticinco años, pero al igual que ha ocurrido con los cables coaxiales, muchos de los cuales se han mantenido operativos durante cerca de cuarenta años, los cables de fibra tienen una esperanza de vida comparable; los satélites han aumentado su vida últimamente desde una docena de años a la veintena, pero las limitaciones de carga de combustible que

pueden transportar ha sido siempre un elemento estrangulador de su vida útil. Ha de tenerse también en cuenta que el entorno marino es mucho más agradecido que el espacio; los cables descansan en el fondo del mar, o suspendidos, en un entorno térmico muy estable y bien regulado, a una temperatura de 2 C y, salvo en las zonas costeras y las plataformas continentales en las que están a merced de las anclas y de las artes de arrastre, no tienen riesgos de ser dañados y mucho menos destruidos, lo que no puede decirse de los satélites. La inmunidad electromagnética de las fibras, en comparación con la facilidad de escucha de las emisiones de un satélite es otro elemento adicional de ventaja, así como la ausencia de retardo perceptible. En los enlaces mediante satélites geoestacionarios, que están situados sobre el ecuador a una distancia de 36.000 km de la superficie de la tierra, el tiempo empleado por una señal en un camino de ida y vuelta es de medio segundo, por lo que se produce una extraña sensación cuando se está realizando la comunicación mediante un enlace de este tipo.

Lamentablemente, este éxito de las fibras está provocando un gran parón en este sector, al existir un exceso de capacidad, estimado en un 50% en las rutas transatlánticas, que son las de mayor tráfico, y cifras todavía superiores en las del pacífico. Cuatro nuevos cables transatlánticos han entrado en funcionamiento en el último año, lo que representa que la capacidad instalada ha tenido un crecimiento en progresión geométrica que no está siendo seguida por aumentos comparables de la demanda y que ha propiciado caídas en los precios de los circuitos de hasta un 70%. Esta sobrecapacidad no se da sólo en las rutas transoceánicas, está presente también en las transcontinentales norteamericanas y europeas que se completaron en su mayoría en este último año. Existe, sobre todo en EE.UU., aunque también en menor medida en

Europa, el convencimiento de la existencia de un gran exceso de capacidad, sobre todo en las rutas más competidas. Un reciente estudio de Merrill Lynch indicaba que en los últimos diez años la capacidad de las redes de fibra en Norteamérica se había multiplicado por sesenta mientras que la demanda sólo lo había hecho por siete, provocando que en la actualidad sólo se utiliza el 6% de su capacidad y sea un mercado dominado por el exceso de la oferta. La situación en España no es muy diferente a la global de este sector. Las fibras representan el 57% de la red de transporte y hay tendidos 133.000 km, prácticamente todos propiedad de los operadores telefónicos; a ellos hay que añadir 23.000 km de fibra oscura, repartida entre los operadores y los propietarios de viales, pero que se estima que sólo representan el 1% de la red de transporte utilizada.

Todas estas redes se concibieron para cubrir la insaciable demanda de ancho de banda que se preveía iba a producir el desarrollo de Internet, sobre todo las aplicaciones de intercambio de música y vídeo, así como las aplicaciones y servicios multimedia que iban a generar las empresas. Las fibras ópticas constituían la única opción tecnológica capaz de suministrar ese ancho de banda, a precios cada vez menores, al poder combinar cables con un elevado número de fibras dotadas de una gran capacidad intrínseca que podía, además, incrementarse varios ordenes de magnitud incorporando el multiplexaje de longitud de onda. El énfasis se puso principalmente en las redes troncales y en menor medida en las redes metropolitanas, donde no existe esa superabundancia de fibra, y no se contempló realmente su uso en la red de acceso para llegar con fibra al domicilio de los usuarios.

Al incumplimiento de las expectativas de desarrollo de Internet se ha añadido la tendencia a suministrar localmente la información demandada por los usuarios, evitando las

conexiones a grandes distancias. Para ello se hacen copias en grandes discos locales de las páginas web visitadas recientemente, de forma que si otro usuario las solicita posteriormente son leídas en la memoria de estos servidores y se evita tener que acceder de nuevo a la red, con el consiguiente ahorro económico y una gran mejora del tiempo de respuesta. Estas memorias intermedias trasladan la información desde el núcleo de la red a la periferia y permiten acelerar mucho la navegación por Internet al disminuir la necesidad de reiteradas conexiones en busca de la misma información. Cuánto mayor sea la capacidad de almacenamiento de estos discos menor será el tiempo de ocupación de las líneas. Si a ello añadimos, sobre todo en Europa, la demanda de acceso a contenidos en las lenguas propias de cada comunidad, se dibuja una nueva tendencia en el mercado a mantener un porcentaje importante de los tiempos de comunicación en el entorno de las redes de las áreas metropolitanas en detrimento de las redes troncales. Este efecto es claramente perceptible en los EE.UU. donde se estima que cerca del 30% de todo el tráfico se queda en las áreas metropolitanas y ya empieza a contemplarse la posibilidad de distribuir servidores de contenidos a niveles de barrios o de grandes complejos residenciales.

No obstante, tiende a infravalorarse el cambio que se ha producido: los cables existentes en 1994 sólo soportarían el 2% de la demanda actual por lo que no existe parangón del desarrollo vertiginoso que han propiciado las fibras en la última década. En las redes metropolitanas abunda la capacidad en las interconexiones entre ellas, pero existe escasez en su interior, tanto mayor cuanto más se acerca uno al nivel capilar final.

Esta sobreabundancia de capacidad en las redes troncales es una de las críticas más acusadas que la comunidad financiera hace a los operadores de telecomunicaciones,

principalmente a los globales, y si bien se considera una de las causas de la profunda crisis que están padeciendo, es objeto de debate cual es el nivel de sobredimensión que conviene mantener. Para fijarlo, debería disponerse de una estimación realista del crecimiento futuro del tráfico y sobre todo de las aplicaciones de Internet que pueden propiciar el uso de grandes anchos de banda. Por un tiempo pareció que el intercambio de música iba a ser uno de los grandes motores, pero ha bastado el control creciente de las discográficas y la implantación de sistemas de pago puestas de manifiesto en el largo proceso de control de Napster para que se haya moderado su crecimiento. Otro motor cuya presencia pasa mucho más desapercibida es el intercambio de contenidos eróticos y pornográficos, que constituye el negocio más próspero y menos documentado de la red; se estima que hasta un 40% de la demanda puede estar inducida por estos contenidos. La realidad es que la mayor parte de las aplicaciones actuales son de banda estrecha; correo electrónico, mensajería, telefonía y fax siguen dominando el entorno y sólo si se introducen progresivamente aplicaciones multimedia se podrá comenzar a agotar la capacidad disponible.

Este mercado de fibras, a semejanza del de la fabricación de satélites, está altamente especializado y sólo dos compañías europeas participan en él, Alcatel y Pirelli. El panorama aeroespacial europeo gravita en torno a consorcios franco –germano – británicos con una larga tradición de cooperación en el marco de los programas de la Agencia Espacial Europea que están abocados a una fusión en este campo al igual que han hecho en el sector aeronáutico.

El lanzamiento del satélite Sputnik en 1957 tuvo un profundo impacto social en el mundo occidental y desencadenó una febril actividad de desarrollo de satélites

de comunicaciones y sobre todo de creación de organismos internacionales de gestión de las futuras redes de comunicaciones espaciales. Si bien se trataba sólo de un radiofaro que emitía a frecuencias de 20 y 40 MHz, el hecho de que pudieran recibirse sus señales con simples equipos de radioaficionados puso de manifiesto la potencialidad de este nuevo medio y el interés en emplear satélites como repetidores de las señales de radio. Unos años antes, en la primera mitad de esa década, se había intentado emplear la luna como reflector pasivo, pero la distancia y las pobres características reflectoras mostraron la nula utilidad de este sistema.

En 1945 Arthur C. Clarke, que había sido operador de radar en la RAF durante la segunda guerra mundial propuso en un artículo en la revista *Wireless World* titulado "Relés extraterrestres" emplear tres satélites separados 120° en la órbita geoestacionaria, situada a 36.000 km sobre el ecuador, con los que se podría establecer comunicaciones con cualquier punto del globo. Parecía una visión futurística y alejada de toda realidad en el contexto de la situación europea de aquella época, pero la guerra fría y el desarrollo de los cohetes intercontinentales que trajo consigo la hicieron posible en unos pocos años.

John Pierce, un ingeniero de Bell Labs conocido también por sus escritos de divulgación y de ciencia ficción, al que se le debe haber acuñado el nombre del transistor y publicado un texto básico sobre la teoría de la información (editado en español bajo el título de "Símbolos, señales y ruido") que contribuyó enormemente a difundir esta teoría en las ciencias sociales, convenció a la NASA para emplear un globo esférico de mylar de treinta metros de diámetro como elemento de prueba de la utilidad de reflectores en el espacio. Lanzado el 10 de Agosto de 1960 y bautizado Echo I tuvo una corta vida al ser perforado por meteoritos pero fue

un gran éxito de imagen y demostró que las comunicaciones espaciales sólo serían posibles con satélites activos. Este experimento tuvo un importante efecto colateral, la antena que se empleó quedó en desuso y fue utilizada como radiotelescopio por Arno Penzias y Robert Wilson, descubriendo con ella en 1965 el ruido de fondo del universo, lo que confirmó la teoría del Big Bang y les valió el premio Nobel.

En paralelo, Pierce y los ingenieros de Bell construyeron el primer satélite activo, el Telstar I, que fue lanzado dos años más tarde, el 10 de julio de 1962 en una órbita baja de 952×5.632 km; esto hacía que fuese visible unos veinte minutos en cada órbita y obligaba a las antenas a seguir su trayectoria sobre el horizonte, permitiendo establecer las comunicaciones durante esos cortos periodos de tiempo. Transmitió conversaciones telefónicas y por primera vez imágenes de televisión, inicialmente la bandera norteamericana ondeando con la estación transmisora de Andover, en Maine, de fondo y posteriormente los telespectadores pudieron seguir en directo una conversación entre interlocutores de ambas orillas del Atlántico. Hasta ese momento sólo se habían podido intercambiar comunicaciones telefónicas. Ese evento marca posiblemente el nacimiento de la aldea global.

Era una esfera de un metro de diámetro con las antenas situadas en el ecuador; recibía las señales de la tierra a una frecuencia de 6,39 GHz y las retransmitía con una potencia de dos vatios, poco más que la de una linterna de bolsillo, a 4,17 GHz, frecuencias que caen dentro de la que se denomina desde los tiempos de desarrollo del radar con el nombre de Banda C. La mayor parte de su superficie estaba recubierta de paneles solares que suministraban la energía al satélite. Sin la existencia de las células solares y de los transistores no habría sido posible la era de las comunicaciones espaciales.

Era un satélite experimental y tuvo una vida corta, a los cuatro meses se produjo un primer fallo en uno de los transistores del circuito de control de los equipos de radio pero la redundancia de equipos permitió sobrepasar la unidad afectada y el satélite volvió a funcionar de nuevo durante dos meses, tras lo cual se apagó definitivamente. Los fallos fueron atribuidos a los desperfectos causados por los electrones de alta energía de los cinturones de Van Allen y pusieron de manifiesto que uno de los aspectos críticos para el futuro de las telecomunicaciones espaciales iba a ser la vida de los satélites y convirtió a esta industria en un sector altamente especializado, coto de unos pocos fabricantes capaces de dominar esta tecnología.

La serie de los Telstar se entrelazó con los Relay de RCA, muy similares a ellos. El paso siguiente fue lanzar un satélite geoestacionario, lo que ocurrió el 14 de Febrero de 1963 con el Syncom I fabricado por Hughes Aircraft Co., que alcanzó la órbita pero nunca funcionó. El 26 de julio de ese año se colocó sobre el Atlántico el segundo satélite de esta serie y el 19 de Agosto del siguiente el tercero sobre el Pacífico, que permitió retransmitir en un único canal en blanco y negro los Juegos Olímpicos de Japón de 1964. El desarrollo de las telecomunicaciones en los tiempos modernos ha estado frecuentemente ligado a grandes eventos, como las olimpiadas, que requieren nuevos sistemas de comunicaciones para difundir las competiciones o a grandes programas, como el Apolo, que actuó de dinamizador de la creación de la red Intelsat.

La fase experimental concluyó en ese corto periodo de cuatro años que median entre el Echo y los Syncom, pero mientras los ingenieros probaban esta tecnología y la operadora telefónica norteamericana constataba su viabilidad comercial, los políticos comprendieron su potencial económico y actuaron con criterios geoestratégicos.

En 1961 el Presidente Kennedy invitaba a todas las naciones a participar en un sistema global de comunicaciones en beneficio de la paz mundial y la fraternidad entre todos los hombres. El Congreso aprobó en 1962 el Acta de Satélites de Comunicaciones por la que instaura una corporación privada, regulada por el gobierno, que será la única encargada de establecer en conjunción y en cooperación con otras naciones, tan rápidamente como sea posible, un sistema comercial de comunicaciones por satélite; se rompe así el esquema de libre empresa que había presidido el desarrollo de la red telefónica norteamericana. Conviene resaltar esta situación ahora que nos encontramos en un punto diferente del movimiento pendular de intervención de los estados en este sector y se ha liberalizado el establecimiento de infraestructuras. Al año siguiente se creó COMSAT (Communications Satellite Corporation) la compañía que sería la única responsable del desarrollo de este nuevo medio y en la que el 30% de las acciones estaba en manos de ATT, el 10% de ITT, otro 10% de GTE, RCA y otras empresas y el 50% restante se ofertaba públicamente. Tan sólo seis años después del Sputnik, Wall Street entraba en la era espacial, un tiempo mucho más breve del que ha tardado en entrar en la era internet.

En Europa, como no podía ser de otra forma, se convocó una conferencia para armonizar las posturas europeas y establecer una base de negociación con otros países. Sin sorpresas, concluyó que las comunicaciones por satélite deberían organizarse internacionalmente de forma que todos los países fueran copropietarios del sistema y pudieran participar en su diseño y gestión. Dado el monopolio norteamericano de cohetes lanzadores, el dominio de la tecnología de fabricación de satélites y la coincidencia con la política establecida, se firmaron los acuerdos internacionales que condujeron a la creación en 1964 de la Organización Internacional de Telecomunicaciones por Satélite

(INTELSAT). En ella participaron todos los países no comunistas y la propiedad se repartía entre ellos en función del tráfico anual de cada uno. COMSAT se convirtió a partir de entonces en la rama operativa de la organización.

COMSAT había encargado la fabricación del primer satélite comercial a Hughes. Bautizado Early Bird (posteriormente pasó a ser conocido como Intelsat I) fue lanzado en abril de 1965; era un cilindro de setenta centímetros de diámetro y de sesenta de altura, que pesaba treinta y nueve kilos y estaba alimentado con células solares que suministraban cuarenta vatios. Durante sus cuatro años de vida permitió el intercambio de 240 conversaciones telefónicas simultáneas entre ambas orillas del Atlántico, o bien un canal de televisión en blanco y negro. Introdujo una importante novedad técnica, el acceso al satélite desde múltiples estaciones terrenas, lo que permitía distribuir dinámicamente los canales entre las distintas estaciones. La segunda serie de satélites consolidó la tecnología de acceso y extendió la garantía de vida de los satélites a tres años, su lanzamiento fue financiado prácticamente en exclusiva por los EE.UU. a cambio de suministrar las comunicaciones requeridas por el programa Apolo que llevó al hombre a la luna.

El dominio tecnológico norteamericano del sector fue prácticamente absoluto durante las dos primeras décadas. El desarrollo por parte de Francia del lanzador Arianne y los programas de diseño y construcción de satélites de comunicaciones de la Agencia Espacial Europea permitieron a los europeos reequilibrar la situación a partir de los años ochenta y la creación del sistema continental EUTELSAT y la aparición de sistemas nacionales de satélites, como HISPASAT en el caso español, que inició su vida coincidiendo con el quinto centenario del descubrimiento de América.

La ola liberalizadora de las telecomunicaciones también alcanzó recientemente a estos consorcios internacionales y en julio de 2001 Eutelsat se convirtió en una sociedad privada en la que los antiguos monopolios telefónicos de Francia, Italia, Gran Bretaña y Alemania se reparten el 70 % de su capital, estando prevista una oferta pública de venta del resto a finales de este año. Eutelsat es propietaria en la actualidad del 27% de Hispasat. En cuanto a Intelsat, en el mismo mes y año que el consorcio anterior pasó a ser también propiedad de 200 inversores privados, entre los que se incluyen fabricantes y operadores de telecomunicaciones, y a finales de este año pasará a ofertarse también en bolsa de acuerdo con los términos de la Acta ORBIT (Open-Market Reorganization for the Betterment of International Telecommunications Act).

Ambas compañías tienen un tamaño parecido. Intelsat opera con una flota de 22 satélites y sus ingresos anuales superaron el último año el millar de millón de dólares. La flota de Eutelsat, está compuesta por 18 satélites que difunden desde la órbita geoestacionaria un millar de canales de televisión y quinientos programas de radio a cien millones de hogares, con unos ingresos anuales del orden de la mitad de los de Intelsat.

El despliegue de la red de satélites se hizo siempre en competencia con el tendido de cables telefónicos submarinos, que se había iniciado diez años antes. Los satélites iniciaron esta carrera con una clara ventaja, ya que en aquellos momentos los cables todavía empleaban tubos de vacío como repetidores. Early Bird doblaba la capacidad de los cables de la época. Veintidós años después de su descubrimiento, el transistor se instalaba en los cables, con mucha más lentitud de cómo lo había hecho en los satélites; el conservadurismo siempre ha sido una seña de identidad en el crecimiento de los sistemas de comunicaciones

sólidamente establecidos. En 1970 se tendió entre España y EE.UU. el primer cable totalmente transistorizado, conocido bajo las siglas de TAT-5; su capacidad de 845 canales multiplicaba por seis la de los cables tendidos un lustro antes y por más de veinte los 36 canales del primer cable de 1956.

Para entonces, las fibras ópticas acababan de nacer y comenzarían a ganarle lentamente la partida a los satélites. La primera demostración en tierra de un sistema práctico de comunicaciones por fibra tuvo lugar en Atlanta en 1975 y en 1983 ATT ya había tendido el primer enlace troncal entre Nueva York y Washington. La ruptura del Sistema Bell y la competencia de GTE y MCI en el tráfico de larga distancia espoleó el mercado y aceleró el tendido de cables ópticos. En 1988 comenzó a funcionar el primer cable óptico transatlántico (TAT-8) que disponía de una capacidad de 40.000 circuitos y desplazó definitivamente el cobre y los transistores del fondo del mar, que fueron reemplazados por vidrio y láseres. Los cables submarinos de fibra representaron la culminación del sueño de los primeros operadores telegráficos de cruzar los mares y los océanos y significaron un salto cuantitativo de gran magnitud, ya que han permitido pasar de transmitir unos pocos bits por segundo a billones de ellos.

Los satélites introdujeron desde el primer momento la capacidad de acceso simultáneo desde múltiples estaciones terrenas, lo que se logra multiplexando mediante división temporal las distintas señales. Esta técnica, conocida como TDMA, es muy eficiente, ya que permite a cada estación terrena utilizar el satélite durante un intervalo de tiempo determinado; para ello han de sincronizarse las estaciones para poder acceder ordenadamente al satélite, o bien simplemente hacer aleatorio este proceso y dejar que cada una de ellas intente probar suerte y si está libre el canal realice la transmisión, en caso de que esté ocupado se

plantea un conflicto y para evitar que pueda interferirse la comunicación en curso ha de volverse a intentar en un momento posterior. Este procedimiento fue probado por primera vez en radioenlaces entre las islas hawayanas y recibe el nombre de ALOHA.

De la misma manera y para lograr un uso eficiente de la capacidad de los cables submarinos se empleó poco después de que entrara en servicio el primero de ellos (TAT-1) un ingenioso sistema electrónico que permitía doblar prácticamente su capacidad y que desde entonces se ha aplicado en todos los cables. Explota el hecho de que en una conversación ordinaria más del 50% del tiempo es silencio, por lo que un conmutador rápido podía intercalar en esos instantes otra conversación; un símil poco viable, por razones obvias de seguridad, sería aprovechar en las autopistas el espacio de separación entre los coches para ir cambiando continuamente los vehículos de carril; está conducción ciertamente temeraria no implica riesgos cuando lo que se intercambia es algo tan inmaterial como segmentos o los bits de una comunicación. La rutina de funcionamiento se denomina TASI (Time-Assignment Speech Interpolation) y una vez más, al igual que ya hizo Shannon al considerar la naturaleza aleatoria de las comunicaciones, explota a fondo todas las características estadísticas de las señales.

En los primeros tiempos de las comunicaciones por satélite nunca se consideró que donde los satélites iban a ser líderes indiscutibles era en la transmisión de programas de televisión; basta un evento deportivo o un suceso extraordinario para ver un elevado número de estaciones terrenas móviles en funcionamiento. La flexibilidad de despliegue y la facilidad de acceso a los satélites las hacen actores habituales del periodismo electrónico, pero también el avance tecnológico ha permitido poder recibir en tierra

con pequeñas antenas las señales de televisión radiadas desde satélites especializados.

Por ceñirnos sólo al entorno europeo, la Conferencia administrativa mundial de radio (CAMR) de 1977 había asignado a cada país europeo posiciones orbitales en las que ubicar los satélites especializados de difusión de televisión, que en el caso español son las utilizadas por Hispasat. Como se consideraba que la recepción de las señales con pequeñas antenas sólo iba a ser posible si los satélites eran plataformas especializadas de elevada potencia, Francia y Alemania iniciaron un costoso programa de desarrollo de satélites de difusión directa (TDF y SAT) que si bien fueron un motor de desarrollo de la industria espacial europea, desde el punto de vista económico fueron un fracaso, ya que la aparición de los transistores de efecto de campo a frecuencias de microondas permitieron fabricar receptores mucho más sensibles que no hacían necesarias las potencias que se habían previsto en los satélites. Los satélites ordinarios de comunicaciones cubrieron inmediatamente este nicho y la red de Eutelsat, que había sido diseñada para cursar el tráfico telefónico intraeuropeo se encontró con que este seguía transitando por las redes de cables terrenas y que inesperadamente el uso principal de los transpondedores de sus satélites iba a ser la difusión de programas de televisión. En la actualidad, el 16,2% de los hogares catalanes reciben televisión por satélite, tanto los canales de pago como los gratuitos.

Este avance técnico provocó también que equipos dotados de pequeñas antenas parabólicas, de diámetro inferior al metro, llamados VSAT (Very Small Aperture Terminal), hicieran su entrada en el mercado a mediados de los años ochenta permitiendo comunicaciones bidireccionales desde cualquier lugar, por remoto que sea. Periodistas, expediciones científicas, voluntarios de organizaciones no

gubernamentales en campañas humanitarias, entre otros muchos usuarios dispersos por lugares del globo en los que no existen redes convencionales de telecomunicaciones, pueden beneficiarse de esta tecnología, como también lo están haciendo empresas y corporaciones que tienen múltiples centros distribuidos por un extenso territorio y desean establecer rápidamente una red propia. Se había augurado a estas redes un brillante futuro, pero a finales del milenio el número de terminales VSAT instalados en todo el mundo no llegaban al medio millón, de los cuales más de dos tercios se encontraban en EE.UU. Los terminales resultaban voluminosos y su coste y el del servicio era elevado, por lo que sólo empresas con sedes muy dispersas tuvieron un claro interés en instalarlas.

Estas no son las únicas redes de satélites de comunicaciones existentes, a ellas hay que sumar la red INMARSAT de comunicaciones marítimas y varias redes de comunicaciones militares que dan cobertura a los ejércitos norteamericanos y de la OTAN. En la órbita geoestacionaria están situados también los satélites meteorológicos, que junto con los de observación de la tierra y los científicos constituyen un buen ejemplo de cooperación internacional en aras de la ciencia y de la paz.

La Sociedad Europea de Satélites, un consorcio privado europeo propietario de la red de satélites ASTRA, y que en España soporta la plataforma de Canal Satélite Digital, de forma semejante a como lo hace Hispasat con Vía Digital, nació con la finalidad de difundir en Europa programas de televisión y empleó siempre satélites comerciales. Opera una red de 13 satélites y sus ingresos en el último año se aproximaron al millar de millón de euros. Tras la reciente adquisición de GE Americom ha sido rebautizada SES GLOBAL y se ha dotado de cobertura mundial, convirtiéndose en la primera empresa del sector. Es un

ejemplo de éxito singular en este campo y, en la actualidad, ha puesto en marcha un nuevo sistema de comunicaciones bidireccionales en banda ancha que cubre cualquier punto de la península ibérica. Emplea transpondedores en banda Ka de su satélite ASTRA 1H y mediante antenas parabólicas de un metro veinte de diámetro permite transmisiones de 2 Mbit/s, cifra que se reduce a 384 kbit/s si la antena es de sólo setenta y cinco centímetros. Es un servicio dirigido al sector empresarial que pretende soportar los mismos servicios de Internet que dan las redes terrenas. Está por ver si los servicios interactivos vía satélite se consolidan y pueden competir con éxito con las redes fijas; los satélites tienen una cierta ventaja en los sistemas multidifusión, en los que la misma información se envía a muchos usuarios, pero en las comunicaciones bidireccionales las redes metropolitanas están mucho mejor posicionadas para abarcar este mercado, por lo que el acceso a Internet vía satélite quedará reducido a aquellas situaciones en las que no exista disponible otro medio de acceso de banda ancha a Internet, o bien se requiera multidifundir contenidos a un número elevado de usuarios situados en la periferia de la red.

De la misma manera que la medida de capacidad de las redes terrestres es un canal de 2 Mbit/s, en los satélites, por razones históricas al tratarse de un mercado mayorista y por el uso frecuente de sus canales (también denominados transpondedores o repetidores) para difundir programas de televisión, la capacidad de las redes de satélites se mide por el número de repetidores de 36 MHz o su equivalente. En la actualidad la capacidad global de todas las redes ronda los 7.000 canales, estando la mitad de ellos destinados a difundir televisión y sólo la cuarta parte soportan tráfico telefónico. Tradicionalmente se ha mantenido en estas redes un exceso de capacidad del 20 al 30%. Se estima que para el año 2010 la demanda de canales se habrá doblado y que el motor

principal de ella sean los servicios de Internet, ya que la difusión de programas de televisión no va a crecer y el tráfico telefónico probablemente disminuirá.

Las órbitas se clasifican normalmente en tres tipos, según la altitud a la que se encuentren. En las órbitas bajas, situadas típicamente entre 300 y 1.500 km de altitud, conocidas por las siglas inglesas LEO (Low earth orbit), los satélites viajan rápidamente y completan una revolución alrededor de la Tierra en una hora y media, siendo visibles desde un lugar menos de un cuarto de hora en cada revolución; esto requiere para cubrir toda la superficie terrestre un mínimo de cincuenta satélites y si se ha de seguir en tierra un satélite determinado un sistema activo, bien de tipo mecánico o electrónico, que permita a la antena receptora apuntar al satélite.

En la órbita geoestacionaria, situada a 36.000 km de altitud sobre el ecuador, los satélites son geosíncronos y aparecen siempre fijos en el cielo, sin necesidad de que la antena de tierra tenga que seguirlos. Tres satélites bastan para tener cobertura global, si bien al estar situados en el ecuador no alcanzan las zonas septentrionales del hemisferio norte y las meridionales del sur. La altitud de la órbita hace que el satélite tenga que radiar una potencia mucho mayor para producir el mismo nivel de señal en tierra; por ejemplo, un satélite en una órbita situada a 1.000 km requiere radiar mil veces menos potencia que uno geoestacionario, pero como contrapartida, su vida media es la tercera parte de la de éste.

Las órbitas medias, denominadas MEO (Medium earth orbit), se sitúan típicamente a altitudes comprendidas entre 10.000 y 25.000 km y para lograr cubrir la tierra se necesita un mínimo de doce satélites.

La órbita geoestacionaria tiene la gran ventaja de que una constelación de muy pocos satélites puede cubrir eficientemente un continente, lo que permite llegar en muy poco tiempo a millones de usuarios. Ésta es la razón del éxito de los sistemas de difusión directa de televisión, tanto analógicos como digitales; unos pocos satélites permiten difundir centenares de canales. El precio que hay que pagar por ello es disponer de potentes cohetes lanzadores, dado que el peso de los satélites es muy superior a los de baja órbita y la potencia que se requiere para situarlos en órbita es mayor que la requerida para llegar a la luna.

Este segmento de satélites se encuentra en estos momentos a las puertas de un gran cambio. El aumento de la potencia de los lanzadores va a permitir que el perigeo de la órbita inicial de lanzamiento sea mucho más alto que el que se alcanza actualmente y que la última etapa del cohete proporcione también impulso en el apogeo para situar al satélite en órbita circular, trabajo que ahora tiene que hacer completamente un motor del satélite. Previsiblemente, desaparecerán a largo plazo los propulsores de alto empuje instalados en el satélite y será el lanzador quien le dé el primer impulso, para iniciar la órbita de transferencia, y después motores eléctricos completen el proceso y aseguren el mantenimiento de la posición del satélite en el emplazamiento fijado.

La tecnología actual permite construir y situar en la órbita geoestacionaria satélites que pueden tener una altura de unos siete metros y estar dotados de hasta diez antenas diferentes. Su masa en el lanzamiento puede alcanzar los 5.000 kg, de los que sólo la séptima parte corresponde a la carga útil, es decir al sistema de comunicaciones propiamente dicho. Sus paneles solares pueden suministrar una potencia de hasta 15 kW con la que alimentar eléctricamente hasta un centenar de canales de comunicación

dirigidos del satélite hacia tierra, durante toda la vida del satélite, que contractualmente ya se establece en el entorno de los quince años. Esta larga vida requiere que los satélites posean configuraciones muy flexibles para poder acomodar los cambios de escenario en el mercado de los servicios de telecomunicaciones que se produzcan en ese tiempo. Como además, las flotas existentes requieren una renovación continua al ir acabando los satélites su vida útil, en los próximos cinco años va a necesitarse una nueva generación de satélites de mayor tamaño y potencia. Se apunta ahora a alcanzar masas mayores de 2.000 kg de carga útil y potencias que sobrepasarán los 20 kW, con los que se estima se va a producir una reducción de coste por canal del 25% respecto a la generación actual.

Las órbitas bajas están ocupadas por los satélites de exploración de la tierra y también en ellas iban a situarse las constelaciones de satélites para comunicaciones móviles, que han sido uno de los mayores fracasos empresariales de estos últimos tiempos. Un sistema de este tipo se enfrenta al problema de comunicar un satélite y un terminal de reducido tamaño, dotado de una pequeña antena que radia muy poca potencia y además lo hace en todas las direcciones del espacio, pues no puede apuntar a un satélite concreto. A ello hay que sumar que el usuario se puede estar moviendo en un vehículo, caminando por las calles de una ciudad o dentro de edificios. Esto hace que sólo puedan llegar con su señal hasta la distancia de las órbitas bajas y así se planificaron diversos sistemas en la última década. El más conocido de ellos es Iridium, una constelación de 66 satélites que comenzó a funcionar en 1999 y un año más tarde entró en bancarrota. Fracasó por motivos técnicos, al disponer de pocos terminales y a precios elevados (1.500\$), por el alto coste del servicio (3 a 7\$ por minuto), y sobre todo por que en el largo tiempo de maduración de este proyecto, las redes terrenas de comunicaciones móviles basadas en GSM

experimentaron un crecimiento explosivo y acapararon el mercado al resolver en tierra, en la mayor parte de los países, la problemática que se pretendía solucionar desde el cielo. En los países ricos, donde los usuarios podían permitirse el uso de este sistema, no era necesario, y en el resto del mundo, o no había población o no disponía de los recursos para hacerlo. No obstante, el Departamento de Defensa norteamericano salvó la empresa y se aseguró el uso de la constelación para fines militares. Los satélites de Iridium son muy avanzados, ya que permiten la conmutación a bordo del satélite y el envío de los mensajes a través de la constelación sin necesidad de bajar a tierra hasta el destino. Situados a 780 km de altitud, cada satélite de 690 kg de masa es capaz de generar 48 haces sobre tierra y soportar 1.100 llamadas simultáneas; el coste total del sistema fue de cinco mil millones de dólares.

Desgraciadamente, Iridium no fue el único sistema de este tipo. Le acompañaron en su mismo destino Globalstar, otra constelación de 48 satélites en órbita baja (1.400 km) completada también en 1999 que entró en suspensión de pagos en 2001 e ICO, en este caso una constelación de diez satélites de órbita media (10.000 km) que estaba mucho más retrasada en su desarrollo y que quebró en 1999, siendo comprada por Teledesic, un sistema de satélites que a diferencia de los anteriores, que son de telefonía móvil, pretende dar servicio fijo por satélite de acceso a Internet a partir del año 2005. Estos sistemas eran mucho menos avanzados que Iridium, ya que el satélite actuaba de la misma forma que lo hacen las estaciones base de los sistemas celulares de telefonía móvil, recibiendo la llamada del móvil y transfiriéndola inmediatamente a un nodo próximo de la red fija, por la que viaja hasta el destinatario.

Se han planificado también diversos sistemas de satélites para suministrar acceso de banda ancha a Internet, varias de

ellas utilizando los satélites geoestacionarios de una manera similar a la que utiliza ASTRA en su servicio BBI.

Uno de los problemas más serios a los que han de enfrentarse estos sistemas está provocado por el hecho de que el protocolo de transmisión de Internet (TCP) realiza el control de flujo a base de retornar mensajes de acuse de recibo de los paquetes de datos enviados y sólo permite tener un cierto número de paquetes pendientes de acuse. Cuando esto ocurre se espera a que lleguen antes de reiniciar la transmisión; como el tiempo de tránsito de una señal que ha de subir a un satélite y bajar a tierra (que técnicamente recibe el nombre de latencia) es de un cuarto de segundo, mucho mayor que el empleado en las redes terrenas de fibra óptica, esto puede aminorar mucho la velocidad de transmisión.

La mayoría de los servicios de Internet por satélite aprovecharán las redes geoestacionarias existentes, de la misma forma que lo hace ASTRA, pero también se han contemplado redes de banda ancha basadas en satélites de órbita baja. De ellas, la más conocida es Teledesic, que fue considerada en su momento sólida prueba del prometedor futuro de los satélites para poder proporcionar acceso a Internet, no en vano entre sus socios se encontraban Bill Gates y Craig McCaw, fundadores de Microsoft el primero y de una exitosa empresa norteamericana de comunicaciones móviles el segundo. Con una constelación de 288 satélites en baja órbita funcionando en banda Ka (30/20 GHz) se mantendrá en tierra una estructura celular fija, semejante a la que crean las estaciones base en los sistemas de comunicaciones móviles, con un tamaño de célula reducido para poder también reutilizar las frecuencias. Para ello, las antenas de los satélites, que se están moviendo rápidamente, habrán de poder orientarse electrónicamente para mantener fijo sobre el suelo la huella de su haz. Cuando éste ya no

pueda hacerlo, otro satélite que le siga en su mismo plano orbital pasará a dar cobertura a esa zona. Cada satélite actuará como un nodo de una red de conmutación de paquetes y el tráfico se transferirá de unos a otros. Es una estructura muy compleja y tras más de seis años de diseño del sistema, se ha anunciado su entrada en servicio para el año 2005 y se ofrecerá a sus usuarios un enlace descendente de 64 Mbit/s y un ascendente de 2 Mbit/s, o bien un enlace simétrico de 64 Mbit/s.

Donde los satélites no tienen competencia es en los sistemas de radionavegación, como se ha demostrado con el Sistema Global de Posicionamiento (GPS), un sistema militar concebido para permitir a los navíos y aeronaves norteamericanas conocer con precisión su localización y poder guiar sus misiles, que se desplegó en los años ochenta. Rusia posee también un sistema semejante, denominado GLONASS. Al permitir su uso civil, los terminales GPS de un tamaño y coste similar al de un teléfono móvil se han abierto camino en un sinfín de aplicaciones de la vida cotidiana: navegación marítima y aérea, construcción, control de flotas de transporte, excursionismo y geodesia, entre otros, ya que permiten conocer de forma instantánea la hora y el lugar en que se encuentra cualquier usuario. La red GPS es una constelación de veinticuatro satélites situados en seis planos orbitales a altitud media; estando compartido cada plano por cuatro satélites. Entre cinco y ocho satélites están visibles en todo momento desde cualquier punto de la tierra y el terminal necesita recibir la señal de al menos cuatro de ellos para poder establecer la posición geográfica y la altura del lugar donde se encuentra. Todos los sistemas de localización funcionan mediante triangulación, midiendo el tiempo de demora de la señal, por ello cada satélite lleva un preciso reloj atómico sincronizado y emite un código de ruido pseudoaleatorio propio. El satélite transmite los datos de su órbita y las correcciones temporales a una velocidad de

50 bit/s combinándolos con el código de una forma semejante a como se hará en los sistemas móviles de tercera generación (UMTS). Los terminales tienen almacenados los veinticuatro códigos y mediante correlación son capaces de identificar los satélites visibles, extraer los datos y con el microprocesador que llevan incorporado calcular la posición.

Como GPS suministra una información temporal muy precisa, sus señales se emplean también para sincronizar las redes de telecomunicaciones que requieren ajustar los tiempos de acceso de sus usuarios, lo que ocurre por ejemplo en las redes celulares, en las redes de frecuencia única de televisión digital terrestre o en todos aquellos sistemas que necesitan una información horaria precisa.

Dado su origen militar, el sistema GPS está controlado por el ejército norteamericano y tiene serias limitaciones de disponibilidad, al no estar garantizado el servicio y mucho menos su calidad. Es más, hasta fechas muy recientes se introducían intencionadamente errores sistemáticos para disminuir la precisión de los usuarios civiles. Si bien la administración norteamericana ha mantenido últimamente que retiraba definitivamente esas medidas, es evidente que si en el futuro lo consideran necesario para sus intereses volverán a aplicarlas. Por ello, la Agencia Espacial Europea (ESA) hace años que viene estudiando y proponiendo el lanzamiento de una constelación propia de satélites para uso civil que liberaría a Europa de la dependencia de GPS. Bautizada con el nombre de Galileo, ha recibido finalmente la aprobación de la Unión Europea, tras vencer las reticencias de varios países miembros y superar la obvia oposición de los EE.UU. a perder el monopolio occidental de este tipo de sistemas.

El control de esta tecnología tiene evidentes connotaciones estratégicas y los EE.UU. no van a renunciar a

considerar prioritario su uso militar, ahora y en la futura generación del sistema GPS que se anunció al unísono que Galileo, suspendiendo el servicio o degradándolo intencionadamente cuando lo requieran sus intereses, pero también significa una ventaja económica y comercial. A parte de ser un factor clave de desarrollo industrial, tanto en el segmento espacial como en el de los terminales receptores, va a permitir la implantación de nuevos servicios comerciales que inciden de lleno en el bienestar social.

Junto con las comunicaciones móviles e Internet, los sistemas de navegación por satélite y de localización de posición representan el núcleo de nuevos servicios que están conformando la sociedad de la información. Hasta ahora, cada uno de ellos se ha desarrollado por separado, pero su confluencia es inevitable por la combinación de movilidad y localización que aportan. El primer aspecto a considerar es su uso en situaciones de emergencia, donde la localización puede realizarse de forma automática combinándolo con un teléfono móvil o una radiobaliza; ejemplos de aplicaciones nuevas pueden ser su activación, en caso de accidente, por los sistemas de protección activa de los coches, o la ayuda a personas con discapacidades sensoriales o mentales en situaciones de emergencia médica o de desorientación. En los sistemas de transporte y logísticos ya se vienen utilizando rutinariamente sistemas de localización y mensajería, tanto para el control de las flotas como para el intercambio de datos. En este campo queda mucho por hacer, incluyendo el control preciso de la velocidad y los peajes flexibles en autopistas, hasta llegar algún día a los sistemas de conducción automatizados en mayor o menor medida (campo en el que aparecen también los radares anticolidión, los sistemas de identificación de imágenes, y el control de los vehículos en entornos y tiempo real), pasando por el control de transportes de mercancías peligrosas y la identificación de vehículos robados.

En la navegación aérea el control de tráfico, que en la actualidad se realiza con sistemas instalados en tierra que no cubren los océanos o las zonas remotas, pasa ineludiblemente por la incorporación de los sistemas de navegación por satélite, que van a permitir incluso hasta el aterrizaje de precisión en condiciones de visibilidad limitada, lo que se conoce como aproximaciones de precisión de categoría 1 (CAT 1). En el tráfico marítimo puede llegarse desde el control en zonas de alto tráfico hasta el guiado en puerto, pasando por la instalación de equipos simples que permitan la identificación y la localización electrónica de contenedores. Pero donde puede aparecer un uso muy amplio es combinado con los teléfonos móviles de futuras generaciones para suministrar servicios de Internet móvil dependientes de la ubicación.

La constelación de Galileo estará formada por treinta satélites (veintisiete operativos y tres en reserva) situados en una órbita media a 23.616 km en tres planos orbitales que suministrarán una buena cobertura en las altas latitudes del continente; se desplegará entre los años 2006 y 2008 y tendrá un coste estimado en 3.500 millones de euros.

Galileo va a permitir un error de posición de unos cinco metros en los servicios gratuitos, aquellos que en la actualidad se obtienen con GPS con un error un orden de magnitud mayor, y está previsto que soporte también servicios de pago en los que la precisión vertical y horizontal puede llegar a ser del orden de diez centímetros, sobre todo para aplicaciones críticas como el aterrizaje de aeronaves, o el guiado automático de buques en puertos. En cuanto a la precisión horaria, GPS permite sincronizar relojes respecto a la hora coordinada (UTC) con una precisión de quinientos nanosegundos, mientras que Galileo reducirá este valor a la décima parte.

Como un paso intermedio hacia Galileo, ESA ha estado desarrollando el proyecto EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System). Utilizando tres satélites geoestacionarios con cobertura europea y una red de estaciones terrenas, permitirá en el año 2004 aumentar la precisión de GPS y de GLONASS, transmitiendo información de los errores reales y de la fiabilidad de las señales de estos sistemas. El compromiso más estricto en este sistema es garantizar que la probabilidad de que los datos suministrados sean correctos será del 99,99995% y caso de no serlo, ha de notificarse antes de seis segundos, lo que permitirá su uso por los aviones, tanto en ruta como en la aproximación a los aeropuertos.

Los sistemas de localización basados en satélites no son los únicos posibles. Las redes de comunicaciones móviles acumulan continuamente información de la posición de los usuarios, ya que cada terminal debe de registrarse y está localizable en cada momento desde una estación base; se obtiene así la información de la celda de cobertura en la que está situado. Como además los sistemas digitales (GSM) están sincronizados en tiempo, el teléfono de cada usuario ha de ajustar temporalmente sus señales para poder encajarlas en el intervalo de tiempo asignado; ese ajuste temporal suministra información precisa de la distancia a la que se encuentra de la base. Con frecuencia, sobre todo en los entornos urbanos, un terminal está en el área de cobertura de varias bases por lo que si puede situarse respecto a tres se obtiene una triangulación muy precisa de su posición. Una de las tablas de salvación que los operadores móviles ven para los sistemas de tercera generación es poder suministrar a los usuarios información personalizada y ajustada al lugar donde se encuentran (hoteles, restaurantes, cines, comercios, bancos, clínicas, farmacias, etc.), esto no será posible sin una información precisa de la localización del móvil, que previsiblemente

llevará incorporado un terminal de posicionamiento por satélite.

Pero este no es el único motor que va a forzar la convergencia de las redes móviles y los satélites en estas aplicaciones, el más importante será sin duda el acceso a servicios de emergencia. La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), el agente regulador de las telecomunicaciones de EE.UU., impuso en 1996 a los operadores móviles que en el plazo de cinco años deberían tener instaladas aplicaciones que permitieran conocer el lugar desde donde se realizaban las llamadas al número de emergencia 911, al igual que están obligados a hacerlo en las provenientes de la red fija. Si la localización la realiza la red a partir de la información de las estaciones base se pide una precisión de 100 metros en el 67% de las llamadas y de 300 metros en el 95%. Si la información la suministra el móvil, la precisión exigida es la mitad de la anterior, 50 y 150 metros, respectivamente, ya que incorporará un receptor GPS. Dado que la implantación del número europeo de emergencia 112 va mucho más retrasada, la disponibilidad de este servicio se demorará, pero muchos usuarios desearán poder ser localizados en caso de emergencia cuando no puedan indicar, por la causa que sea, donde se encuentran, y los reguladores acabarán imponiendo este servicio.

Otro campo donde las telecomunicaciones espaciales tienen un gran impacto es el de exploración de la tierra. Son bien conocidas las aplicaciones meteorológicas y los satélites que suministran esta información, pero han existido otros satélites europeos de observación: óptica en el caso de SPOT, radar en el caso de ERS y el recientemente lanzado ENVISAT. Estos satélites han servido para experimentar y demostrar diversas posibilidades de uso, las más conocidas son las cartográficas, pero también han mostrado la viabilidad de controlar desde el espacio el estado de los

océanos, la contaminación marina, la clasificación de suelos según sus usos, la deforestación, o la estimación de biomasa y el seguimiento de las cosechas. Pero quedan abiertas muchas puertas en la monitorización del medio ambiente y en la protección civil en caso de desastres naturales. El programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security) es una de las acciones de la Unión Europea en esta área con un horizonte del año 2008 y requerirá de satélites de observación para la vigilancia y control medioambiental y de comunicaciones para asegurar la protección y rescate de las personas en casos de catástrofes. El control del cumplimiento de los tratados internacionales de protección del medio ambiente, como es el caso del Protocolo de Kioto de reducción de los gases de efecto invernadero, encontrará en estos satélites un aliado imprescindible. GMES abarcará desde la vigilancia de los mares y la atmósfera hasta el control de las masas forestales y los cultivos con un seguimiento del impacto medioambiental de nuestras actividades. A ello habrá que añadir todos los sistemas de comunicaciones y de gestión de crisis.

La telefonía móvil constituye, junto con Internet, la otra gran revolución de la última década. Si Internet permite el acceso individualizado a cualquier fuente de información, las comunicaciones móviles han permitido personalizar la telefonía y posibilitado que podamos comunicarnos en cualquier tiempo y lugar.

Las radiocomunicaciones son centenarias y sus orígenes y su implantación comercial conducen directamente a Marconi. Los servicios móviles marítimos y aeronáuticos han existido durante todo el siglo pasado y han estado profesionalizados desde sus inicios. Los sistemas móviles terrestres han tenido un desarrollo mucho más lento al haber otras alternativas mucho más económicas para comunicar usuarios en tierra, surgiendo su uso de la necesidad de

comunicación con vehículos de la policía. A finales de los años veinte comienzan a instalarse equipos de radio en los coches de la policía de Detroit y su uso se extendió pronto a todas las flotas de policía y bomberos. Este tipo de servicios se conoce como de radiotelefonía móvil privada porque sirven a un conjunto definido de usuarios en un territorio normalmente reducido y se emplean para intercambiar órdenes e información entre ellos. De los ámbitos de seguridad se pasó a los de protección civil, asistencia sanitaria y al control de flotas de servicios públicos y de compañías de servicios, siempre con el denominador común de un centro de control o despacho de la flota. Se produjo un crecimiento continuado de estos sistemas, que se vieron beneficiados por la introducción de la modulación de frecuencia y la transistorización de los equipos, lo que permitió la reducción de la ocupación espectral de cada canal de radio, que se redujo hasta 12,5 kHz, permitiendo un uso mucho más eficiente del espectro disponible y dar servicio a un número elevado de terminales.

Durante mucho tiempo las aplicaciones civiles estuvieron circunscritas a los ámbitos anteriores y siguieron con considerable retraso los avances de los equipos militares de radio. La aparición de redes móviles públicas, en las que cualquier persona podría conectarse a la red telefónica con un terminal móvil fue muy posterior y tuvo un desarrollo muy lento, motivado por el hecho de que la cobertura debería ser muy amplia, todo un país como mínimo, y que el funcionamiento del sistema solamente sería posible si se hacía de forma automática, sin la intervención de los operadores presentes en los centros de control de las redes privadas. La creación de un servicio de este tipo requiere poner en marcha una red que posea todas las funcionalidades de transmisión y conmutación de una red telefónica fija, con el agravante de que el acceso se hace en condiciones mucho más desfavorables que las permitidas

por un par de hilos de cobre, y empleando un recurso muy escaso, el espectro de frecuencias. En los años sesenta, una década prodigiosa de las telecomunicaciones, pues en ella nacieron también los satélites y las fibras ópticas, comenzó a funcionar en EE.UU. un sistema de telefonía móvil que permitía la marcación directa y el encaminamiento automático de las llamadas, conocido como IMTS (Improved Mobile Telephone System). Las primeras pruebas del sistema se realizaron a partir de 1962 en Harrisburg, Pennsylvania, y en 1965 el servicio se amplió a otras ciudades. Se basaba en el uso de una veintena de radiocanales con estaciones base de un radio de cobertura de unos cincuenta kilómetros, por lo que resultaba muy poco viable al disponer de unos recursos escasos para servir a un gran número de usuarios y se saturaba frecuentemente.

La solución a este problema era conocida y había sido propuesta por D. Ring en 1947, pero la tecnología y el espectro disponible no permitían aplicarla. Consiste en crear una estructura de celdas de cobertura de reducido tamaño, en las que se emplea una pequeña parte de las frecuencias disponibles para dar servicio a pocos usuarios. Esto permite utilizar las mismas frecuencias en celdas separadas lo suficiente para que no se interfieran los usuarios, por lo que las estaciones base han de radiar poca potencia y cubrir una pequeña zona. Cuando el número de terminales en una celda crece, no queda más remedio que subdividirla en otras más pequeñas para poder seguir funcionando satisfactoriamente. De ahí que estos sistemas reciban el nombre de celulares, ya que se representan sobre el mapa de un territorio como un conjunto semejante a la estructura celular de un tejido, con las estaciones bases ocupando el lugar de los núcleos, y que su éxito haya necesitado llenar de antenas los tejados de muchos edificios de las ciudades para poder dar servicio a todos los teléfonos móviles. La dificultad mayor que tienen que solventar estos sistemas es el seguimiento de los

usuarios y el control de las llamadas, para asegurar que estas puedan establecerse con independencia del lugar en que se encuentra el terminal y que no se pierda la comunicación si se está moviendo y va cambiando de celda. Durante los años setenta se desarrollaron en paralelo estos sistemas a ambas orillas del Atlántico, pensando inicialmente en equipos que iban a ser instalados en vehículos.

Los pioneros en Europa en la creación de estos sistemas fueron los países nórdicos. Al poseer territorios con una baja densidad de población cuyas necesidades de telecomunicaciones no podían ser atendidas con costes razonables por las redes fijas, y al estar situados en latitudes elevadas con mala cobertura desde los satélites geoestacionarios, apostaron decididamente por las tecnologías celulares. El acierto de esta elección ha sido doble, resolvieron satisfactoriamente un problema y convirtieron a sus industrias en líderes del sector. Los cuatro países escandinavos definieron un estándar común analógico NMT (Nordic Mobile Telephone) que funcionaba a 450 MHz con acceso múltiple por división de frecuencia, y que comenzó a operar en 1982; este sistema fue también el primero que Telefónica instaló en España. Posteriormente este sistema pasó a operar también en la banda de 900 MHz con una capacidad muy mejorada lo que permitió el uso de terminales portátiles, los precursores de los teléfonos esbeltos y de reducido peso que ahora conocemos.

Los Laboratorios Bell desarrollaron por su parte el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone System), pero su entrada en servicio se retrasó por diversas cuestiones relativas a las asignaciones de frecuencias y sobre todo por que se estaba ya a las puertas de la ruptura de ATT. Cuando se inicia el despliegue del sistema en 1983 se hace ya en un incipiente marco liberalizado, con el servicio repartido entre operadores independientes y los regionales, por lo que la

telefonía móvil ha sido un servicio liberalizado desde sus inicios. Funciona a 800 MHz y se extendió por todo el continente americano y la cuenca del pacífico. A ellos hay que añadir un tercer sistema desarrollado por Motorola y denominado TACS (Total Acces Communications), que es una adaptación de AMPS a 900 MHz para coberturas nacionales. En Europa se instaló en el Reino Unido y posteriormente también en España.

Estos sistemas son conocidos actualmente como la primera generación de la telefonía móvil. Son sistemas analógicos que emplean modulación de frecuencia para transmitir la información, el mismo método que se emplea en la radio para emitir los programas de la banda de frecuencia modulada (FM). Tienen todos en común un uso muy poco eficiente del espectro radioeléctrico y las limitaciones inherentes a los sistemas analógicos en cuanto a complejidad de los circuitos para reproducir fielmente las señales y los costes de su diseño y fabricación. Desde el punto de vista de las comunicaciones presentan un problema adicional, la facilidad de su escucha, que está presente de forma inevitable en los sistemas analógicos de radio porque al captar la onda se puede extraer directamente la señal; esto va en contra de uno de los principios básicos de las telecomunicaciones, su secreto.

El despliegue de estos sistemas en Europa puso de manifiesto una vez más la fragmentación de los mercados y la imposibilidad de atravesar las fronteras, ya que los sistemas eran incompatibles entre sí y no se podían emplear en otros países. Para solventar este problema se creó en 1982 en el marco de la Conferencia Europea de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) un grupo de trabajo (franco - alemán) al que se encomendó la definición de un nuevo estándar que debía permitir la movilidad por todos los países europeos, ser compatible con la red digital de

servicios integrados y aprovechar al máximo los avances tecnológicos que se habían producido hasta entonces para mejorar la capacidad de tráfico e incorporar nuevos servicios, además de voz, que seguía siendo la razón de ser del sistema. El liderazgo francés en la digitalización de sus redes condujo a la adopción de un sistema digital basado en multiacceso por división temporal (TDMA), el mismo que se emplea también en las redes fijas, y a la reserva de una banda de frecuencias común que abarcaba inicialmente desde 890 hasta 960 MHz, próxima a los canales superiores de televisión. Un sistema de este tipo aporta una gran confidencialidad a las comunicaciones, ya que permite aplicar un robusto cifrado a los bits que imposibilitan la extracción de la información en caso de escucha y mejora la calidad de voz, ya que ésta no se transmite directamente sino una serie de atributos que permiten en destino una reproducción fiel. Un sistema digital permite transmitir datos sin conflicto y, si bien el uso de las redes móviles para este fin es prácticamente nulo en la actualidad, el servicio de transmisión de mensajes cortos de texto que ha introducido se ha convertido en la aplicación estelar tras la telefonía.

Una novedad en el diseño del sistema fue la incorporación de una tarjeta inteligente que identifica al usuario (llamada SIM: Subscriber Identity Module) y lo independiza del equipo, ya que toda la información que permite el acceso a la red está contenida en ella, no en el equipo telefónico. Esta es una situación novedosa, pues durante más de un siglo los teléfonos han podido conectarse a cualquier línea y funcionar inmediatamente; el control de la línea móvil ha pasado a un microchip que puede instalarse en cualquier teléfono. La tarjeta permite también la identificación y autenticación del usuario, evita el uso fraudulento y contiene las claves de cifrado que aseguran la confidencialidad de la comunicación, además de almacenar información sobre los servicios y un listín telefónico.

Este grupo de trabajo se denominó Groupe Spécial Mobile (GSM) y sus siglas francesas dieron nombre al sistema, que comenzó a desplegarse comercialmente en Europa en 1993, pero la gran aceptación que ha tenido en todo el mundo, excluyendo básicamente EE.UU, Japón y Corea, han llevado a mantener el acrónimo y reescribir su significado en inglés como Global System for Mobile Communications, un signo más del cambio de los tiempos y del predominio lingüístico del inglés en este campo.

En EE.UU. el dominio de los sistemas analógicos fue mucho más duradero que en Europa pero también se definieron estándares digitales, con la exigencia de que fueran compatibles con los analógicos y permitieran a los operadores ir migrando progresivamente de un sistema a otro, cambiando canal a canal según las necesidades de cada uno de ellos. Esto ha sido un lastre que no han tenido los sistemas europeos, al forzar la situación tan incompatible de partida a crear un sistema paneuropeo de nueva planta.

Ambos sistemas digitales se engloban dentro de lo que se denomina la segunda generación de telefonía móvil, y presentan diversas ventajas e innovaciones técnicas. Al emplear formatos digitales los bits de la voz pueden agruparse para ser transmitidos a una velocidad mucho mayor que la de su generación, esto permite por ejemplo en GSM compactar en un único radiocanal de 200 kHz ocho conversaciones simultáneas, que pueden proceder de puntos muy dispersos de la zona de cobertura de la base. Como cada teléfono transmite y recibe los bits a ráfagas, en breves instantes de tiempo, se hace que no coincidan en el mismo momento, eliminando la necesidad de filtros, basta un conmutador que va conectándolos a la antena alternativamente. Esto presenta también un gran ahorro de carga de la batería; al no tener que estar el equipo conectado continuamente, sólo se activa en los instantes en que ha de

enviar o recibir información, el resto del tiempo está a la espera, en reposo. La calidad de la transmisión se mantiene con la distancia de forma mucho más estable que en los sistemas analógicos, lo que facilita la cobertura de un territorio. Los equipos digitales son mucho más simples, robustos y baratos que los analógicos, lo que ha permitido fabricar los teléfonos de reducido tamaño y peso actuales.

La digitalización de la voz en GSM se realiza tomando ocho mil muestras cada segundo, el mismo valor que en el sistema digital de la red fija, cuyo valor se codifica con trece bits. Dado que el flujo resultante de 104 kbit/s es muy elevado, se ha de comprimir en un codificador de voz, denominado vocoder o codec, que retira mediante un algoritmo de predicción (RPE-LTP) información de la voz, manteniendo en la medida de lo posible la forma de onda. Se consigue así reducir la tasa a 13 kbit/s. Además de transmitir los bits de información, los sistemas digitales añaden bits que permiten al sistema detectar y corregir errores en la transmisión e introducen en instantes prefijados secuencias conocidas de bits que le permiten al receptor ajustar sus filtros digitales para compensar las perturbaciones radioeléctricas que se producen en la transmisión. Cuando se combina la voz de las ocho conversaciones simultáneas y todos estos bits adicionales resulta una buena eficiencia espectral, de 1,3 bits por segundo por cada hercio de ancho de banda.

La asignación de frecuencias iniciales de GSM, permitía un total de 125 radiocanales, que en el caso español se los reparten Telefónica y Vodafone. Para que el sistema pueda funcionar se requiere una planificación muy cuidadosa de las asignaciones de frecuencias a cada estación base. En las ciudades las antenas de las bases cubren sólo un sector angular de 120°, lo que les confiere un aspecto triangular muy característico, y en cada uno de ellos pueden llegar a

usarse hasta tres frecuencias, lo que hace que con siete celdas prácticamente se agote el espectro disponible. Esta estructura básica se va repitiendo espacialmente intentando minimizar las interferencias bajando todo lo posible la potencia de las instalaciones.

Al saturarse las frecuencias iniciales se reservó una nueva banda, que abarca desde 1.710 a 1.785 MHz y de 1.805 a 1.880 MHz, para un sistema que se conoce con los nombres de DCS o GSM-1800. Sólo se diferencia del anterior en que los equipos pueden funcionar con menores potencias y que las antenas son más reducidas, lo que permite crear una estructura celular con celdas de reducido tamaño, preludio de los sistemas personales de comunicaciones. Una parte de esta banda está compartida por las redes de los tres operadores nacionales y los teléfonos funcionan indistintamente en ella y en la banda inicial del sistema, lo que introduce una mayor complejidad técnica en los terminales y la red, pero que los usuarios no notamos.

La red móvil tiene en todo momento localizada la posición del móvil, ya que éste periódicamente ha de notificar su identidad, al igual que cuando cambia de zona de cobertura, para que pueda recibir ininterrumpidamente una comunicación conforme se va desplazando y cambie de celda. El establecimiento de una llamada es un complejo proceso de identificación, actualización de posición, y asignación del canal, que puede llegar a necesitar hasta una docena de acciones y comprobaciones antes de poder iniciar la conversación; esto es posible gracias a la digitalización y al uso de potentes ordenadores y programas que permiten el funcionamiento automático de la red, sin intervención humana en el proceso.

Podía pensarse que al ser digitales los sistemas anteriores podrían transmitir datos con enorme facilidad, pero no es

así, ya que todos ellos, al igual que los de primera generación, fueron definidos primordialmente para dar servicio telefónico, por lo que emplean conmutación de circuitos. Esto hace que aún pudiendo transmitir datos, y GSM lo puede hacer hasta velocidades de 9,6 kbit/s, no estén optimizados para ello, lo que unido a los sistemas de tarifas aplicados por los operadores ha hecho que el tráfico de datos en estas redes no sea significativo.

Mención aparte requieren los mensajes cortos, que fueron concebidos como una aplicación marginal de coste nulo para los operadores, ya que prácticamente no consumen recursos, al ser sólo de 160 caracteres y transmitirse por los canales de control. Este servicio ha tenido un éxito inesperado, sobre todo entre los jóvenes, y en la actualidad se cursan en todo el mundo una media diaria de más de un mensaje por móvil. Dado que se facturan a unos precios por bit desorbitados, son una suculenta fuente de ingresos y beneficios directos para los operadores.

El salto a los sistemas de tercera generación, conocidos en Europa con las siglas UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), requiere cambiar de estructura y pasar a conmutación de paquetes, precisamente para poder soportar tráfico multimedia y facilitar el acceso a Internet. Las redes móviles se encuentran ante la misma disyuntiva que las fijas para poder acomodar estos nuevos tráficos y hasta que lleguen a existir esas nuevas redes se ha intentado paliar esta limitación de diversas formas.

Los principales fabricantes de teléfonos móviles publicaron en 1997 el estándar WAP (Wireless Application Protocol) que es una adaptación de los protocolos de Internet al entorno móvil para crear un navegador, pero las grandes limitaciones impuestas por las pantallas de los terminales, la lentitud de la descarga de la información por la poca

adecuación de la red GSM y el escaso interés mostrado por los usuarios no permitieron que su implantación tuviera el éxito que esperaban los operadores, que promocionaron esta aplicación como la puerta de acceso a Internet, un reclamo poco realista.

En estos momentos y mientras se espera el inicio del despliegue de UMTS se está instalando un aditamento sobre GSM para permitir aplicaciones y servicios basados en conmutación de paquetes utilizando varios canales GSM para aumentar en modo semidúplex la velocidad de transmisión. Se denomina GPRS (General Packet Radio Service) y ha sido bautizada como una generación intermedia, la 2,5. Se esperaba un gran lanzamiento comercial en las últimas navidades, pero la situación financiera de los operadores y la escasez de terminales frenaron esta actuación y su penetración en nuestro país no llega a alcanzar el 1% de los terminales en servicio. En una primera fase podrán emplearse hasta cinco canales temporales del radiocanal de 200 kHz, uno para transmitir y hasta cuatro para recibir, lo que conduce a una velocidad máxima de descarga de 57,6 kbit/s. En una segunda fase y empleando dos radiocanales completos se podría alcanzar el doble. Cuesta admitir que con la carga habitual de las redes actuales pueda asegurarse la disponibilidad de esos recursos, pero GPRS tiene la ventaja de que puede también agregar en un único canal los paquetes de datos de varios usuarios, haciendo mucho más eficiente el sistema con tráficos de poca densidad. Lo que sí hace, es el uso de WAP mucho más eficiente.

La instalación de GPRS ha requerido cambios importantes en las redes. Al tener que superponer de hecho una nueva red las bases han tenido que modificarse para distinguir los paquetes de datos del tráfico telefónico y enviarlos a unos nuevos nodos que los procesan o envían hacia pasarelas con

redes de datos externas. Los teléfonos también han tenido que modificarse para poder tratar simultáneamente los paquetes de datos de varios canales, lo que ha requerido doblar como mínimo la capacidad de proceso del terminal.

En una muestra más de lo complicado que resulta definir nuevos sistemas de telecomunicaciones, la tercera generación de los sistemas móviles comenzó a definirse por la UIT en 1985 y se ha denominado genéricamente IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000). Las características esperadas del sistema son la asignación del ancho de banda a los usuarios en función de sus necesidades, altas velocidades de datos (hasta 2-20 Mbit/s en un horizonte temporal), integración de redes terrestres y de satélites e itinerancia entre redes diversas. Su desarrollo ha estado plagado de conflictos de intereses y pleitos sobre las patentes de Qualcomm sobre el sistema CDMA, de acceso múltiple por división de códigos, una tecnología de origen militar que se conoce bajo el término de comunicaciones de espectro ensanchado, que es la opción que se adoptó. UMTS es la opción europea para esta familia de sistemas.

El acceso por código es una forma totalmente diferente a la de las dos primeras generaciones, en las que los usuarios se distinguían asignándoles distintas frecuencias o haciendo que transmitieran en diferentes momentos. En este caso todos usan la misma frecuencia y lo hacen al mismo tiempo; para poder distinguirlos emplea distintos códigos, siguiendo un proceso que se cree se asemeja a nuestra capacidad para poder seguir una conversación en un ambiente donde otras muchas conversaciones de igual intensidad están transcurriendo. A cada usuario se le asigna un código que conocen su terminal y la base, con el que se combinan los bits de información, de la misma forma que se hace al cifrar un texto, para construir una larga secuencia de bits que al ser

radiada ocupa una porción de espectro mucho mayor que la de la señal original. Cuando todas estas señales se superponen el resultado aparenta ser sólo ruido pero si se aplican los códigos se puede extraer la información. Es un sistema muy eficiente, que se aproxima a las tasas máximas de Shannon pero que complica enormemente el terminal al requerir filtros y la integración de un gran número de chips.

Aún antes de haberse instalado equipos de tercera generación ya se están considerando los aspectos de ingeniería que pueden contemplarse en la siguiente generación, entre ellos aparecen varios temas recurrentes en la ingeniería de sistemas de telecomunicación: aumento de la capacidad empleando técnicas de modulación que permitan una mayor eficiencia espectral, como las de amplitud en cuadratura (QAM), en las que diversos estados de amplitud y fase permiten transmitir símbolos de hasta ocho bits, que se emplean en los radioenlaces y en la transmisión de vídeo, o el multiplexaje por división de frecuencias ortogonales (OFDM) que se utiliza en los sistemas de televisión digital terrena y en los módem ADSL.

Otro aspecto sometido a estudio desde hace algunos años es el empleo de antenas inteligentes, que son capaces de adaptar de forma dinámica sus haces de radiación a la situación de los móviles en la celda de cobertura, es decir, en lugar de radiar indiscriminadamente en todas direcciones, una vez se localiza la posición del transmisor concentran la energía en esa dirección y van siguiendo su desplazamiento. Los avances que se han producido en este campo han sido lentos y todavía no se han llegado a instalar sistemas comerciales de este tipo.

Un tercer aspecto que aparece motivado por la gran diversidad de estándares, bandas de frecuencia de funcionamiento y sistemas en general incompatibles es la

creación de equipos que sean capaces de funcionar con cualquiera de ellos, y permitir que si uno cambia de red se puedan reconfigurar para funcionar correctamente. La idea es crear un equipo de radio universal, que pueda reajustarse automáticamente sólo reprogramándolo, sin necesidad de realizar ningún cambio de sus circuitos; lo que se realizaría enviándole por radio los programas o instalando tarjetas inteligentes que lo reconfiguren en cada ocasión. Existen varias limitaciones que pueden hacer de estos sistemas una utopía, y van desde la potencia de proceso de los conversores analógico-digitaes hasta el cuello de botella, normalmente insalvable, que representan las antenas, ya que no resulta fácil hacerlas funcionar correctamente en múltiples bandas de frecuencias arbitrarias. Nuestro grupo en la UPC ha sido pionero en la introducción de las formas fractales en las antenas, lo que ha despertado un gran interés en este tipo de antenas, que están dotadas de nuevas e interesantes propiedades a la hora de poder radiar en muchas bandas de frecuencias y que pueden contribuir a solventar el problema anterior. Las antenas fractales han sido el primer dispositivo de un campo más amplio que ya se está definiendo como la electrodinámica fractal, cuyo estudio está planteando importantes retos científicos a la hora de extender el cálculo vectorial a dominios geométricos fractales.

El motor económico que se encuentra detrás del despliegue actual de redes de tercera generación es el acceso a Internet, lo que se conoce con el nombre de Internet Móvil, y por él han estado dispuestos a pagar los operadores europeos un total de 120.000 millones de euros para conseguir las licencias de tercera generación, una cifra que representa el 150% de su facturación total en el último año y a la que tendrán que añadir otra cantidad similar por la infraestructura de las redes, que han de ser de nueva planta. La confluencia de diversas circunstancias favoreció la alegría

con la que los operadores adquirieron estos compromisos. Partían de unas condiciones muy ventajosas ya que en los últimos años habían sido el sector más dinámico de la economía europea, con altas tasas de crecimiento, grandes márgenes de beneficios y ligeros decrecimientos de los ingresos por usuario. En un año de crisis como ha sido el 2001, han alcanzado un crecimiento del 21% y se estima que este año lo harán al 13%. Con la saturación del mercado en el horizonte cercano, consideraron que Internet podía ser fuente inagotable de recursos al permitirles incorporar a la voz, que es el núcleo de su negocio, servicios multimedia. El talón de Aquiles de los sistemas radioeléctricos es la escasez de espectro de frecuencias, por lo que cualquier operador que quiera actuar en este mercado tiene que estar dispuesto a pagar un peaje para poder disponer de un pequeño trozo de él, y las apuestas en esta ocasión han sido muy altas. Hubo también una gran ligereza a la hora de estimar las dificultades tecnológicas del desarrollo de los sistemas de tercera generación y de la creación de las aplicaciones que pueden hacer de ellos un éxito comparable a los de la segunda.

Como los teléfonos móviles se han convertido en instrumentos específicos de las comunicaciones personales, y nos acompañan prácticamente en todo tiempo y lugar, (lo que incidentalmente está creando problemas en muchos entornos en los que no se respeta su prohibición de uso y en los que se acabarán instalando equipos de radio para inhibir de forma controlada su funcionamiento) es inevitable asociarlos con la forma más simple y económica de acceso a Internet, pero ésta será muy limitada en prestaciones respecto al acceso desde la red fija con un ordenador.

Tres de cada cuatro europeos utilizan ya en estos momentos un teléfono móvil, una cifra a la que se aproximan los japoneses y que casi duplica la de los

norteamericanos, por lo que resulta evidente el potencial económico que tienen estos terminales para servir de puerta de acceso a Internet. La clave de su éxito radica en encontrar las aplicaciones que resulten atractivas para los usuarios; éstas tendrán que ser específicas de los móviles y en gran medida distintas de las conocidas en el acceso desde un ordenador, dada la gran diferencia que hay en el tamaño de las pantallas de unos y otros.

Internet ha marcado el final de siglo y ha sido posible gracias a la maduración de un conjunto de tecnologías que fueron progresando en las dos décadas anteriores y confluyeron en ese momento. Por un lado el pausado desarrollo de la red pública de Internet, el progreso de las redes locales de ordenadores y por último la popularización de los ordenadores personales y su irrupción en el hogar. Las redes móviles han tenido también un crecimiento lento durante gran parte del mismo periodo de tiempo y explotaron simultáneamente. La confluencia de ambas es inevitable, pero la maduración del proceso será lenta y estamos sólo en sus albores. Las redes han de cambiar su concepción desde una especialización en la transmisión de voz a una de datos, y las personas hemos de aceptarlo y adaptarnos a un nuevo medio que permite realizar la comunicación desde cualquier lugar.

Podría pensarse que es simplemente una cuestión de cambiar el acceso a la red desde un ordenador a un teléfono, y dado que el primero de ellos se conecta directamente en más de un 80% de los casos a través de un módem telefónico, es sólo cuestión de diversos tipos de teléfonos, pero no es el caso. Hay ciertos servicios, como el correo electrónico o la mensajería que pueden funcionar indistintamente en ambos medios, pero la mayor parte de los contenidos de la red no tienen la forma adecuada para ser vistos desde un móvil, tanto por las limitaciones de los terminales como por la baja

velocidad de transmisión de los datos, por ello ha de crearse una nueva Internet o adecuarse una parte de ella para permitir el acceso desde los móviles.

Frecuentemente se considera que una de las ventajas de los móviles de nueva generación va a ser el gran ancho de banda de que van a disponer los usuarios, hasta 2 Mbit/s en un principio y hasta 20 Mbit/s en el futuro, pero esto es una gran exageración dados los escasos recursos espectrales de que se dispone; sólo en el hipotético caso de ser el único usuario de la celda, algo a todas luces impensable, se podría llegar a obtener esas velocidades de transmisión. Los accesos de banda ancha seguirán estando en manos de las redes de fibra óptica.

Por ello y aún a pesar de la lentitud en el desarrollo normativo de UMTS, se ha avanzado más en la definición del sistema que en la identificación de las aplicaciones exitosas que lo harán viable en términos económicos. Se conocen las líneas maestras de las que pueden surgir pero todo el mundo es cauto a la hora de hacer cualquier predicción. Como se parte de unos terminales que seguirán siendo utilizados para conversar, hay poco margen para imaginar otras configuraciones que las clásicas del teléfono. Curiosamente, los primeros aparatos telefónicos tuvieron micrófonos y auriculares separados, una configuración forzada por el tamaño de los primeros transductores, pero que ha reaparecido miniaturizada en forma de aditamento de los teléfonos móviles y si bien no es infrecuente encontrar personas que lo usan, cuesta suponer que pueda desaparecer la centenaria y familiar estructura de micrófono y auricular juntos, con una separación próxima a la de nuestros sentidos del oído y del habla. Esto es importante, pues si bien se han creado muchos diseños artísticos, que van desde formatos de reloj de pulsera hasta los de libro, pasando por las agendas, el margen real de cambio es mínimo y así se puede constatar

en los terminales del sistema japonés de tercera generación FOMA, que entraron en servicio a finales del año pasado; son equipos de forma clásica, con pantallas de color y a lo sumo una pequeña cámara, donde el énfasis se ha puesto en la reducción de coste y en la creación de nuevos servicios (mensajes gráficos, juegos, descarga de música, horóscopos, karaoke). Las agendas electrónicas y los ordenadores portátiles representarán una línea diferente de migración de equipos hacia la Internet móvil, y a la posibilidad de acceso a través de la red fija que ya poseen normalmente se les unirá el acceso vía radio; serán utilizados por los profesionales y las empresas.

Muchas de las aplicaciones estarán basadas en la posibilidad de conocer de forma precisa la ubicación del móvil, bien porque la red pueda estimarla o por que el terminal pueda transmitirle voluntariamente los datos de su posición geográfica, obtenidos mediante el sistema de posicionamiento por satélite. Esta información puede emplearse en un sinnúmero de aplicaciones tanto para el mercado residencial como el empresarial. Por ejemplo, cualquier persona podrá obtener información de servicios próximos, del estado del tráfico, de eventos en la zona, recibir ayuda en caso de una emergencia o ser guiado por un sistema de navegación a bordo de un vehículo; las empresas de servicios tendrán la posibilidad de controlar flotas y conocer la ubicación de sus empleados, seguir la entrega de mercancías o asistir a sus agentes de ventas con información puntual sobre sus clientes. En el sector turístico también pueden jugar un importante papel al permitir obtener información de interés sobre el lugar o el entorno particular en que uno se encuentre.

En otros casos será información efímera pero oportuna la que se podrá suministrar, como por ejemplo retrasos en vuelos, sin contar la información financiera, la deportiva o

las noticias generales de interés, y el acceso a bases de datos especializadas. El ocio está siendo ya una importante fuente de ingresos para los operadores móviles y se están empleando los mensajes cortos en procesos de voto de programas de televisión, en servicios de emparejamiento, en el suministro de horóscopos, melodías musicales, o iconos gráficos. A todos ellos se unirán los juegos, individuales y en red, que prometen ser una de las mayores fuentes de ingresos de esta nueva generación.

En las áreas de la asistencia sanitaria y social la telefonía móvil puede jugar un papel en la monitorización remota de pacientes o el acceso a historiales médicos, siempre que la movilidad lo requiera, pero en el entorno hospitalario y de los centros de asistencia veremos siempre el predominio de las redes locales.

Los operadores tienen experiencia en tramitar facturas por un cúmulo de pequeños cargos telefónicos y se consideran bien posicionados para poder procesar micropagos por bienes o servicios, pero es dudoso que la banca permita que les arrebaten ese proceso de intermediación. La sed de clientes de los operadores móviles parece insaciable y en la visión de futuro de estas tecnologías del operador japonés DoCoMo se contemplan además de las personas, de las que ya quedan pocas que no lo posean, que los terminales móviles se instalen en todos los vehículos a motor, bicicletas, animales de compañía, máquinas expendedoras, o paquetes en proceso de distribución, lo que define un mercado potencial varios ordenes de magnitud mayor que el actual. Cuánto hay de deseo y cuánto habrá de realidad de esta visión lo dirá el tiempo.

Pero el desarrollo de UMTS ha sufrido importantes retrasos, tanto en la definición de los estándares como en el diseño y fabricación de las infraestructuras de red y los

terminales. En un momento pareció incluso que se iba a producir una fractura del mercado y que los terminales serían específicos de cada red u operador. El éxito económico de GSM, un sistema que emplean dos de cada tres teléfonos móviles en el mundo, se debió precisamente más a la creación de ese mercado único de terminales que a la indudable ventaja de itinerancia por toda Europa. La continua renovación de la gama de productos de los fabricantes se ha basado en un acelerado proceso de innovación a todos los niveles, desde los chips hasta los procesos de fabricación, pasando por las pantallas y las baterías; estas últimas han avanzado más en estos últimos años movidas por el empuje de la telefonía móvil que en toda su larga historia anterior. Se predice que a finales del primer lustro de este siglo los terminales pesarán menos de 30 g, cuando hace escasamente una década rondaban el kilo. UMTS traslada el centro de gravedad desde los fabricantes de equipos a los operadores de la red, ya que es en ésta donde residen las aplicaciones que pueden marcar las ventajas competitivas de unos respecto a otros.

La liberalización de los servicios de telecomunicación vino acompañada también en Europa de la de las infraestructuras, una decisión injustificable en términos económicos y que condujo en el caso de los sistemas móviles a que cada operador desplegara su propia red y no quisiera compartirla con otros. Disponer de la red era una clara ventaja competitiva frente a los nuevos entrantes y esto obligó a los entes reguladores a forzar a que durante un periodo inicial éstos pudieran emplear la red de los ya establecidos. Desde el punto de vista social la repetición de infraestructuras representa un despilfarro de recursos y un gran impacto urbanístico y, dada la omnipresencia de las antenas en nuestras ciudades, fue sólo cuestión de tiempo que surgiera una protesta vecinal por su despliegue y apareciera el miedo a que las ondas de radio pudieran

resultar nocivas. El descuido con el que los operadores realizaron sus instalaciones en las primeras fases de sus despliegues, la ausencia inicial de normativas legales de limitación de la exposición a los campos electromagnéticos, o de reducción de los impactos urbanísticos o medioambientales, y el retraso de las administraciones en reglamentar estos aspectos ha conducido en el momento actual a una multiplicidad de normas locales, autonómicas y nacionales que no han conseguido calmar la ansiedad que muchos ciudadanos sienten en este sentido. Los técnicos siempre hemos defendido que la experiencia acumulada desde los inicios de la radio en los años veinte, permite ser confiados en cuanto a que los niveles de exposición actuales, basados en factores de seguridad muy elevados sobre los valores que podrían considerarse nocivos, garantizan la ausencia de riesgos para las personas. Asimismo, el diseño de estos sistemas hace posible cumplir con esos límites de exposición, y de hecho así se está comprobando en el proceso de certificación de todas las estaciones base. En la actualidad ya se ha completado el plan de medidas de Catalunya y no se han encontrado instalaciones que generen niveles excesivos fuera de las zonas de exclusión en la proximidad de las antenas. No obstante, la percepción social de este riesgo se mantiene y serán necesarios nuevos estudios bioquímicos y epidemiológicos para disminuir la aprensión actual.

UMTS requiere celdas todavía más reducidas que GSM y para cubrir un territorio como el español se puede llegar a necesitar hasta 90.000 estaciones, que además en la mayoría de los casos estarán mucho más próximas al suelo que ahora; por ello, será necesario también la cooperación de los ayuntamientos para poder integrar efectivamente estos dispositivos en el mobiliario urbano. La complejidad del despliegue y la situación financiera van a forzar a los operadores a compartir las nuevas infraestructuras y en

varios países europeos ya estamos asistiendo a acuerdos imprescindibles hace sólo un par de años, en plena euforia de las subastas.

Va a surgir un problema importante con estas redes que no se suele comentar y tiene que ver con el respeto a la intimidad de las personas. Ya hoy en día, las redes móviles tienen una constancia de la celda en la que se encuentra en todo momento un usuario; como además el teléfono móvil se ha convertido en una extensión de la persona, es inmediato asociar individualmente esa información. Hasta ahora era sólo información de itinerancia, pero en cuanto se introduzca información precisa de ubicación en todo instante y se asocie con toda una serie de acciones que van desde comprar y recabar informaciones de todo tipo hasta ser bombardeado con publicidad y ofertas de servicios del lugar donde nos encontremos, nos podemos encontrar con graves riesgos de mal uso de esa ingente cantidad de información. Es cierto que ese problema está presente también en el acceso fijo a Internet, al igual que lo están también los de seguridad y confidencialidad, pero en mucha menor medida, ya que el móvil estará siempre conectado y estará suministrando continuamente información de nuestro paradero, por lo que si no se imponen estrictos controles en el uso de esta información podemos ver comprometido el derecho a la intimidad.

Las fibras ópticas han permitido a los operadores, sobre todo en el último lustro construir una red de transporte capaz de soportar ingentes cantidades de tráfico, pero la red de acceso, la puerta de entrada de cada uno de los usuarios a la red telefónica, que representa el nivel de mayor capilaridad de la red, ha mantenido una estructura inadecuada para soportar grandes anchos de banda y se ha constituido en el principal cuello de botella de su expansión. La aparición de las líneas digitales sobre los pares de cobre,

el tendido de cables coaxiales en el tramo final de las redes de cable y los enlaces vía radio y por infrarrojos, han venido a paliar esta carencia y han permitido conectar con un mayor ancho de banda a un número creciente de usuarios, que hasta entonces sólo disponían de la opción del alquiler de circuitos.

Los operadores han ido superponiendo redes y descargando el tráfico de datos de la red de voz para no perjudicar su negocio principal. Mantener y operar varias redes es muy poco eficiente, ya que introduce duplicidades en la organización, multiplica costes, requiere interlocutores diversos para resolver los problemas o fallos que ocurran en la prestación de los servicios y representa en general un incremento de complejidad constante al añadir nuevos servicios. Incorporar un nuevo servicio, como pueda ser un acceso de banda ancha, una red privada virtual o una videoconferencia requiere la instalación de nuevos elementos de conmutación y transporte, sin contar los elementos terminales.

Es innegable que Internet está transformando completamente el negocio de las telecomunicaciones, más por su potencial futuro que por el alcance económico que para los operadores pueda parecer derivarse de la explosión del tráfico de datos en la red. A pesar del crecimiento exponencial de éste, los operadores obtienen hoy en día cerca del 90% de sus ingresos del tráfico de voz. Esto significa que han de ser capaces de acomodar ese tráfico de datos por sus redes telefónicas tradicionales, fijas y móviles, sin comprometer la calidad del servicio telefónico.

La solución pasa por que todos los servicios converjan en una única red, pero esto es algo mucho más fácil de pregonar que de lograr. En las redes públicas de telecomunicación siempre se ha seguido un proceso de desarrollo evolutivo,

no ha habido situaciones revolucionarias en las que toda la infraestructura se haya sustituido por otra de nueva planta. Esta realidad innegable conlleva que la adición de nuevos servicios se tenga que hacer siempre integrándolos en los equipamientos existentes, acomodando voz, datos y vídeo sin tener que sustituir los actualmente en servicio; pero no sólo ha de respetarse el pasado, sino que además esos nuevos equipamientos han de poder soportar los servicios presentes y los que se incorporen en el futuro. Este es el gran reto que tendrá que superarse, pero no es el único, para poder migrar hacia esa futura red única. Han de seleccionarse los protocolos de transporte para esa convergencia, sea ATM, IP o directamente fibra; la realidad actual es que se están manteniendo múltiples protocolos de red y finalmente deberá establecerse si las redes fotónicas serán las que asegurarán la convergencia definitiva.

Lo que se ha llamado la nueva economía, si bien el término ha caído en rápido abandono, es en gran medida la confluencia de dos grandes motores económicos actuales, la globalización y el desarrollo de las redes de telecomunicaciones y en ella parecen valorarse por encima de cualquier otro beneficio la mejora de la productividad y la continua innovación de los procesos. La tecnología actual está creando riqueza e influyendo en la manera de hacer negocios, producir bienes, ofrecer servicios y comunicar a los individuos, de una forma semejante a como lo hizo en su día la revolución industrial. Internet permite incorporar a los canales tradicionales de venta una nueva manera de distribuir bienes y servicios a escala global, con independencia de la ubicación y el tamaño de la empresa, por lo que se ha considerado un factor clave en la aparición de ese nuevo paradigma económico, cuando no se ha confundido lisa y llanamente con él. Tiende a pensarse que este proceso es de reciente aparición, y se olvida con frecuencia que hace más de un cuarto de siglo se

establecieron los sistemas de compensación bancarios y que la práctica totalidad de las transacciones financieras comportan la transferencia electrónica de fondos; asimismo, el intercambio electrónico de datos y la mensajería electrónica están presentes desde los años ochenta en las relaciones entre las grandes corporaciones y sus proveedores, sin las que no habría sido posible establecer los modernos procesos de fabricación y el ajustado control de los suministros y stocks presentes en los centros fabriles.

Toda la sociedad percibe que este nuevo escenario, en el que la información y el conocimiento son la base del desarrollo tecnológico, tiene un gran potencial de cambio de muchos aspectos de la vida cotidiana, al permitir las redes de comunicaciones el acceso a múltiples servicios desde cualquier lugar y en cualquier momento.

La creación de la Sociedad de la Información requiere proporcionar a todos los ciudadanos la posibilidad de acceder libre e inmediatamente a toda la información que se pueda desear. Es un fenómeno global ya que involucra la creación, el almacenamiento y el transporte de cualquier tipo de información, sean sonidos, imágenes, textos o datos. Esta sociedad global requiere poner al alcance de todos los habitantes del planeta los servicios que posibiliten y faciliten el acceso a esa información. Las claves de este proceso han de ser la personalización, la rapidez y la calidad, y han de resultar asequibles económicamente y satisfacer las necesidades percibidas por los usuarios. Cada vez más, estamos acostumbrándonos en el mundo desarrollado a disfrutar de comunicaciones en cualquier tiempo y lugar, sea en una aglomeración urbana o en un recóndito paraje aislado, desde un punto fijo como un domicilio o desde un lugar de trabajo, o moviéndonos por tierra, mar o aire. Esta disponibilidad se convierte a menudo en exigencia, acompañada de un desconocimiento de los condicionantes

técnicos que siempre la limitan. Tampoco la disponibilidad de estos servicios está al alcance de la mayor parte de la población; en Africa, por ejemplo, no se alcanzará la cifra de cien millones de teléfonos móviles antes del año 2005, y en nuestro propio entorno existe el riesgo de que se produzca una fractura digital si no se actúa para evitar los desequilibrios y las desigualdades en el acceso.

Es ilustrativo en este sentido recordar una interesante historia. Hace más de siglo y medio Sir Rowland Hill propuso en Inglaterra una modificación del sistema de tasas de correo que se aplicaba a las cartas y configuró los sistemas postales modernos en la forma en que hoy los conocemos. Hasta entonces, los empleados tenían que calcular carta por carta las tasas que debían pagarse por enviarlas, en función de la distancia que tenía que recorrerse; esto provocaba la existencia de un gran abanico de tarifas y hacía que desde el punto de vista contable todo el proceso fuera muy complejo, requiriera muchos empleados y su elevado coste estrangulara el crecimiento postal. Al comprobar en 1835 que el coste de enviar una carta era realmente independiente de la distancia, pues la mayor parte del trabajo se hacía en el momento de la recogida y de la entrega, Hill propuso imponer una tasa sencilla y única, independientemente de la distancia, y que se pagaría por adelantado. Era un cambio radical en el sistema, que como era previsible tuvo que vencer una gran oposición en la administración, pero en 1840 se puso en práctica. Calculó que una tasa de un penique sería suficiente y si inicialmente no se llegaban a cubrir los gastos, no importaba, pues se produciría un gran aumento en el volumen de tráfico que acabaría generando beneficios. Convencido de que la recaudación por tasas crecería en la medida que lo hiciera la población y la prosperidad de la nación, el sistema que proponía sería muy beneficioso para el comercio y el bienestar social. Para aplicarlo propuso

introducir un nuevo dispositivo, el sello postal que hoy conocemos, que se compraría por adelantado.

Los servicios telegráficos siempre aplicaron un sistema de tasas muy semejante al postal, independiente de la distancia, con la novedad adicional de que se cobraba por el contenido de información del mensaje, en este caso el número de palabras del texto. No ocurrió lo mismo con los servicios telefónicos. En ellos volvió a repetirse la antigua situación de los correos: múltiples tarifas en función de la distancia y de la hora de llamada, tasas de establecimiento de la comunicación, cobro de un mínimo de tiempo con independencia de que se alcanzase, tarificación por pasos o minutos, cuotas mensuales de abono, sólo por nombrar algunas de las más conocidas. No ha sido hasta ahora y fruto de la desaparición de los monopolios y la introducción de la competencia en el sector que ha comenzado a disminuir la disparidad de tarifas y se ha podido oír hablar de tarifas planas y facturación por el volumen de información transmitido, pero aún queda un largo camino por recorrer hasta que las telecomunicaciones sean un nexo real de unión entre los pueblos, y éste pasa por la abolición de la mayoría de las tasas que se aplican actualmente y su sustitución por un sistema de cobro independiente de la distancia. Es también curioso constatar que las tarjetas de prepago de la telefonía móvil, una gran novedad que ha contribuido a popularizarla y a atraer a este mercado a importantes grupos sociales, son conceptualmente muy próximas al sello inventado por Hill hace cerca de dos siglos.

El desarrollo económico de los países avanzados se sustenta en la introducción continuada del conocimiento en los procesos productivos, con claros ejemplos en la aparición de la máquina de vapor, la electricidad, el ferrocarril, el telégrafo, los motores de combustión interna o los plásticos. En el momento actual, de cambio de milenio, la revolución

tecnológica en curso bascula sobre las tecnologías de la sociedad de la información, que se basan en un nuevo paradigma tecnológico que aglutina la microelectrónica, la informática y las telecomunicaciones.

Desde un punto de vista económico se suele entender el conocimiento como el conjunto de saberes, habilidades y destrezas que permiten a quien las posee la creación de bienes y servicios. El conocimiento es fruto de un proceso creativo, de la experiencia y de la asimilación de la información; reside en las mentes de las personas y en el acervo de las organizaciones y resulta en general difícil identificarlo, estructurarlo, reproducirlo o transmitirlo. Todas las etapas educativas, desde la escuela a la universidad, constituyen el substrato formativo básico sobre el que ha de sustentarse el proceso de generación de conocimiento, ya que sólo en una sociedad educada cobra pleno sentido este concepto. Las actividades de I+D tanto públicas como privadas tienen como guía fundamental la creación de conocimiento y difundirlo o aplicarlo a la producción de bienes y servicios. La Sociedad de la Información significa una nueva época en el desarrollo social, basada en la facilidad de almacenamiento y en el intercambio rápido de información, lo que permite a las empresas mejorar sus procesos productivos y estimula la generación de nuevos productos, dando a la información un valor económico muy superior al que había conocido hasta ahora.

En Lisboa, en el año 2.000, la Unión Europea se marcó la ambiciosa meta de convertirse en diez años en la economía basada en el conocimiento más competitiva y dinámica del mundo, capaz de generar un crecimiento sostenible y mayor empleo (cifrado en la cumbre de Barcelona en veinte millones de nuevos empleos), manteniendo la cohesión y el modelo social europeo. El desafío es extraordinario, ya que

pretende invertir la tendencia de la última década, durante la cual los indicadores europeos de crecimiento económico, tanto de creación de empleo como de productividad, cedieron terreno frente a los norteamericanos, y se parte de un producto interior bruto por habitante de la Unión del orden de las dos terceras partes del de Estados Unidos. Para alcanzar esta meta, la innovación debe impregnar todo el tejido productivo europeo y asentarse socialmente como la base de las políticas económicas e industriales. La innovación es fruto del conocimiento y del trabajo creativo y, para que se produzca, no basta con saber emplear la tecnología, ha de aprenderse a hacer tecnología partiendo del conocimiento científico con una actividad investigadora rigurosa y continuada en las empresas y en las instituciones académicas. Fomentar, por ejemplo, el uso de las nuevas tecnologías de la información y de las comunicaciones es, sin duda, beneficioso, ya que habilita para conocer y usar nuevos productos, pero no basta por si solo para desarrollar novedosos bienes y servicios, ha de crearse en cada ciudadano el convencimiento de que puede ser usuario pero también creador de conocimiento.

En el camino que va desde la disponibilidad de datos a la generación de información, la creación de conocimiento y su conversión en sabiduría, hemos recorrido las primeras etapas, pero queda todavía un largo peregrinar. Las telecomunicaciones son sólo un medio instrumental en ese viaje hacia la sociedad del conocimiento, a la que sólo llegaremos si se crean las infraestructuras que permitan el acceso a ella de todos los ciudadanos, desde cualquier lugar y en todo momento. Pero esto por si sólo no basta, se requiere además que se creen servicios que vengan a satisfacer necesidades sentidas por toda la sociedad y se les dote de los contenidos de información adecuados. Finalmente, ha de crearse una gran confianza en la seguridad de uso de estos medios y sobre todo garantizar y

proteger adecuadamente los derechos y libertades individuales para que se pueda alcanzar esa meta.

Desitjo haver donat una perspectiva personal, però global, de les telecomunicacions i les seves implicacions socials, i només em resta per finalitzar agrair-vos la vostra atenció i la vostra companyia en aquest dia, així com reiterar el meu reconeixement a l'Acadèmia i la meva plena disponibilitat per convertir-me en un membre actiu i aportar el temps i esforç que requereixi la meva participació.

BIBLIOGRAFIA

- Alabau, Antonio. "La Unión Europea y su Política de Telecomunicaciones. En el camino hacia la Sociedad de la Información", Fundación Airtel Móvil, 1998.
- Alcatel Telecommunications Review. "Optinex – Experience what's next in optical networking", 3er Quarter 2000.
- Ballester, Fernando. "La brecha digital". Fundación Auna, 2002.
- Berners-Lee, Tim y Fischetti, Mark. "Tejiendo la Red", Siglo XXI, 2000.
- Bernstein, Jeremy. "Three Degrees Above Zero. Bell Labs in the Information Age", Charles Scribner's Son, 1984.
- Carne, E. Bryan. "Telecommunications Primer: Signals, Building Blocks, and Networks", Prentice Hall, 1995.
- Castells, Manuel. "La Era de la Información", Alianza Editorial, 1997.
- Castells, Manuel. "La Galaxia Internet" Plaza Janés, 2001.
- Cebrián, Juan Luis. "La red", Punto de Lectura, 2000.
- Clarke, Arthur C. "El mundo es uno", Ediciones B, 1996.
- Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. "GRETEL: Convergencia, Competencia y Regulación en los Mercados de las Telecomunicaciones, el Audiovisual e Internet", Grupo de Regulación de las Telecomunicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2000.

Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. "GRETEL 2002: Nuevo Diseño Europeo de las Telecomunicaciones, el Audiovisual e Internet", Grupo de Regulación de las Telecomunicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002.

Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, "Informe Anual 2000", CMT, 2001.

COM(2002) 62, "Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones. Informe de la evaluación comparativa de la acción eEurope", Bruselas, 5.2.2002.

Commission of the European Communities. COM(2001) 706. "Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Seventh Report on the Implementation of the Telecommunications Regulatory Package", Brussels, 26.11.2001.

Ericsson Review. "Evolución de sistemas CDMA: De CdmaOne a tercera generación", 2/2000.

Escobar, Modesto. "El Comercio Electrónico. Perspectiva presente y futura en España", Fundación Retevisión, 2000.

European Commission, "IST 2001. Technologies Serving People", Comunidades Europeas 2001.

Ferrer-Roca, Olga. "La Telemedicina: Situación Actual y Perspectivas", Fundación Retevisión, 2001.

Figueiras Vidal, Aníbal. "Una Panorámica de las Telecomunicaciones", Prentice Hall, 2002.

Font, Andrés. "Seguridad y Certificación en el Comercio Electrónico", Fundación Retevisión, 1999.

Foro de las Telecomunicaciones. "Horizonte de las telecomunicaciones españolas. Informe 2002", Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002.

Fouke Janie. "Engineering Tomorrow", IEEE Press, 2000.

Fundación CIREM e Institut Catalá de Tecnologia, "Economía y trabajo en la sociedad del conocimiento", Encuentro de expertos europeos en Barcelona, 24 y 25 de febrero de 2000.

Fundación COTEC para la Innovación Tecnológica. "Informe COTEC 2001. Tecnología e innovación en España".

Gershenfeld, Neil. "Cuando las cosas empiecen a pensar", Granica, 2000.

Gual, Jordi y Ricart, Joan E. "Estrategias Empresariales en Telecomunicaciones e Internet", Fundación Retevisión, 2001.

Hall, Peter y Preston, Paschal. "La ola portadora. Nuevas tecnologías de la información y geografía de las innovaciones 1846-2003". Fundesco 1990.

Hernando Rábanos, José María. "Comunicaciones móviles", Centro de Estudios Ramón Areces, 1997.

<http://dursi.gencat.net/ca/si/documents.htm>

<http://europa.eu.int/comm>

http://europa.eu.int/comm/space/index_en.html

http://europa.eu.int/information_society

http://europa.eu.int/information_society/eeurope/benchmarking/index_en.htm

http://europa.eu.int/information_society/topics/telecoms/implementation/annual_report/7report/index_en.htm

<http://www.aniel.es>

<http://www.bcn.es>

<http://www.cmt.es>

<http://www.cordis.lu>

<http://www.dante.net/geant>

<http://www.galileo-pgm.org>

<http://www.iec.org>

<http://www.ieee.org>

<http://www.iies.es/teleco>

<http://www.isoc.org>

<http://www.mcyt.es>

<http://www.media.mit.edu>

<http://www.umts-forum.org>

Huidobro, José Manuel. "Fundamentos de Telecomunicaciones", Paraninfo, 2001.

IEEE Proceedings. "Special Issue on Quantum Devices & Applications", April 1999.

IEEE Proceedings. "Special Issue on Optical Interconnections for Digital Systems", June 2000.

- IEEE Proceedings. "Special Issue on Low Power Systems", October 2000.
- IEEE Proceedings. "Special Issue on Lossless Data Compression", November 2000.
- IEEE Spectrum. "Technology 2001 Analysis & Forecast: Always on. Living in a Networked World", January 2001.
- IEEE Spectrum. "The Quest for the Spin Transistor. Electronics Explores its Great New Frontier", December 2001.
- International Technology Roadmap for Semiconductors: 2001.
<http://public.itrs.net>
- Negroponte, Nicholas. "El mundo digital", Ediciones B, 2000.
- Olivé Roig, Sebastián. "Primeros Pasos de la Telecomunicación", Fundación Airtel Móvil, 1999.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. "21st Century Technologies. Promises and Perils of a Dynamic Future", OECD, 1998.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. "OECD Information Technology Outlook 2000. ICTs, E-commerce and the Information Economy", OECD, 2000.
- Pierce, John R. y Noll, A, Michael. "Señales. La Ciencia de las Telecomunicaciones", Reverté 1995.
- Plaza, Crisanto. "Informe Anual de las Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información 2001", Ediciones Z, 2001.
- PricewaterhouseCoopers, "Technology Forecast: 2001-2003. Mobile Internet: Unleashing the Power of Wireless", PwC, 2001.

Revista de Telecomunicaciones de Alcatel. "Cobertura Total", 4º Trimestre 2001.

Schwartz, Mischa. "Redes de Telecomunicaciones: protocolos, modelado y análisis", Addison-Wesley Iberoamericana 1994.

Secretaria de Telecomunicacions i Societat de la Informació. "Estadístiques de la Societat de la Informació. Catalunya 2001", Generalitat de Catalunya, 2002.

Telefónica, "La Sociedad de la Información en España. Perspectiva 2001-2005", Telefónica, 2001.

Terceiro, José B. y Matías, Gustavo. "Digitalismo. El nuevo horizonte sociocultural", Taurus, 2001.

Terceiro, José B. "Sociedad digital", Alianza Editorial, 1996.

Werner, Douglas H. y Mittra, Raj. Ed. "Frontiers in Electromagnetics", IEEE Press, 2000.

Wiener, Norbert. "Inventar. Sobre la gestación y el cultivo de las ideas", Tusquets Editores, 1995.

DISCURS DE CONTESTACIÓ
PER L'ACADÈMIC NUMERARI

EXCM. SR. DR. EUGENIO OÑATE IBÁÑEZ DE NAVARRA

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras y Señores:

Es un honor poder dar la bienvenida a la Reial Acadèmia de Doctors al nuevo Académico, Dr. Angel Cardama Aznar.

Presentar una visión concisa y panorámica de sus méritos es el mejor elogio que podríamos hacerle, y la mejor justificación del acierto de la Academia en su designación.

El Dr. Cardama nació el 13 de Mayo de 1944. Cursó la carrera de Ingeniero de Telecomunicaciones en la Universidad Politécnica de Madrid, donde se graduó en 1968. Dos años más tarde obtuvo el título de Master of Sciences en la Universidad de Brown (EEUU) y en 1973 alcanzó en la misma universidad el grado de Doctor of Philosophy, título que convalidó en España con el de Doctor Ingeniero de Telecomunicaciones. Su tesis doctoral versó sobre “Análisis modal de problemas en fibras ópticas”.

Desde 1974 es profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de la Universidad

Politécnica de Cataluña, donde actualmente es Catedrático de Universidad.

La investigación del Dr. Cardama ha estado centrada siempre alrededor del mundo de las antenas y sus aplicaciones más diversas. No obstante, ha contribuido también con aportaciones teóricas y aplicadas en diversas áreas de las telecomunicaciones. En conjunto ha publicado más de un centenar de trabajos científicos, de los cuales cuarenta lo han sido en revistas internacionales de prestigio y el resto en congresos.

La labor investigadora del Dr. Cardama ha estado orientada siempre hacia la aplicación práctica. Son de destacar en ese aspecto su participación en el desarrollo y patente de un aparato tomógrafo y/o termógrafo por microondas, y en el desarrollo del sistema informático GRECO para predicción de la sección recta radar de objetos, de aplicación en ingeniería aeronáutica y naval. Pero quizás su contribución práctica más relevante es el desarrollo de antenas fractales para sistemas de comunicaciones, que obtuvo en 1998 el máximo galardón del Premio de las Tecnologías de la Información de la Comunidad Europea. Los resultados de dicha investigación en antenas fractales son ya una realidad comercial a través de la empresa Fractus, creada ese año por diversos ingenieros de la Universidad Politécnica de Cataluña como resultado del mencionado premio.

Este no es el único premio recibido por el Dr. Cardama. Ha obtenido las máximas distinciones en numerosas convocatorias. De entre ellas destacamos el primer premio en 1986 de la revista Actualidad Electrónica al mejor desarrollo llevado a cabo con tecnologías nacionales por el desarrollo de una estación receptora de señales de TV vía satélite, el primer premio en 1987 a la innovación para

investigadores de Mundo Electrónico por su trabajo de tomógrafo de microondas y el premio ESADE de la fundación CEOE concedido colectivamente en 1988 al Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. En 1996 obtuvo la medalla Narcís Monturiol al mérito científico y tecnológico de la Generalitat de Catalunya.

El Dr. Cardama ha dirigido diversas tesis doctorales en la Universidad Politécnica de Cataluña y ha participado en numerosos proyectos de investigación y desarrollo en el marco de programas nacionales e internacionales.

En su brillante trabajo de ingreso a esta Academia, el Dr. Cardama ha desgranado con suma minuciosidad los aspectos y detalles más destacables de la reciente historia de la denominada Sociedad de la Información, desde la perspectiva de las Telecomunicaciones.

Queda claramente manifiesto en su trabajo el impresionante trayecto que el mundo audio-visual ha recorrido desde que Samuel Morse logró sintetizar los desarrollos del primer tercio del siglo diecinueve en el telégrafo que vio la luz en 1937. Cuarenta años después Bell tratando de mejorar el telégrafo inventó el teléfono.

Telégrafo y teléfono convivieron durante más de cien años hasta que en 1962 la codificación binaria de la voz abrió la puerta de los sistemas de comunicaciones digitales, acercando más el comportamiento de las redes de comunicaciones a las del sistema nervioso central de los humanos.

Desde el teléfono clásico hasta la internet actual, pasando por el desarrollo de la radio, la televisión, los ordenadores y las redes de comunicación analógica y digital vía satélite y

terrestre, hemos sido testigos en los últimos años de una auténtica eclosión de las tecnologías de la información y las comunicaciones (las denominadas TIC) en prácticamente todos los ámbitos de la vida del hombre.

El Dr. Cardama nos ha explicado con gran altura los entresijos de muchos de esos desarrollos científicos y técnicos, así como el alcance de los mismos en distintas facetas de la vida humana. Desde mi perspectiva de ingeniero de caminos, añadiré aquí mi visión personal del impacto de las TIC, y en particular de internet, en el mundo actual y en el futuro probable.

No hablaré aquí con detalle de aplicaciones de internet más o menos “clásicas” que, aunque hasta hace poco eran meras especulaciones, hoy en día, pese a la cierta crisis provocada por la digestión del espectacular crecimiento de los últimos años, son ya realidades y promesa de nuevos avances. Enunciaré únicamente a título de curiosidad algunas de esas aplicaciones en un sector tan aparentemente lejos del mundo de internet hasta hace muy pocos años, como el de la construcción. En dicho sector están en auge el comercio electrónico de todo tipo de productos pequeños y grandes (hormigón, ladrillos, vigas, equipos, etc.); la creación de oficinas técnicas virtuales en las que ingenieros y arquitectos que trabajan en distintos lugares de la misma empresa, o de empresas distintas, interactúan intercambiando datos relativos al mismo proyecto; los nuevos servicios de consultoría, de cálculo, de formación continua y de gestión y mantenimiento de obras a través de internet y un largo etcétera.

Es más apasionante quizás reflexionar aquí, con un cierto espíritu especulativo, sobre el futuro que nos depara internet.

En mi opinión, el reto a abordar en los próximos años será transformar la ingente cantidad de información que proporciona internet a través de ordenadores, teléfonos móviles de tercera (y pronto cuarta) generación, etc. en conocimiento a partir del cual poder tomar decisiones sobre el funcionamiento del mundo que nos rodea. Para ello, será indispensable apoyarse en herramientas que procesen la información, de manera que podamos reproducir escenarios sobre el comportamiento previsible de la realidad, de acuerdo con hipótesis preestablecidas. Estas herramientas, denominadas comúnmente métodos de simulación, combinarán las TIC con modelos matemáticos, métodos numéricos e informáticos y, sin duda, con un conocimiento profundo de la física del problema a resolver.

Se podrían así esquematizar las actividades del hombre utilizando las TIC, como enmarcadas en un triángulo en cuyo vértice superior se concentraría la captación de datos sobre el problema a resolver, el vértice inferior izquierdo acogería la simulación de diferentes escenarios posibles, utilizando los datos disponibles, y en el vértice derecho se concentrarían todas las facetas relativas a la toma de decisiones sobre la mejor solución a adoptar. Los tres vértices que representan los datos, la simulación del futuro y la decisión a tomar, estarían unidos por los lados del triángulo que simbolizan a internet. Se configura así un bucle que enlaza a través de internet la información con la decisión en base de la predicción. En el centro del triángulo se situará el hombre, responsable de la gestión de las tres fases del proceso y, en definitiva, de la decisión final.

Pueden encontrarse hoy en día numerosos ejemplos de ese sencillo esquema triangular. La predicción del tiempo es uno de ellos. En el vértice superior se captan los datos sobre la situación meteorológica en un instante dado, en el vértice inferior izquierdo se predice, a partir de los datos recibidos

por internet y con ayuda de potentes programas de cálculo y medios informáticos, el estado del tiempo en diversos instantes del futuro. Estas simulaciones se traducen en el vértice inferior derecho en pronósticos y recomendaciones prácticas sobre el tiempo esperable.

El triángulo mágico se podría bautizar con el nombre de Sistema de Ayuda a la Decisión vía Internet. En la Universidad Politécnica de Cataluña se desarrollan actualmente sistemas de este tipo. Un ejemplo concreto es un sistema para gestión de emergencias en caso de inundaciones. Ahora los datos necesarios hacen referencia a información meteorológica y geográfica de un territorio particular, los programas de simulación reproducen diferentes situaciones de riesgo de inundación en dicho territorio para diversas condiciones meteorológicas. Con esas simulaciones se educan sistemas expertos basados en redes neuronales, que permiten tomar decisiones sobre el riesgo de una avenida para una situación meteorológica específica y las acciones más adecuadas a tomar.

Es fácilmente intuible que aplicaciones similares pueden encontrarse en muchas áreas de la ingeniería y la ciencia. Es muy prometedora la aplicación de dichos sistemas al ámbito de la administración pública, para la gestión de ciudades y territorios. Es remarcable, en ese sentido, el esfuerzo que están invirtiendo en USA organizaciones como the Orton Family Foundation para configurar sistemas de ayuda a la decisión con el objetivo de favorecer el desarrollo de la América rural (www.communityviz.com). Dichos sistemas pretenden recomendar a los ciudadanos el ritmo óptimo para gestionar sus cosechas, y a los ayuntamientos la mejor forma de promover el crecimiento sostenible de sus municipios, entre otras cuestiones.

La tentación inmediata ante las enormes posibilidades de internet al servicio del hombre, es pensar que no existen límites a dichas posibilidades. ¿Es factible pensar que gestionando adecuadamente los vértices del triángulo mágico: datos, predicción, decisión, enlazados por las más avanzadas tecnologías de la comunicación podremos llegar a diseñar un futuro sin riesgos? ¿Podrá, en fin, algún día el hombre controlar el futuro? Esta es una cuestión de apasionante actualidad, tratada en numerosos libros y películas de ciencia ficción (menciono aquí *Minority Report* por ser la más reciente). La respuesta formal a dicha cuestión la estableció de un modo magistral en 1931 el matemático vienés Kurt Gödel.

En una época en que Wiener, von Neumann y Shannon pusieron los fundamentos de la teoría de la comunicación sobre la que se apoyó el desarrollo de las TIC, Gödel demostró que todo sistema lógico basado en axiomas, contiene proposiciones indecidibles. Es decir, es imposible que un sistema cerrado contenga la respuesta a todas las preguntas. Hay cuestiones, por tanto, que solo pueden ser contestadas desde fuera del sistema.

Las conclusiones del teorema de Gödel, aplicadas al sistema formado por los tres vértices del triángulo donde se encuentran los datos, las herramientas de predicción y los módulos de decisión, enlazados por la red más avanzada de comunicaciones, nos recuerdan que, pese a lo sofisticado que puede llegar a ser dicho sistema, siempre existirán cuestiones sobre las que no podremos tomar decisiones, a menos que aportemos criterios externos al sistema. Estos criterios deberán ser invariablemente de tipo extra-científico y extra-tecnológico y solo podrán ser aportados por el hombre, quien por su carácter de ser libre, estará siempre capacitado para, desde el centro del sistema, enriquecer cada una de las etapas del bucle con los criterios más adecuados

combinando los aspectos científicos y tecnológicos con todas las otras facetas humanísticas, históricas, ambientales, económicas y sociales, que componen la vida del hombre.

He intentado, pues, Dr Cardama completar vuestras tesis sobre el nuevo escenario que abren las presentes y futuras redes de comunicación, al favorecer que la información se transforme en conocimiento que se manifestará en innumerables servicios para la vida cotidiana, tratando de franquear los límites de las barreras del espacio y del tiempo. Pese a la creciente sofisticación del entramado de redes, datos y predicciones sobre el futuro, es importante recordar que los hombres, en definitiva, serán siempre los últimos responsables de las decisiones y, en particular, de que la nueva sociedad de la información sea una sociedad más libre, justa y equilibrada. Usted ha reflexionado con profundidad sobre estas cuestiones y conoce las enormes posibilidades de las tecnologías de la información y las comunicaciones y también los retos que éstas abren en el compromiso con nuestra generación y las futuras. Le felicito muy sinceramente por sus contribuciones y por su trayectoria que le puede enorgullecer personalmente y que enriquece nuestra comunidad. Le deseo que el éxito acompañe su trabajo en el futuro como hasta ahora.

Esperamos, en fin, poder tener el placer como colegas en esta Academia de seguir de cerca vuestras futuras aportaciones, de aprender de ellas y de alegrarnos por los hitos que sin duda seguiréis alcanzando.

ÍNDICE

Discurso de Ingreso	7
Las Telecomunicaciones en la Sociedad de la Información.....	9
Bibliografía.....	165
Discurso de Contestación	171

NOVES PUBLICACIONS DE LA REIAL ACADÈMIA DE DOCTORS

Directori 1991.

Los tejidos tradicionales en las poblaciones pirenaicas (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr. Eduardo de Aysa Satué, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Antoni Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història), 1992.

La tradición jurídica catalana (Conferència magistral del acadèmic de número Excm.Sr. Josep Joan Pintó i Ruiz, Doctor en Dret, en la Solemne Sessió d'apertura de curs 1992-93, que fou presidida per SS.MM. el Rei Joan Carles I i la Reina Sofia), 1992.

La identidad étnica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Angel Aguirre Baztan, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm.Sr. Josep M. Pou d'Avilés, Doctor en Dret), 1993.

Els laboratoris d'assaig i el mercat interior; Importància i nova concepció (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm.Sr. Josep M^a Simón i Tor, Doctor en Medicina i Cirurgia), 1993.

Contribución al estudio de las Bacteriemias (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il.lm.Sr. Miquel Marí i Tur, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm.Sr. Manuel Subirana i Cantarell, Doctor en Medicina i Cirurgia), 1993.

Realitat i futur del tractament de la hipertròfia benigna de pròstata (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Albert Casellas i Condom, Doctor en Medicina i Cirurgia i President del Col.legi de Metges de Girona), 1994.

La seguridad jurídica en nuestro tiempo. ¿Mito o realidad? (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztan, Doctor en Filosofia i Lletres), 1994.

La transició demogràfica a Catalunya i a Balears (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Ferrer i Bernard, Doctor en Psicologia), 1994.

L'art d'ensenyar i d'aprendre (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Agustín Luna Serrano, Doctor en Dret), 1995.

Sessió necrològica en record de l'Excm.Sr. Lluís Dolcet i Buxeres, Doctor en Medicina i Cirurgia i Degà emèrit de la Reial Acadèmia de Doctors, que morí el 21 de gener de 1994. Enaltiren la seva personalitat els acadèmics de número Excms.Srs.Drs. Ricard García Vallès, Josep M^a Simón i Tor i Albert Casellas i Condom. 1995.

La Unió Europea com a creació del geni polític d'Europa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Jordi García-Petit i Pàmies, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Lloret i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques), 1995.

La explosión innovadora de los mercados financieros (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il.lm.Sr. Emilio Soldevilla García, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm.Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret), 1995.

La cultura com a part integrant de l'Olimpisme (Discurs d'ingrés com acadèmic d'honor de l'Excm.Sr. Joan Antoni Samaranch i Torelló, Marquès de Samaranch, i contestació per l'Excm.Sr. Jaume Gil i Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques), 1995.

Medicina i Tecnologia en el context històric (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1995.

Els sòlids platònics (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm.Sra. Pilar Bayer i Isant, Doctora en Matemàtiques, i contestació per l'Excm.Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1996.

La normalització en Bioquímica Clínica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Xavier Fuentes i Arderiu, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm.Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Geografia) 1996.

L'entropia en dos finals de segle (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'Excm.Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques) 1996.

Vida i música (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Carles Ballús i Pascual, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Josep M^a Espadaler i Medina, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1996.

La diferencia entre los pueblos (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il.lm.Sr. Sebastià Trías Mercant, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'aventura del pensament teològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia, i contestació per l'Excm.Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1996.

El derecho del siglo XXI (Discurs d'ingrés com acadèmic d'honor de l'Excm.Sr.Dr. Rafael Caldera, President de Venezuela, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'ordre dels sistemes desordenats (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Josep M^a Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm.Sr. Joan Bassegoda i Nonell, Doctor Arquitecte) 1997.

Un clam per a l'ocupació (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Joan Bassegoda i Nonell, Doctor Arquitecte) 1997.

Rosalía de Castro y Jacinto Verdaguer, visión comparada (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

La nueva estrategia internacional para el desarrollo (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Santiago Ripol i Carulla, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

El aura de los números (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor Enginyer de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'Excm.Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1998.

Nova recerca en Ciències de la Salut a Catalunya (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excm.Sra. Anna M^a Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia, i contestació per l'Excm.Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1998.

Dilemes dinàmics en l'àmbit social (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Albert Biayna i Mulet, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

Mercats i competència: Efectes de liberalització i la desregulació sobre l'eficàcia econòmica i el benestar (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Amadeu Petitbó i Juan, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret) 1999.

Epidemias de asma en Barcelona por inhalación de polvo de soja (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excm.Sra. M^a José Rodrigo Anoro, Doctora en Medicina, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Llor i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1999.

Hacia una evaluación de la actividad cotidiana y su contexto: ¿Presente o futuro para la metodología? (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excm.Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) i contestació per l'Excm.Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1999.

Directori 2000.

Antonio de Capmany: el primer historiador moderno del Derecho Mercantil (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Xabier Añoveros Trias de Bes, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Santiago Dexeus i Trias de Bes, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2000.

La medicina de la calidad de vida (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Luís Rojas Marcos, Doctor en Psicologia, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Psicologia) 2000.

Pour une science touristique: la tourismologie (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent, Il.lm.Sr. Jean-Michel Hoerner, Doctor en Lletres i President de la Universitat de Perpinyà, i contestació per l'Excm.Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 2000.

Virus, virus entèrics, virus de l'hepatitis A (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Albert Bosch i Navarro, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm.Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2000.

Mobilitat urbana, medi ambient i automòbil. Un desafiament tecnològic permanent. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Pere de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial, i contestació per l'Excm.Sr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

El rei, el burgès i el cronista: una història barcelonina del segle XIII (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. José Enrique Ruiz-Domènec, Doctor en Història, i contestació per l'Excm.Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

La informació, un concepte clau per a la ciència contemporània (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Salvador Alsius i Clavera Doctor en Ciències de la Informació, i contestació per l'Excm.Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2001.

La drogaaddicció com a procés psicobiològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Miquel Sánchez-Turet, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm.Sr. Pedro de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial) 2001.

Un univers turbulent (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Jordi Isern i Vilaboy, Doctor en Física, i contestació per l'Excma.Sra. Ma. Teresa Anguera i Argilaga, Doctora en Psicologia) 2002.

L'envelliment del cervell humà (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr.Dr. Jordi Cervós i Navarro, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr.Dr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 2002.

La Reial Acadèmia, respetando como
criterio de autor las opiniones expuestas en
sus publicaciones, no se hace responsable
ni solidaria.

® Reial Acadèmia de Doctors
Impressió: Imprenta Baltasar 1861
Tels. 93 346 91 52 - 93 346 92 06
Tiratge 350 exemplars

Dipòsit Legal: B-50031-2002

