

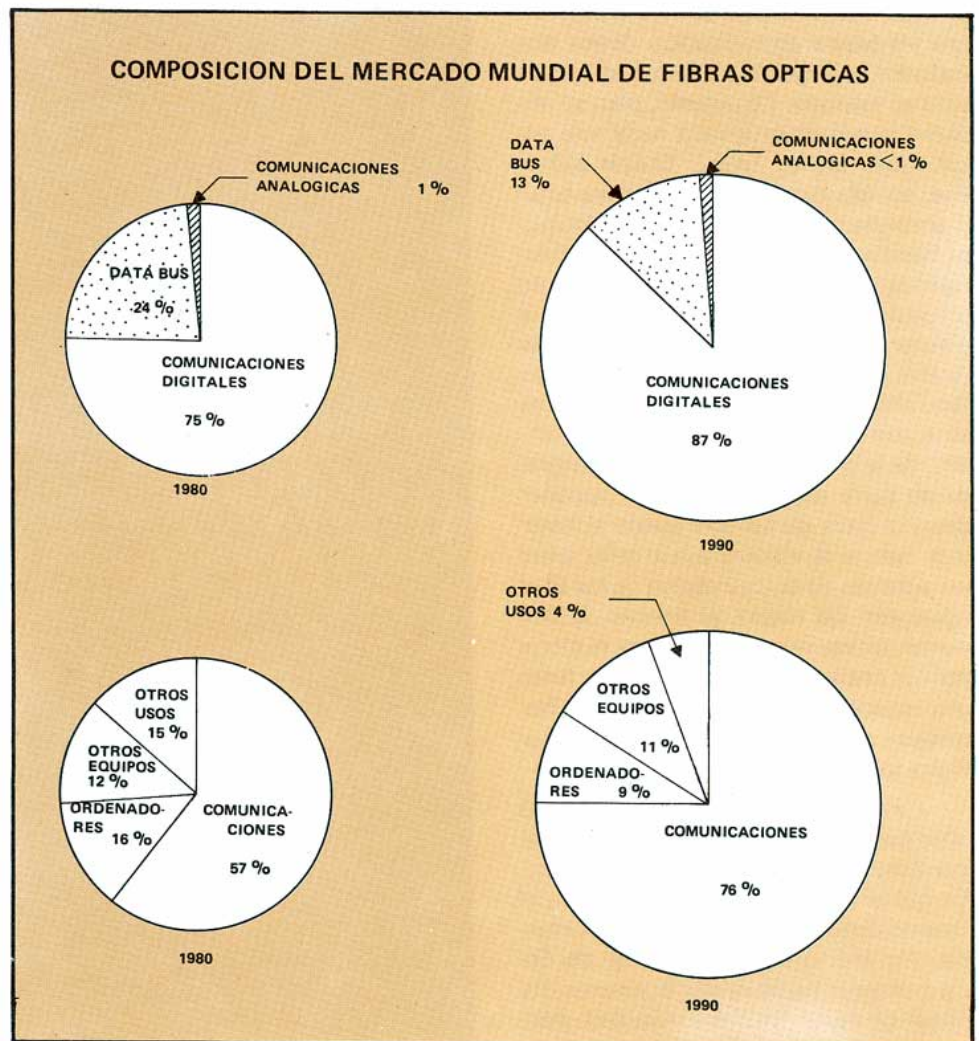
DE COMO LO ANALOGICO Y LO DIGITAL SE IMBRICAN EN COMUNICACIONES OPTICAS

J.A. Martín Pereda
M.A. Muriel

Cuando a los pocos segundos del inicio del Universo, y después de unas milésimas de segundo de cuasicaos, surgieron los primeros fotones, la Naturaleza había dicho su primera y última palabra sobre su preferencia de los digital sobre lo analógico. Sólo que después de algunos millones de años, quizás unos doscientos mil millones según los últimos cálculos, cuando con la entrada en escena del primer homínido pensante lo analógico adquirió primacía sobre lo digital. Las formas de su correspondiente homínida eran absolutamente continuas y no había nada en ella que sugiriera discontinuidades abruptas o flancos de subida. La noticia de que estaba frente a él, la recibía continuamente y no de forma discreta. Lo analógico había iniciado su aparición en el mundo de las relaciones humanas, y de hecho, la primera y más elemental forma de comunicación óptica, también.

1.- A MODO DE HISTORIA PASADA Y PRESENTE

Los siglos fueron pasando. Y con ellos llegó la primera noticia que registra la historia de una comunicación óptica que, inevitablemente, tenía que ser digital. Troya había caído y el honor de Menelao estaba a salvo. Había que comunicar la buena nueva, desde el Asia Menor hasta Argos, por el medio más rápido posible. Y el medio fué mediante señales de hogueras situadas en las cumbres de montañas próximas. Esquilo, su cronista, puede considerarse el primer vulgarizador de descubrimientos científicos en este campo. Quizás la referencia de Esquilo debiera ser mencionada como el primer "tutorial paper" de las Comunicaciones Ópticas. Aunque su éxito de público y crítica no debió de ser muy grande porque pasaron muchos años, siglos, hasta la siguiente referencia. Al menos, los amanuenses medievales no registraron similares entradas.



Corrían los últimos años del siglo dieciocho. Y por aquello de que el siglo de las luces no podía por menos de contribuir con algo a las Comunicaciones ópticas, apareció el Telégrafo óptico de Claude Chappe. Mediante los brazos móviles de una serie de postes situado dentro de su región de alcance óptico, podía transmitirse en unos seis minutos, un mensaje desde París hasta Estrasburgo. ¿Analógica o digitalmente? Los brazos adoptaban posiciones determinadas, discretas. Pero eran varias, no sólo dos. No

eran ceros y unos, sino muchos más símbolos. El rocoó previo parece no permitir demasiadas simplificaciones.

Con el inicio del XIX, la óptica inició la retirada. Ya mediados, con la invención del telégrafo eléctrico, perdió definitivamente la batalla. Unicamente los pobres indios, en el lejano Oeste, seguían siendo fieles a las Comunicaciones Ópticas. Las señales de humo que anunciaban el avance del Quinto de Caballería eran las últimas bocanadas de una comunicación óptica ligeramente digital. Y a

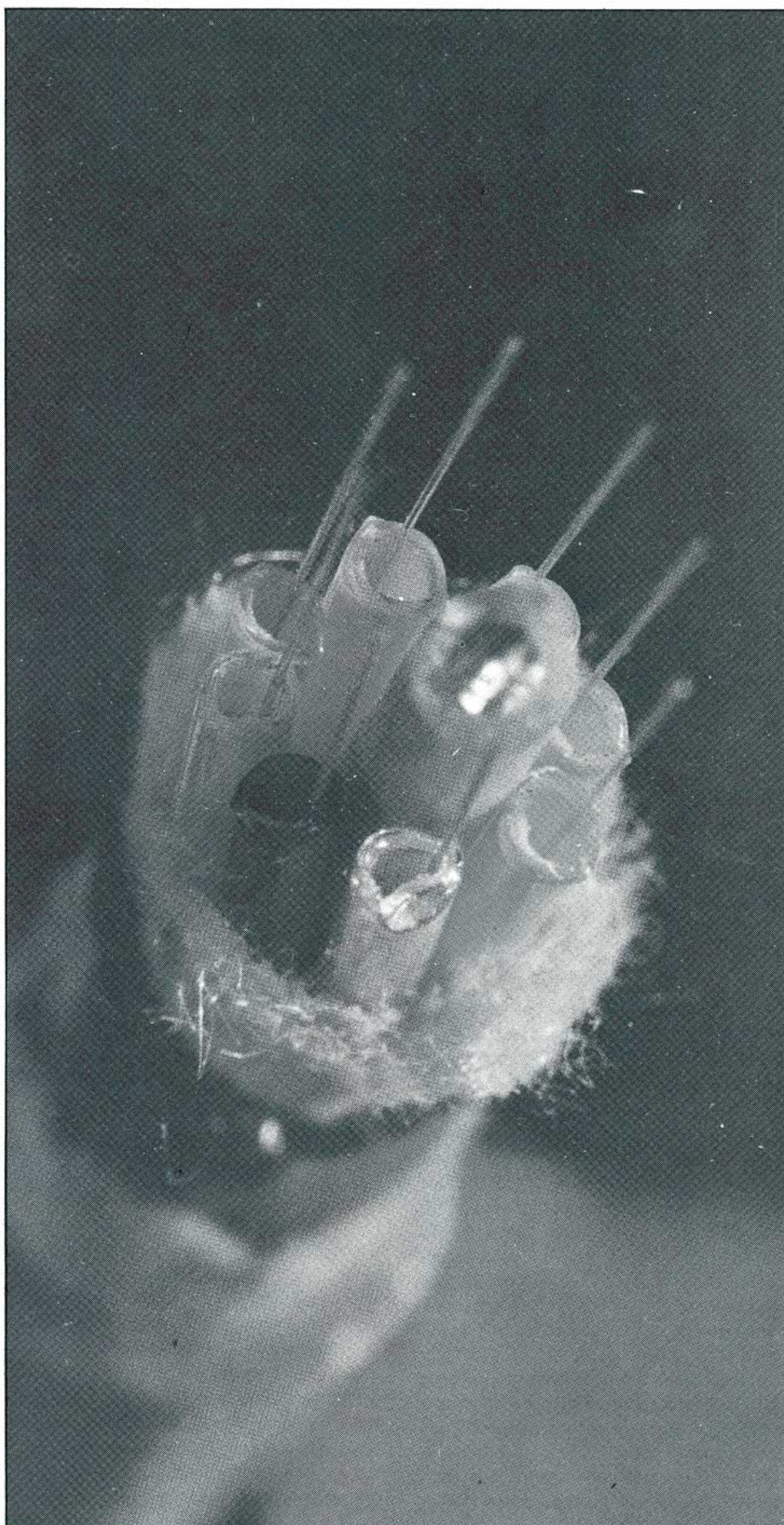
su vez, las señales con reflejos de sol sobre un espejo roto con que un mascador de tabaco pregonaba el inicio de la fiebre del oro en California, eran el contrapunto entre los rostros pálidos de un análogo sistema de comunicaciones que, invariablemente, volvía a ser digital.

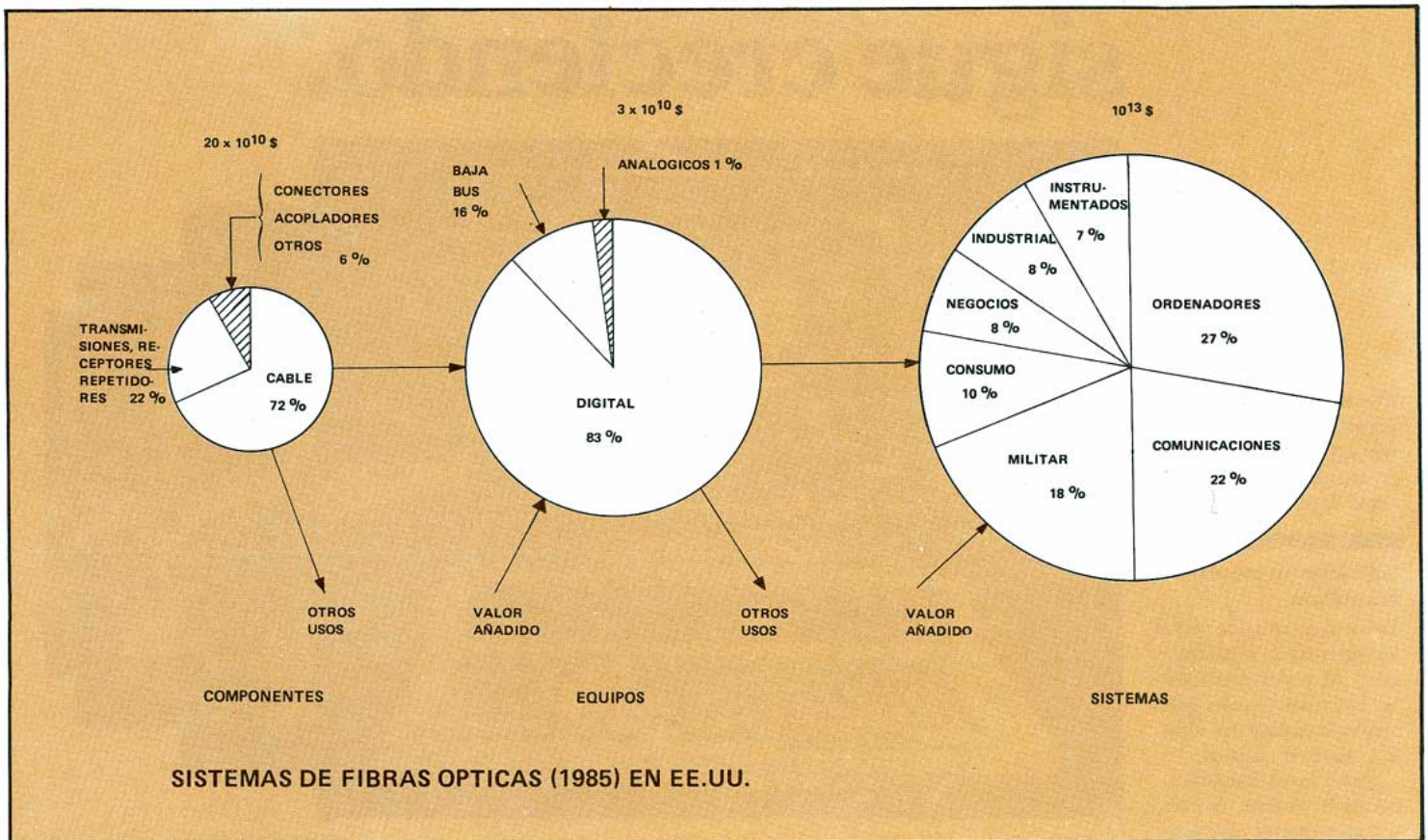
Pero, claro es, eran enlaces entre tercermundistas por un lado y el lumpen de la sociedad americana por otro. Su influencia no podía ser muy fuerte. Y de hecho no lo fue.

Sólo Graham Bell, en 1880, tuvo un intento de realizar de forma práctica una verdadera comunicación óptica por métodos análogos a los antes utilizados para su teléfono. Lo patentó, pero su impacto quedó amortiguado nada más nacer. ¿Cuál fue su fallo? Quizás fue el que, en esta ocasión, la técnica era total y absolutamente analógica. Su principio se basaba, esencialmente, en la modulación de un haz de rayos de sol mediante un diafragma especular, y que se movía gracias a la voz del "locutor". El haz se recibía en un reflector parabólico en cuyo foco situaba un fotoresistor de selenio en serie con una pila y un teléfono. La calidad de la transmisión no queda registrada en parte alguna, pero es de suponer que no fuera demasiado buena si hacemos caso a la influencia que tuvo sobre los sistemas de comunicación de los años siguientes. De hecho, el invento de Bell puede decirse que pasó sin pena ni gloria por los anales de la técnica. Quizás fuera una especie de represalia de la madre Naturaleza por intentar usar de forma analógica lo que por esencia era digital.

Fueron necesarios casi ochenta años para que, con la propuesta del láser por Schawlow y Townes y con el desarrollo del primero de rubi por Maiman, el camino óptico volviera a tener importancia. No era lo mismo depender del Sol para obtener haces de luz, que poder disponer de rayos ópticos a voluntad. Además, aparecían otras muchas propiedades en el láser, cuyo detalle se saldría de nuestro objetivo actual y que hacían del mismo algo radicalmente diferente de todo lo anterior. Pero eso son otras historias. El caso es que el láser había nacido y había que usarle. Y en sus primeros meses de vida, cuando aún no había acabado de echar sus primeros fotones, todos los que le contemplaban boquiabiertos se decían entre sí: "¡Cuando sea mayor servirá para comunicar ópticamente!".

De hecho en un gran número de artículos publicados entre 1960 y 1963,





y en particular en un número extraordinario, aparecido en enero del 63, de los Proceeding del IEEE, ya se anunciaban futuros sistemas de comunicaciones ópticas. Ese número que se acaba de citar es histórico por muchas cosas. Creo que más de uno definió su vocación a raíz de una lectura a salto de mata y de diccionario del mismo. Pero continuemos. ¿Qué sistemas se proponían? Pues así los que luego se han desarrollado. Naturalmente los años han ido sofisticando su filosofía. Es el triste pago a la época decadentista en que nos encontramos. Pero la base ya estaba casi asentada. Y estaba casi asentada porque se aprovechó, y se está aprovechando, a tope todo lo que era digital, las comunicaciones ópticas, tras algunos vaciles, se decidieron también por lo digital. En el Apéndice de este artículo, o pseudoartículo, se analizará de una forma más concreta porque está justificada la técnica digital y no la analógica, cuando de comunicaciones ópticas se trata.

La eterna relación señal/ruido, angustiosa compañera de viaje de cualquier sistema de transmisión, va a imponer sus reglas de juego. Y esas reglas de juego van a decir que sólo se admitirán jugadores cuyos conocimientos de números no pasen del 0 y del 1. Las tahures de apues-

tas altas, de varios estados posibles, quedan excluidos.

Hay un hecho que quizás había que mencionar. Es un poco el de la eterna lucha de los opuestos o el célebre, "¿Cómo de no-cabello podría engendrarse cabello y engendrarse carne de no-carne?" de Anaxágoras. Se inició este artículo comentando la voluntad expresa de la Naturaleza de que lo discreto fuera el todo. Pero la tendencia que aparece también en el desarrollo de las comunicaciones ópticas es que de lo digital, de los pulsos discretos, se evolucione a estados de variación continua. Un pulso infinitamente abrupto, idealmente perfecto, después de hacerse pasar por un kilómetro de fibra óptica real, se transforma en algo que sólo recuerda lejanamente a sus orígenes. Ha pasado de ser un pulso a tener una configuración acampanada. Los fenómenos de dispersión, tan esenciales en el estudio de sistemas de comunicaciones ópticas, han aparecido en escena. Es como si de una señal digital se hubiera pasado a otra analógica, como si hubiera surgido el equivalente al "horror al vacío", esto es, el "horror al digital". Pero el hombre trata de solventar este "horror" e introduce los sistemas regeneradores de pulsos, los dispositivos capaces de reconformar los pulsos distorsio-

nados en otros rectangulares. El hombre, analógico por esencia, trata de digitalizar su alrededor. ¿Para bien? Quizás sólo para aumentar la efectividad.

2.- A MODO DE HISTORIA FUTURA

¿Qué se otea en el horizonte? Hagamos de augures. Y sigamos observando la contraposición de analógico y digital.

Como se desprende en parte de lo visto hasta aquí, las Comunicaciones Ópticas son, en realidad, comunicaciones como todas las demás con la única diferencia de que en éstas el medio portador de la información es una radiación óptica. Lo demás, casi en su totalidad, muy poco se diferencia en cuanto a filosofía de los otros métodos de transmisión. Las Comunicaciones Ópticas, no se puede decir de ellas que sean el hermano pobre de los otros tipos de Comunicaciones. Lo que se puede decir es que son el hermano parásito que, hasta la fecha, casi todo lo que ha hecho ha sido aprovecharse de lo que hasta ahora existente.

Pero las cosas tienden a iniciar un viraje, aún no se sabe si de diez, de noventa o de ciento ochenta grados. Y no nos estamos refiriendo simplemente a la Óptica Integrada, cuyo concepto, ya sobradamente conocido, no merece que

(Continúa en la pág. 51)

OPERACION ANALOGICA FRENTE A OPERACION DIGITAL

En comunicaciones hay una gran tendencia de pasar de la comunicación analógica a la digital. Aunque la comunicación digital ofrece muchas ventajas, su aceptación general se ve limitada por el modo de funcionamiento de los sistemas generales de telecomunicación que están diseñados para la necesidad de transmitir señales analógicas de sonido.

La mayor exigencia de un sistema digital es un incremento del ancho de banda, mientras que el analógico necesita una mejora de la linealidad. Por lo tanto el avance relativo de ambos sistemas depende de las mejoras de los tiempos de conmutación y de la linealidad, pero es de esperar que los avances digitales sobrepasen a los analógicos, de forma que cada vez será más claro el dominio digital.

La comunicación digital ofrece las siguientes ventajas sobre la analógica:

a) INMUNIDAD AL RUIDO: Los sistemas digitales nos ofrecen la promesa de una transmisión a cualquier distancia. La calidad de la transmisión es independiente de la longitud ya que se pueden emplear repetidores regenerativos de bajo ruido. La transmisión analógica, por contra, no permite la eliminación del ruido, una vez que éste se ha introducido en el sistema analógico viene dado por la degradación acumulada de la señal que no puede evitarse con el uso de repetidores, además del ruido adicional introducido por ellos.

b) INCREMENTO DEL ANCHO DE BANDA: Los sistemas digitales permiten una mejor utilización del ancho de banda de los componentes. Como la transmisión digital se realiza convirtiendo una señal analógica en digital y reconstruyéndola a la llegada,

un parámetro importante es el número de bits asignado a una palabra. Con una palabra de n bits, la amplitud de una señal en un instante dado podrá tomar 2^n niveles. Un incremento en la longitud de palabra nos produce una necesidad de mayor anchura de banda. Además la codificación, redundancia y criptografía requieren una mayor velocidad de transmisión.

c) REDUCCION DE COSTES: Los sistemas digitales nos permiten usar circuitos integrado de bajo costo. En sistemas analógicos que usen, por ejemplo, multiplicado por división de frecuencia, se emplean filtros paso-banda que deben ser precisos y complejos (y consecuentemente caros); igualmente necesitarán multiplexores y demultiplexores que solamente podrán realizarse con equipos de alta precisión. Por otro lado, los sistemas digitales solamente usan filtros paso-bajo que son relativamente simples y de bajo precio. A causa del vertiginoso descenso de los precios de los circuitos integrados digitales y a la ausencia de necesidad de emplear filtros de elevado precio, el costo por canal de un sistema digital continuará siendo mucho menor que el de un sistema analógico equivalente.

d) FLEXIBILIDAD DE USO: Desde el punto de vista de la información transmitida, podemos considerar que los sistemas digitales hablan todos el mismo idioma, ya que ha sido traducida desde la señal analógica a una serie de palabras de un número determinado de bits. Por lo tanto se puede optimizar el diseño de la red independientemente del tipo de información a transmitir, a diferencia de la transmisión analógica donde es preciso conservar las características propias de la señal ya sea: voz, facsímil, video o datos.

e) RUIDO EN CANALES OPTICOS ANALOGICOS: En los enlaces de fibras ópticas aparecen problemas adicionales respecto al ruido para comunicación analógica debido al trabajo con frecuencias mucho mayores.

Consideremos un canal analógico eléctrico en la región de banda-base, con un ancho de banda de 4 MHz potencialmente utilizable para transmitir una señal de video. Hay transistores, fácilmente obtenibles, con buena linealidad a 100 mW de salida como transmisores de señal Ps. El ruido límite fundamental es KTB, con K como constante de Boltzmann, T como temperatura absoluta, y B como ancho de banda del canal. La cantidad KTB a temperatura ambiente es $1,65 \times 10^{-14}$ W, así con una potencia de señal de 100 mW (Ps), la máxima relación señal/ruido de la portadora respecto al ruido es $Ps/KTB = 6 \times 10^{12}$ ó 128 dB

El canal comparable para fibra óptica tiene una portadora Ps alrededor de 1 mW. El ruido fundamental es $h\nu B$, con h como constante de Planck, ν como frecuencia, y B como ancho de banda del canal. La cantidad $h\nu B$ es alrededor de 8×10^{-13} W en nuestra banda de 4 MHz a $1\mu\text{m}$ como longitud de onda. Con un detector con una eficiencia cuántica η de 0,8, la máxima relación señal/ruido es:

$$\eta Ps/h\nu B = 10^9 \text{ ó } 90 \text{ dB}$$

Por lo tanto el canal de fibra óptica tiene alrededor de 38 dB menos de relación señal/ruido que la alternativa del canal electrónico. Este déficit es debido al hecho de ser $h\nu B$ superior a KTB y disponer de menos potencia de portadora en el caso de fibra óptica.

A modo de ejemplo se adjuntan las gráficas y tabla representativas de las tendencias actuales. ■

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES OPTICAS DE CORTO ALCANCE (1980)

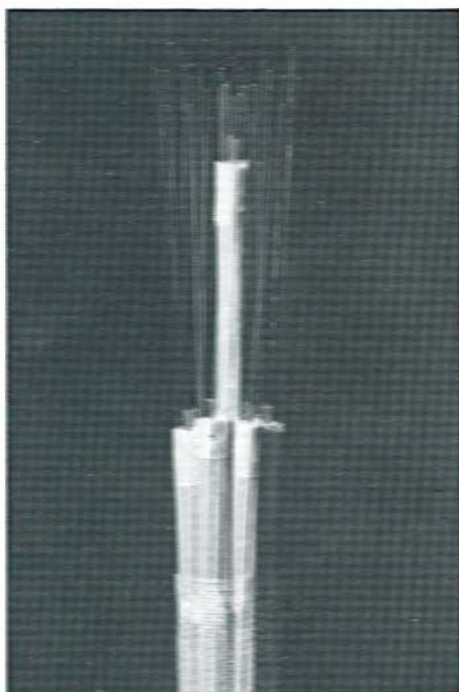
CARACTERISTICA	ANALOGICO				DIGITAL	
	AEG TELEFUNKEN	SIEMENS	ITT	SIECOR	AEG TELEFUNKEN	ITT
ANCHO DE BANDA (MHz)	5	5	20	—	—	—
VELOCIDAD DE TRANSMISION (Mb/s)	—	—	—	1	10	20
FUENTE	LED	LED, B-LED	B-LED	LED	LED	B-LED
DETECTOR	PIN	PIN, APD	PIN, APD	APD	PIN	PIN
ATENUACION DE FIBRA (dB/Km)	10-20	5-100	10-30	10-30	10-20	10-30
IMPEDANCIA DE ENTRADA (Ω)	1000	75	75	—	1000	50
IMPEDANCIA DE SALIDA (Ω)	20	75	75,600	—	20	50

(Viene de la pág. 47)

nos detengamos aquí en él. Nos referimos a la Óptica no lineal y a la óptica no lineal y no convencional, término este último acuñado en la próxima Conferencia de la Optical Society of America a celebrar en el próximo mes de Octubre en Arizona. ¿Cuáles son sus principales puntos dignos de mención? O mejor, ¿qué se podría aprovechar para Comunicaciones Ópticas?

El hecho básico de partida sería el de cómo habrían de ser unas Comunicaciones Ópticas para que fueran realmente Ópticas y no meros apéndices de la Electrónica. Y la respuesta es, en principio, simple: deberían ser ópticas de principio a fin. Deberían ser tales que, sin ninguna ayuda electrónica, una radiación óptica se modulara, se transmitiera, se regenerara y se recibiera. Que una determinada información pudiera imponerse a una radiación óptica sin necesidad de ser convertida previamente en señal eléctrica. Con esto, prácticamente, se habría conseguido un proceso integrado óptico total. ¿Hay indicios de que esto se logre? Rotundamente, sí.

Según han demostrado varios grupos de todo el mundo, es ya posible regenerar señales ópticas, extraer pulsos inmersos en ruido, amplificar una radiación óptica sin necesidad alguna de dis-



positivos electrónicos. La biestabilidad Óptica, uno de los temas de más candente actualidad en el mundo de la ciencia, ha hecho posible lo anterior. Aquí es sólo una radiación óptica, interaccionando con un determinado material no lineal, la que por sí misma hace todo. ¿Cómo? Aquí no podemos entrar en detalles pero la bibliografía es ya, realmente, muy abundante. ¿Y digital o analógico? Obvia-

mente, tratándose de sistemas biestables, digital. Y digital de una forma muy sui generis, porque también surgen otra serie de fenómenos cuyo carácter comienza a mezclarse con el analógico. Según ha demostrado nuestro grupo, es posible la modulación de un haz láser mediante otro haz láser modulado que atraviesa un material no lineal. Este fenómeno, a su vez imbricado con otro, también estudiado por numerosos grupos de todo el mundo y, modestamente, por nosotros, y que permite obtener oscilaciones de muy variadas frecuencias y formas mediante fenómenos de interacción no lineal con un determinado material, dan lugar, al final a la obtención de una serie de señales ópticas cuyo carácter entra de lleno dentro del campo de lo analógico. Es el problema del caos, cuyo concepto, estudio, definición y aplicaciones, llena las sesiones de las más importantes Conferencias de todo el mundo.

¿Qué nos espera? Quizás el descubrimiento de otro Big Bang, equivalente al que tuvo lugar en el momento de la creación del Universo y que se anticipó en unos milisegundos al momento de creación de los fotones, con que iniciábamos el presente artículo. Habría que terminar con el trozo aquel de Heráclito que dice: "El orden cósmico más bello es algo así como desperdicios echados a voley". ■