

# estado actual de las comunicaciones ópticas

Dentro de una panorámica no completa, se ofrece una situación actual de algunos de los temas más significativos de las Comunicaciones Ópticas. El análisis se centra, esencialmente, en las fibras mono y multimodo; en las de características especiales, de uso en comunicaciones coherentes; en los componentes activos; en las redes locales y en los cables submarinos.

J.A. Martín-Pereda (\*)

## PRESENTACION DEL NUMERO ESPECIAL SOBRE COMUNICACIONES OPTICAS

Avanzado ya 1986, y muy próximo el cambio de década, parece ya necesario dar a las Comunicaciones Ópticas el puesto de privilegio que, por derecho, le corresponde. Desde hace más de quince años han ido abriéndose paso, al principio despacio y luego ya, sin freno, compitiendo con otras formas de transmitir información. De ser un método alternativo ha pasado a ser motor de empuje de una creciente industria. El dedicarles un número especial en «Mundo Electrónico» parecía pues necesario. Y para confeccionarlo, como también parecía obligado, había que llamar a los que hubieran tenido con ellos algún contacto en nuestro país. Por otra parte, la fecha de septiembre de 1986 era la más adecuada para su publicación, habida cuenta que entre el 22 y el 25 de ese mes se celebraba en Barcelona la XII Conferencia Europea de Comunicaciones Ópticas (ECOC'86), hecho que por primera vez tenía lugar en España.

Así, con esos condicionantes, hubo que confeccionar el número. Y, como es obvio, faltan muchas firmas que deberían haber colaborado. Pero algunas de ellas acaban de publicar, en estas mismas páginas, artículos dedicados al tema y no era conveniente

repetirlos. Con otras, dada la rapidez con que me montó, no fue posible contactar. En cualquier caso, el muestrario de firmas y temas parece lo suficientemente amplio como para dar idea de por dónde se camina. Y habría que añadir por dónde se camina... fuera de nuestro país. Porque, aunque en casi todos los temas de la Ciencia y la Técnica lo que se hace fuera no tiene mucho que ver con lo que se hace dentro, al menos en cuanto a nivel puntero se refiere, en el caso de las Comunicaciones Ópticas, las realidades españolas son tan escasas, tan de pequeña envergadura, que sin mucha exageración podríamos afirmar que nos encontramos a un nivel por completo tercermundista. Ni en el campo de los dispositivos activos (láseres de semiconductor y fotoreceptores), ni en el de los medios de transmisión (fibras ópticas) parece posible ya intentar una mínima autonomía. Quizás en algunos componentes pasivos, como acopladores o multiplexores, todavía se pueden hacer algunos pequeños escauceos. Pero, en general, la situación es bastante pobre. Y aunque muchas voces reclaman un puesto adecuado para las Comunicaciones Ópticas, aun son voces que claman en el desierto.

En cualquier caso, aquí se presenta una pequeña crestomatía que muestra lo que pueden, o podrían, ser las Comunicaciones Ópticas si fueran lo que deberían ser.

## OPTICAL COMMUNICATIONS

### A survey

*A partial panoramic view gives a synthesis of the present situation in Optical Communications. The main topics reviewed are: mono and multimode fibers for use in coherent communications; active components; local area networks and undersea lightwave communications.*

## INTRODUCCION

Cuando al final del siglo VI a. de C. Esquilo mencionó que la transmisión de la noticia de la caída de Troya se había realizado mediante señales luminosas con hogueras situadas en cadena en la cima de montes contiguos, desde el Asia Menor hasta Argos, poco podía imaginarse que con ello

había nacido algo que, veintiséis siglos más tarde, constituiría una de las etapas fundamentales en las comunicaciones.

Hablar hoy de las Comunicaciones Ópticas (CO) y decir de ellas que puedan ser algo con un prometedor futuro es tanto como presagiar el que el hombre puede llegar a la Luna. Las CO son hoy ya una realidad tangible y están bastante lejos de ser esa especie de curiosidad de barracón de feria que es, más o menos, lo que pueden ser todos los descubrimientos científicos o tecnológicos cuando aún no han pasado de los laboratorios de investigación. Nadie que haya leído los rudimentos del estado de la tecnología en nuestros días puede dejar de reconocer que la fibra óptica y las señales luminosas transmitiéndose a su través, pertenecen por completo a una realidad tan en vigor como lo es el corte de materiales por láser o el procesado de imágenes. Ya han dejado de ser futuro para ser presente. Ya han abandonado

(\*) Redactor Jefe Asociado para este número especial sobre Comunicaciones Ópticas.

los centros de investigación para ser objeto de fabricación en serie. Pocos serán los que trabajando con ellas puedan decir que están investigando; lo más que pueden decir es que están desarrollando.

Pero evidentemente, igual que en cualquier otro campo, igual que en cualquier otro área, por muy trillado que esté un cierto dominio de la técnica, siempre queda algo que investigar y siempre queda algo nuevo que introducir. Las necesidades satisfechas sólo generan, a la larga, nuevas necesidades. El llegar a una meta únicamente supone haber cumplimentado una etapa. Pronto surgen nuevas metas y la carrera nunca acaba. Y las CO no podían ser menos.

Si se estudia, sin mucho detalle, la evolución de las CO desde que en 1966 fueron presentados sus primeros conceptos, hasta la actualidad, puede verse una sucesiva alternancia de ideas que iban y venían sin que, de hecho, ninguna haya quedado firmemente asentada.

Aunque es bastante difícil intentar prever qué será lo que venga antes de que acabe el siglo, sí es fácil, al menos, tener una idea vaga de cuáles son los caminos que se seguirán en los próximos años y, más o menos, cuál es la situación actual en ellos. Ese será el fin del presente artículo. El resto, lo que ahora se hace en aplicaciones concretas, es ya patrimonio de todos y en cualquier catálogo puede verse. De hecho, ensamblar un sistema de CO, sin unos requisitos muy estrictos, pertenece ya al dominio común y con solo seguir las instrucciones del fabricante se puede alcanzar un resultado bastante apreciable. Toda la mística que tenían hace no más de cinco años pertenece ya a la prehistoria. El que sólo pueden ser terreno para los muy iniciados es pura leyenda. Igual que se puede usar un PC sin idea de lo que tiene dentro, se puede instalar un sistema sencillo de CO sin saber qué es lo que se maneja. En las líneas que seguirán, intentaremos meternos en algunos de los terrenos en los que, todavía, puede uno introducirse sin saber cuándo se usarán de forma comercial y en los que, todavía, lo único interesante es el camino que se sigue para conseguir algo. Algo que todavía no está conseguido.

El artículo se dividirá, esencialmente, en tres grandes apartados: fibras, dispositivos activos y sistemas. En cada uno de ellos sólo se mencionarán los hitos fundamentales, sin profundizar de lleno en ninguno. Hacerlo supondría, al menos, un artículo para cada uno. Todo lo que se presentará está tomado de aquí y de allá. Nada es original del autor del presente artículo. Hacer las cosas que se van a mencionar impone la existencia de una tecnología que, al menos hoy, no existe en nuestro país. Sólo podemos ser meros espectadores de lo que hacen otros. Y soñar.

## FIBRAS MULTIMODO - FIBRAS MONOMODO

Aunque, como se mencionó anteriormente, la primera propuesta, realizada en 1966, de un material dieléctrico como medio apto para transmisión óptica, planteaba el concepto de fibra monomodo, los primeros desarrollos que se llevaron a cabo se hicieron con fibras multimodo. Hacia 1970, apareció la primera fibra con «bajas pérdidas», unos 20 dB/km, y un poco más adelante la tecnología de índice gradual. Todo el desarrollo de los 70 dió lugar a que el primer sistema de fibra óptica surgiera hacia 1980 y con él el inicio de un fuerte desarrollo de las fibras multimodo. Eran fibras que, usualmente, trabajaban entre 850 y 900 nm con fotodetectores de silicio, con separaciones entre repetidores de 5-10 km y unas velocidades en el margen 6-140 Mbits/s en Europa, 6-90 Mbits/s en EE.UU. y 6-100 Mbits/s en

Japón. Los sistemas de multiplexado por división de longitudes de onda (WDM) comenzaban a aparecer. El esfuerzo de todos los laboratorios se centró en aumentar la repetibilidad de la atenuación multimodo. Conseguir una aceptable correlación entre las medidas hechas en el laboratorio y las en la zona de trabajo era un objetivo a alcanzar.

Mientras que lo anterior ofrecía, a pesar de todo, unas perspectivas bastante halagüeñas, un primer problema vino a presentarse con las fibras de índice gradual. Era el que se derivaba de la estimación de su anchura de banda en un enlace articulado. Esto se unió a la necesidad de conseguir un alto rendimiento de producción en fibras de gran anchura de banda así como, al descubrimiento de que casi todas las fibras tenían un comportamiento más favorable para 1300 ó 1500 nm. En esas zonas, la combinación de nula, o casi nula, dispersión cromática debida al material y una muy baja atenuación, de entre 0,2 y 1 dB/km frente a los 2-5 dB/km para 850-900 nm, hizo que, al comienzo de los 80, la situación iniciara un suave cambio y se entrara en los sistemas monomodo de la segunda generación.

Los primeros resultados fueron ya claramente definitivos. Así, en unas experiencias hechas en 1980, pudo transmitirse datos a 140 Mbit/s a una distancia de 49 km, sin apenas distorsión, mediante fibra monomodo, mientras que por entonces todavía la fibra de índice gradual se encontraba aferrada a 1 ns/km. Poco después, trabajando ya a 1.300 nm, se pudo conseguir velocidades de 100-600 Mbits/s, con distancia entre repetidores superiores a 25 km, hecho que con los de índice gradual, sólo se podía llegar a los 10 km, con 100 Mbits/s de velocidad.

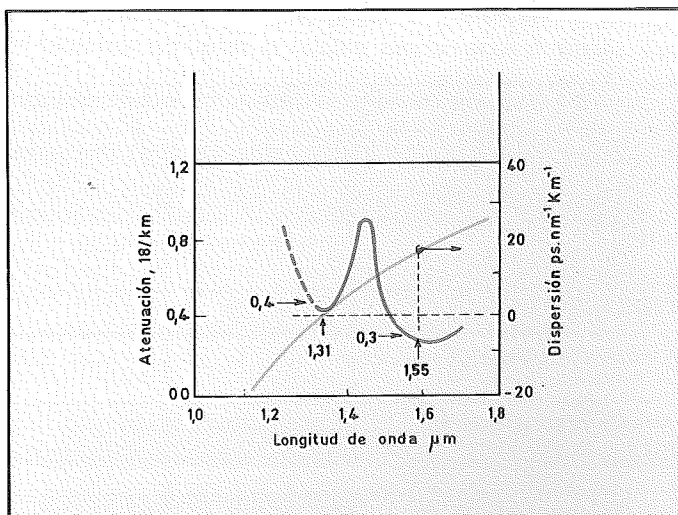


Figura 1. Atenuación y dispersión típicas de una fibra monomodo.

La atenuación y la dispersión de una fibra monomodo típica aparecen en la figura 1. Lo que muestra es claramente significativo. Si se tiene en cuenta que la anchura de línea de un láser típico es de 5 nm, se llega al resultado de que, por ejemplo, a 1300 nm, la dispersión es menor que 4 ps/nm·km, por lo que para un enlace de 50 km se tendría una dispersión menor de 1 ns. Pero también la figura 1 muestra algo más. Y es que a 1500 nm la atenuación es aún menor, del orden de 0,2 dB/km. Esta atenuación es francamente atractiva a la hora de instalar los repetidores. Pero allí la dispersión ha crecido a 20 ps/nm·km. Así se presenta un pequeño dilema: rebajar la atenuación a costa de la dispersión o viceversa. Como veremos más adelante, la solución ideal parece debe

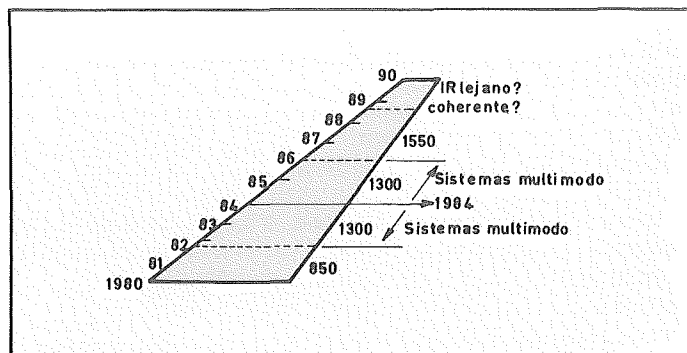


Figura 2. Esquema de la evolución de la tecnología de fibras ópticas.

ser rebajar la atenuación y rebajar también la dispersión. A esto llevarán las fibras especiales que veremos un poco más adelante.

El resumen de lo anterior aparece sintetizado en la figura 2 donde se muestra la evolución habida y la que se prevé. Como puede apreciarse, 1984 muestra claramente un punto de discontinuidad. Hasta 1984 los sistemas multimodo eran los dominantes. Desde entonces casi nadie habla ya de ellos siendo los monomodo los únicos en acción. Por otra parte, yendo a su aplicación concreta en sistemas, preferentemente experimentales, desde los primeros ensayos al principio de los 70, el resumen aparece en la figura 3. En ella se incluyen, asimismo, los sistemas coaxiales preexistentes y los límites teóricos, tanto por parte de las fibras como por la electrónica. Los avances han sido tremendos y espectaculares y sobre todo, muestran el impacto de la aparición de las fibras de 1300 nm seguidas por las monomodo y, finalmente, las de

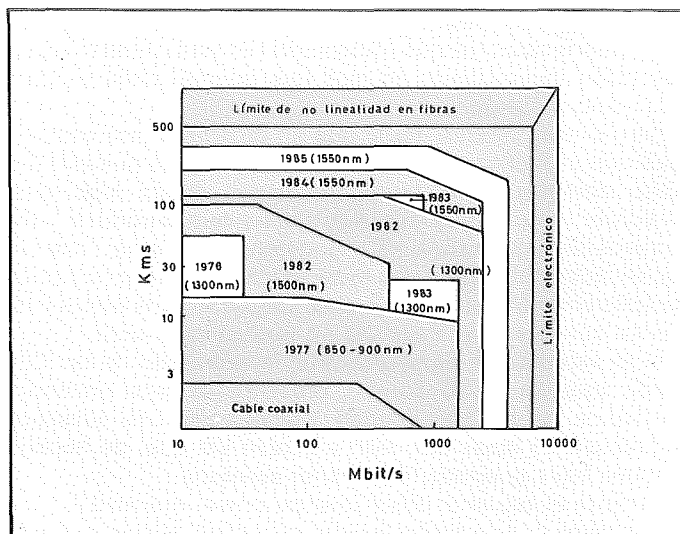


Figura 3. Desarrollo de los sistemas experimentales de fibra óptica de sus primeros desarrollos (según J.E. Midwinter).

1500 nm. Otro hecho significativo es que la velocidad de transmisión ha evolucionado mucho más lentamente que lo ha hecho la separación entre repetidores. Mientras que aquella se multiplicaba por un factor de dos a cinco, ésta lo hacía en un factor de entre diez y veinte. De hecho, durante muchos años, no había habido incremento significativo en las velocidades de transmisión hasta el reciente de 4 Gbits/s realizada por AT&T en 1985. Un hecho final que hay que señalar es el límite electrónico que aparece a la derecha y que no parece sobrepasar fácilmente los 2 Gbits/s, límite que

Fibras monomodo					
Compañía	Margen de transmisión (nm)	Atenuación (dB/km)	Dispersión nula	Dispersión máx. y margen (ps/km)	Longitud máx. de tirada (km)
AT&T	1310-1550	0,4/0,35	1310 ± 10	3,2 (1285-1300) 17 (1550)	—
Cabloptic	1275-1325	0,5	1315	4	4,5
Corning-Glass Works	1300 1550	0,4 0,22	1300 1550	3,5 (1285-1330) 2,5 (1525-1575)	12,6 12,6
Furukawa Elec. America Inc.	1285-1330	0,4	130 ± 20	3,5 (1285-1330)	10,0
Gec Optical Fibre. Ltd. London	1300	0,4-1,1	1305	6 (1275-1325)	12
ITT Electro-Optical	1300	0,5-1	1310	3,5 (1285-1330)	5
Pirelli Cable Corp.	1300	0,4-1	—	3,5 (1285-1330)	6,4
Standard Wires & Cable Co.	1300-1550	0,5	1300	3,5 (1285-1330)	6
Fibras multimodo					
AT&T	825-1300	3,50-1,20	—	300-1100 (825) 300-1100 (1300)	—
Cabloptic S.A.	1200-1600	0,8	—	—	4,5
Corning Glass Works	850-1300	3,2	—	—	2,2
Diaguide Inc	850	3	—	—	10
Furukawa	1285-1330	0,7-1,0	—	—	10

Tabla 1. Situación actual de las fibras existentes en el mercado de los fabricantes más significativos.

queda muy por debajo del teórico de los componentes ópticos que entran en juego. La posible introducción, en un futuro no muy lejano, de componentes activos totalmente ópticos puede ser un nuevo avance que rompa la presente barrera.

La situación comercial es, por otra parte, muy significativa. Dar, en este momento, un listado de todos los fabricantes de fibras monomodo y multimodo, sería bastante difícil por su elevado número. Sí hay un hecho característico: apenas hay fabricantes europeos. La mayor parte son americanos o japoneses.

Algunos datos de la producción de los más importantes, aparecen en la tabla 1. En ella se dan valores para el margen de la longitud de onda de la transmisión, de su atenuación, de la longitud de onda para dispersión nula, de la máxima dispersión en el margen de uso y, al final, la longitud máxima que se vende en una única pieza. Como puede apreciarse, en la monomodo se llega a las 12,6 km, mientras que en la multimodo, sólo Furukawa llega a 10 km.

## OTRAS FIBRAS

Como se ha dicho en el apartado anterior, uno de los objetivos que se plantean a la vista de la figura 1 es el de ver la posibilidad de unir, en una misma longitud de onda la mínima atenuación y la mínima dispersión. Este objetivo ha iniciado la fase de ser alcanzado mediante la aparición de nuevos diseños de fibras que logran, bien un desplazamiento de la curva de la dispersión hacia una región donde los anteriores hechos coincidan o bien, haciendo que esta curva sea lo más horizontal posible y de valor casi nulo cerca del mínimo de atenuación. Son las fibras de dispersión desplazadas («dispersion-shifted fibers») y las de dispersión aplanada («dispersión-flattened fibres»). En las primeras, la zona de trabajo a la que se tiende es a la de  $1,55 \mu$  mientras que en las segundas se intenta conseguir una dispersión muy pequeña en el margen de  $1,3$  a  $1,55 \mu$ .

El diseño de ambos tipos de fibras es bastante diferente, ya que diferentes también son los conceptos en los que se basan. En las de dispersión desplazada, el efecto se logra haciendo que la suma de las dispersiones debidas al material y a la guía sea nula. En las de dispersión aplanada, la dispersión de la guía se amolda de modo que se aplane todo lo posible. En ambos casos se combinan las capas, múltiples, de núcleo y/o cubierta, sus índices de refracción y la separación entre capas. Las principales tendencias son:

- diseños de núcleos segmentados (para ambos tipos);
- núcleos de índice gradual con perfil triangular (para el primer tipo);
- perfiles en W o de doble cubierta (para ambos tipos), y
- cubierta cuádruple (para el segundo tipo).

Estos diseños son muy flexibles y pueden acomodarse a las más variadas necesidades. En general, casi todos tienen como objetivos comunes obtener un tamaño de punto razonable, de manera que se minimicen las pérdidas en las uniones, disminuir las pérdidas por microcurvaturas y desplazar la longitud de onda de corte monomodo cerca de la de dispersión nula. Algunos ejemplos de estos tipos aparecen en la figura 4.

Aparte de estas fibras, y sin entrar en las que trabajan en el IR, otro grupo ha hecho su entrada recientemente. Son aquellas cuyo fin es el de ser empleadas en sistemas de comunicación coherentes y en una familia de sensores en la que el estado de polarización de la luz es esencial. Las fibras usuales monomodo no mantienen dicho estado y, en

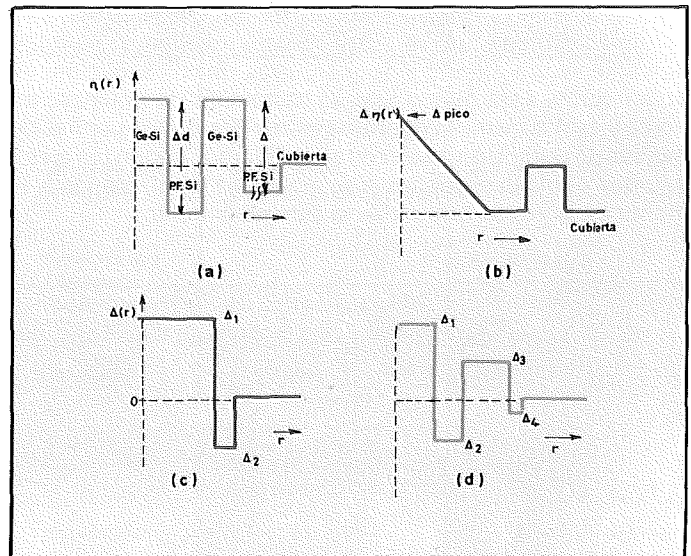


Figura 4. a) Diseño de núcleo segmentado; b) Diseño de núcleo segmentado para fibras de dispersión desplazada; c) Diseño de perfil de índice en W o de doble cubierta para fibras de dispersión aplanada; d) Diseño de cuádruple cubierta para fibras de dispersión aplanada.

consecuencia, no son válidas. Hasta el momento no se ha encontrado una fibra que sea de polarización única y por ello, la única forma en que se puede abordar el problema es la de identificar los diferentes mecanismos que dan lugar a birrefringencia y favorecerlos. Normalmente, el más usual es mediante tensiones mecánicas que pueden ser originadas, bien externamente o bien internamente, mediante la adición de regiones cercanas al núcleo fuertemente dopadas. Las primeras se obtuvieron mediante un núcleo circular de sílice rodeado de una cubierta de sección elíptica de borosilicato y de sección mucho menor que la total de la fibra. Posteriormente se desarrollaron otros tipos de geometrías casi planas o con regiones de tensión aislada como, por ejemplo, los tipos PANDA («Polarization-maintaining AND Absorption-reducing») de la figura 5.

De hecho son dos los tipos de fibras relacionadas con la polarización. El tipo anterior constituye el grupo de las fibras capaces de mantener la polarización («polarization-maintaining fibers»). En él, dos direcciones de polarización

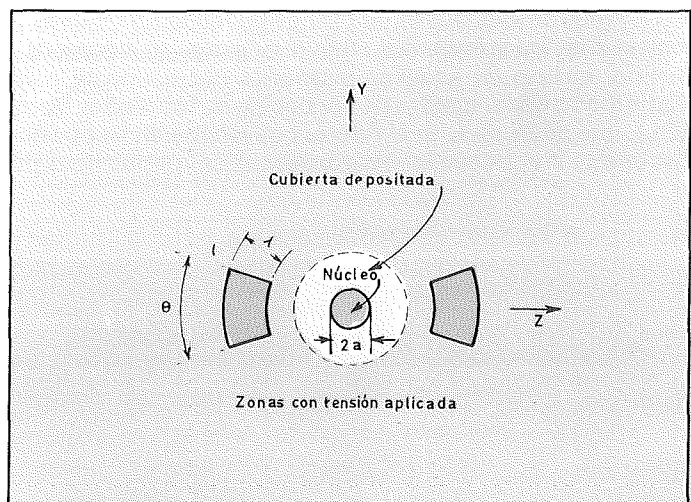


Figura 5. Esquema de una fibra tipo PANDA. Valores típicos:  $2a=4 \text{ m}$ ,  $t/a=56$ ;  $\theta \approx 90^\circ$ .

ortogonales se propagan a su través con un acoplamiento mínimo. En cambio, el otro grupo existente permite, únicamente, la transmisión con una única dirección de polarización. Este nuevo tipo se denomina de polarización única y está constituida por una estructura cuyos perfiles de índices de refracción aparecen en la figura 6, según los ejes x e y, que coinciden con los ejes mayor y menor, respectivamente de la elipse que rodea el núcleo circular.

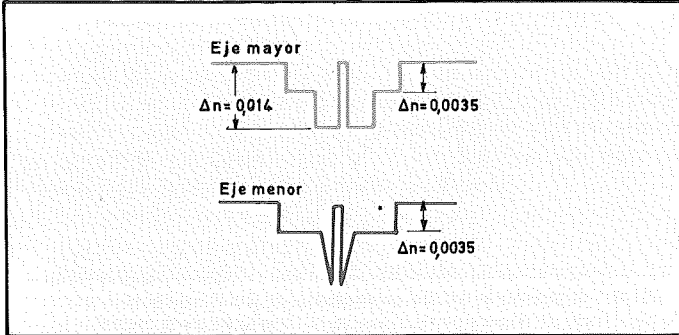


Figura 6. Perfil del índice de refracción, según las direcciones de los ejes mayor y menor de su cubierta.

Como puede comprenderse, muchos son los problemas que rodean a todos los tipos de fibras anteriores y algunos de ellos no están todavía resueltos en su totalidad. Uno es, por ejemplo, el de su fabricación. Otro, el de la teoría que gobierna la propagación de la radiación en las estructuras más complejas. Y, sobre todo, el más importante: el de obtener, realmente, la fibra que sea capaz de mantener al 100 % la polarización.

### COMPONENTES ACTIVOS

Como se ha mencionado anteriormente, la aparición de nuevos tipos de fibras y las condiciones, mucho más exigentes, que se demandan a los nuevos sistemas, han obligado a la realización de componentes activos, principalmente láseres, que hace muy pocos años no estaban ni en fase de desarrollo previo. La preferencia de las fibras monomodo sobre las multimodo ha desplazado a éstas casi únicamente a enlaces de muy baja velocidad y de muy corta distancia. Con ello, el uso de LED se ha reducido también a límites casi insospechados. Por otra parte, su comportamiento, incluso en aquellos diseñados expresamente para fibras monomodo, queda tan por debajo de los diodos láser, (DL), que difícil será, en el futuro, que recuperen su puesto. En la tabla 2 aparecen las características de los dos tipos de

	LED de superficie	LED de borde	Láser
— Potencia suministrada a fibras monomodo	—30	—10	—5
— Velocidad (Mbit/s)	200	1000	10000
— Refrigeración	aletas	aletas	aletas
— Costo del transmisor	bajo	medio	medio
— Fiabilidad	alta	media	media
— Margen (km)	1	20	20
— Margen de temperatura °C	—40 a +70°C	—40 a +70°C	—40 a 70°C

Tabla 2. Comportamiento de los diferentes emisores de luz.

LED en uso y los DL. Como puede apreciarse, salvo en el caso de la fiabilidad, en los demás el DL está siempre por encima. Un hecho que, hasta hace no mucho, ponía a los LED por delante, el del margen de temperatura, está fuera ya de cuestión. Queda únicamente el tema del precio en el cual, todavía, los LED están bastante por debajo de los DL.

Otro hecho que aparece también, en paralelo, es el de la dispersión cromática o del material, comentada antes. Una forma alternativa de solventarla, sin recurrir a las fibras especiales, es la del uso de láseres que emitan una única frecuencia, sin los saltos que ocurren usualmente en los comerciales. El desarrollo de los láseres de realimentación distribuida (DFB) y de los C3 está contribuyendo grandemente a resolver este problema. Estos láseres, aunque todavía en fase de laboratorio, se espera que aparezcan muy pronto en el mercado. La competencia entre láseres monofrecuencia y fibras de dispersión desplazada inicia sus primeros pasos. En aquellos, los resultados obtenidos más recientemente dan unas anchuras espectrales de la línea emitida del orden de 10 MHz. Este valor puede ayudar al problema de la dispersión cromática pero, evidentemente, no es bastante para las comunicaciones coherentes. En el artículo dedicado a ellas se comentará este hecho, igual que en el de los sensores. Resultados obtenidos en los últimos meses, mediante técnicas de realimentación externa, hacen descender el valor anterior a unos 10 kHz.

En general, una comparación de todos los parámetros comentados antes, puede verse en la figura 7. En ella se comparan el ancho de banda, la potencia acoplada a la fibra, el costo del emisor y el de los circuitos de ataque para los tres

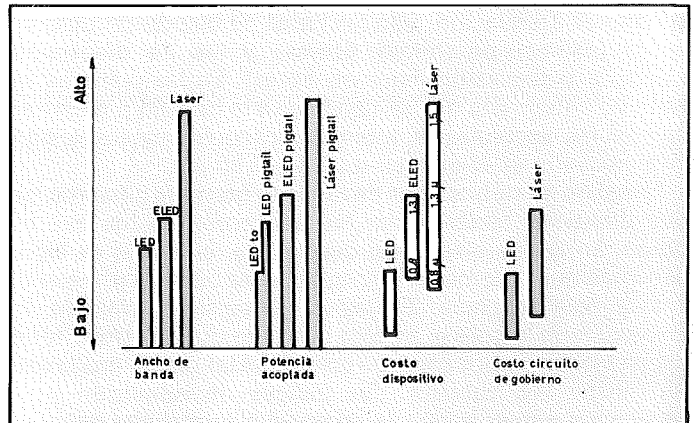


Figura 7. Características relativas de distintos emisores.

tipos más usuales de emisores, esto es, LED, ELED (LED que emiten por el borde, en contra de la emisión por la superficie, como es en los normales) y diodos láser. En el caso del acoplo de luz a la fibra aparecen los casos más extendidos: aquellos en los que el dispositivo se monta en un encapsulado convencional tipo TO y en los que una pequeña fibra aparece ya unida al láser (tipo «pigtail»).

Quedan unos breves comentarios sobre la situación de los receptores. Pero con ellos, los problemas que existen son ya de mucha menor cuantía que los de los emisores. Puede decirse que están, en este momento, en una situación bastante cómoda con respecto al resto de los componentes para CO. A modo de ejemplo, puede verse la figura 8, en la que se da la respuesta de un diodo pin de estructura heterogénea. Como puede apreciarse, está muy por delante de lo que que los emisores dan en la actualidad.

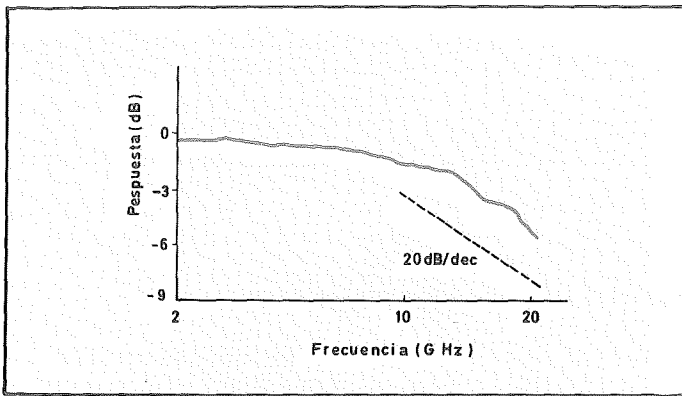


Figura 8. Respuesta de un diodo pin de estructura heterogénea.

Finalmente, el tema con el que debería concluirse este apartado debería ser el de los componentes optoelectrónicos integrados. Pero dado que aún no está cercana su aparición en el mercado no ha parecido adecuado su introducción aquí.

## REDES DE AREA LOCAL (LAN)

Hasta hoy, las redes locales (LAN) han estado trabajando con velocidades medias, comprendidas entre 1 y 15 Mb/s, y en superficies geográficas de tamaño no muy grande. Usualmente, las distancias que cubrían no solían superar el kilómetro. Además de ello, y como requisito paralelo, aunque fundamental, se encontraba el de un fácil mantenimiento y una gran versatilidad para ser modificadas de acuerdo con las necesidades.

Pero la situación actual parece va a cambiar drásticamente. Según se estima, las velocidades habrán de llegar a los Mb/s con longitudes de tendido de varios kilómetros. Y para ello, como es lógico, la única solución que promete viabilidad es la que puede desarrollarse con fibras ópticas. Los problemas de velocidad y de distancia de tendido no son tales, y técnicas como el multiplexado por división en longitudes de onda (WDM) dan la posibilidad de ampliación y modificaciones de la arquitectura tomada, según sea necesario.

Pero una serie de pequeños problemas han dificultado hasta ahora un rápido desarrollo de las LAN ópticas. El primero, y obvio, el de que al ser su configuración de enlaces con conexiones múltiples, los componentes requeridos son muy diferentes de los empleados en las redes de larga distancia y punto a punto. Estos dispositivos comienzan ahora a aparecer en el mercado a precios asequibles.

El segundo se deriva de que, al menos las redes de paquetes de datos, trabajan asincrónicamente, en contraste con la forma de trabajo sincrónica de los enlaces telefónicos o de larga distancia. En consecuencia, es necesario proteger al sistema contra secuencias de paquetes enviados fuera de orden y que, de otra manera, podrían echar abajo los intercambios en tiempo real, como la voz o los datos de control.

En tercer lugar, las redes requieren protocolos de control de acceso que regulen la entrada de los diferentes usuarios que compartan la malla.

Una última complicación se deriva de que estas redes necesitan un alto número de puntos de conmutación local, hecho que en las redes de largas distancias llevan a cabo

<i>Función</i>	<i>Requisito</i>	<i>Capacidad</i>
— Teléfonos	64 Kbit/s cada uno de los 1000 usuarios con un 25 % de uso simultáneo.	16 Mbit/s
— Datos de baja velocidad	9000 bit/s 500 usuarios en los momentos de pico	4,8 Mbit/s
— Datos de alta velocidad Facsimil	56 Kbit/s cada uno o más alto	8 a 10 Mbit/s
Ordenador	800 Kbit/s 10-50 usuarios	
— Vídeo Imagen fija	128-512 Kbit/s 2 usuarios	1 Mbit/s
Imagen móvil	NTSC a 6 MHz CCTV a 20 MHz	Opcional con canales WDM separados

Tabla 3. Requisitos de transmisión para un edificio típico de varios propietarios en 1990.

sistemas electrónicos altamente sofisticados y de elevado coste. El rebajar este último y simplificar aquellos, es el objetivo de las nuevas LAN.

Si a todo lo anterior se añaden los requisitos que pueden plantear los usuarios, queda como condicionante para, por ejemplo, un edificio de varios propietarios, el conjunto de los siguientes valores que aparecen en la tabla 3, y que es una perspectiva aproximada para 1990. La única forma de dar respuesta a esta demanda es, como es lógico, con fibras ópticas.

La tabla 4 muestra un cierto número de características de uso, de acuerdo con las necesidades de usuarios normales, de los LAN de fibras. Todos ellos serán satisfechos en la próxima generación de redes gracias a su forma de trabajo por conmutación de paquetes, esto es, por dispositivos que trabajen como conmutadores de circuitos dando canales lógicos de principio a fin.

Por otra parte, y dado que las topologías a emplear, son iguales a las en uso hasta ahora, esto es, en anillo, en bus y en estrella, pueden esbozarse ya los componentes ópticos que serán necesarios en cada caso. En forma sintetizada

— Comportamiento entre extremos	Retardos no detectables $10^{-10}$ /milla BER Transmisión banda ancha
— Gasto de señalización.	Mínimo «hand shaking» (ACK's y NACK's eliminados)
— Control de flujo	No aplicable para circuitos virtuales. Control de origen aplicado para datos ocasionados
— Hardware vs. Software	Inteligencia de supervisión en cada nudo
— Comportamiento con alta carga	Respuesta plana a todas las cargas ofrecidas

Tabla 4. Características de una red de fibras ópticas.

Topología de la red	Tx Óptico	Rx Óptico	Conectores	Acopladores estrella	Acopladores direccionales	Conmutadores by pass
Anillo	X	X	X		X	X
Estrella	X	X	X	X		
Bus en línea	X	X	X		X	X

Tabla 5. Resumen de componentes ópticos para topologías LAN.

aparecen en la tabla 5. De todos ellos, sin duda, el componente clave es el conector ya que ha de garantizar la compatibilidad mecánica entre los restantes componentes del sistema. Sus requisitos normales son de unos 0,8 a 1,5 dB de pérdidas de inserción y una alta estabilidad para trabajar entre  $-30$  y  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Por lo que respecta a los acopladores, es imposible dar un acoplador único, ya que necesita amoldarse a cada situación. En general, dos son los tipos que aparecen: los invariantes con la longitud de onda y los dependientes de ésta. No podemos entrar aquí en el detalle de su tecnología, pero puede decirse que en el mercado existen ya la mayor parte de los necesarios, desde 1:1 a 1:10. Las pérdidas usuales se encuentran entre 1 y 2 dB y el aislamiento entre canales está entre 15 y 40 dB, para el caso de los direccionales. Para los de tipo en estrella, estos valores pasan a  $\pm 0,7$  a 4 dB y, de 1 a 4 dB.

En los WDM, en donde se usan ya componentes más sofisticados que incluyen redes de difracción, prismas y filtros dicróicos, las pérdidas pueden estar entre 1 y 45 dB y acoplamientos de entre 20 y 50 dB; las ventanas de longitud de onda, son de 2 a 4.

Por lo que respecta a los conmutadores, se suelen emplear dos métodos, de fibra móvil y de espejo móvil. En ambos casos las pérdidas se encuentran entre 1,0 y 2,5 dB y el aislamiento entre canales entre 40 y 60 dB.

El estado actual de las redes LAN es, no el óptimo, pero sí presenta indicios de que pronto se acercará a él. En forma ya comercial, existen enlaces que consisten en módulos emisores y receptores para 10 Mb/s, 20 Mb/s y hasta 200 Mb/s. Con ello se pueden satisfacer las demandas poco exigentes y las más estrictas. Los enlaces de 10 a 20 Mb/s trabajan sobre redes de 4 km usando LED y fotodiodos pin a 830 nm. Son compatibles con fibras 50/125, 85/125 y 100/140 y usan conectores DIN y SMA. Ambos módulos transmisores pueden acoplar  $-12$  dBm de potencia óptica en una fibra 100/100  $\mu\text{m}$ . Las sensibilidades del receptor son  $-35$  dBm y  $-30$  dBm para los receptores de 10 y 20 Mb/s, respectivamente. La ganancia del sistema es así de 23 y 18 dB para los módulos respectivos.

Para conseguir velocidades más altas y mayores distancias de enlace, se emplean LED y fotodiodos pin a 1300 nm. Longitudes de hasta 2 km son usuales, con fibras multimodo 50/125  $\mu\text{m}$  y 85/125 usando conectores DIN. El transmisor acopla  $-21$  dB de potencia óptica, siendo la sensibilidad típica del receptor de  $-31$  dBm, dando así al sistema una ganancia de 10 dB. El margen dinámico del receptor es de 20 dB, lo que permite un alto grado de flexibilidad en el sistema. Entre las aplicaciones de alta velocidad en uso se encuentran las redes de ordenadores y las comunicaciones entre discos y ordenador.

Una panorámica muy completa de la situación actual, con una amplia extensión de todo lo expuesto anteriormente puede verse en el número de junio de 1985, del IEEE Journal of Lightwave Technology, dedicado casi exclusivamente a las LAN.

## COMUNICACIONES SUBMARINAS

Dada la velocidad con que se han desarrollado las comunicaciones ópticas por tierra podría parecer que las submarinas siguieran igual camino. Pero, lógicamente, no ha sido así. La tecnología necesaria es aquí mucho más exigente dado el alto costo que requeriría solventar la más mínima avería. Un sistema bajo agua debe de tener una fiabilidad varios órdenes de magnitud por encima de la bajo tierra. La meta a obtener es la de que el primer cable submarino tendido tenga menos de tres reparaciones en los 25 años de vida previstos para el sistema. Esto lleva a que los componentes tengan una vida media muy superior a la usual en otras condiciones. Un detalle aproximado aparece en la figura 9.

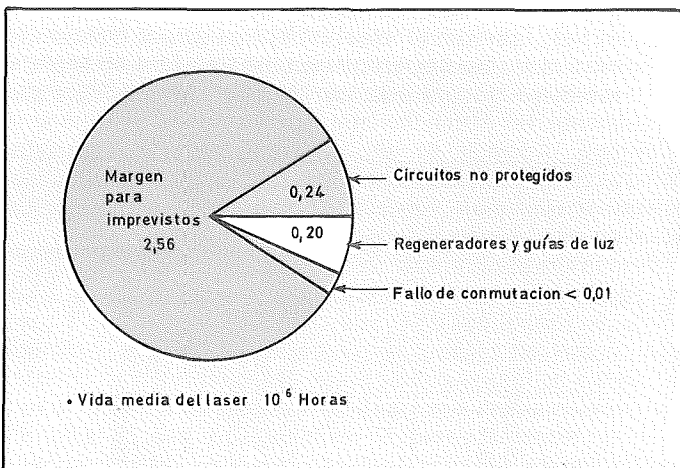


Figura 9. Fiabilidad del sistema SL para un número inferior a tres reparaciones en 25 años.

Además de lo anterior, a fin de evitar el número de repetidores, los diodos láser pasan a ser obligados, así como las fibras monomodo. Con el fin de minimizar el número de componentes activos, ha de llegarse a un muy alto nivel de integración. Igualmente, una cierta redundancia es casi obligada en los componentes críticos.

Finalmente, y dadas las operaciones de tendido a que se somete al cable, así como a las variables condiciones del entorno en que se va a encontrar, los parámetros mecánicos y las características ópticas derivadas de variaciones de aquellos han de ser medidos y cuidados mucho más que en las de tendido terrestre.

No es extraño, en consecuencia, que lo obtenido hasta aquí no sea equiparable a lo existente en otras áreas. Pero la meta del primer cable transatlántico está ya muy próxima; en concreto, para 1988 parece pueda estar en servicio el primero, compuesto por ocho cables telefónicos (TAT-8) y unirá Tuckerton, en EE.UU., con Penmarch, en Francia, y Widemouth, en Gran Bretaña.

Un esquema de su trazado aparece en la figura 10. El

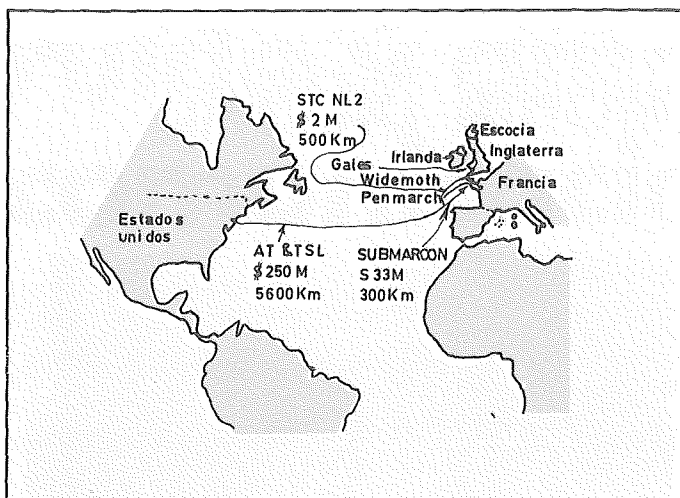


Figura 10. Sistema submarino TAT-8.

sistema seleccionado, el SL, lo fue por los copropietarios del TAT-8, que suministran el 87 %. El resto de los copropietarios aparece en las mismas figuras así como el importe monetario con que cada uno contribuye. El sistema SL tiene una garantía de 10 años, mientras que los sistemas francés y británico, el NL2 y el S280, de STC y de Submarcon, lo están por 2 años.

Otro sistema SL, equivalente será instalado en el Pacífico, para usos domésticos, entre Hawaii y la costa oeste de Estados Unidos, mientras que un tercero, también SL, conjuntamente con otros dos, KDD y OS-280 M, unirá Hawai con Japón y Guam.

Las características del sistema SL serán: transmisión a  $1,3 \mu$ , diseño de cable con fibras de alta rigidez unidas fuertemente a la estructura de aquél; transmisores con láseres BDH; circuitos integrados de microondas, de silicio, redundancia tanto para regeneradores y fibras y, finalmente, un muy robusto diseño mecánico.

de fibras de trabajo, para la transmisión y la supervisión, más un par adicional en redundancia. El cable lleva, además, un conductor de 1,6 A para la alimentación de los repetidores. Estos están compuestos de seis regeneradores optoelectrónicos más los correspondientes de reserva.

El equipo terminal puede apreciarse en la figura 11, en la que con las siglas SCOUT se designa al sistema de transmisión submarina de control y vigilancia (Surveillance and Control of the Undersea Transmission system). La tensión requerida para el sistema es de  $\pm 7500$  V.

La fibra empleada es del tipo de cubierta hendida, como la de la figura 4c, que permite una mayor versatilidad y flexibilidad en el diseño de los parámetros de propagación.

## CONCLUSIONES

Quedarían bastantes temas que considerar aquí, pero parece más adecuado que sean tratados, con más detalle, en artículos dedicados expresamente a ellos. Así, los temas de las comunicaciones coherentes y de los sensores, los de propagación por fibras y los de amplificación serán tratados en otras páginas de este mismo número. Otros, como los de las fibras en el IR, aún no ha parecido conveniente introducirlos, porque queda bastante para que lleguen a ser comerciales.

Una sola cosa es segura: que este pequeño estudio, en muy poco tiempo, quizás el próximo año, se habrá quedado completamente obsoleto. Todo lo dicho hasta aquí será sólo un recuerdo y nuevas perspectivas habrán modificado toda la panorámica de las comunicaciones ópticas. ●

*José Antonio Martín Pereda. Doctor Ingeniero de Telecomunicación y Licenciado en Ciencias Físicas, realizó sus estudios de Doctorado en la Colorado State University de Fort Collins, Colorado, desde 1968 a 1971. Catedrático de Tecnología Electrónica y Electrónica Cuántica de la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid desde 1975, ha dedicado su actividad principal al estudio de temas relacionados con el láser y sus aplicaciones desde 1968. Su interés principal se ha centrado recientemente en el estudio de dispositivos electroópticos de modulación, deflexión y control de haces láser para diferentes aplicaciones y en especial para Comunicaciones Ópticas. En la actualidad se encuentra desarrollando una serie de estudios en torno al desarrollo de dispositivos biestables ópticos y sus posibles aplicaciones en el campo de los Ordenadores Ópticos y de las Comunicaciones Ópticas. Ha sido nombrado recientemente miembro del Grupo de trabajo de la ESA (Agencia Espacial Europea) creado en el presente año de «Space Laser Sounding and Ranging» y cuya función específica será la de definir las políticas que en este campo desarrollará dicha Agencia Espacial en los próximos años. Asimismo, es en la actualidad presidente del Comité Técnico de la European Conference on Optical Communications (ECOC, 86) que tendrá lugar en Barcelona en septiembre de 1986.*

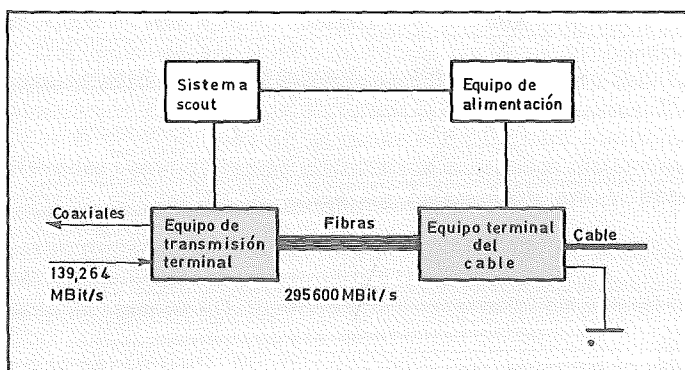


Figura 11. Terminal SL.

Un sistema SL de pequeñas dimensiones, y con carácter experimental, fue instalado en 1985, en las islas Canarias y ha sido ya objeto de amplios comentarios en la prensa especializada, por lo que no parece necesario repetirlos aquí. Únicamente parece indicado dar unas pequeñas ideas de cómo es, en grandes líneas, el sistema SL a instalar.

El sistema SL está compuesto de equipo sumergible y terminal. El sumergible está compuesto por el cable submarino y los repetidores, constando aquel de dos pares