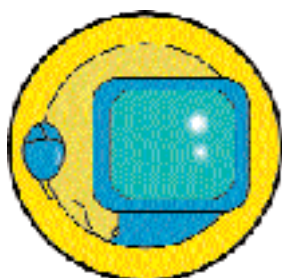


Una supercarretera de cristal: la autopista de la información



La era del internet hace que a veces olvidemos la compleja tecnología que se encuentra detrás de la red global de computadoras. La fibra óptica, el láser y el procesamiento de datos son parte de los ingredientes que permiten su existencia.

Ramón Gutiérrez-Castrejón

¿DE QUÉ ESTÁ HECHA LA AUTOPISTA DE LA INFORMACIÓN?

El conjunto de llamadas telefónicas, video-conferencias, correos electrónicos, archivos de imágenes, texto y datos en general que enviamos y recibimos desde una computadora constituye lo que desde un punto de vista técnico se conoce como información. La necesidad del ser humano de intercambiar dicha información ha dado por resultado la creación de una red muy amplia e intrincada de vías por las que la información circula, similar a la red de carreteras que utilizamos para transportarnos de un lugar a otro. Con base en esta analogía, a esta red se le denomina supercarretera de la información, *information superhighway*, *Infobahn* o *info strada*, de acuerdo a la preferencia de quien utiliza el término (el término *information super-*

highway fue acuñado por el ex-vicepresidente estadounidense Al Gore a principios de los noventa). A diferencia de las carreteras en que circulan automóviles y camiones, esta novedosa red de carreteras no está construida de tierra, asfalto, o concreto, sino que, dependiendo del tipo de vía de que se trate, está hecha de fibra óptica, cable de cobre o cable coaxial. Así, por ejemplo, los cables de cobre y coaxial constituyen la materia prima de que están hechas las carreteras “vecinales” de la información, es decir, aquellas carreteras que interconectan nuestra casa con la central de la compañía telefónica más próxima. La longitud de estas carreteras no excede de algunos cuantos kilómetros, y en ellas no se alcanzan grandes velocidades. En cambio, las autopistas de la información, propiamente dichas, están construidas de fibra óptica. Interconectan centrales telefónicas, ciudades, países, e incluso continentes entre sí. Para darse una idea de la importancia que tiene la fibra óptica como elemento indispensable en esta red de autopistas, baste mencionar que hacia finales de 1999 se encontraban instalados más de 100 millones de kilómetros de fibra óptica alrededor del mundo.

Algunas fibras ópticas utilizadas para transmitir información están hechas de plástico, pero la gran mayoría están fabricadas del mismo material del que está hecho el vidrio de nuestras ventanas, es decir, sílice (dióxido de silicio). Durante el proceso de fabricación de una fibra óptica, el sílice no se mezcla con sosa o cal, como se hace con un vidrio de ventana, sino que únicamente se le agregan pequeñas cantidades de algunos otros materiales para controlar sus propiedades físicas. Así pues, podemos pensar en una fibra óptica como un hilo de vidrio no más grueso que un cabello humano (de 200 micrómetros, o milésimas de milímetro, de diámetro, aproximadamente) y que es sumamente transparente, o sea que casi no absorbe la luz, a diferencia de, por ejemplo, unos anteojos oscuros de playa, cuya función es, precisamente, absorber parte de la luz del sol para así proteger nuestros ojos. La idea original de emplear una fibra de vidrio como medio de transmisión de información guiada se le atribuye a Charles Kao, un inglés nacido en China. Desafortunadamente en 1966, cuando Kao realizó su propuesta, un experimento de transmisión de información resultaba prácticamente imposible, entre otras razones porque el vidrio disponible en aquel entonces no era suficientemente puro. Fue hasta 1970 que la primera fibra óptica con capacidad de transmitir información a lo largo de varios kilómetros fue producida por una compañía especializada en la fabricación de productos de vidrio, mejor conocida en aquel entonces por sus refractarios para cocina hechos de cerámica de vidrio y *pyrex*.

¿EN QUÉ CIRCULA LA INFORMACIÓN?

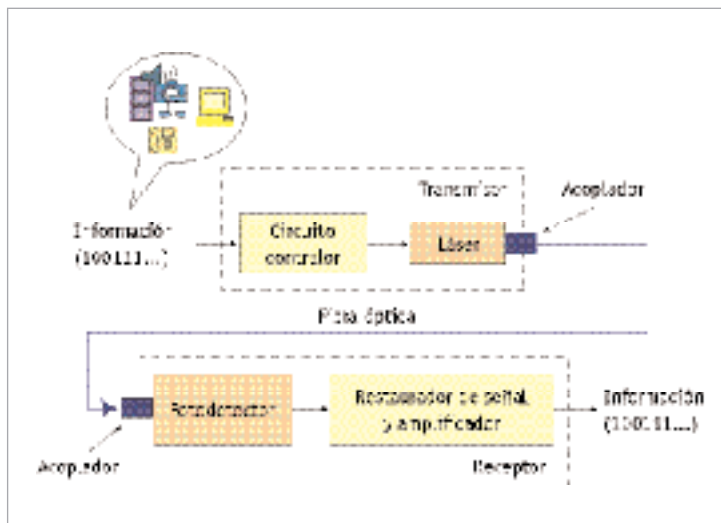
En la “autopista de la información”, hecha prácticamente de vidrio, la información no se transporta sobre objetos diminutos, sino utilizando rayos de luz que se propagan a lo largo de la fibra óptica hasta alcanzar su destino. Los rayos utilizados se llaman infrarrojos, y aunque son invisibles a nuestros ojos tienen la característica de poder viajar a lo largo de una fibra óptica por decenas de kilómetros sin disminuir apreciablemente su brillantez, gracias a lo cual podemos transmitir la información a través de grandes distancias. Dicho en otras palabras, se utilizan rayos infrarrojos porque la fibra óptica es prácticamente transparente a ellos. El que los seres humanos seamos incapaces de percibir la luz infrarroja no representa un problema, ya que podemos utilizar un aparato llamado fotodetector para transformar estos rayos invisibles en una corriente eléctrica, la cual puede observarse en un osciloscopio o apar-

to similar. Los fotodetectores generalmente se encuentran próximos a los puntos de la red en que se recibe la información, ya que ahí es donde principalmente es necesario transformar estos rayos en fragmentos de información susceptibles de ser comprendidos por el ser humano. La figura 1 muestra un sistema de transmisión muy básico, formado por un transmisor, un medio de transmisión y un receptor. En los sistemas ópticos, el transmisor es una fuente de luz, como un láser, el medio de transmisión es una fibra óptica, y el receptor está constituido principalmente por un fotodetector.

Los rayos infrarrojos que se propagan a lo largo de la fibra son emitidos por un láser hecho de material semiconductor. Los rayos se “inyectan” en la fibra óptica mediante un acoplador, de tal manera que el láser transfiera la mayor cantidad posible de luz a la fibra. Sin embargo, para lograr esto, el acoplamiento entre el láser y la fibra debe ser tal que el rayo de luz incida con un ángulo mayor al que se conoce como “ángulo crítico”. Esto garantiza que el rayo sea guiado por la fibra óptica a lo largo de su recorrido, aun cuando ésta no siga



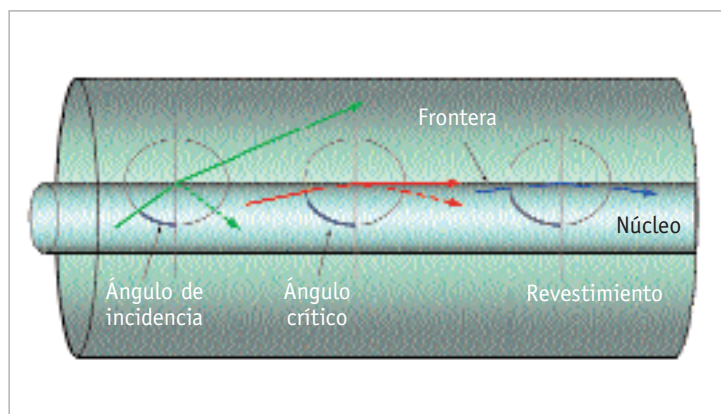
Figura 1. Sistema básico de transmisión conocido como enlace punto-punto, que en el caso de sistemas ópticos consta de un láser, una fibra óptica y un fotodetector, interconectados mediante acopladores ópticos.



siempre una línea recta. El concepto de ángulo crítico puede comprenderse más claramente ayudándonos de la figura 2, que muestra el corte longitudinal de una fibra óptica. Ésta se compone de un tubo de vidrio central llamado núcleo que a su vez está recubierto por otra capa de vidrio llamada revestimiento.

Durante el proceso de fabricación de una fibra óptica se producen de manera deliberada variaciones en la composición de los materiales que forman el núcleo y el revestimiento, logrando así que en este último la luz viaje un poco más rápidamente que en el primero; es decir, el revestimiento se fabrica de modo que presente un menor índice de refracción que el núcleo. La razón de esto es contener dentro del núcleo a los rayos que se propagan a lo largo de la fibra óptica. Efectivamente, gracias a un fenómeno físico llamado *reflexión interna*, cuando un rayo de luz intenta cruzar de un medio con alto índice de refracción (como el núcleo) hacia uno con bajo índice de refracción (como el revestimiento), éste es reflejado en la frontera entre los medios, tal y como sucede con el rayo azul de la figu-

Figura 2. Corte longitudinal de una fibra óptica compuesta por núcleo y revestimiento. El diagrama de rayos central ilustra el concepto de ángulo crítico. En el diagrama de la izquierda el rayo incide en la frontera con un ángulo menor al crítico, escapando así del núcleo. En cambio, en el diagrama de la derecha, el rayo incide con un ángulo mayor al crítico, permaneciendo así confinado en el núcleo de la fibra.



ra 2, donde, debido a la reflexión interna, el rayo permanece confinado en el núcleo de la fibra.

Sin embargo, el fenómeno de reflexión interna no siempre se presenta de manera total, ya que en ocasiones solamente una parte del rayo atraviesa la frontera, mientras que el resto del rayo es reflejado. Esto se ilustra con las líneas sólida y punteada, que representan al rayo verde de la figura 2, y que corresponden al rayo transmitido y reflejado, respectivamente. En este caso la reflexión interna es parcial, permitiendo que la mayor parte del rayo escape para siempre de la fibra. La parte restante, que se refleja hacia el núcleo, posee tan poca brillantez que es prácticamente despreciable. Lo que determina si ocurrirá un fenómeno de reflexión interna total o parcial es el ángulo con que el rayo incide en la frontera que forman núcleo y revestimiento. Así pues, si el rayo incide con un ángulo mayor al ángulo crítico, como ocurre con el rayo azul de la figura 2, éste experimentará reflexión interna total, continuando entonces su recorrido por la fibra. En cambio, si el rayo incide con un ángulo menor al crítico, como ocurre con el rayo verde de la misma figura, éste experimentará reflexión interna parcial, escapando entonces para siempre de la fibra. El ángulo crítico se define entonces como el ángulo límite en que el rayo transmitido se propaga paralelamente a la frontera entre núcleo y revestimiento, tal y como ilustra el rayo rojo de la figura 2. La existencia del ángulo crítico se debe al fenómeno conocido como refracción de la luz, en el cual un rayo de luz sufre una pequeña desviación de dirección al atravesar la frontera entre dos medios con índice de refracción distinto, tal y como ocurre en la frontera entre núcleo y revestimiento. Esta desviación es apreciable en el rayo verde (sólido) de la figura 2. Conforme el ángulo de incidencia del rayo aumenta, el rayo refractado se aproxima a la frontera entre los dos tipos de vidrio, hasta que para un cierto valor del ángulo de incidencia (el ángulo crítico) el rayo hasta ahora transmitido pasa a formar parte del rayo reflejado.

El secreto, para mantener un rayo confinado en una fibra óptica es, además de hacer incidir el rayo dentro de un intervalo apropiado de ángulos, diseñarla de modo que el índice de refracción del material que compone el núcleo sea mayor al del material que compone el exterior de la fibra. Partiendo de esta idea, los fabricantes de fibras ópticas han creado nuevos diseños de fibras, entre los que se encuentra aquél en que la disminución del índice de refracción del centro hacia el exterior de la fibra varía gradualmente. Este diseño le da a la fibra características físicas novedosas que facilitan la transmisión de información.

¿CÓMO SE TRANSMITE LA INFORMACIÓN?

Para que la información pueda transmitirse a lo largo de una fibra óptica es muy conveniente que dicha información se encuentre *digitalizada*, es decir, que se encuentre representada por una secuencia de ceros y unos, a los que se les llama *bits*. Esta manera de representar la información no es exclusiva de las telecomunicaciones, ya que también la información que contienen las computadoras, como fotos o cartas, está almacenada y es procesada como una secuencia de ceros y unos. De hecho, la

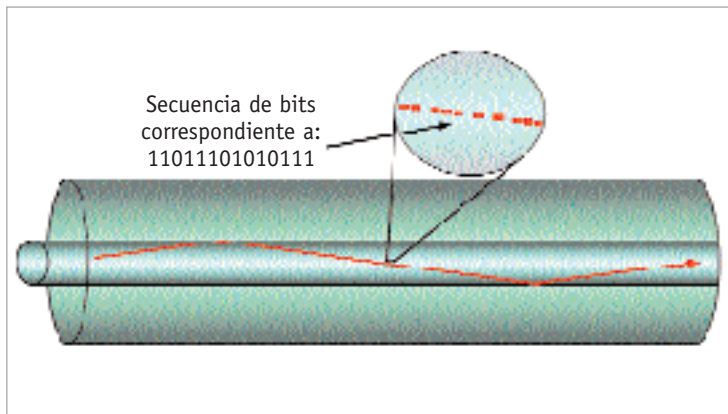
Para que la información
pueda transmitirse a lo largo
de una fibra óptica
es muy conveniente
que dicha información
se encuentre *digitalizada*,
es decir, que se encuentre
representada por
una secuencia de ceros
y unos

labor de los programas de computación es, en buena medida, permitirnos observar esta secuencia de bits de una manera comprensible al ser humano, o sea como una secuencia de tonos de gris en una fotografía en blanco y negro, o como un conjunto de letras, en el caso de una carta. Lo mismo sucede con los discos compactos, que almacenan canciones o información en general en formato digital. El reproductor de discos compactos tiene, pues, como finalidad convertir la secuencia de ceros y unos que está almacenada en el disco compacto en una secuencia de notas musicales y voz que escuchamos cuando son emitidas por las bocinas del aparato. El proceso inverso también es necesario, por ejemplo cuando realizamos una llamada telefónica. En este caso, mediante el uso de un dispositivo que digitaliza nuestra voz se crea una secuencia de bits que se transmite a lo largo de una fibra óptica. En el otro extremo de la línea se da un proceso similar al de la reproducción del disco compacto, ya que la secuencia de bits que representa nuestra voz se

transforma nuevamente en una señal susceptible de ser reproducida por el auricular, la cual es muy parecida a nuestra propia voz.

Mediante la representación de la información como secuencias de ceros y unos, la transmisión de información utilizando un rayo de luz derivado de un láser es relativamente simple. Una manera de hacerlo es asociando los unos de la secuencia al estado en que el láser emite luz, y los ceros al estado en que no emite luz. Mediante este proceso, llamado *modulación*, podemos transmitir cualquier secuencia de ceros y unos con tan sólo alternar entre los dos estados del láser. Por convención, cada bit de la secuencia tiene una duración fija, que es la misma para todos los bits. Durante este intervalo de tiempo el láser puede emitir o no emitir, según sea el valor (0 ó 1) del bit en cuestión. De esta manera, si quisiéramos transmitir la secuencia 1001110101, el rayo derivado del láser estaría formado por la siguiente combinación de estados en que el láser emite (-) y no emite (): - - - - -. Este razonamiento nos lleva entonces a pensar que los rayos que se propagan en una fibra óptica no son precisamente continuos, sino más bien una secuencia de pequeños espacios y rayos cortos que representan a los bits de información, tal y como se muestra en la figura 3. Estos rayos tienen en realidad una longitud microscópica, correspondiente a la distancia que la luz recorre en un intervalo de tiempo extremadamente corto, o sea, la duración de un bit. Por ejemplo, si consideramos los mejores sistemas comerciales que operan hoy en día, los cuales transmiten 10 mil millones de bits cada segundo, el intervalo temporal que le correspondería a cada bit tendría una duración de 0.0000000001 segundos (una diezmilmillonésima de segundo). Esto quiere decir que también el láser que produce el rayo, o en su defecto, el modulador externo, debe tener la capacidad de alternar entre los estados de emisión y no emisión en un intervalo de tiempo menor a una diezmilmillonésima de segundo.

Figura 3. Propagación de un rayo en una fibra óptica. Un acercamiento al rayo nos permite distinguir que no es continuo, sino más bien una secuencia de espacios y rayos cortos que representan a los bits de información.



De ahí que las especificaciones de fabricación de estos componentes sean muy estrictas. A la cantidad que caracteriza el número de bits que un sistema de telecomunicaciones puede transmitir en un segundo, se le llama *tasa de bits*. En el ejemplo anterior, la tasa de bits correspondería a 10 gigabits por segundo (el prefijo “giga” significa mil millones).

Una de las ventajas que ofrece la fibra óptica sobre, por ejemplo, el cable coaxial, es precisamente la gran cantidad de bits que se puede transmitir a través de ella en un tiempo determinado. Efectivamente, mientras que un cable coaxial no puede transmitir más de 200 millones de bits cada segundo, en una fibra óptica se pueden llegar a transmitir, en principio, más de un millón de millones de bits cada segundo, o sea, mil gigabits por segundo. Desafortunadamente, la tecnología de que disponemos actualmente no nos permite explotar la capacidad de transmisión tan grande que la fibra óptica nos ofrece, por lo que algunos de los mejores laboratorios del mundo están investigando para desarrollar dispositivos como láseres y fotodetectores que operen cada vez más rápidamente, para así beneficiarnos plenamente de las cualidades de la fibra óptica. Lo anterior también explica por qué las autopistas de la información con gran tráfico de bits están hechas de fibra óptica, mientras que las carreteras vecinales, hasta hoy con un tráfico moderado de bits, permanecen hechas de cable coaxial o de cobre.

Una de las ventajas que ofrece la fibra óptica sobre, el cable coaxial, es precisamente la gran cantidad de bits que se puede transmitir a través de ella en un tiempo determinado

AUTOPISTAS MULTICOLORES

Aun cuando pudiera parecer que la tasa de transmisión de 10 mil millones de bits cada segundo con la que los mejores sistemas de telecomunicaciones operan hoy en día fuera suficiente para satisfacer nuestra necesidad de intercambio de información, la realidad es que el continuo incremento en la demanda de nuevos servicios de telecomunicaciones ha hecho que en las redes de mayor tráfico esta tasa de transmisión no baste. La voracidad de bits de nuestra sociedad, recientemente denominada “sociedad de la información”, se ha incrementado en gran medida con el advenimiento del internet. El individuo de esta incipiente sociedad requiere de información donde quiera que ésta esté, desde cualquier punto en que se encuentre, en el momento que desee, con la mayor velocidad posible y en el formato idóneo. Bajo estas condiciones de gran demanda, los investigadores en materia de telecomunicaciones se han abocado a idear ingeniosas técnicas para que, de una manera sencilla y económica, sea posible multiplicar



el flujo de información que se transporta a través de una fibra óptica. En un principio se pensó en tender un mayor número de fibras a lo largo de un mismo ducto, de manera similar a lo que significaría construir más carreteras al lado de las ya existentes. Esta idea, sin embargo, fue superada por una alternativa más atractiva, pero imposible de llevar a la práctica antes de 1989, fecha en que aparecieron los primeros amplificadores ópticos dopados con erbio.

El concepto es, en principio, relativamente simple: si pensamos en una fibra óptica como una carretera muy ancha en la que circula un automóvil tras otro a lo largo de un solo carril, una solución para incrementar el tráfico de automóviles sería dividir dicha carretera en dos carriles, de modo que ahora pudiera circular el doble de automóviles. De igual manera, si en vez de dos carriles, dividiéramos la carretera original en N carriles, el tráfico que habría de circular por la nueva autopista multicarril se incrementaría N veces, tal y como

muestra la figura 4. En el caso de la fibra óptica ocurre lo mismo; basta imaginar que cada automóvil corresponde a un bit de información, y que en vez de una sola secuencia de bits transmitiríamos ahora N secuencias de bits, cada una en su propio carril, o como se dice en la jerga de las telecomunicaciones, en su propio canal. Mediante la división de la fibra óptica en, digamos, 40 canales, es posible aumentar el flujo de bits de, por ejemplo, 10 gigabits por segundo que circulan en un solo canal, a $40 \times 10 = 400$ gigabits por segundo, que circularían en la autopista de 40 carriles. El incremento en la capacidad de transmisión de información que representa el uso de la división de canales es considerable. Verbigracia, si originalmente podíamos transmitir 156 mil llamadas telefónicas simultáneamente, mediante el uso de la división de canales es posible efectuar $40 \times 156 \text{ mil} = 6 \text{ millones } 240 \text{ mil}$ llamadas telefónicas simultáneamente utilizando una sola fibra (una llamada telefónica requiere 64 mil bits por segundo para operar, por lo que en un sistema operando a 10 gigabits por segundo, o sea, 10 mil millones de bits por segundo, es posible transmitir poco más de 156 mil llamadas telefónicas).

Actualmente se encuentran instalados sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica que operan con decenas de

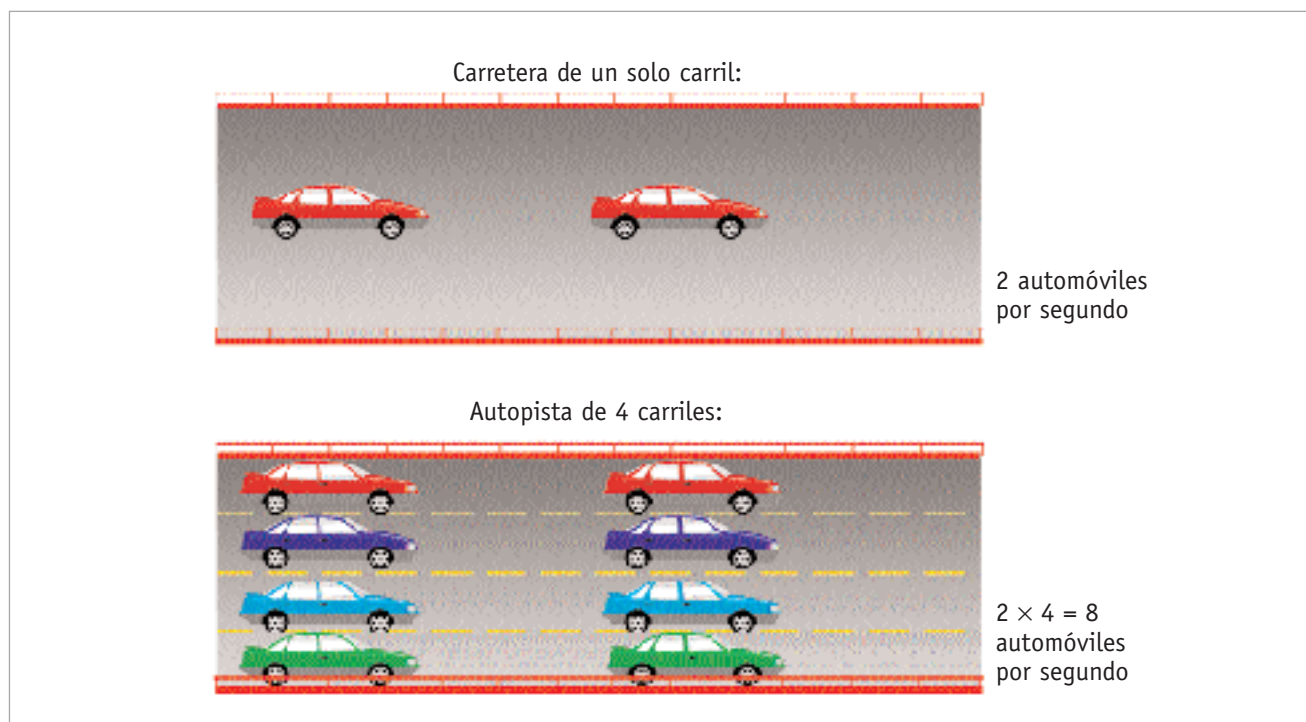


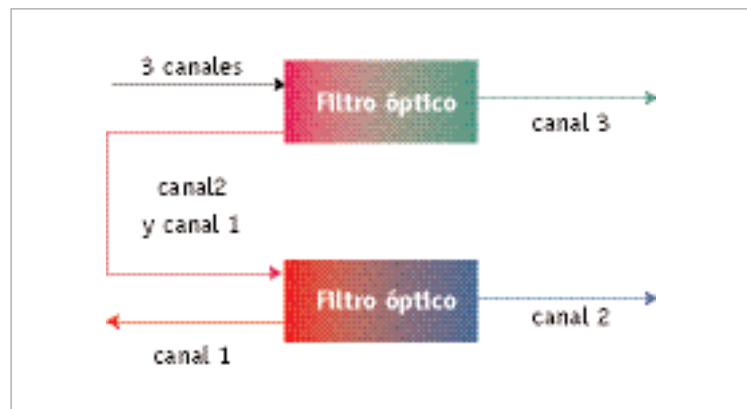
Figura 4. Incremento en el tránsito de automóviles al dividir la autopista de un solo carril en cuatro carriles. Un procedimiento similar se efectúa en una fibra óptica para incrementar el número de canales que se transmiten.

canales, pero ya existen planes para extender tal número de canales a por lo menos cien. Desde luego, los experimentos realizados en laboratorios especializados son muy estimulantes, como el reportado en el año 2000 en la Conferencia Europea de Comunicaciones Ópticas, donde se demostró la transmisión de 128 canales, cada uno operando a 40 gigabits por segundo a lo largo de 300 kilómetros. Multiplicando 128 por 40 gigabits por segundo resulta que la tasa de bits total alcanzada fue de 5 mil 120 gigabits por segundo, lo que representa un logro notable.

Si disponemos de una carretera pavimentada lo suficientemente ancha, su división en varios carriles no presenta gran dificultad; solamente es necesario pintar las líneas divisorias para que los conductores distingan y puedan conservar su carril. En el caso de la fibra óptica, la división en canales es un poco más complicada. Una manera de hacerlo es utilizando, en vez de un solo rayo, varios rayos de diferente color que siguen la misma trayectoria del rayo original a lo largo de la fibra. A cada rayo se le asigna un canal propio por el que se transmite una secuencia de bits particular. Los rayos, cada uno de los cuales es producido por un láser que emite luz del color correspondiente, se inyectan simultáneamente en la fibra óptica. Este proceso de combinación de rayos en una sola fibra óptica se conoce como *multiplexión*, y a la técnica que lo lleva a cabo se le llama *multiplexión por división de longitud de onda*. Cuando los rayos llegan a su destino después de haber viajado a lo largo de la fibra, se les separa mediante un proceso llamado *desmultiplexión*, gracias al cual es posible tratar nuevamente cada secuencia de bits de manera independiente, tal y como si cada uno de los rayos hubiera sido transmitido a través de fibras diferentes. El proceso de desmultiplexión consiste, pues, en separar un rayo de color particular del haz formado por la combinación de todos ellos, y repetir el procedimiento para todos y cada uno de los rayos o canales del sistema. Dicho proceso es similar al que ocurre cuando un rayo proveniente del sol, que podemos pensar como compuesto por rayos de diferentes colores, es reflejado por un charco de aceite en un suelo mojado. Efectivamente, debido a un proceso natural llamado *interferencia* de la luz, solamente los rayos de determinado color son reflejados por el charco, y es por eso que el charco se ve de ese color particular. El proceso de desmultiplexión de un rayo formado por tres canales (colores) se presenta esquemáticamente en la figura 5. Cada uno de los filtros emplea la interferen-

El proceso de combinación de rayos en una sola fibra óptica se conoce como *multiplexión*

Figura 5. Desmultiplexión de un rayo formado por tres canales (colores). Cada filtro óptico separa un canal particular, rechazando el resto de los canales.



cia de la luz, de manera similar a como ocurre en el charco, para separar un canal particular del resto de los canales, y así poder tratar la secuencia de bits correspondiente a ese canal de manera independiente.

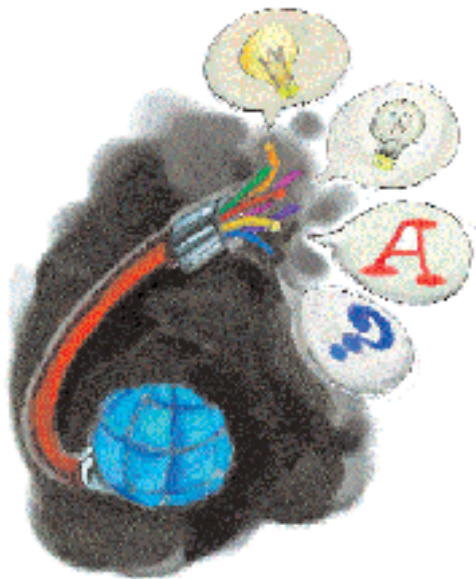
CONCLUSIONES

El internet ha cambiado para siempre la manera en que nos comunicamos y accedemos a la información. Sin embargo, la conectividad global que este medio nos ofrece sería impensable sin la existencia de la fibra óptica, ya que constituye la materia prima de que están construidas las autopistas de la información. Este cable, hecho de un vidrio muy puro, nos ha dado la posibilidad de guiar la luz a lo largo de decenas de kilómetros, para así poder, gracias a la acción de un láser, transportar información a velocidades y en cantidades inconcebibles tan solo hace una generación. Mucho ha tenido que ver en esto también el desarrollo de la multiplexión por división de longitud de

onda, que ha multiplicado la capacidad de transmisión de las de por sí ya eficientes fibras ópticas. La importancia de esta tecnología no radica solamente en su capacidad multiplicativa, sino en la versatilidad que a una red de telecomunicaciones le ofrece el tratar cada canal como una línea de interconexión independiente. El impulso que la fibra óptica le ha dado a las telecomunicaciones modernas seguirá viéndose reflejado en los sistemas de transmisión del futuro, los cuales dependerán cada día más de tecnología completamente óptica.

Bibliografía

- Mynbaev, D. K. y L. L. Schneiner (2001), *Fiber optic communications technology*, Estados Unidos, Prentice-Hall.
- Agrawal, G. P. (1997), *Fiber optic communications systems*, Estados Unidos, J. Wiley.
- Ramaswami, R. y K. Sivarajan (1998), *Optical networks: a practical perspective*, Estados Unidos, Morgan Kaufmann.
- Hecht, E. y A. Zajac (1987), *Optics*, Estados Unidos, Addison Wesley.
- Discovery Center de Corning: http://www.corning.com/opticalfiber/discovery_center/ (2003), Estados Unidos.
- Se puede encontrar información acerca de los últimos desarrollos en materia de dispositivos y sistemas ópticos de telecomunicaciones en la revista *WDM Solutions*, en <http://lfw.pennnet.com/>



Ramón Gutiérrez-Castrejón nació en la ciudad de México, en donde recibió de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) el grado de físico y maestro en ingeniería eléctrica con mención honorífica. El grado de doctor en física lo obtuvo de la Universidad de Londres por su trabajo en óptica no lineal. Después de una estancia posdoctoral en el grupo de física del láser de la Universidad Complutense de Madrid, pasó a laborar en el ETH de Zürich, Suiza, como asistente de investigador en óptica computacional de semiconductores para aplicaciones en telecomunicaciones. Posteriormente, fue contratado por Corning Inc., en Nueva Jersey, Estados Unidos, para realizar investigación en dispositivos y sistemas de telecomunicaciones ópticos. Actualmente labora en el Instituto de Ingeniería de la UNAM como investigador titular y forma parte del Sistema Nacional de Investigadores. Sus intereses incluyen dispositivos y sistemas opto-electrónicos, óptica no lineal, procesamiento de señales y láseres.

rgutierrez@iingen.unam.mx

