

# *Aplicaciones de los dispositivos ópticos biestables*

J.A. MARTIN-PEREDA

*ETS. Ing. Telecomunicación. UPM  
28040- Madrid*

## **I. INTRODUCCION**

Una vez expuestos en un artículo previo (1), los principios físicos fundamentales en los que se basa el comportamiento de los dispositivos ópticos biestables, sólo resta ya dar una breve síntesis de cuales pueden ser las aplicaciones de los mismos que se prevén para un futuro próximo. Es muy posible también que algunas realizaciones futuras no hayan sido aún previstas. Pero lo que sí es seguro es que, a pesar de todo, su estudio merece una especial atención. Ello se debe, en particular, a dos hechos fundamentales. Por una parte, el que desde un punto de vista práctico es más fundamental, es el de su posible empleo en campos como las comunicaciones ópticas o los ordenadores fotónicos, temas ambos que, en este artículo, merecerán una especial atención, y que constituyen objeto central de investigación y desarrollo en todo momento. El segundo es que la biestabilidad óptica es un terreno absolutamente favorable para el estudio de los fenómenos en sistemas fuera del equilibrio. Un tema en particular, el del caos, ha visto en los últimos dos años un renacido interés gracias al conjunto de nuevos datos que ha aportado la B.O. Aunque en este artículo este último tema no será tratado, ya que necesitaría uno sólo para él, nos parece importante sacarle al menos a la luz.

Por otra parte, como para un gran número de aplicaciones que aquí se verán nos referimos en especial a los desarrollos del grupo de Electrónica Cuántica de la UPM, que han sido realizados en su mayoría con cristales líquidos, conjuntamente con las aplicaciones prácticas se presentarán algunos de sus conceptos elementales, haciendo referencia a los lugares en los que se puede encontrar un mayor detalle de los mismos.

Finalmente se darán las principales limitaciones que se prevén y los márgenes en los que se moverán, de acuerdo con los principios físicos que los gobiernan.

## **II. FORMAS DE TRABAJO DE UN BIESTABLE OPTICO DIFERENCIA ENTRE BIESTABILIDAD E HISTERESIS**

La forma del ciclo de histeresis que presenta un BO será, sin duda, la que imponga la forma de trabajo en que actúe. Uno de los objetivos básicos que se plantean en la actualidad es la de obtener ciclos de histeresis que sean lo más regulares y repetitivos posibles. Este objetivo, por el momento, no está absolutamente conseguido ya que si se analiza la literatura del tema pue-

de verse que la mayor parte de los obtenidos, además de bastante irregulares desde un punto de vista clásico, son asimismo bastante poco semejantes los obtenidos en unos materiales y en otros, dependiendo, al mismo tiempo, muy fuertemente, de las condiciones de trabajo. En cualquier caso el objetivo final debe ser la obtención de dos ciclos, como los mostrados en la Fig. 1, y que representan, también, las dos posibilidades, que se ofrecen. De hecho, el de la Fig. 1, a no es sino el de la Fig. 1, b en el que el área se ha reducido a cero. El de la Fig. 1, a, encontrará aplicaciones como amplificador diferencial, como triodo óptico y como conformador de pulsos. El de la Fig. 1, b, para memorias ópticas, para computación óptica, para lógica fotónica y en limitadores ópticos. Al primero le designaremos como BO de área nula y al segundo BO de ciclo de histéresis convencional.

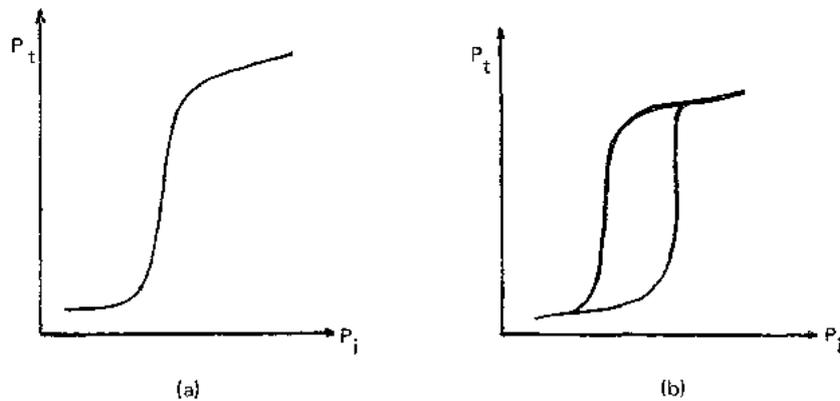


Figura 1.—

Y conviene, también, hacer aquí una breve diferenciación entre cuándo un dispositivo es realmente biestable óptico o es simplemente un dispositivo con histéresis óptica.

Por biestabilidad óptica se entiende un dispositivo que, para un margen finito de parámetros de haz de entrada existen dos posibles estados de salida; una vez que el sistema se sitúa en uno de ellos, permanece allí indefinidamente mientras no cambien las condiciones de entrada.

Por histéresis óptica se conoce, simplemente, al sistema cuya salida depende de la historia pasada del haz de entrada así como del estado instantáneo en el que se encuentra.

Según las anteriores definiciones, un sistema biestable exhibirá siempre histéresis. Pero en una excitación pulsada, la observación de histéresis no implicará necesariamente que el sistema sea biestable. Así, por ejemplo, la respuesta de un sistema monoestable con un tiempo de respuesta  $t$  podrá presentar histéresis ante una excitación con pulsos de duración del orden de  $t$ , pero ante una excitación de onda continua, solamente daría una salida para cada valor de la entrada.

### III. APLICACIONES DE LOS BO CON CICLO DE AREA NULA.

Sin entrar aquí en los detalles del tipo de BO que se emplea, si intrínseco o híbrido, y sólo atendiendo a la forma de trabajo, las principales aplicaciones que se ofrecen son las que se presentan a continuación.

*a) Aplicador diferencial. Supresor de ruido.*

Sus características de funcionamiento aparecen representados en la Fig. 2. En la Fig. 2. a se muestra la forma de trabajo como aplicador diferencial y en la 2.b como supresor de ruido. Como puede apreciarse, la principal diferencia entre ambos modos de trabajo estriba únicamente en la pendiente de la zona que une las regiones de baja y alta potencia de salida. En el primer caso, una señal variable en el tiempo, con una potencia media situada en el

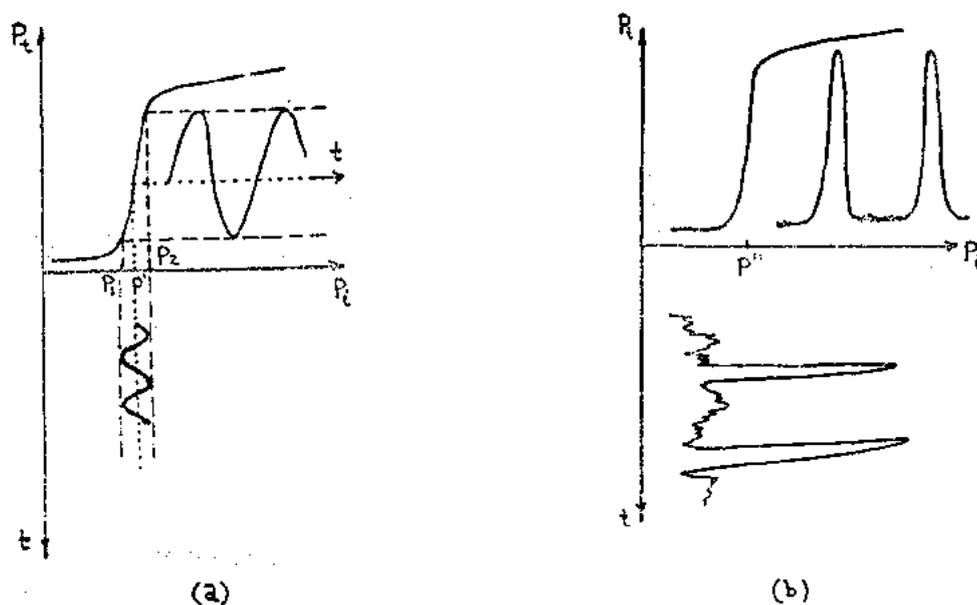


Figura 2. -

punto  $P'$ , es amplificada en su salida, siempre que se mantenga dentro de la zona de potencias comprendida entre  $P_1$  y  $P_2$ . Si se sobrepasaran ambos límites, la salida se presentaría recortada. El segundo caso, para el que la pendiente mencionada en el anterior debería ser lo más vertical posible, ofrece la posibilidad de extraer una señal pulsada inmersa en un fondo apreciable de ruido. El nivel de potencia  $P''$  deberá ajustarse de manera que en ningún caso la señal a recibir quede por debajo de él y, al mismo tiempo, el ruido no le sobrepase. Es evidente que, tanto lo uno como lo otro, puede no ser veri-

ficado en todas las ocasiones, por lo que será necesario introducir aquí todos los elementos de discriminación ya conocidos de teoría de la señal.

Ambas aplicaciones se encuentran de lleno en el campo de las posibles aplicaciones en Comunicaciones Ópticas. Como ya es conocido, en la actualidad las Comunicaciones Ópticas son un híbrido de Óptica y Electrónica en el que la parte más significativa, en lo que se refiere a procesado de la señal, la lleva la Electrónica. La Óptica se limita a ser una simple parte pasiva del sistema. La introducción de estos elementos permitiría eliminar parcialmente a la Electrónica con una mayor posibilidad de procesar íntegramente, de forma óptica, todas las señales.

Los desarrollos realizados hasta la fecha en este terreno son muy pequeños. Una ganancia diferencial de 7, ha sido medida (2), amplificándose únicamente el contenido de información de la señal. Hay que hacer notar que, dado que estamos tratando con dispositivos pasivos, la potencia total de salida nunca podrá sobrepasar a la entrada.

#### b) Triodo óptico.

El esquema básico de uno de los triodos ópticos reportados hasta hoy (2) es el de la Fig. 3. En concepto, su funcionamiento es análogo al ya mencionado del amplificador diferencial del apartado anterior. Como puede apreciarse, se basa en mantener al B.O. en una zona próxima a la de salto de baja a alta transmisión. Esto se logra mediante la señal constante de entrada  $P_i$  y la realimentación a través del detector  $D_1$ . Si la señal eléctrica de éste se superpone ahora a la del  $D_2$ , la señal eléctrica aplicada al amplificador, que dará el voltaje de trabajo en el cristal electroóptico, será una superposición de una señal continua, la debida a  $P_i$ , más la que proceda del haz de control  $P_c$ . El resultado será una señal óptica de salida que será reflejo de éste últi-

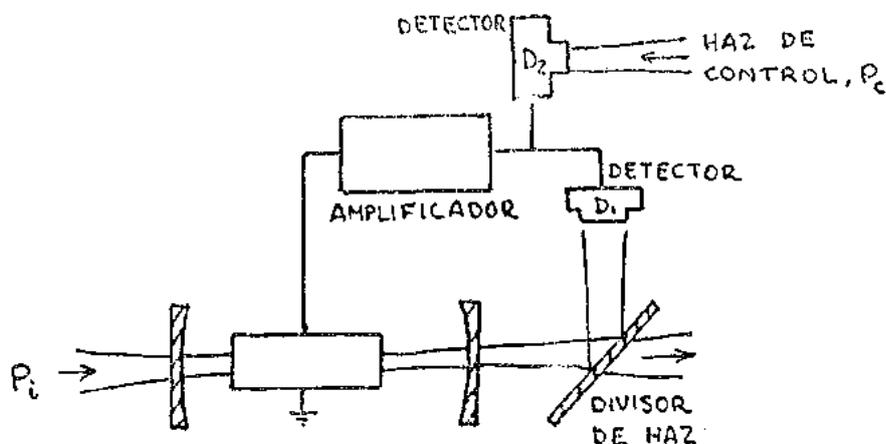


Figura 3...

mo. Si el sistema esta adecuadamente ajustado una señal óptica muy débil puede controlar a otra de alta intensidad, o lo que es lo mismo, funcionará como un triodo óptico. Hay que señalar que las señales ópticas que inciden sobre  $D_1$  y  $D_2$  pueden ser diferentes e, incluso, sobre  $D_2$  puede hacerse incidir luz incoherente.

*c) Conformador de pulsos.*

Después de la descripción de los dos casos anteriores, no es necesario ya dar aquí mucho más detalle de este nuevo. De hecho, parcialmente, ya ya ha sido comentado en el *a*). Si la señal de entrada  $P_i$  tuviera una amplitud que rebasara  $P_2$  (Fig. 2.a) aunque ésta tuviera variaciones, estos no se reflejarían a la salida. O lo que es lo mismo, de un pulso de valor de cresta variable se pasaría a otro de valor casi constante. Algunas experiencias en este campo (2) muestran que cambios de 15:1 en la entrada se quedan reducidos a menores del 4 por ciento en la salida. Este tipo de operación, como puede intuirse, puede ser también muy importante en comunicaciones ópticas.

#### IV. APLICACIONES DE LOS B.O. CON CICLO CONVENCIONAL.

Siguiendo el orden dado en II, correspondería en primer lugar iniciar el apartado de memorias ópticas, pero como este caso, el ejemplo que se va a presentar es un desarrollado por el grupo de la ETSIT-UPM que se basa en el empleo de cristales líquidos, parece necesario dar un breve recordatorio de las propiedades de los mismos que se aprovecharán aquí y en desarrollos sucesivos.

*a) Conceptos básicos de cristales líquidos.*

Los cristales líquidos, de manera breve, están compuestos por moléculas orgánicas alargadas que, dentro de un cierto margen de temperaturas, mantienen entre ellas un cierto orden preferencial. De acuerdo con él, se encuentran tres tipos principales: nemáticos, colestéricos y esmécticos. De ellos son los primeros los que hasta hoy han encontrado un mayor número de aplicaciones, principalmente para visualizadores digitales de relojes y calculadoras. Su base de trabajo en estos casos está basada en la propiedad de orientarse según la dirección del campo eléctrico aplicado. En base a ello, presentan, para la estructura torsionada en  $90^\circ$ , unas características de transmisión en función del voltaje, como las de la Fig. 4. En ella puede verse que su forma es fuertemente dependiente del ángulo que forma la radiación con el plano frontal de la célula. De tener únicamente dos estados, de alta y baja transmisión, para  $0^\circ$ , se puede pasar a varios máximos y mínimos, para  $45^\circ$ . Es por ello por lo que son unos candidatos muy adecuados para trabajar en BO.

Su principal inconveniente estriba en el hecho de su lentitud en la respuesta. Tiempos inferiores al milisegundo son algo difíciles de conseguir. Algunos estudios que se llevan a cabo en la actualidad parecen indicar que, con

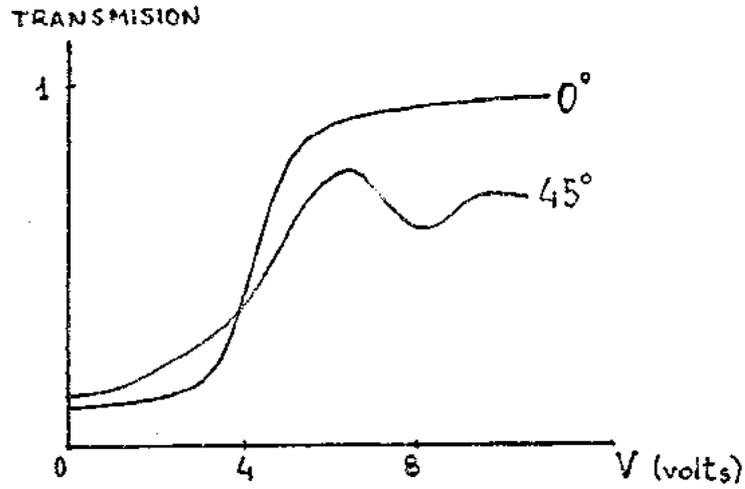


Figura 4.

esmécticos, pueden alcanzarse los nanosegundos fácilmente. A pesar de ello, las realizaciones prácticas están aún lejos de ser una realidad.

Un estudio más detallado de este tema puede encontrarse en (3).

*b) Memorias ópticas.*

El esquema básico de una memoria óptica es el que aparece en la Fig. 5 (4). Su estructura básica es la de un BO convencional con la diferencia de que a su entrada llegan combinadas dos señales, una que sirve de referencia, la  $P_R$ , y otra que es donde se introduce el dato que se quiere almacenar. En esas condiciones, en el momento inicial (Fig. 6.a) el sistema se encuentra trabajando en el punto A, de baja transmisión, que corresponde con una pendiente de la recta de trabajo de  $\text{arc tg } (\beta P_R)$ . Si se introduce un pulso

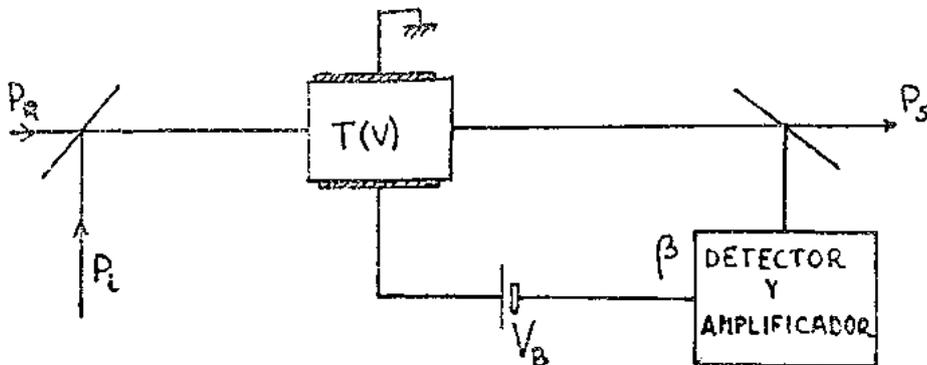


Figura 5...

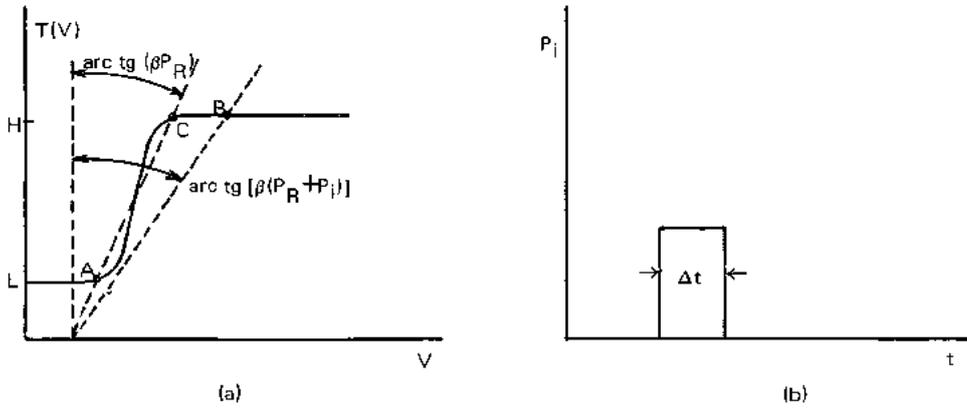


Figura 6

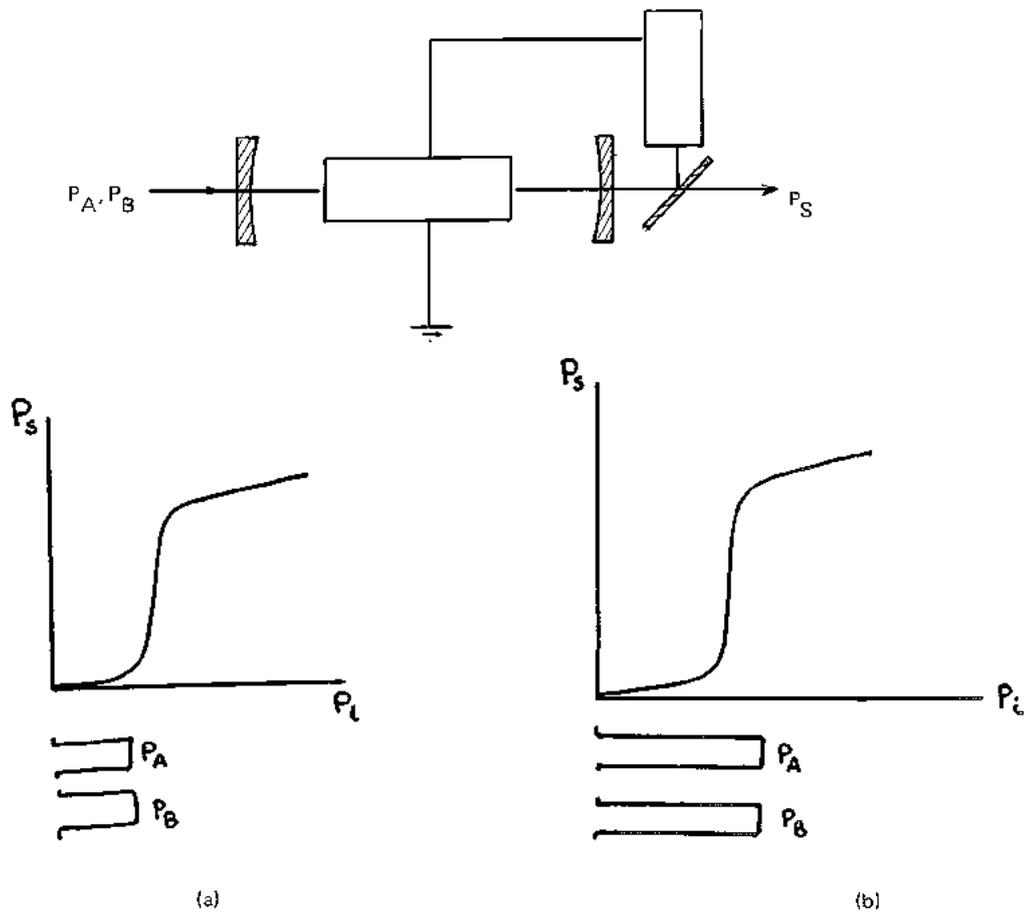


Figura 7.

(Fig. 6.b) de duración  $\Delta t$ , compatible con el de respuesta del dispositivo, durante su presencia la nueva recta de trabajo será la de pendiente  $\text{arc tg} [\beta(P_R + P_i)]$ , con lo que el sistema pasará al estado de alta transmisión (punto B). Una vez concluido el pulso, la recta de trabajo volverá a ser la inicial pero el BO permanecerá en transmisión alta (punto C) con lo que habrá que dado almacenado un dato.

Trabajando con una célula torsionada de cristal líquido, se han conseguido, para pulsos de duración de 1 mseg, una relación ON:OFF de 100:3. Las intensidades de los haces de referencia y de información eran del orden de 0,1 mvat.

Este tipo de sistemas, muy análogos a los presentados por otros autores, son adecuados para almacenar información durante tiempos no muy largos. Pero debido al hecho de que es necesario el mantener el haz de referencia para tener almacenada la información, no parece sean aconsejables para tiempos largos. Por ello, este tema está aún pendiente de soluciones más satisfactorias.

### c) Computación óptica y lógica fotónica.

Las operaciones lógicas *AND* y *OR* pueden realizarse muy fácilmente mediante BO convencionales en la forma mostrada en la Fig. 7. En 7.a se muestran las características que han de tener los pulsos de entrada,  $P_A$  y  $P_B$ , para realizar la operación *AND*. Únicamente cuando se encuentren los dos presentes, se pasará a la zona de alta potencia de salida. En consecuencia, existirá siempre un 0 salvo en este caso, que aparecerá un 1.

En 7.b se muestra la operación *OR* y el tamaño requerido en los pulsos de entrada con respecto al ciclo de histéresis. Ahora, siempre que aparezca uno de ellos, se tendrá a la salida un 1.

De análoga manera pueden realizarse puertas *NAND* y *NOR*. Y basado en ellas, todo un sistema de computación óptica.

## V. APLICACIONES EN SISTEMAS.

El camino de los BO's debe conducir, finalmente, al desarrollo de sistemas que los tengan como elemento fundamental de su comportamiento. Por ello, aunque, como se ha dicho en otro apartado, aun queda bastante que desarrollar en los BO's a fin de conseguir su repetitibilidad y un comportamiento adecuado, ya comienzan a presentarse sistemas que puedan trabajar con ellos. Aquí se presentarán, a modo de ejemplo, dos de ellos que han sido propuestos por P. W. Smith (5) y que aún no han sido llevados a la práctica.

### a) Amplificador de imágenes.

Este sistema, representado en la Fig. 8, está basado en una estructura bidimensional de elementos biestables de autoenfoque, ya descritos en (1). La base de su comportamiento no es otra que la del amplificador diferencial

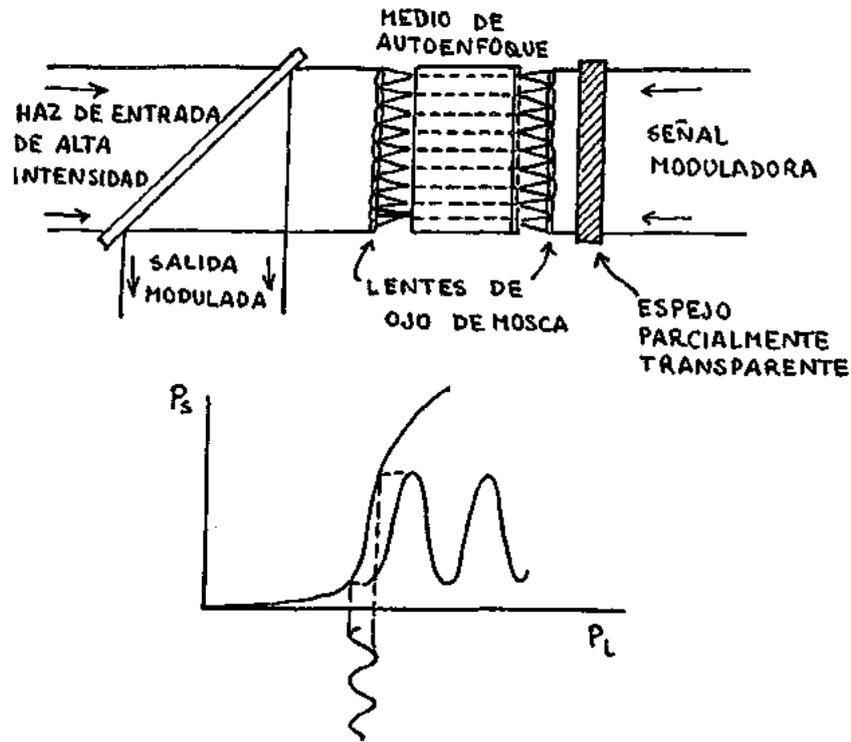


Figura 8.-

visto en III. a. Una señal de referencia,  $P_i$ , sitúa al sistema en la zona de pendiente positiva que une la baja con la alta transmisión. Cuando se superpone la señal moduladora,  $P_s$ , sus variaciones, debido a la región donde aparecen, se traducirán en una salida que las refleja, pero con una amplitud mucho mayor. En (5) se señalan como posibles medios, el de una suspensión de partículas dieléctricas, que tiene un tiempo de respuesta del orden del segundo, y el de AsGa adecuadamente dopado, que podría descenderle al microsegundo. Tanto en un caso como en otro, aún no se han realizado experimentos que lo verifiquen.

*b) Multiplexadores y demultiplexadores ópticos.*

En comunicaciones ópticas, una de las ventajas más significativas que se presentan con respecto a las convencionales es la posibilidad de transmitir pulsos de duración del orden de los picosegundos por una fibra óptica. Esto imponen una serie de condiciones a los sistemas de multiplexación a la entrada y de demultiplexación a la salida, que la electrónica actualmente en uso no es capaz de manejar. La única posibilidad que se vislumbra es la del

empleo de elementos capaces de conmutar a esa velocidad, como son los biestables ópticos.

Un posible multiplexador es el mostrado en la Fig. 9. A fin de multiplexar los pulsos, es necesario un pulso de disparo con la sincronización de tiempo adecuada. Un elemento posible es el que aparece en 9.b y que no es sino un biestable en anillo que permite la fácil separación de las señales de entrada, de salida y de disparo. Cuando únicamente se encuentra presente la señal  $I_i^{(1)}$  el sistema, como un todo, se encuentra en la zona de baja transmisión, lo que quiere decir que en el haz de salida, por estar situado en el mismo espejo de entrada de  $I_i^{(1)}$  será, prácticamente, esta última. Si, por el

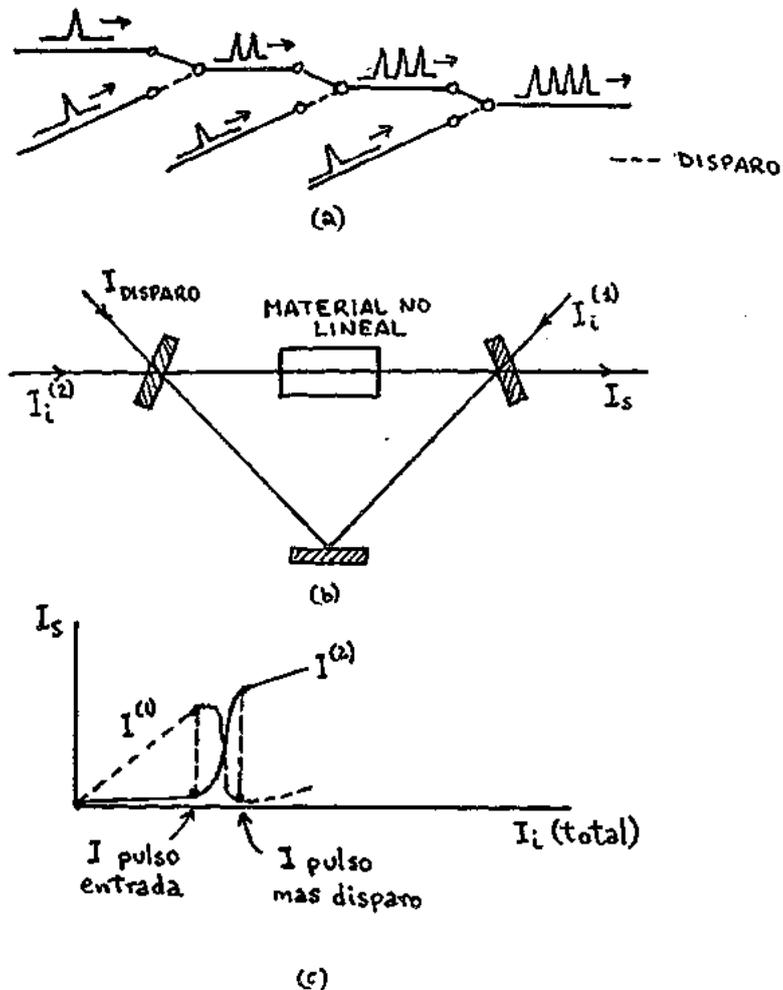


Fig. 9.-

contrario, se introduce  $I_i^{(2)}$  y, conjuntamente la señal de disparo, el sistema pasará a un estado de alta transmisión y la salida será  $I_i^{(2)}$ . Con ello, la salida será un tren de dos pulsos. Esta operación, repetida en cascada, puede conducir a un tren de pulsos de picosegundos que sean transmitidos por una fibra óptica. Debido a la pequeña pendiente de la curva característica del elemento, el pulso de disparo puede ser de muy pequeño valor.

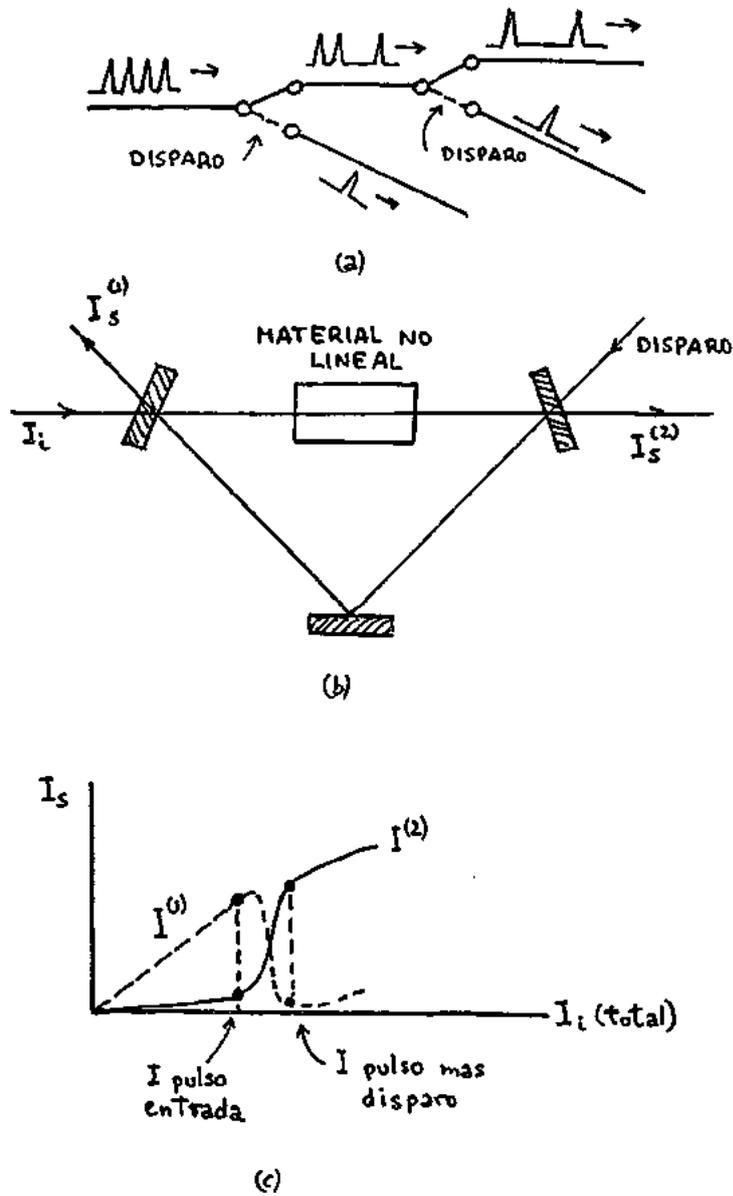


Figura 10.-

De análoga manera puede realizarse el demultiplexado. El esquema, y la forma de trabajo aparecen en la Fig. 10. Como puede verse, un resonador biestable en anillo funciona como elemento de direccionado para enviar los pulsos por un camino u otro, según esté o no presente otro pulso de disparo.

Un material propuesto es el SCD, cuyos efectos no lineales son muy intensos cerca de la línea de resonancia biestacionaria. Con una radiación de longitud de onda 4836 Å puede conseguirse una no linealidad lo suficientemente fuerte como para permitir que el dispositivo trabaje con niveles de potencia de alrededor del milivatio y con un tiempo de respuesta del orden del picosegundo. El inconveniente principal que presenta es que ha de trabajar a la temperatura del helio líquido y que el margen de longitudes de onda en que es favorable la situación es muy estrecho, no más de 5 Å.

## VI. LIMITACIONES DE POTENCIA Y DE VELOCIDAD.

Después de haber dado una idea general de cuáles pueden ser las aplicaciones de los biestables ópticos sólo resta hacer unos pequeños comentarios sobre los límites dentro de los que van a poder trabajar en el futuro, tanto en lo que se refiere a potencia como a la velocidad.

En los últimos tres años ha existido una cierta controversia entre los diferentes grupos trabajando en el tema sobre los límites reales que podrían encontrarse. Pero después de algunas vacilaciones, el criterio expuesto por P. W. Smith (5) parece que ha quedado definitivamente asentado. Aquí se presentará un breve resumen del mismo con algunos comentarios marginales.

El primer hecho a considerar es el que se refiere a la velocidad de conmutación. Es evidente que esta velocidad vendrá limitada por el tiempo de respuesta del medio no lineal y por el establecimiento de las condiciones adecuadas en el resonador (o equivalente). Este último puede hacerse muy pequeño si se reduce su longitud o, como es el caso de una interfase no lineal, llegar a ser prácticamente nulo, si se emplea una configuración no resonante. Por ello, el límite más significativo viene fijado por el material. Y como, según se conoce de la literatura del tema, tiempos menores de  $10^{-9}$  segundos pueden llegar a conseguirse en materiales con no linealidades electrónicas muy fuertes. El inconveniente que se presenta en paralelo es que, para alcanzar esos tiempos, son precisas potencias muy elevadas. Ambos conceptos, potencia de conmutación y tiempo de conmutación, están ligados. Así, el tiempo de respuesta de un sistema que estuviera dominado por el del resonador, podría dividirse por dos, reduciendo la longitud de la cavidad a la mitad. Pero al tenerse menos material no lineal, la potencia de conmutación debería duplicarse. Y este camino no puede prolongarse indefinidamente ya que deben aparecer una serie de factores que limiten la potencia que puede suministrarse a un material.

John von Newman indicó, hace bastantes años que, a partir de razonamientos termodinámicos, se podía demostrar que una operación de conmutación entre dos únicos estados, requiere, al menos una energía de valor  $KT$ , con  $K$  como constante de Boltzman y  $T$  la temperatura absoluta.

Por otra parte, consideraciones de carácter cuántico conducen a que debe disiparse, al menos, en una conmutación, una energía de valor  $h/\tau$ , donde  $h$  es la constante de Plank y  $\tau$  el tiempo de conmutación.

R. W. Keyes (6) demostró, para dispositivos digitales electrónicos, que otro límite físico venía fijado por consideraciones de transferencias térmica. En nuestro caso, cada operación de conmutación deberá disipar una cierta energía que, para altas velocidades, puede llegar a no ser aceptable por el material. En un diagrama potencia-tiempo, esto representaría una zona en la que el sistema no podría trabajar. Todo esto, conjuntamente con las dos consideraciones anteriores aparece en la Fig. 11. Asimismo demostró que otro límite venía determinado por una cierta relación entre la potencia absorbida y el tiempo de conmutación. Este hecho obliga a trabajar al dispositivo en la zona por encima de una línea que, en la Fig. 11, se ha designado como "no-

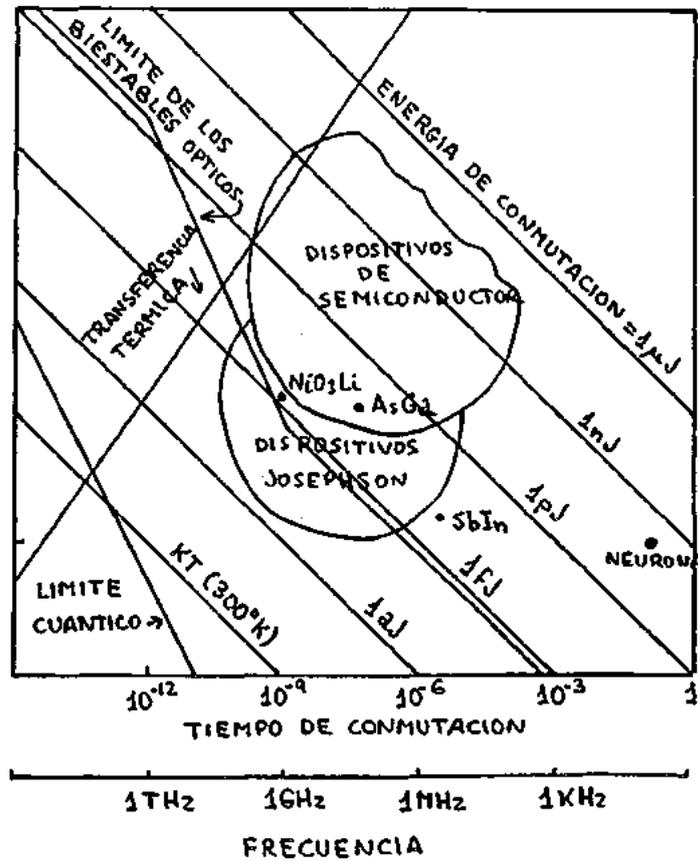


Fig. 11

linealidad de absorción” Otros materiales como los que ofrecen efecto Kerr, p.ej., esto es, en los que su índice de refracción depende de la intensidad de luz, ofrecen un efecto análogo que, en la Fig. 11, se ha designado como “no-linealidad reactiva”.

Finalmente, se presenta un último límite derivado de consideraciones estadísticas. Es el requisito de que ha de haber un número mínimo de diferencia entre los fotones correspondientes a los estados para que puedan diferenciarse. P. W. Smith (5) ha fijado este número en  $10^3$ . Este nuevo límite se representa también en el diagrama de la Fig. 11.

A fin de situar el gráfico anterior en relación con los resultados ya obtenidos, se han representado también los puntos de trabajo de los dispositivos BO en operación y las zonas en las que se mueven los de semiconductor y los Josephson. Como puede apreciarse hay regiones en las que estos son superiores a aquellos pero, evidentemente, cuando se trate de obtener velocidades de conmutación en el margen de  $10^{-12}$  a  $10^{-14}$  segundos, los dispositivos ópticos ofrecen la única posibilidad de trabajo.

## VII. CONCLUSIONES.

De todo lo anterior se desprende el que los biestables ópticos ofrecen una serie de ventajas y de condicionantes que hacen de ellos elementos básicos para la tecnología óptica de mañana. Queda, como se ha repetido varias veces, obtener BO's realmente fiables y conocer a fondo cuál es su comportamiento. Para ello es necesario investigar qué materiales de los existentes son los más idóneos e, incluso, buscar otros. No parece previsible que esto se concluya en un plazo corto.

Y una vez conseguido lo anterior queda la siguiente fase, que aquí sólo se ha bocetado: la del desarrollo de sistemas. Pero esta fase no creemos se llegue a poner en marcha en un tiempo breve. El principal hecho que lo justifica es que el empleo, con todo su potencial, de los BO's debe llevar consigo un cambio en la filosofía del campo o campos en los que se aplique. Un sistema de comunicaciones ópticas, p. ej., basado totalmente en sistemas puramente ópticos y no electrónicos como lo son ahora, ha de ser, por fuerza, muy diferente a los actuales. Y otro tanto podría decirse de los ordenadores ópticos, donde un procesado de datos en paralelo, y no en serie como con los en uso, es factible.

Por todo ello creemos, ratificando las palabras de Bowden, que los BO's pueden llegar a constituir en el futuro lo que el transistor constituye en la actualidad: la pieza básica para el desarrollo de una nueva tecnología.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] MARTIN-PEREDA, J. A.: (1984). Artículo precedente.
- [2] SMITH, P. W., TURNER, E. H. Y MALONEY, P. J.: (1978), *IEEE J. of Quantum Electronics*, 14, 207.
- [3] MARTIN-PEREDA, J. A, MURIEL, M. A. Y OTON, J. M.: (1984). Mundo electrónico.
- [4] MARTIN-PEREDA, J. A. Y MURIEL, M.A (1983), *Proc. SPIE*.
- [5] SMITH, P.W.: (1982). *Bell Syst. Tech. J.* 61, 1975.
- [6] KEYES, R. W.: *Proc. IEEE*, 63, 740.