

Cuadernos CDTI

Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial.  
Ministerio  
de Industria y Energía.

**El láser y sus aplicaciones  
industriales**



Cuadernos CDTI

Noviembre, 1983

Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial.  
Ministerio  
de Industria y Energía.

**El láser y sus aplicaciones  
industriales**

Depósito legal: M. 347-1984  
ISBN: 84-500-9329-5  
Diseño Gráfico: TRAMA 3  
Fotomecánica y Fotocomposición:  
CASTELLANA, S. A.  
Solana de Luche, 11  
MADRID-11  
Imprime: PRAL, S. A.  
Belmonte de Tajo, 12  
MADRID-19

**CDTI Junio 1983**

# INDICE

## DOCUMENTO BASE

<b>Fundamentos del láser</b> . . . . .	7	Soldadura por láser . . . . .	45
Los comienzos del láser. Descripción y fundamentos . . . . .	7	Tratamientos superficiales. . . . .	46
Características de la emisión láser. Rango de longitudes de onda y de potencias . . . . .	9	Grabado con láser. . . . .	48
<b>Tipos de láser.</b> . . . . .	12	Ajuste de componentes electrónicos . . . . .	49
Láseres de gas. . . . .	12	Medidas y control por láser en los procesos industriales . . . . .	49
Láseres de estado sólido . . . . .	15	Otras aplicaciones del láser en la industria. . . . .	51
Láseres de semiconductores . . . . .	17	Estado actual y evolución de la tecnología . . . . .	51
Láseres de líquido. . . . .	19	<b>Instrumentación científica</b> . . . . .	53
Láseres de electrones libres. . . . .	20	El radar óptico con láser . . . . .	53
<b>Aplicaciones del láser.</b>		Espectroscopia por láser . . . . .	53
<b>Aplicaciones en el ámbito de la defensa</b> . . . . .	22	Microscopía con láser. . . . .	56
Armas con láser de alta energía . . . . .	22	Velocímetros de partículas con láser . . . . .	57
Mecanismo de destrucción producidos por un arma láser . . . . .	22	Interferometría . . . . .	58
Tipos de láseres utilizados como armas. . . . .	24	Procesos ultrarrápidos . . . . .	58
Sistemas de puntería y control del rayo . . . . .	25	Análisis clínicos con láser . . . . .	59
Armas láser espaciales. . . . .	26	Láseres utilizados en fotoquímica . . . . .	59
Armas láser atmosféricas. . . . .	28	<b>Aplicaciones del láser en informática</b> . . . . .	61
Localización y fijación de blancos . . . . .	29	Impresoras de línea con láser . . . . .	61
Giroscopios de láser. . . . .	30	Unidad de salida de ordenador por microfilm. . . . .	63
Hidrófonos ópticos . . . . .	30	Memorias ópticas. . . . .	63
Simuladores y juegos de guerra. . . . .	31	Lectores de puntos de venta . . . . .	65
Comunicaciones militares por láser . . . . .	31	Lectura de textos por reconocimiento óptico de caracteres. . . . .	65
<b>Aplicaciones en el campo de la energía</b> . . . . .	32	Proceso óptico de datos . . . . .	66
Separación de isótopos mediante láser . . . . .	32	Transmisión de datos. . . . .	67
Unificación de materiales. . . . .	34	<b>Aplicaciones del láser en construcción, obras públicas y agricultura</b> . . . . .	68
Separación de elementos de residuos atómicos . . . . .	34	Tipos de láseres utilizados en construcción y agricultura . . . . .	68
Producción de agua pesada. . . . .	34	Aplicaciones de alineación. . . . .	68
Detección de fugas radiactivas . . . . .	36	Aplicaciones a la medida de elevación . . . . .	70
Investigación en los EE. UU. y Europa . . . . .	36	Control de máquinas de movimiento de tierras. . . . .	73
Fusión nuclear mediante láser . . . . .	36	Medición de distancias. . . . .	73
Sistemas de fusión termonuclear por láser . . . . .	38	<b>Aplicaciones del láser en artes gráficas</b> . . . . .	74
<b>Aplicaciones industriales</b> . . . . .	42	Tipos de láser para reprografía . . . . .	74
Características de los sistemas industriales por láser . . . . .	42	Confección de planchas de impresión. . . . .	74
Tipos de láseres para aplicaciones industriales. . . . .	43	Scanner de color por láser . . . . .	77
Taladro y escariado . . . . .	43	Facsimil con láser y telecopiadoras . . . . .	77
Corte de materiales. . . . .	44	Reproducción de fotografías con láser . . . . .	78
		Composición de textos. . . . .	78

<b>Aplicaciones de láser en telecomunicaciones</b> . . . . .	79
Comunicaciones por fibra óptica . . . . .	79
<b>Aplicaciones médicas de láser</b> . . . . .	89
Aplicaciones en cirugía gastrointestinal . . . . .	91
Aplicaciones en cirugía plástica y dermatología . . . . .	91
Aplicaciones en obstetricia y ginecología . . . . .	92
Aplicaciones en neurocirugía . . . . .	92
Aplicaciones en urología . . . . .	92
Aplicaciones en traumatología . . . . .	93
Aplicaciones en otorrinolaringología . . . . .	93
Aplicaciones en cirugía general . . . . .	93
Otras aplicaciones médicas . . . . .	94
Tendencias de investigación en la instrumentación médica con láser . . . . .	94
<b>Videodiscos con láser</b> . . . . .	95
Mercado del láser . . . . .	99
Aplicaciones militares . . . . .	100
Energía . . . . .	103
Industria . . . . .	103
Instrumentación científica . . . . .	104
Puntos de venta . . . . .	105
Construcción . . . . .	105
Ordenadores . . . . .	105
Artes gráficas . . . . .	106
Telecomunicaciones . . . . .	106
Medicina . . . . .	106
Ocio y otras . . . . .	107
<b>La industria de láser</b> . . . . .	108
<b>ANEXO</b>	
<b>Principales empresas norteamericanas</b> . . . . .	111
<b>Principales empresas alemanas</b> . . . . .	112
<b>Principales empresas británicas</b> . . . . .	112
<b>Principales empresas japonesas</b> . . . . .	112
<b>Principales empresas francesas</b> . . . . .	112
<b>Principales empresas españolas</b> . . . . .	113
<b>Relación de empresas que desarrollan en España actividades en el campo del láser</b> . . . . .	114



# FUNDAMENTOS DEL LASER

## LOS COMIENZOS DEL LASER. DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTOS

Desde el año 1960 en que el científico T. H. Maiman desarrolló el primer láser de rubí en California (Estados Unidos) y aun en nuestros días, una gran parte de la opinión pública, influida por algunos medios de comunicación, piensa en el láser casi exclusivamente como un artefacto destructor. Se han empleado expresiones como "el rayo de la muerte", y los autores de ciencia ficción han concebido ingenios destructores basados en él.

Este concepto del láser hoy día está injustificado, porque aunque es cierto que tiene importantes aplicaciones en el campo militar, no es menos cierto que muchas de las mismas no son directamente destructivas, sino que son, por lo general, técnicas auxiliares que permiten la localización e identificación de blancos, comunicaciones, armas guiadas, etc., como se verá más adelante.

El predecesor del láser fue el máser,

desarrollado en 1954 por científicos americanos. El máser es un dispositivo amplificador de microondas por emisión estimulada de radiación. Este descubrimiento sugirió a los científicos C. H. Townes y A. L. Schawlow la idea de ampliar las teorías de A. Einstein, y propusieron en 1958 que, debido al carácter de radiación electromagnética de la luz, ésta se podría amplificar, al igual que las microondas, por el fenómeno de la emisión estimulada. Por ello, el primer láser de rubí, realizado por Maiman, se llamó inicialmente "máser óptico" y posteriormente "láser", que son las iniciales, en terminología sajona, de "amplificación de luz por emisión estimulada de radiación".

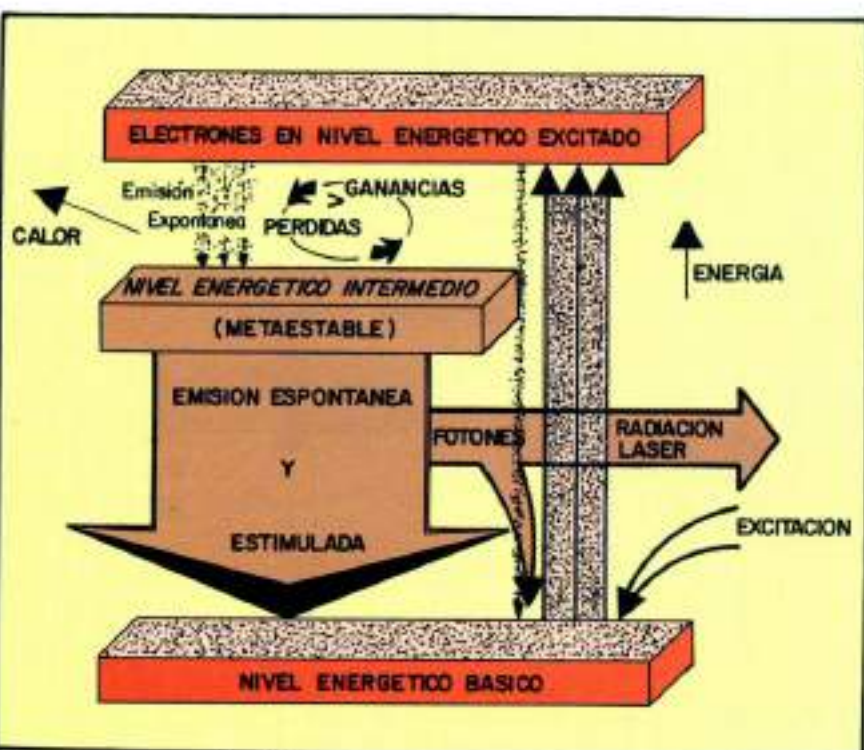
Con este descubrimiento, al fin se encontró la fuente de luz tan buscada y deseada por los científicos, que propusieron teorías basadas en esta clase de radiaciones luminosas mucho antes de disponer de ellas, como por ejemplo Dennis Gabor, premio Nobel de física en 1971, por su teoría de la holografía, formulada 25 años antes. Esta teoría trata del registro y

reconstrucción de frentes de ondas coherentes, que permite, entre otras muchas aplicaciones, la reconstrucción de imágenes tridimensionales, el procesado óptico de imágenes, etcétera.

El láser es una fuente de radiaciones, generalmente en el espectro visible o en sus proximidades, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, y que es capaz de producir una enorme densidad de potencia, muy concentrada en un rayo. Por ejemplo, la densidad de potencia puede ser tan grande, que se pueden soldar chapas de acero de unos 4 cm. de espesor a una velocidad de más de 1 cm. por segundo. La energía puede concentrarse tanto, que los médicos tratan zonas de tejido tan pequeñas como un círculo de la milésima parte de un milímetro de diámetro.

El efecto láser se basa en el fenómeno conocido como emisión estimulada de fotones (Figura 1), que tiene lugar cuando se excita un material activo determinado con niveles de energía superiores a los normales, mediante una fuente de energía exterior.

En un estado normal, los electrones orbitan alrededor del núcleo de los átomos del material activo del láser, con un determinado nivel de energía. Cuando los átomos se excitan mediante una fuente de energía exterior, como, por ejemplo, una lámpara de destello, una corriente eléctrica, un haz electrónico, u otras fuentes de energía, los electrones del material activo, al absorber energía, saltan a otra órbita de mayor nivel energético, quedando en un estado metaestable durante un tiempo que oscila entre la fracción de segundo y algunos minutos, dependiendo del material activo utilizado. Algunos de estos electrones excitados bajan a su nivel energético original, emitiendo espontáneamente un fotón, o cuanto de luz, de energía  $h \cdot \nu$  (\*) igual a la



(\*)  $h$  = constante de Planck =  $6,625 \times 10^{-34}$  J/s  
 $\nu$  = frecuencia de la radiación luminosa.

Figura 1. Diagrama simplificado de niveles energéticos de un láser

cantidad absorbida anteriormente. Este es el fenómeno conocido con el nombre de emisión espontánea de luz, que caracteriza a dispositivos tales como los diodos electroluminiscentes. Cuando estadísticamente existen más electrones en estado metaestable o de excitación, que en sus niveles energéticos normales, se produce una "inversión de población", que es un requisito indispensable para producir el efecto láser.

En estas condiciones, la probabilidad de que un fotón incidente produzca nuevos fotones o transiciones electrónicas a niveles energéticos inferiores, es mayor que la probabilidad de que el fotón sea absorbido, produciéndose así un efecto acumulativo o de amplificación de la luz, que es indispensable para la aparición del fenómeno láser.

Estadísticamente, algunos de los fotones emitidos emergen paralelos al eje del láser, y pueden ser absorbidos por otros átomos, aún en estado metaestable, y estimular la emisión de otro fotón de este átomo.

Este efecto es acumulativo, si las

pérdidas de energía luminosa en el material activo son inferiores a la energía fotónica generada en el mismo, como consecuencia del estímulo exterior, lo cual implica una cierta ganancia óptica.

Aunque las leyes de la mecánica cuántica que rigen el funcionamiento del láser no son asimilables a las leyes de la mecánica clásica, se puede ilustrar el efecto acumulativo o de emisión estimulada de una forma muy simple, utilizando el siguiente simul mecánico: en un recinto cerrado se colocan una serie de montones de pelotas, ordenados en equilibrio, y se golpea uno de éstos con una pelota procedente del exterior; como consecuencia del impacto caerán varias pelotas de este montón, y cada una de ellas a su vez golpeará a otros montones, cayendo de nuevo varias pelotas de cada montón, y así sucesivamente, produciéndose un proceso acumulativo que pone en movimiento una gran cantidad de pelotas.

Si el ritmo de introducción de pelotas desde el exterior es suficiente, se produce tal acumulación de energía mecánica en toda la cavidad, que si

una de las paredes es lo suficientemente débil, terminará saliendo por ella un chorro de pelotas con alta velocidad.

La materia activa del láser se hace en forma de cavidad resonante, para favorecer la emisión fotónica en el eje y mejorar la ganancia óptica del dispositivo. Los extremos de los láseres son reflectantes a los fotones de la cavidad. Por ejemplo, en el primer tipo de láser construido, el láser de rubí, los extremos de la barra están tallados perfectamente planos y paralelos entre sí y hechos reflectantes mediante metalizaciones. Uno de los extremos refleja la luz totalmente, mientras que el otro refleja la mayor parte y transmite la restante. Cuando se alcanza la emisión estimulada, el rayo axial se refleja sucesivamente en las caras, atravesando el material activo varias veces y siendo amplificado cada vez más, debido a la existencia de electrones en estado metaestable, hasta llegar a un umbral de energía. Entonces se produce un pulso de radiación luminosa de alta intensidad que emerge por la cara semirreflectante del láser (Figura 2).

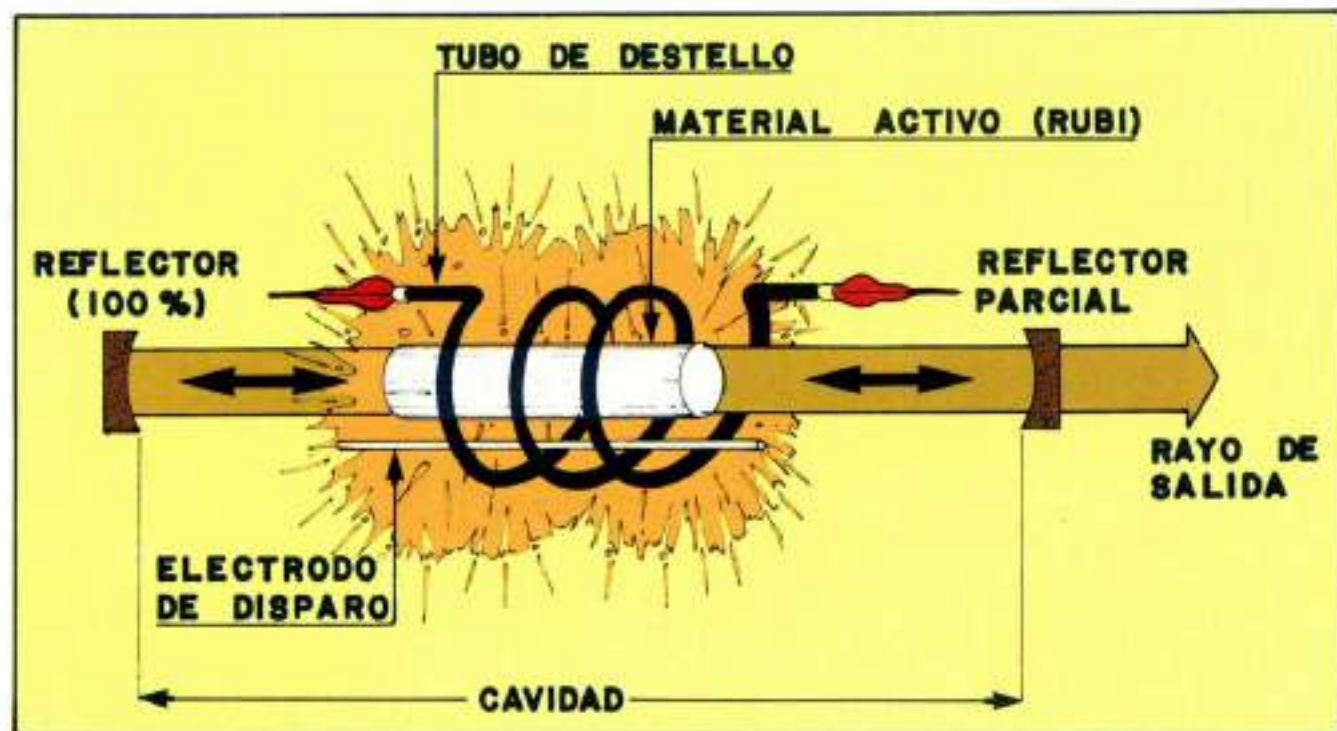


Figura 2. Diagrama simplificado de un láser de cristal sólido (rubí)



### CARACTERISTICAS DE LA EMISION LASER. RANGO DE LONGITUDES DE ONDA Y DE POTENCIAS

Los factores más importantes que caracterizan la emisión láser, distinguiéndola de las demás fuentes de luz conocidas, son la monocromaticidad, la coherencia, la directividad y la gran intensidad luminosa. Todo láser tiene, en mayor o menor medida, estas cuatro propiedades, que a continuación se comentan con más detalle.

En términos sencillos, puede decirse que el láser es la fuente de luz de frecuencia o color más puro, de mayor intensidad luminosa y mayor directividad de todas las fuentes de luz conocidas, y en estas peculiaridades son en las que se basan sus aplicaciones.

#### Monocromaticidad

La luz está considerada como una radiación electromagnética, compuesta, en general, por la superposición

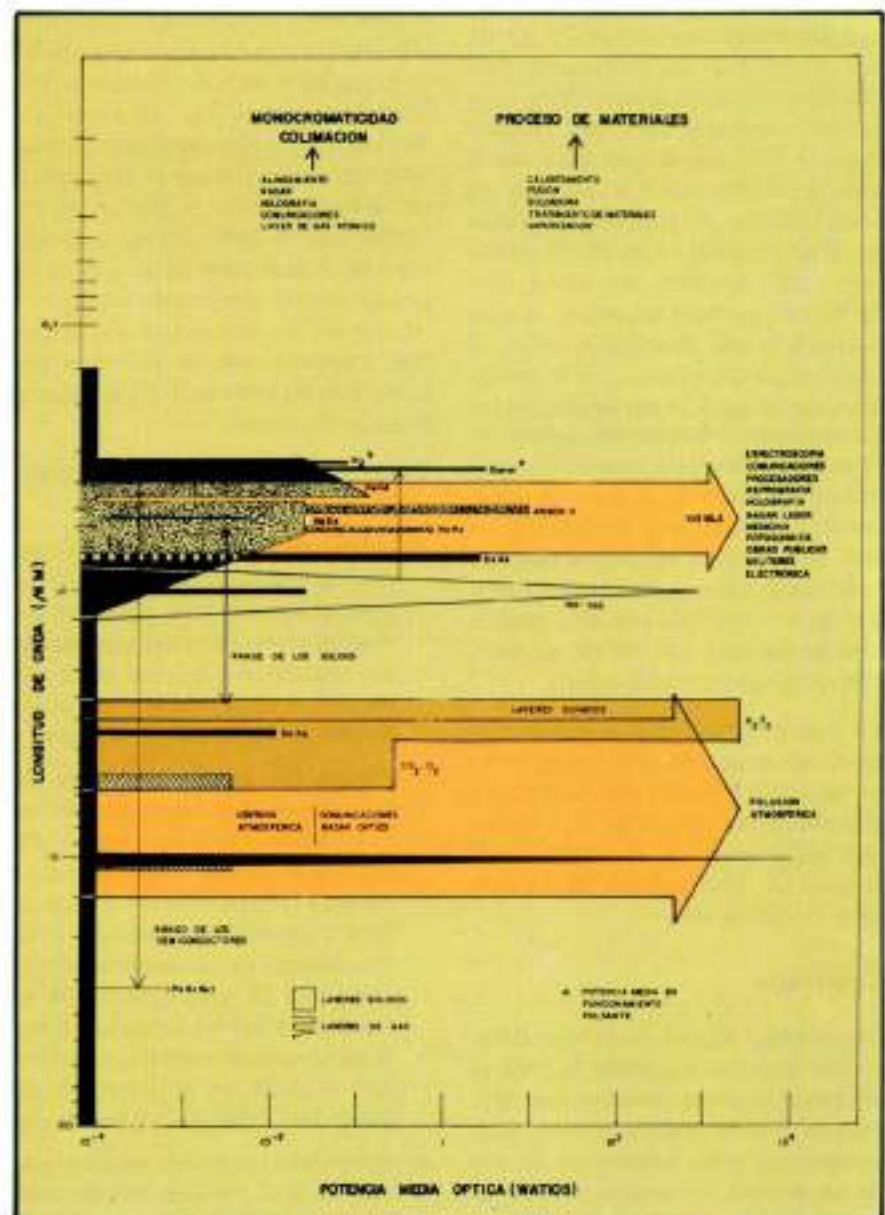


Figura 3. Longitudes de onda, potencias y aplicaciones de los distintos tipos de láser.

de muchas oscilaciones armónicas de distinta frecuencia y fase. Todas las fuentes de luz conocidas antes del láser son policromáticas, es decir, su espectro está formado por una superposición de muchas oscilaciones de frecuencia y fase aleatorias.

Es posible la obtención de radiaciones *quasi*/ monocromáticas a partir de la luz blanca, mediante filtros, pero así se reduce la intensidad luminosa considerablemente.

Los láseres generan una radiación altamente monocromática o con muy pequeña anchura espectral (una frecuencia o color casi puro). Por ejemplo, un láser de semiconductor (los menos monocromáticos) tiene una anchura espectral del orden de 2nm ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ), lo que equivale a una desviación sobre la longitud de onda nominal del 2%, mientras que un láser de helio-neón puede emitir una sola longitud de onda con  $10^{-8}\text{nm}$  de anchura espectral, lo que equivale a una desviación sobre la longitud de onda central de la oscilación, de tan sólo 15 partes por billón. En términos de frecuencia, puede decirse que sobre una frecuencia central de  $3,5 \cdot 10^{14}\text{Hz}$ , el láser de semiconductor tiene una desviación de  $8,2 \cdot 10^{11}\text{Hz}$ , y en cambio el láser de helio-neón tiene una frecuencia central de  $4,7 \cdot 10^{14}\text{Hz}$  con una desviación de tan sólo  $7,4 \cdot 10^3\text{Hz}$ , es decir, 100 millones de veces menos.

La monocromaticidad o pureza del color es especialmente importante en las aplicaciones de sistemas de comunicaciones por láser con detección coherente, en aplicaciones de difracción, holografía, instrumentación científica, etc.

### Coherencia

Dos puntos de una onda son coherentes cuando, teniendo la misma longitud de onda, guardan una relación de fase constante, es decir, que, conocido el valor instantáneo en uno de los puntos, es posible predecir el del otro punto. Una onda perfectamente coherente tiene una estructu-

ra de fase que está fijada respecto al tiempo.

Utilizando el símil de las ondas producidas en un estanque por la caída de piedras iguales, con un cierto intervalo de tiempo sobre el mismo punto, puede comprenderse fácilmente el concepto de coherencia. Cada piedra, al caer, equivale a un impulso de luz del láser o a un tren de ondas que se propaga, formándose una ondulación periódica, con las crestas y los valles perfectamente equidistantes. Si al cabo de cierto tiempo cae una segunda piedra (segundo impulso de luz del láser o tren de ondas) se genera una nueva onda también periódica de la misma periodicidad, pero que, en principio, sus crestas y valles no tienen por qué coincidir con las de la onda producida anteriormente, y así sucesivamente con la caída de las distintas piedras. Puede decirse que la onda producida por una misma piedra tiene una coherencia en todos sus puntos, mientras que no la tienen los puntos de dos ondas producidas por piedras diferentes.

Existen distintos tipos de coherencia en una onda:

- a) coherencia temporal, que es una medida del tiempo que una onda permanece con fase conocida tomando como referencia un punto del espacio y que en el símil del estanque, tiene relación con el intervalo de caída de las piedras;
- b) coherencia longitudinal, que es equivalente, aunque tomando como referencia un instante de tiempo y que se define como el espacio longitudinal en el que la fase permanece conocida. Está relacionada con la anterior por la velocidad de propagación de la luz. En el símil del estanque, tiene relación con el espacio recorrido por la onda en el intervalo de tiempo de caída de las piedras, y
- c) coherencia espacial transversal, que es una medida del espacio transversal en que la relación de fase se mantiene. Por ejemplo, en

una fuente luminosa de cierta área, es una medida de la correlación de fase entre dos puntos de la fuente. Este parámetro tiene mucho que ver con la directividad de la fuente.

La coherencia es una propiedad de mucha importancia en aplicaciones de comunicaciones con detección heterodina, registro de información (holografía), proceso óptico, etc.

Dos ondas coherentes entre sí pueden producir franjas de interferencia, y en esta propiedad se basan muchas de las aplicaciones del láser.

En el símil del estanque tiene relación con la uniformidad del frente de onda producido (círculos concéntricos o figuras no circulares más aleatorias, debido a otras perturbaciones).

### Directividad

La luz que emerge de un láser es muy directiva ya que solamente son amplificadas por el dispositivo las radiaciones muy paralelas al eje, debido al efecto del resonador óptico. Este factor tiene también relación con la coherencia porque, al emitir todos los puntos del área radiante en la misma fase, se produce el efecto de directividad similar al conocido en la teoría de las antenas.

La divergencia del rayo es una medida de su directividad y se mide en grados del ángulo donde está contenida su energía. Este ángulo puede variar entre un minuto y un grado de arco, dependiendo del tipo de láser y su óptica asociada. Esto significa que el diámetro del rayo sólo aumenta del orden de tres milímetros por cada kilómetro recorrido.

Esta propiedad de producir un haz muy directivo o colimado es típica de los láseres, siendo útil para muchas de sus aplicaciones, como por ejemplo, los radares ópticos (lidar), las armas antisatélites, la instrumentación científica, las aplicaciones en agricultura y obras públicas, etc.

### Intensidad luminosa

La intensidad luminosa que emite un láser es muchísimo mayor que la de cualquier otra fuente luminosa conocida.

El rango de potencias oscila entre algunos miliwatios de los láseres de semiconductor, utilizados en comunicaciones por fibras ópticas, o de algunos láseres de gas (He Ne), y los miles de millones de watios de los láseres capaces de destruir satélites a más de 100 km de distancia y de ser utilizados en la fusión nuclear.

En términos comparativos, el rango de potencia de los láseres abarca desde los  $10^{16}$  a los  $10^{28}$  fotones por segundo (5 mW a 5 GW), frente a los  $10^{12}$  fotones por segundo de otras fuentes luminosas conocidas.

Las emisiones de los láseres conocidos cubren un rango desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano. La longitud de onda es un factor determinante en muchas aplicaciones. Por ejemplo, para extirpar un lunar debe utilizarse una longitud de onda que sea absorbida por el color rojo, como la de un láser en la gama verde-azul del espectro (láser de ión de argón), a fin de que toda la energía sea absorbida por el lunar, vaporizando casi instantáneamente todo el tejido de color rojo, sin afectar a los tejidos circundantes.

Los láseres de pulsos tienen una mayor potencia de salida, ya que la energía se concentra y se emite en un pulso rápido. Por el contrario, los láseres que se excitan en forma continua, mediante un bombeo exterior de energía luminosa o con corriente eléctrica, tienen una potencia luminosa de pico muy inferior.

Existen técnicas, como la denominada de enganche de fase (*Mode Locking*) y *Q-Switching*, que se utilizan para intensificar los pulsos de salida. Con éstas, la acción láser se bloquea mediante un polarizador y el material activo se excita con una fuente de luz muy potente, que excita a una gran proporción de sus átomos.

Cuando se elimina el bloqueo en el camino óptico, comienza la acción láser y toda la energía almacenada se emite en un pulso muy intenso y de corta duración, variando desde un segundo a fracción de nanosegundo ( $1 \text{ ns} = 10^{-9}$  segundos).

En la Figura 3 se muestran algunos tipos de láseres con sus longitudes de onda y el orden de magnitud de sus potencias de salida.

## TIPOS DE LASER

Según el tipo de material activo, los láseres se suelen clasificar en láseres de gas, de estado sólido, de semiconductor y de líquido, y, a su vez, cada una de estas categorías se subdivide en otras, dependiendo de su mecanismo interno de excitación y de la clase de energía exterior empleada para producirla.

La acción combinada del material activo con el procedimiento de excitación más adecuado en cada caso produce la emisión láser con las características deseadas de longitud de onda, potencia luminosa, coherencia, etc. Existe un nuevo tipo de láser que no dispone de tales materiales activos, y que se denomina láser de electrones libres.

La eficiencia de los distintos tipos de láseres es muy variable; por ejemplo, en algunos tipos de láseres de semiconductor, la eficiencia de conversión de la energía de excitación es próxima al 100%, mientras en otros tipos de láseres, la eficiencia varía aproximadamente entre el 1 y el

30%. Los parámetros de potencia de salida y longitud de onda son los más importantes para muchas aplicaciones; en cambio, para otras lo son la longitud de onda y la coherencia. En la Tabla 1 se dan las longitudes de onda de los láseres más comunes.

### LASERES DE GAS

El primer láser de gas se construyó en los Laboratorios de la Bell Telephone por Ali Javan en 1961, unos meses más tarde de la construcción del primer láser rubí por Maiman. Se trataba de un láser de helio-neón (He-Ne). Poco tiempo después se desarrollaron láseres con muy diferentes tipos de gases. Hoy día, existen varios miles de tipos de láseres de gas que operan en miles de líneas espectrales, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

En comparación con otros tipos de láseres, los de gas tienen una potencia de pico, en general, inferior a la

Gama	Longitud de onda (nm)	Tipo de láser
Ultravioleta	248	Kriptón-flúor (Kr-F)
	337,1	Nitrógeno (N <sub>2</sub> ) pulsado
Visible	488	Ión de Argón (Ar <sup>+</sup> )
	514,5	Ión de Argón (Ar <sup>+</sup> )
	540,1	Neón (Ne) pulsado
	568,2	Ión de Kriptón (Kr <sup>+</sup> )
	632,8	Helio-Neón (He-Ne)
	647,0	Ión de Kriptón (Kr <sup>+</sup> )
	694,3	Rubí (pulsado)
Infrarrojo cercano	850	Semiconductor Ga As
	1060	Neodimio (Nd <sup>+</sup> )
	1300	Semiconductor GaAlAs
	1500	Semiconductor GaAlAs
Infrarrojo lejano	3390	Helio Neón (He-Ne)
	3507	Helio Xenón (He-Xe)
	9000	Helio Xenón (He-Xe)
	10.600	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )
	28.000	Vapor de agua
Submilimétrica	337000	Cianuro de Hidrógeno

Tabla 1. Longitudes de onda de los láseres más comunes.

de los láseres de estado sólido. La ganancia óptica por unidad de longitud es extremadamente buena, por lo que resulta bastante fácil conseguir la radiación láser en los gases. Pueden operar en modo continuo o en modo pulsado, consiguiéndose unos valores razonables de potencia media y muy buenos en los de  $\text{CO}_2$ , como se verá más adelante. Los láseres de gas de onda continua son, en general, de mayor longitud que otros tipos de láseres y son, además muy estables. La monocromaticidad, coherencia y directividad de su haz son excelentes, por lo que son ideales en aplicaciones de holografía, alineamiento óptico, medida de distancias, instrumentación científica, etc.

Los láseres de gas admiten distintas clasificaciones, pero la más frecuente se hace atendiendo al mecanismo de excitación del material activo. Siguiendo este criterio, se clasifican en láseres de gas neutro o atómicos, de gas iónico y de gas molecular. Los láseres de gas neutro o atómicos emiten en su mayoría en el infrarrojo y en algunos casos importantes, como el de helio-neón, en el visible. La región visible la cubren principalmente los láseres iónicos, que también emiten en la región del ultravioleta. Los láseres moleculares, aunque algunos emiten en el visible o en el ultravioleta, tienden principalmente al

infrarrojo, por encima de los  $5 \mu\text{m}$ . Casi todos los láseres de alta potencia en el infrarrojo son del tipo molecular. En la Tabla 2 se dan algunos datos comparativos de distintos tipos de láseres de gas.

Los láseres de gas más utilizados son los helio-neón (atómico), dióxido de carbono (molecular), de argón, de kriptón o mezcla de ambos (iónico), y de helio-cadmio (iónico de vapor metálico).

#### a) Láser atómico

Se llaman también de gas neutro o atómico de gas noble, y están formados en general por helio (He), neón (Ne), argón (Ar), kriptón (Kr) o xenón (Xe). Son los láseres más estables, monocromáticos y directivos que se conocen, y se excitan por la aceleración de electrones e iones entre sus dos electrodos, mediante un campo eléctrico exterior aplicado. Los electrones más rápidos colisionan con los átomos e iones, que son excitados a un nivel energético más alto. Al bajar los átomos e iones del nivel energético superior al inferior comienza la acción láser. La longitud de onda que producen está entre los  $0,41$  y  $216,3 \mu\text{m}$ . El más conocido y utilizado es el de helio-neón (He Ne) (Figura 4) cuyo material activo está formado por un 90% de helio y un

10% de neón, que es el verdadero material activo. El láser de HeNe oscila normalmente en tres longitudes de onda: en  $632,8 \text{ nm}$  (rojo), en  $1,150 \text{ nm}$  (infrarrojo), y en  $3,390 \text{ nm}$  (infrarrojo).

Se consigue una potencia en onda continua del orden de la fracción de watio, una de las mayores que se consiguen en los láseres atómicos de gases nobles. Los valores más típicos de potencia de los láseres de He-Ne oscilan entre  $5$  y  $20 \text{ mW}$  y son de los láseres más utilizados por su gran coherencia, su estabilidad y su precio razonable. Son láseres fiables, baratos, portátiles y fácilmente fabricables por la industria.

En otros láseres atómicos de gases nobles, se obtienen potencias del orden de la fracción de miliwatio.

#### b) Láser iónico de gas

En este tipo de láser de gas, inventado por W. Bridges en 1965, la emisión estimulada tiene lugar entre dos niveles energéticos de un ión, en vez de un átomo neutro completo, como en el caso anterior. Disipan una gran cantidad de potencia y por término medio dan una potencia óptica de pico, varios órdenes de magnitud por encima de los láseres atómicos de gas (varias decenas de watios en el

Tipo	Material activo	Tipo de excitación	Longitud de onda (nm)	Potencia	Eficiencia
Atómico	Helio-Neón (HeNe)	Continua (corriente)	632,8 (rojo)	Baja (mW)	Baja
Molecular	Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	Continua Generalmente (corriente)	10.600 (infrarrojo lejano)	Alta (kW)	Alta
Iónico	Ión de Argón (Ar)	Continua Generalmente (corriente)	500 (var) (verde)	Alta (W)	Baja
Iónico	Ión de Kriptón (Kr)	Continua Generalmente (corriente)	500 (var) (verde)	Alta (W)	Baja
Iónico de Vapor Metálico	Helio-Cadmio (He-Cd)	Continua	441,6	Baja (mW)	Baja

Tabla 2. Características de algunos láseres de gas comúnmente utilizados.

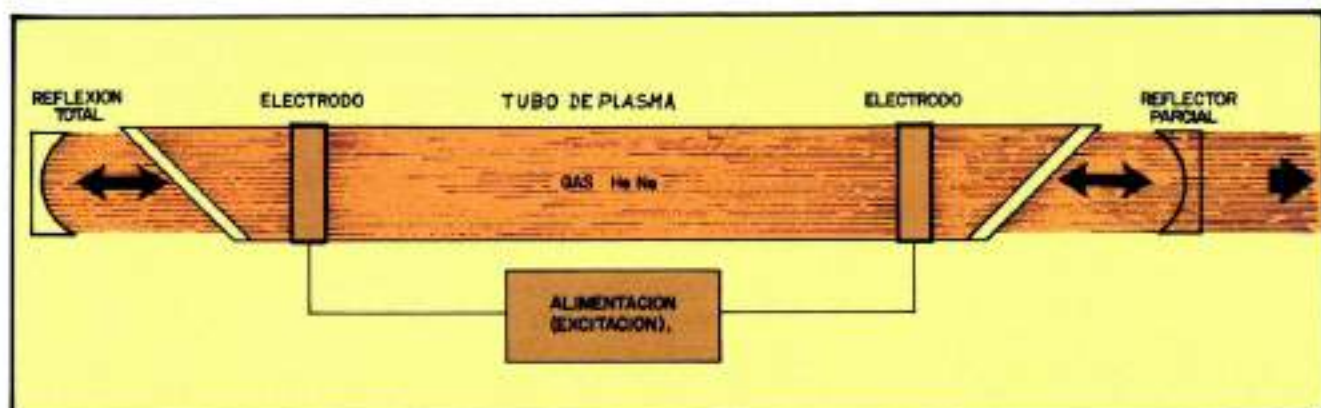


Figura 4. Diagrama simplificado de un láser de Helio-Neón.

rango de 235 a 1.550 nm de longitud de onda).

Según el tipo de material activo, estos láseres pueden ser: de gases nobles, de iones, de vapores metálicos, de gases de las familias del oxígeno y el nitrógeno, de halógenos y de otros materiales vaporizables.

— **Láser iónico de gas noble.** Más del 50% de las líneas espectrales de los láseres iónicos es producido por láseres de este tipo. Los gases más utilizados son el neón, el argón, el kriptón y el xenón. El láser iónico de argón II es el más eficiente y utilizado y oscila a 488 nm (azul) con potencias del orden de 10 w. Le sigue el de kriptón, que da menos potencia pero aún mayor rango de longitud de onda.

Un importante avance tecnológico ha sido los láseres iónicos refrigerados por aire, evitándose así tediosas instalaciones de refrigeración. Este tipo de láseres iónicos dan potencias del orden de las decenas de mW. No se prevé una evolución tecnológica drástica, en los próximos años, de este tipo de láseres.

— **Láser iónico de vapor metálico.** Están basados en la vaporización de metales sólidos o líquidos. Son menos eficientes y más difíciles de manejar que los anteriores. El primer láser iónico de vapor metálico fue el de mercurio. Los materiales activos más empleados son

el cadmio (Cd), el selenio (Se), el zinc (Zn), el plomo (Pb) y el estaño (Sn), o bien éstos mezclados con gases nobles como el helio. Estos láseres pueden funcionar en modo continuo o en modo pulsado.

Entre los de onda continua, uno de los más importantes de este grupo es de helio-cadmio (He-Cd), que da una potencia del orden de una fracción de watio a 441,6 nm y de unas 5 veces menos a 325 nm. Otro láser importante de este grupo es el helio-selenio (He-Se), que da 46 líneas espectrales entre 446,7 y 1.260 nm, con potencias entre 50 y 250 mW. Los de zinc (Zn), plomo (Pb) y estaño (Sn), funcionan del verde al infrarrojo, pero con potencia, en general, inferior a los anteriores.

Entre los láseres iónicos de vapores metálicos, de funcionamiento pulsante, están los de vapor de plomo, que dan pulsos de 10 a 20 ns con líneas espectrales en 722,9, 405,7 y 364 nm. Los de vapores de cobre dan una salida del orden de decenas de kW de pico a 510,5 nm de longitud de onda. Tanto los de plomo como los de cobre requieren temperaturas de 1.000 a 1.500°C, respectivamente. Otros materiales empleados para este tipo de láseres son el calcio (Ca), el manganeso (Mn) y el estroncio (Sr). En este grupo de láseres, es el de Helio-Cadmio el que menos se degrada, resultando una degra-

dación de potencia del 20% a las 5.000 horas de funcionamiento continuo.

- **Láser iónico de las familias del oxígeno y nitrógeno.** Estos láseres utilizan como materia activa, iones de las familias del O y del N, como el oxígeno (O), azufre (S), selenio (Se), telurio (Te), nitrógeno (N), fósforo (P), arsénico (As), antimonio (Sb) y bismuto (Bi).
- **Láseres iónicos de halógenos.** En este grupo de láseres se utiliza como materia activa el flúor (F), el cloro (Cl), bromo (Br) y yodo (I).
- **Otros láseres iónicos.** Pueden utilizarse como materia activa muchos elementos no mencionados anteriormente y vaporizables.

### c) Láser molecular de gas

En este tipo de láser, la estructura de niveles energéticos es muy compleja, produciéndose el mecanismo de excitación energética a nivel molecular. El más importante de este grupo es el de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Figura 5), que tiene una línea espectral a 9,6 μm de longitud de onda y otra a 10,6 μm en onda continua, con niveles de potencia del orden de los kW, y con eficiencias del 15 al 30%. La gama de longitudes de onda de los láseres moleculares de gas oscilan entre las 0,15 μm del láser diatómico de H<sub>2</sub> y los 733,5 μm del láser triatómico de HCN. Según

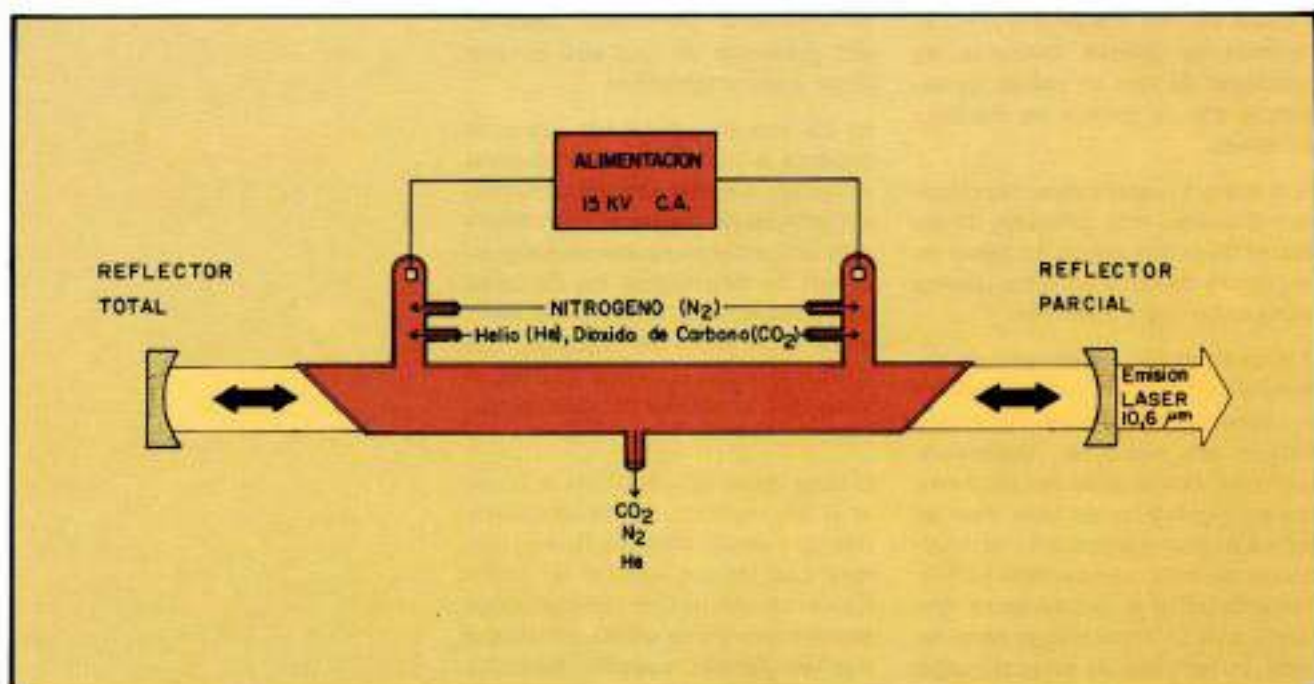


Figura 5. Diagrama simplificado de un láser típico de  $CO_2$  de alta potencia.

el tipo de excitación exterior, los láseres moleculares de gas pueden ser de excitación eléctrica, óptica y química.

Los láseres de  $CO_2$  pueden funcionar en onda continua con potencias de kilovatios y en forma pulsada, con potencias de pico de megawatios y aun gigawatios. Entre sus aplicaciones típicas se encuentran el corte, la soldadura, el taladro y la evaporación de materiales, radar óptico, aplicaciones militares, etc.

En los láseres de  $CO_2$  con descarga controlada por haz electrónico, se han obtenido pulsos de 1 Kjulio y 1 ns y de 2 Kjulios y 20  $\mu s$ , para experiencias de fusión nuclear.

En los láseres de gas dinámico, la excitación se produce por calentamiento del gas y enfriamiento brusco por expansión rápida, con lo que se han obtenido potencias continuas de decenas de kW.

En los láseres químicos, la inversión de población se produce por reacción química en sustancias tales co-

mo el HF, DF y el  $CO_2$ , con lo cual se obtienen potencias de centenares de vatios, con eficiencias del 5%. En algunos tipos de láser químico, se transfiere la excitación química de los reactivos a la materia activa propiamente dicha, como, por ejemplo, los láseres químicos de DF: $CO_2$ . En otros láseres químicos, la reacción se inicia por estímulos externos, como descargas eléctricas o destellos de luz.

#### LASERES DE ESTADO SOLIDO

El primer láser que se puso en funcionamiento fue de estado sólido, concretamente de rubí, realizado por Maiman en 1960, como ya se ha dicho. Desde entonces, los láseres de estado sólido han mejorado considerablemente, tanto en la diversidad de nuevos materiales empleados, como en su eficiencia, estabilidad, fiabilidad, gama de longitudes de onda, etc.

Los láseres de estado sólido están formados por una barra de material soporte, dopado con pequeñísimas

proporciones del material activo. Dicha barra está tallada en forma de resonador óptico y se excita, por lo general, ópticamente, mediante lámparas de tungsteno, de mercurio, de descarga de plasma, etc., según los casos. En función de la estructura interna del material dopado, los láseres sólidos pueden clasificarse en láseres de cristal o de vidrio.

En los *láseres de cristal*, el material soporte tiene una estructura cristalina, mientras que en los de vidrio, la estructura es amorfa, típica de los mismos. En ambos casos, las proporciones de dopante o material activo son muy pequeñas (del orden de décimas por ciento hasta el dos por ciento del peso total) y pueden dar a su salida altas potencias de pico.

Los materiales activos o dopantes de los láseres sólidos son metales de transición, como el cromo (Cr), el níquel (Ni) y el cobalto (Co), o bien las tierras raras o actínidos.

Los cristales más utilizados como material soporte son el rubí ( $Al_2O_3$ ), el granate de itrio y aluminio (YAG) y

el óxido de itrio y aluminio (YALO). También se utilizan fluoruros de magnesio, de zinc, de calcio, de estroncio, etc., y óxidos de distintos materiales.

En la Tabla 3 pueden verse los cristales y dopantes más utilizados en los láseres de cristal sólido. La gama de longitudes de onda en estos láseres oscila entre 550 y 2.700 nm.

El láser de cristal sólido más utilizado es el de Nd:YAG, que consiste en un cristal de óxido de itrio y aluminio dopado con neodimio, generando potencias desde unos vatios hasta incluso gigawatts de pico. Esto se debe a su gran estabilidad y conductividad térmica, que permite su funcionamiento a la temperatura ambiente, con un rendimiento considerable. Su longitud de onda principal es de 1.064 nm, aunque puede hacerse funcionar en unos armónicos de 659 nm y otros. Otras líneas espectrales de emisión son los 914 y los 1.350 nm.

Estos cristales de Nd:YAG no tienen una buena absorción de energía en el espectro visible, por lo que la eficiencia de la excitación óptica del material activo resulta pobre. Para mejorar esta absorción, se añaden al dopante ciertos iones llamados sensibilizadores, generalmente de cromo, que absorben la energía de la excitación exterior y la transfieren al propio material activo. Esto permite adaptar la banda de absorción del neodimio a la fuente óptica de excitación.

Otro láser de cristal sólido muy conocido y utilizado es el de rubí dopado con cromo ( $\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$ ), que emite en el espectro rojo visible (694 nm) y

generalmente en forma pulsante, con potencias de pico que pueden llegar a los megawatts.

En los *láseres sólidos de vidrio*, el dopante o material activo se pone sobre un material soporte de vidrio sin estructura cristalina. Los vidrios más utilizados como material soporte son los de silicatos, los de óxido de germanio, de fósforo o de boro, entre otros. Entre los dopantes más utilizados están el neodimio (Nd), el erbio (Er), el holmio (Ho) y el iterbio (Yb).

El láser sólido de vidrio más utilizado es el de neodimio, por su alto rendimiento y estabilidad con la temperatura. Los láseres sólidos de cristal tienen mucha mejor conductividad térmica que los de vidrio, por lo que pueden generar mayores potencias con menor tamaño de la barra de material activo. Por esta misma razón, es más fácil el funcionamiento de onda continua en los láseres de cristal. El principal inconveniente de los láseres de cristal es la dificultad de obtención de cristales de cierto tamaño y, por consiguiente, su coste es más elevado.

Los láseres sólidos de vidrio tienen también ciertas ventajas frente a los de cristal, como, por ejemplo, su fácil fabricación, que permite hacer desde fibras de tamaños pequeñísimos hasta barras con diámetros de varios centímetros y de varios metros de longitud.

En general, tienen mejor calidad óptica que los de cristal, y su fabricación, más versátil, permite hacer estructuras con índice de refracción variable y coeficiente de temperatura autoajutable, para darle mayor es-

Material soporte	Material activo (dopantes)
Rubí $\text{Al}_2\text{O}_3$	Metales de transición Cr; Ni; Co
Fluoruros $\text{MgF}_2$ ; $\text{ZnF}_2$	Tierras raras y actínidos Nd; Pr; Er; Ho; Er; Tm; Yb; Sm; D; Tm
Oxidos $\text{Y}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ ; $\text{CaWO}_4$ ; $\text{CaMoO}_4$ ; $\text{Y}_2\text{O}_3$	

Tabla 3.



tabilidad térmica. Incluso se han hecho experiencias, sobre fibra óptica dopada con neodimio, para amplificar las señales ópticas que se propagan por la fibra. La principal desventaja de los láseres de vidrio es su baja conductividad térmica, que limita considerablemente la potencia máxima que pueden generar con cierta eficiencia.

Los láseres sólidos tienen una amplia gama de aplicaciones. En el rango de bajas potencias pueden citarse la medición de distancias, los radares ópticos y las comunicaciones por aire. En el rango de medianas y grandes potencias pueden citarse las aplicaciones de mando de satélites, aplicaciones militares, aplicaciones industriales de taladrado y tratamiento de superficies, e incluso para experimentos de inicio de reacciones de fusión termonuclear en los que se emplean potencias de pico del orden de varios gigawatts.

## LASERES DE SEMICONDUCTORES

El primer láser de semiconductor se concibió en 1962, simultáneamente en los laboratorios de General Eléctrica, IBM y MIT Lincoln Laboratory.

En los láseres de gas y en los sólidos, como se ha visto anteriormente, la emisión se produce como consecuencia de las transiciones entre sus distintos niveles de energía. En cambio, la emisión láser en los materiales semiconductores es consecuencia de transiciones en una estructura mucho más compleja de niveles energéticos, como es la del cristal semiconductor. Los niveles energéticos en los semiconductores están agrupados en bandas de energía, separados por bandas de energía prohibidas y con electrones en las bandas inferiores.

Los semiconductores intrínsecos o puros se convierten en extrínsecos, añadiendo en su estructura cristalina impurezas donantes o aceptadoras, para crear así semiconductor tipo "N" o tipo "P". En los semiconducto-

res tipo "N", las impurezas donantes producen un exceso de electrones libres en la banda de conducción, y en los del tipo "P", las impurezas aceptadoras producen un exceso de huecos (cargas positivas, por defecto de electrones) en la población de electrones de la banda de valencia, que está por debajo de la banda prohibida.

La emisión de luz se obtiene en la unión de una zona "P" con una zona "N" del semiconductor (unión P-N), mediante una inyección de portadores (electrones y huecos) que, al recombinarse, genera la radiación de luz.

Los láseres de GaAs operan a una longitud de onda en el rango de 840 a 850 nm, aunque con otros semiconductores, tales como el ZnS, ZnO, CdS, PbS, PbTe, PbSe, PbSnTe y PbSnSe, pueden cubrirse un rango de longitudes de onda entre 0,33 y 31,2  $\mu\text{m}$ .

Las propiedades de los semiconductores son muy dependientes de la temperatura y, por lo tanto, su estabilidad no es tan buena como sería deseable. Las características ópticas de los láseres de semiconductor son varios órdenes de magnitud inferiores a las de otros láseres, tanto en estabilidad de la longitud de onda de salida, como en su coherencia, anchura espectral y directividad. La salida de potencia también es menor que la de otros láseres (del orden de milivatios de potencia media) pero su eficiencia es mucho mayor (próxima al 100%) y, por otra parte, tienen la posibilidad de modulación directa, modulando su corriente de excitación a frecuencias que pueden llegar a varios GHz (1 GHz = 1.000 millones de impulsos por segundo).

El láser de semiconductor más sencillo es el denominado de *homoión*, que está hecho de un monocristal del tipo III-IV, como el arseniuro de galio (GaAs), dopado con átomos donantes, tal como el telurio (Te) y aceptadores como el zinc (Zn), difundidos de tal manera que se crea una

unión P-N. Al inyectar corriente en la unión, se produce una variación lineal de la emisión luminosa (espontánea) hasta que se alcanza un límite o umbral, en que se produce la emisión estimulada. La estructura del semiconductor está terminada con caras talladas planas y paralelas, para formar la cavidad resonante del láser. Este tipo de láser sólo puede operar a pulsos de corta duración, y nunca en onda continua.

Un avance importante en los láseres de semiconductor se dio con los llamados láseres de *heterounión* o *heteroestructura*, que funcionan con corrientes mucho menores que los láseres de homounión, y pueden funcionar en onda continua a temperatura ambiente. Estos láseres son extremadamente pequeños, menores que un grano de arena, y se necesitan unos voltajes de sólo algunos voltios y corrientes de unas decenas de miliamperios para su funcionamiento, debido a que su región activa es muy estrecha. En los láseres de heterounión simple, esta región tiene una anchura de  $2\ \mu\text{m}$  y en un láser de doble heterounión, la anchura de esta zona puede llegar hasta  $0,2\ \mu\text{m}$ .

Los láseres de gran cavidad óptica (LOC) están basados en la regeneración y propagación de la luz en la misma región activa, colocando una capa muy fina de recombinación tipo "P" próxima a una capa más ancha de propagación tipo "P", y así, en lugar de verse la luz sometida a una absorción por la región activa, se propaga por una capa pasiva no absorbente, permitiéndose con ello obtener mayores potencias de pico, utilizando una amplia región de la cavidad óptica, en lugar de la estrecha unión P-N. Se han construido láseres LOC con la zona de emisión hasta de  $30\ \mu\text{m}$  y eficiencias cuánticas del orden de 60 al 70%.

Los láseres de semiconductor son de un especial interés en los sistemas de comunicación por fibras ópticas, por emitir con alta eficiencia en los rangos de longitudes de onda menos atenuadas por la fibra óptica, y por

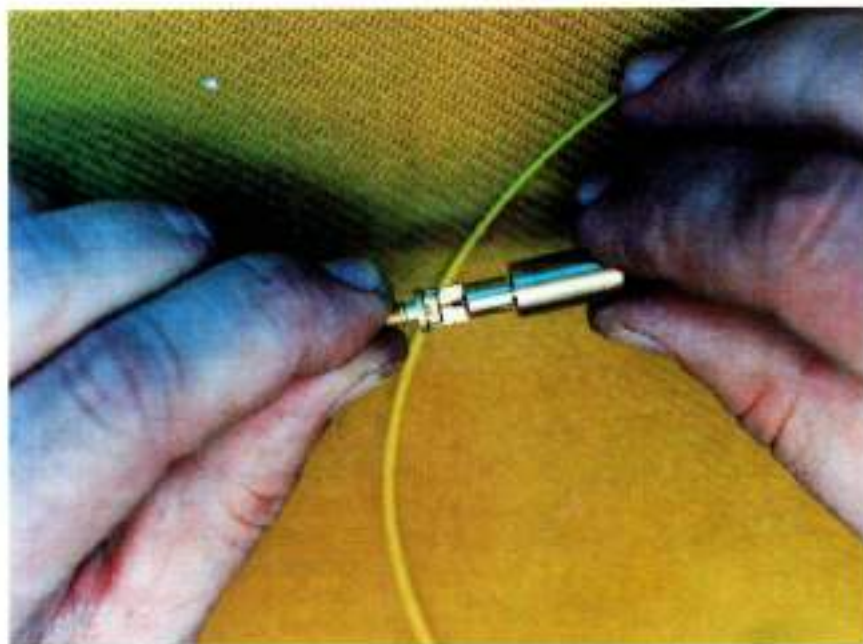


Figura 6. Láser de semiconductor acoplado a un tallo de fibra óptica. (Standard Eléctrica, Centro de Investigación).

conseguirse una radiancia suficientemente alta y con una buena directividad, en un tamaño casi microscópico. Además, este tipo de láser puede llegar a alcanzar una alta fiabilidad, a costes relativamente bajos.

#### Tipos de materiales para láseres de semiconductores

Según la estructura de bandas de energía, los semiconductores son de dos tipos: directos e indirectos. En los *semiconductores directos* es posible una recombinación directa de los portadores, siendo un proceso altamente eficiente, como es el caso del GaAs, InAs, InP,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $0 \leq x \leq 0,37$ ) y el  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$  ( $0 \leq y \leq 0,45$ ).

En los *semiconductores indirectos*, como el silicio (Si), germanio (Ge), GaP, y AlAs, se requiere la participación de fotones para que se produzca la recombinación electrón-hueco, siendo éste un proceso de baja ganancia, y por lo tanto resulta difícil obtener la radiación láser. Por ello, la mayoría de los láseres de semiconductores utilizan materiales directos,

siendo el material más utilizado el arseniuro de galio (GaAs) y sus derivados.

#### Métodos de excitación

Para conseguir la acción láser en los semiconductores como en cualquier material, es necesario conseguir la inversión de población y tener una estructura en forma de cavidad resonante. Los métodos más usados en la historia del láser de semiconductor han sido los siguientes:

##### a) Inyección

Con el láser de semiconductor es con el único que se pueden formar uniones PN. Cuando a la unión no se le aplica ningún potencial exterior, se crea una barrera de potencial en la misma que evita el paso de corriente. Al aplicar un potencial exterior directo, se reduce esta barrera de potencial, y los electrones y huecos pueden superar la barrera y emitir fotones, con una energía aproximadamente igual a la anchura de la banda prohibida. Cuando se aplica un voltaje suficiente, puede existir

una región en las proximidades de la unión, en la que se invierte la población, y dado que la región de la unión es muy estrecha, la ganancia óptima máxima sobre una distancia razonable se dará en el plano de la unión, por lo que se construye una estructura resonante o cavidad óptica. Para pequeñas corrientes, existe una emisión espontánea en todas las direcciones, y al aumentar la corriente, se incrementa la ganancia, hasta alcanzar el umbral requerido para la acción láser.

El método de excitación por inyección de portadores es hoy día casi el único utilizado, por su gran sencillez y enormes posibilidades de modular láseres en alta frecuencia de repetición, así como de estabilización con control electrónico. Los demás métodos se utilizan en investigación, o cuando no pueden realizarse uniones PN en el material semiconductor.

#### b) *Excitación por haz electrónico*

En este caso no es necesario que exista una estructura en forma de unión PN, sino que el material semiconductor se somete a un haz electrónico de alta energía (20 KV o más). Los electrones penetran unas micras en el material, utilizándose dicha energía en la creación de muchos pares electrón-hueco (e-h) de baja energía (del orden de 10.000 pares e-h por electrón incidente) que caen a las bandas de conducción y de valencia respectivamente, formándose la inversión de población.

#### c) *Excitación óptica*

Aunque mucho menos que la excitación por inyección, la excitación óptica con energía fotónica mayor que la banda prohibida también se ha empleado en los láseres de semiconductor, con mecanismos parecidos al de la excitación electrónica. A veces se han utilizado láseres de GaAs para excitar otros láseres de InSb y InAs que producen longitudes de onda diferentes. Uno de los problemas de este tipo de excitación es que la

luz se absorbe muy cerca de la superficie del semiconductor, lo que limita su eficacia.

#### d) *Excitación por avalancha*

Acelerando los electrones o huecos en un semiconductor con suficiente energía mediante un campo eléctrico, éstos pueden ionizar un electrón en la banda de energía para producir un par electrón-hueco. Esto puede producirse en un semiconductor sin unión P-N, o bien en una unión P-N inversamente polarizada. Este procedimiento tiene por lo general muy baja eficiencia, y puede emplearse con estructuras especiales.

## LASERES DE LIQUIDO

Además de gases, sólidos y semiconductores, la sustancia activa de los láseres puede ser también un líquido o ciertos compuestos disueltos en un medio líquido. Por lo general, este tipo de láser genera radiación visible, llegándose en algunos casos hasta el infrarrojo cercano, y tiene la peculiaridad de que, en su mayoría, son sintonizables, es decir, la longitud de onda de la radiación láser es seleccionable en un amplio margen. Esta propiedad hace que estos láseres sean muy atractivos para los laboratorios de investigación.

Existen distintos grupos de láseres de líquido, siendo los más representativos los inorgánicos y los de líquidos orgánicos o de tinte.

Los *láseres orgánicos de tinte* utilizan como sustancia activa diversos compuestos orgánicos fluorescentes, tales como rodamina, kiton rojo, oxamina, etc. Estos fluorescentes orgánicos se disuelven en disolventes especiales. El primer láser de tinte lo realizó Sorokin y su equipo en los laboratorios IBM, operando a  $0,765 \mu\text{m}$ , aunque también podía operar en el rango de  $0,34$  a  $1,175 \mu\text{m}$ . El rango de variación de los láseres de tinte es de unos  $40 \text{ nm}$ , desde el ultravioleta al amarillo. El procedimiento más utilizado actualmen-

te para la sintonía o selección de la longitud de onda, es el de la red de difracción, que es una especie de filtro que dispersa en el espacio las distintas longitudes de onda, seleccionando la deseada mediante rendijas de una anchura determinada. Existen láseres comerciales que funcionan en onda continua y otros, a pulsos.

Los láseres de tinte se excitan con otro láser, y, en algunos casos, por lámparas de destellos muy rápidos. Como se ha dicho, su mayor utilidad radica en su ajuste de longitud de onda, que los hace idóneos para aplicaciones de análisis espectral, de estudios de contaminantes, en procesos fotoquímicos, etc. Se ha dicho que los láseres de tinte son el caballo de batalla de los láseres sintonizables; tanto es así que estos láseres, junto con los láseres de excitación, suponen aproximadamente un 70% del mercado de láseres de laboratorio. Las tendencias de los láseres de tinte apuntan hacia la mejora de la fiabilidad, evitando la degeneración de la sustancia activa, la mejora de la estabilidad de la molécula del tinte, de los disolventes y de la eficiencia de excitación óptica, y la búsqueda de nuevos tintes en la gama del infrarrojo.

Los láseres de líquidos con tierras raras están formados por compuestos metálico-orgánicos. En estos dispositivos, la excitación se produce primero en la parte orgánica de la molécula, transfiriéndose luego al ión metálico de la sustancia activa. Sólo pueden obtenerse eficiencias razonables con tubos delgados de sustancia activa, con el inconveniente de la gran inestabilidad en las características espectrales, debido a las variaciones del entorno. Son, en general, menos eficientes que los láseres sólidos y suelen requerir refrigeración. La gama de longitudes de onda oscila entre 0,54 y 1,05  $\mu\text{m}$ .

Otro tipo de láser líquido es el iónico inorgánico, cuyo tipo más representativo es el de oxiclورو de selenio

dopado con neodimio. Estos láseres son casi tan eficientes como los láseres sólidos y pueden también funcionar a temperatura ambiente, con potencias de pulso de centenares de julios. Otro disolvente, a veces utilizado para dispersar el neodimio, es el oxiclورو de fósforo, pero tiene el gran inconveniente de ser corrosivo y altamente tóxico.

Uno de los inconvenientes de los láseres de líquido es su gran dilatación térmica, que obliga a contar con el correspondiente espacio para expansión. Su conductividad térmica es mejor que la de los láseres de vidrios sólidos, por lo que permiten grandes potencias medias de emisión.

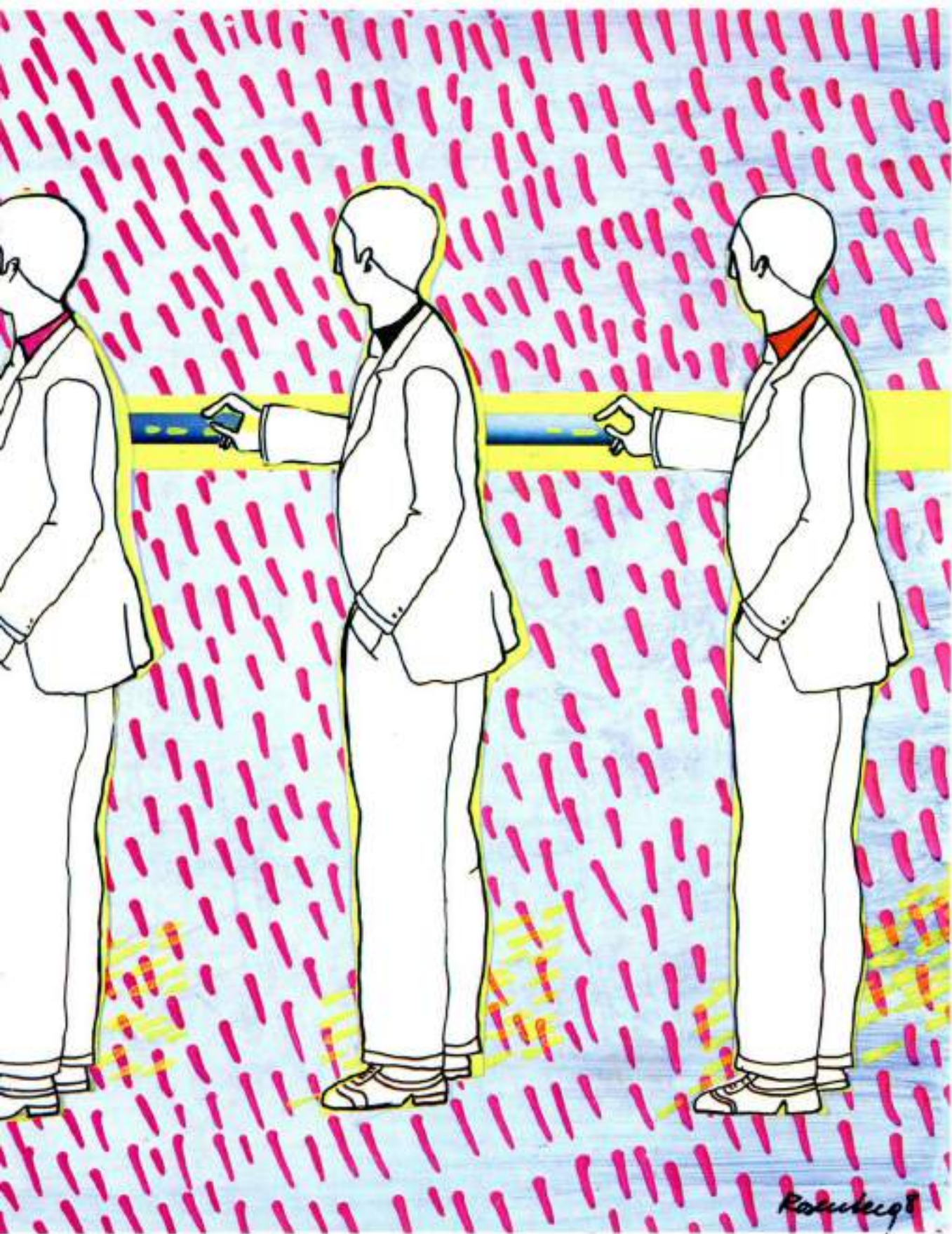
#### LASERES DE ELECTRONES LIBRES

Estos tipos de láseres, a diferencia de los anteriores, no tienen una sustancia activa que se estimule, sino que son los cambios energéticos de un chorro de electrones excitados los que producen la radiación. Estos dispositivos son sintonizables en un margen amplio de longitudes de onda y de una manera muy versátil, pero aún están en una primera etapa de desarrollo. Pueden clasificarse en dos grandes tipos: los que hacen uso de un campo magnético ondulado para acoplar un rayo de electrones a una onda electromagnética, y los que hacen uso de una onda de vibración lenta para este propósito.

En el rango de ondas milimétricas, existen dispositivos llamados girotron, orotron y tipo "Raman". El girotron es, de estos, el dispositivo de mayor rendimiento y mayor potencia. En el rango de longitudes de onda más cortas, submilimétricas y cercanas al infrarrojo, el único dispositivo hasta ahora operativo es el llamado tipo "Stanford".

Es de esperar que en los próximos años puedan obtenerse potencias y eficiencias sin precedentes con estos tipos de láseres, lo que hace esperar un gran futuro para estos dispositivos.





Rosulicq8

## **APLICACIONES DEL LASER. APLICACIONES EN EL AMBITO DE LA DEFENSA**

Desde sus principios, el láser ha sido considerado como un ingenio que emite un rayo de alto poder destructor. Hoy puede afirmarse que las armas láser nunca serán utilizadas para la destrucción masiva. Un rayo bien colimado, bien dirigido, con la longitud de onda adecuada y con la suficiente energía, puede ser utilizado como arma defensiva para neutralizar satélites, misiles o aviones enemigos en vuelo, a distancias superiores a 100 km y con una gran rapidez. A continuación se avalizan las principales aplicaciones en el ámbito de la Defensa.

### **ARMAS CON LASER DE ALTA ENERGIA**

El láser puede ser utilizado, principalmente por las fuerzas armadas, como arma defensiva de alta energía. Los láseres requeridos para esta aplicación, además de radiar altas energías, deben hacerlo con la suficiente precisión como para poder dar exactamente en el blanco, ya que, al contrario que en las armas de efecto explosivo, el efecto de la radiación láser sobre una superficie está localizado sólo en el área irradiada.

Pueden distinguirse dos tipos de armas láser: las que trabajan en el espacio y las que lo hacen en la atmósfera. Cada tipo está caracterizado principalmente por las distintas condiciones de propagación del rayo. A su vez, tanto unas como otras, pueden estar situadas en la atmósfera o fuera de ella, lo que da diversas variantes con diferencias sustanciales, tanto en los mecanismos de propagación, como en los de destrucción, tipos de láser a utilizar, fuentes de energía y mecanismos de puntería y comprobación.

No existe actualmente un criterio unánime sobre la utilización del láser como arma, porque, si bien es verdad que puede taladrar fácilmente chapas metálicas y dañar circuitos electrónicos a cientos de kilómetros de distancia, actuando con la veloci-

dad de la luz (300.000 km/s), también es verdad que requieren unos mecanismos de puntería muy sofisticados y que están muy condicionados, en algunos casos, por los agentes meteorológicos. El programa actual de investigación y desarrollo de armas láser en EE. UU. es de unos 300 millones de dólares anuales. Recientemente el Congreso de los EE. UU. ha pedido ampliación de estos fondos, en base a que la Unión Soviética ha obtenido grandes progresos en armas láser contra misiles, lo que le da una mayor capacidad defensiva.

Se hace necesario, no obstante, un detenido análisis de la verdadera eficacia del láser como arma, comparando con otros medios defensivos, ya que existen obstáculos técnicos considerables, que se irán apareciendo a lo largo de las distintas aplicaciones.

### **MECANISMOS DE DESTRUCCION PRODUCIDOS POR UN ARMA LASER**

La efectividad de un impacto con un rayo láser para producir efectos destructivos está dada por el factor de acoplamiento del impulso, que es la relación entre la energía total del impulso generado por el láser y la energía total interceptada por el blanco. Este factor depende de la intensidad del rayo, de la duración del impulso, de la longitud de onda de la radiación, del tipo de material y de los factores de propagación.

La cantidad de energía absorbida no depende solamente de la capacidad de absorción de la superficie del blanco, sino que es consecuencia de la combinación de los efectos de vaporización de dicha superficie, absorción del plasma, calentamiento, expansión de gases, rerradiación, etc. Este proceso combinado se recoge en el llamado coeficiente de acoplamiento térmico. Por ejemplo, este coeficiente, para una superficie de aluminio irradiada con un láser de CO<sub>2</sub> 10,6  $\mu$ m puede oscilar entre el

5 y el 40%, dependiendo de las condiciones de la superficie y de su entorno. Las armas láser pueden dañar la estructura de los ingenios atacantes, así como su equipo electrónico, e incluso a los operadores de dichos ingenios a través de distintos mecanismos físicos.

El daño térmico directo es el que resulta del efecto directo del rayo sobre la superficie del blanco, que puede fundir, vaporizar o quemar dicha superficie. Por ejemplo, para perforar una chapa de aluminio de 3 mm de espesor en el vacío del espacio, sería necesario un flujo energético de 5.000 julios por  $\text{cm}^2$ ; en cambio, los componentes semiconductores, los sensores ópticos, las células solares, etc., se dañan con tan sólo una densidad de energía 500 veces menor.

Al aplicar un rayo de unos 10 MW/ $\text{cm}^2$  en un objetivo situado en la atmósfera, se formará un plasma de aire ionizado en las inmediaciones del blanco. Este plasma absorbe el haz láser excitándose y libera la energía absorbida emitiendo radiación ultravioleta y expandiéndose explosivamente.

Estos dos mecanismos contribuyen a incrementar la energía absorbida por el blanco en un 30%, pudiéndose reducir en esa cantidad la energía necesaria.

Una serie de pulsos de alta energía, del orden de 1 MW/ $\text{cm}^2$ , aplicados sobre una superficie metálica brillante, le harían perder su brillo, aumentando así la energía absorbida, hasta llegar a fundirse.

El daño mecánico indirecto es el resultado del intenso calor del rayo y de la presión del plasma en expansión ejercida sobre el blanco, la cual puede deformar y hasta perforar su carcasa metálica. El impacto de un pulso de luz láser con la suficiente energía puede llegar a vaporizar el metal de la superficie del blanco. Este metal vaporizado escapa a altísima velocidad, produciendo una gran fuerza de reacción contra el blanco.

Los daños por ionización están causados por los rayos X radiados por el plasma excitado por el láser en la superficie del blanco. Cuando una radiación láser de alta energía alcanza a un blanco en el vacío, el material vaporizado por el rayo puede crear un plasma lo suficientemente excitado como para causar la radiación de rayos X, los cuales pueden dañar a los instrumentos electrónicos en el interior del blanco. Para generar rayos X con la suficiente energía, se necesitan flujos de potencia del orden de los 100.000 MW/ $\text{cm}^2$  (cantidades hoy por hoy impensables, más aún con el láser a gran distancia del blanco.)

El daño termomecánico es una combinación de los efectos térmicos y mecánico y requiere menor energía que cada uno de los efectos independientemente. Por ejemplo, un rayo continuo puede elevar la temperatura de una chapa metálica hasta cerca del punto de fusión, y luego, un pulso de alta energía perfora dicha chapa, con menos energía total de la necesaria con un solo efecto. Otro efecto termomecánico se consigue también con un tren de impulsos de alta energía, incidiendo sobre la chapa metálica, de manera que cada pulso tenga suficiente energía como para alcanzar el límite plástico del metal. Este efecto es acumulativo con cada pulso, debilitando la superficie y produciendo también un calentamiento. Este tipo de daño termomecánico requiere también menos energía que la de la simple fusión o vaporización por láser.

El efecto biológico del láser, a pesar de que estas armas no están concebidas para ello, debe tenerse en cuenta para la defensa contra determinados tipos de ataques. Por ejemplo, mientras que para atravesar la chapa de un avión se necesita un flujo de energía de 700 julios/ $\text{cm}^2$ , para producir daños en la retina de un piloto no protegido, sólo son necesarias diez millonésimas de julio/ $\text{cm}^2$ . Un flujo de 1 julio/ $\text{cm}^2$  en el infrarrojo puede dañar la córnea, y pa-

ra dañar la piel son necesarios unos 15 julios/cm<sup>2</sup>. En defensa aérea estratégica, deben buscarse unos efectos más eficaces, puesto que muchos bombarderos están equipados para protegerse del resplandor de explosiones nucleares. El conocimiento de los efectos biológicos del láser tiene mayor interés para la protección de los operadores de armas láser y del personal civil o militar de las fuerzas propias. Los elementos de protección para los ojos son gafas o prismáticos especiales que bloqueen la longitud de onda de que se trate, visores de visión nocturna, intensificadores de imagen, etc.

#### TIPOS DE LASERES UTILIZADOS COMO ARMAS

Generalmente, para obtener la energía necesaria en un arma láser, hay que disponer de un generador primario seguido por una o varias etapas amplificadoras de luz en fase.

Una posible clasificación de los osciladores y amplificadores láser es la de láseres de electrones confinados, en los que la luz se genera al excitar una determinada materia activa por distintos procedimientos, y láseres de electrones libres, que generan la radiación de luz a partir de un chorro de electrones o de plasma.

Los láseres de electrones confinados sólo pueden emitir en algunas longitudes de onda que son características del material activo utilizado, y que van desde el infrarrojo hasta los rayos X. Cada tipo de arma láser requiere la elección adecuada de la materia activa, ya que, mientras longitudes de onda más cortas (ultravioleta) producen más daños en los blancos, las longitudes de onda más largas (infrarrojo) se propagan mejor por la atmósfera. Además, debe tenerse en cuenta el mecanismo de excitación y la fuente de energía a utilizar en el arma. Este tipo de láseres puede clasificarse, en función del método de excitación, en láseres de dinámica gaseosa, láseres químicos,

láseres de descarga de electrones y láseres de excitación óptica.

Los *láseres de dinámica gaseosa* generan la inversión de población por combustión de gases del tipo del dióxido de carbono. El gas se forma a alta temperatura y, por tanto, sus moléculas están en excitación. Este gas se enfría bruscamente al ser expandido en unas toberas, de tal forma que a las moléculas no les da tiempo a volver a su estado energético fundamental, creándose una inversión de población que origina la emisión láser inmediatamente después de la expansión.

En los *láseres químicos* se combinan dos componentes dentro del láser para formar las moléculas activas con un nuevo compuesto. Debido a la reacción, las moléculas se forman en estado excitado. Con un control adecuado puede lograrse la emisión estimulada antes que las moléculas vuelvan a su estado fundamental. El más utilizado de los láseres químicos es el de fluoruro de hidrógeno, a partir de hidrógeno y flúor en estado gaseoso. Estos láseres son buenos candidatos para bases espaciales, porque han desarrollado energías de 162 kJ/kg, y se pueden conseguir energías 10 veces superiores.

En los *láseres de descarga de electrones* se consigue la excitación de un medio gaseoso al ser atravesado por un haz de electrones que colisionan con las moléculas del gas activo, cediéndole parte de su energía, para producir la inversión de población y, como consecuencia, la emisión de láser.

Los *láseres metálicos de rayos X*, excitados ópticamente por una radiación de rayos X originados por una pequeña explosión nuclear, pueden dar aún más energía que los láseres químicos de fluoruro de hidrógeno.

Los *láseres de electrones libres* generan una radiación láser por estímulo de la dispersión de fotones, a partir de electrones o de plasmas. Estos láseres pueden ajustarse para



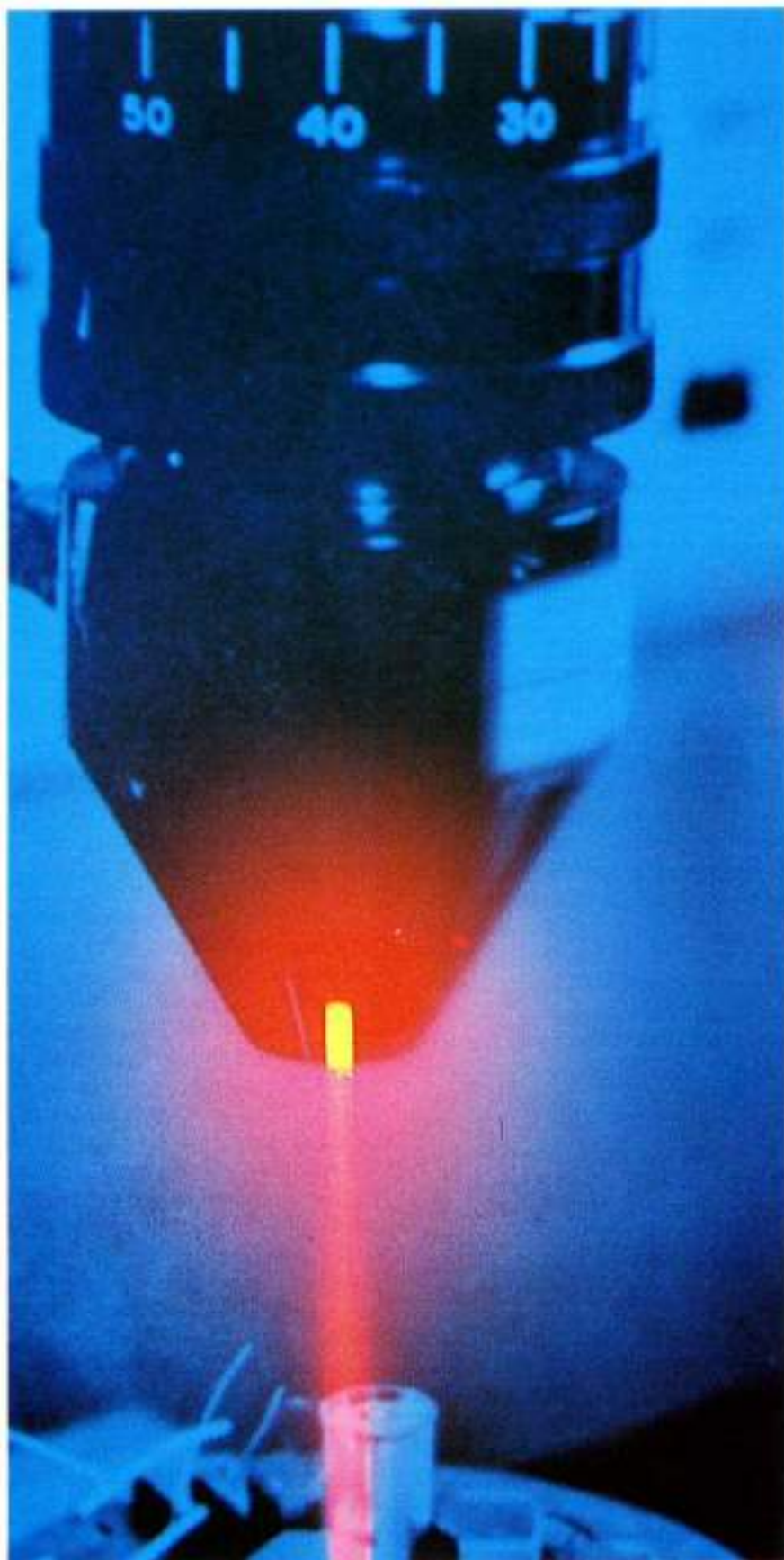
funcionar en cualquier longitud de onda, que puede ir desde las microondas submilimétricas hasta el ultravioleta y, en algunos casos, hasta los rayos X. Hasta la fecha, sólo se han construido algunos láseres de electrones libres, pero existe un gran esfuerzo investigador en este campo en los países tecnológicamente avanzados.

Los tipos de láser a utilizar como armas en bases terrestres o en aviones, deben elegirse con longitudes de onda que se propaguen bien por la atmósfera. Para este fin se están utilizando láseres de fluoruro de deuterio y de dióxido de carbono, y últimamente de láseres de yodo. Se han iniciado en los EE.UU. programas de desarrollo de láseres químicos de yodo, de los que se espera obtener una elevada energía y unas buenas condiciones de propagación atmosférica.

#### **SISTEMAS DE PUNTERIA Y CONTROL DEL RAYO**

Para apuntar el rayo al blanco de una forma precisa y mantenerlo apuntado el tiempo necesario para su destrucción, se requiere un sistema de localización y seguimiento y un sistema de puntería y enfoque. También resulta necesario un sistema que determine la inutilización del blanco para reanudar la acción sobre otro blanco.

El sistema de localización y seguimiento puede realizarse con sensores pasivos de infrarrojos que detecten la radiación del blanco, o por un sistema lidar (radar láser) que localice el blanco, emitiendo un pulso de luz y recogiendo su eco. Los sistemas de seguimiento con sensores pasivos de infrarrojos utilizan un mosaico de detectores que detectan un foco de calor sobre un fondo iluminado. Este método es sencillo para el seguimiento de misiles o de aviones, pero difícil para satélites pequeños. El inconveniente de estos sensores



es su vulnerabilidad a la iluminación hostil.

Los sistemas de seguimiento con lidar utilizan un filtro interferencial de entrada que los protege tanto de la iluminación ambiental, como de las radiaciones láser de las contramedidas enemigas de distinta longitud de onda.

La mayoría de las armas láser necesitan una gran apertura de transmisión para minimizar la difracción, los efectos de propagación y el calentamiento de los componentes ópticos del láser. Normalmente se utilizan sistemas ópticos adaptativos formados por espejos flexibles, diseñados para mantener una imagen óptima perfecta, o adaptar la forma del rayo a la propagación óptima.

### ARMAS LASER ESPACIALES

Las grandes potencias están considerando seriamente la posibilidad de utilizar una red de satélites armados con láser, principalmente como defensa de misiles intercontinentales enemigos, en la fase de lanzamiento (que dura unos 8 minutos). Por ejemplo, cada satélite tendría que estar equipado con un láser de 2 a 5 MW, y con espejos de 5 a 10 m de diámetro, dependiendo de la longitud de onda del láser y de la divergencia deseada. Estos láseres, si son químicos necesitarían de unos 500 kg de combustible por cada misil abatido a 200 km de distancia, y, suponiendo una autonomía para derribar a 1.000 misiles, se necesitan 500 toneladas de combustible químico, lo cual costaría unos 1.100 millones de dólares, puesto en órbita (Figura 7).

El estado de la tecnología en estos tipos de láseres, no permite aún su utilización, pero existen importantes programas de investigación en los EE.UU., estando previstas las primeras pruebas para 1983, utilizando un láser de fluoruro de deuterio, con un alcance de unos 800 km, capaz de dañar satélites en órbita.

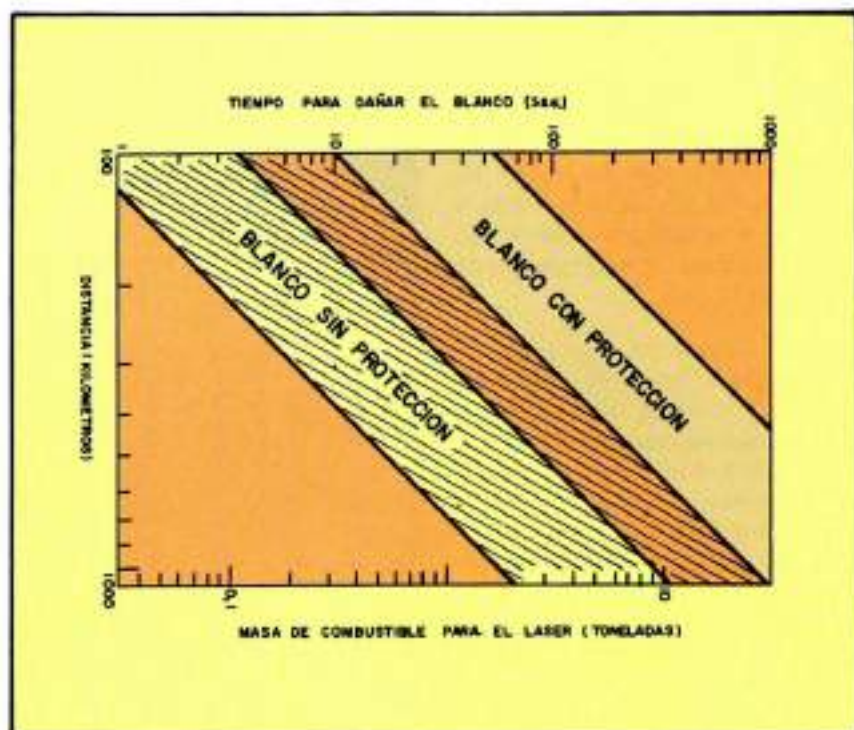


Figura 7. Tiempo y masa de combustible necesarios para dañar un blanco de aluminio de 2 mm. de espesor, con un láser de 5 MW, en función de la distancia.

### Características de las armas láser espaciales

La ventaja más importante de las armas láser, frente a otras armas, es su enorme velocidad de respuesta y su gran precisión. Un disparo de un pulso de energía láser se propaga a la velocidad de la luz (3.000.000 km/s), que es el límite máximo de velocidad alcanzable según la física actual. La velocidad de los misiles o satélites es del orden de 10 km/s, lo cual significa que, a distancias de unos 150 km, estos blancos móviles sólo se pueden mover unos 5 metros en el tiempo transcurrido entre el disparo del láser y el impacto en el blanco. Esto, unido a que en el vacío del espacio, la luz se propaga sin perturbación y en línea recta y que el rayo puede dirigirse rápidamente hacia el siguiente blanco, hace del arma láser un arma potencial muy precisa y rápida, comparada con la tecnología más convencional de defensa antimisil y antisatélite, basada en satélites de-

fensivos con posibilidad de manio-  
bra, y en misiles de gran aceleración  
con pequeñas cabezas nucleares.

Pese a las ventajas expuestas, la uti-  
lización del láser en este tipo de ar-  
ma defensiva no está muy clara aún,  
por la superioridad potencial de las  
armas de rayos de partículas, de re-  
ciente desarrollo, y por la supuesta  
vulnerabilidad de las armas láser.

Existen varios programas de investi-  
gación, tanto en EE.UU. como en la  
URSS, para el desarrollo de armas  
de rayos de partículas de diversos ti-  
pos. Una forma de emitir un rayo de  
protones consiste en una cámara de  
explosión donde se produce una pe-  
queña explosión nuclear. El plasma  
excitado producido por la explosión,  
genera un pulso de energía eléctrica  
que, acoplado a un acelerador de  
partículas, genera el haz de proto-  
nes. También existen programas de  
investigación para armas de rayos

de protones, de electrones, de iones  
o de partículas neutras.

La ventaja principal de las armas de  
rayos de partículas sobre las de láser  
es una mayor eficiencia, que hace  
posible la construcción, a costes  
comparables, de armas más eficaces  
y menos sensibles a las contramedidas.  
Sin embargo, debido al avance  
relativo de la tecnología láser frente  
a la de rayos de partículas, parece  
previsible que, al menos durante la  
presente década, tengan una consi-  
derable utilización las armas láser,  
ya que la tecnología para hacer posi-  
bles en forma práctica las armas de  
rayos de partículas no estará dispo-  
nible hasta finales de siglo.

Una red de satélites armados, como  
defensa contra ataques de misiles o  
con misiones de destrucción de saté-  
lites enemigos, puede crear un gran  
desequilibrio de fuerzas, en opinión  
de expertos de defensa norteameri-

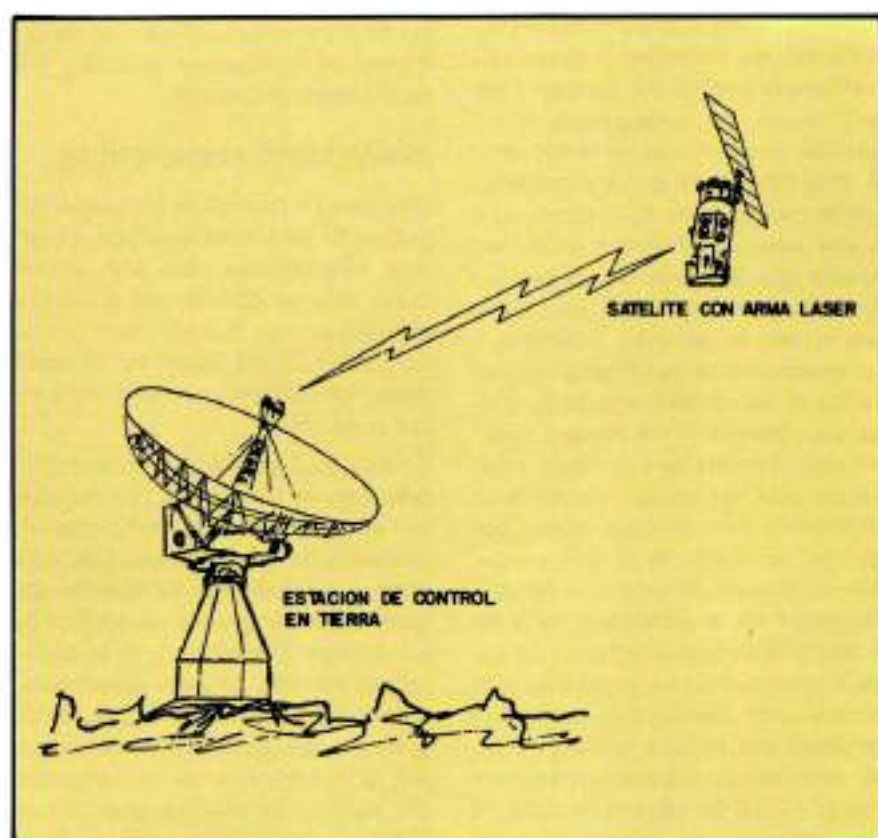


Figura 8. Satélites con armas láser.

canos, ya que otra potencia podría destruir la red de satélites en un ataque de unos segundos, y dejar a ese país indefenso contra un ataque de misiles nucleares.

### **Efectos de la propagación atmosférica del rayo**

La propagación del rayo de radiación láser en la atmósfera está sujeta a varios fenómenos perturbadores que dependen fuertemente de las condiciones atmosféricas, de la longitud de onda y de la potencia del rayo. La atenuación o pérdida de potencia, y la dispersión del haz pueden producirse por las moléculas del aire y por sus partículas en suspensión (polvo, humedad, humos, etc.). Estas partículas pueden absorber parte de la energía y dispersarla.

Por ejemplo, un láser de CO<sub>2</sub>, que emite a 10  $\mu$ m de longitud de onda, pierde aproximadamente un 15% de su potencia por cada kilómetro de distancia en aire seco y frío, y un 40% de su potencia por kilómetro en aire húmedo y caliente. La presencia de polvo, nubes, lluvia y turbulencias atmosféricas absorben o dispersan casi toda la energía del rayo en 1 km de distancia. Por consiguiente, la eficacia de un arma láser en la atmósfera, está dificultada por las condiciones de propagación de la atmósfera, lo que significa una gran limitación de este tipo de armas en muchos casos, sobre todo teniendo en cuenta que el láser es un arma defensiva, y por lo tanto no se puede elegir el momento ni las condiciones de su utilización. Además de los efectos directos mencionados de absorción y dispersión del haz, existen fenómenos perturbadores indirectos, como por ejemplo el efecto de la divergencia térmica provocada porque la energía absorbida en la atmósfera, calienta el aire que atraviesa el haz, y lo expande creando un camino de menor densidad. Debido a un fenómeno de refracción, el rayo se aleja de estas zonas menos densas por tener un menor índice de refracción. Esto se manifiesta en una desviación y en una divergencia del haz.

Otro efecto indirecto, que incide sobre la propagación del rayo en la atmósfera, es la posibilidad de que se cree un plasma en las inmediaciones del haz láser, debido a la alta densidad de potencia electromagnética de la radiación. Esto hace que existan fortísimos campos eléctricos en el rayo que pueden llegar a provocar la ionización y excitación de las moléculas del aire de sus inmediaciones, creando un plasma. Este plasma absorbe la energía del haz e impide la transmisión. Debido a este fenómeno, existe un umbral máximo de densidad de potencia que se puede propagar por la atmósfera.

Aparte de los efectos negativos, puede sacarse cierto partido de los fenómenos de propagación: por ejemplo, un láser de CO<sub>2</sub> es incapaz de atravesar, en principio, una nube, pero si el láser tiene suficiente potencia, la energía absorbida por las partículas de agua puede vaporizarlas y abrir así un camino de propagación para el rayo. Esto requiere una gran potencia, pero no debe ser tan grande como para desencadenar los fenómenos de divergencia térmica y los de creación de plasma.

### **ARMAS LASER ATMOSFERICAS**

Otro campo de interés en la investigación de las armas láser son las armas atmosféricas, que son armas defensivas contra aviones y misiles tácticos, aunque también tienen cierto interés contra satélites. Pueden operar desde tierra o a bordo de barcos o aviones.

En este tipo de armas, el factor limitativo no es la relación potencia/peso, sino los grandes problemas de propagación atmosférica. Los problemas de absorción se abordan eligiendo las longitudes de onda más adecuadas. El problema de la divergencia térmica se evita construyendo una óptica adecuada que evite las grandes concentraciones de potencia, y el problema de la formación del escudo de plasma protector se intenta contrarrestar optimizando la forma de los pulsos del láser.

Entre los principales programas norteamericanos sobre armas láser atmosféricas, puede citarse el que se ha construido en White Sands (Nuevo México) con un láser químico, otro de  $\text{CO}_2$  de descarga electrónica y otro móvil. Otro programa equipa un láser de  $\text{CO}_2$  a bordo de un avión Boeing KC-13, para pruebas contra misiles aire-aire y aire-tierra. Por último la fuerza aérea está probando un láser de oxígeno-yodo que funcione a 1.300 nm, y del que se espera una mayor energía acoplada al blanco.

Salvando las dificultades de propagación atmosférica, el láser de  $\text{CO}_2$  tiene buenas posibilidades antisatélite. Teniendo en cuenta los fenómenos de divergencia térmica y de formación de plasma en el aire, la densidad máxima de energía del rayo está limitada al  $1,5 \text{ J/cm}^2$  para buenas condiciones atmosféricas, lo cual implica un láser con una energía total de unos tres millones de julios, que viene a ser unas 300 veces la energía impulsiva del mayor láser de dióxido de carbono construido hasta la fecha. Con pulsos repetitivos de 10 julios por  $\text{cm}^2$ , al ritmo de unos 20 por segundo, se puede irradiar un satélite a 120 km de distancia con  $1,4 \text{ W/cm}^2$  (10 veces la irradiancia solar), que podría llegar a inutilizar un satélite no protegido.

La tecnología actual permite la construcción de armas láser antisatélite con base en tierra. Estas armas aumentarán su eficacia cuando se mejoren los láseres de alta potencia y longitud de onda más corta, como los de yodo, fluoruro de deuterio, de óxidos metálicos y los de electrones libres. También ha de mejorar la tecnología de componentes ópticos adicionales, como la óptica adaptativa, etc. No obstante, los satélites armados parece que serán más eficaces como arma antisatélite.

#### **Ventajas e inconvenientes de las armas láser atmosféricas**

El balance entre ventajas e inconvenientes de las armas láser atmosféricas

no está claro, ya que su principal ventaja, la velocidad de la respuesta, no es tan importante para contrarrestar a los posibles atacantes en la atmósfera, como lo es en la defensa contra misiles balísticos y satélites. Por ejemplo, se puede derribar un avión de una forma más eficaz, utilizando los misiles guiados existentes, algunos de los cuales son guiados por láser o por fibra óptica. Además, los posibles obstáculos de propagación, que no son elegibles en un arma defensiva (la niebla, las nubes y otras perturbaciones atmosféricas), suponen una gran limitación. Asimismo, las contramedidas son relativamente fáciles de realizar, para contrarrestar el efecto de estas armas.

A pesar de estos serios inconvenientes, estas armas resultan más útiles que las convencionales en ciertas situaciones como, por ejemplo, en los combates aire-aire, donde las perturbaciones atmosféricas no son muy importantes, y, en cambio, la velocidad de respuesta puede ser una buena ventaja. Otra aplicación útil es la defensa de buques contra los misiles aire-superficie, ya que en la actualidad no existen defensas de mucha eficacia.

#### **LOCALIZACION Y FIJACION DE BLANCOS**

Este es otro importante campo de aplicaciones militares de los láseres. Al contrario de lo que ocurre con las armas láser, se dispone ya de muchos sistemas que son operativos desde la guerra del Vietnam. La utilización de estos sistemas se empezó a extender en el año 1977, con el despliegue de sistemas terrestres y aéreos para la localización y seguimiento de blancos.

Estos sistemas se han concebido en su mayoría para blancos móviles y, sobre todo, para la defensa anticarro.

Los dispositivos de medida de distancias funcionan midiendo con precisión el eco o la reflexión de un im-

pulso de láser que se proyecta contra el blanco. Los sistemas de fijación o seguimiento se basan en la iluminación del blanco con un láser y la detección de esa iluminación por un dispositivo captador colocado en el proyectil, misil o bomba. Dicha iluminación guía al arma contra su objetivo.

La ventaja principal de estos sistemas es la gran precisión que puede obtenerse con ellos, comparado con otros sistemas, especialmente en la defensa contra carros. Un grave inconveniente de estos sistemas es su gran sensibilidad a las contramedidas, que pueden ser tan sencillas como una simple cortina de humo, o la radiación con otros láseres para "desorientar" la medida. Esto produce una gran limitación práctica a las armas guiadas por láser.

El coste de las armas basadas en estos sistemas de localización y fijación es sensiblemente superior al de otras armas, pero está compensado ventajosamente por un aumento de eficacia debido a su precisión.

Las bombas guiadas por láser están en producción bajo contratos de la fuerza aérea norteamericana con Texas Instruments, que produce unos módulos acoplables a bombas convencionales, y las convierte en bombas guiadas con láseres instalados en tierra o en aire.

Se están desarrollando e instalando en los EE. UU. multitud de sistemas de localización y fijación de blancos basados en el láser, para instalar en aviones, barcos, carros, y en tierra, para guías de bombas y misiles.

La mayoría de estos sistemas utilizan láseres de buena propagación atmosférica, como los de Nd:YAG, aunque en algunos casos también se utilizan los de CO<sub>2</sub>. La potencia requerida por estos láseres es pequeña en comparación con las armas láser.

#### **GIROSCOPIOS DE LASER**

Los giroscopios de láser se basan en los pequeños retrasos que sufre la

luz coherente al recorrer un bucle cerrado sobre un objeto en movimiento. La luz retardada es interferida con una señal luminosa de referencia para producir interferencias. Las franjas de interferencias obtenidas dan información sobre el movimiento del objeto.

Existen dos tipos de giroscopios basados en láser: los giroscopios ópticos, que forman el camino cerrado del rayo de luz con elementos ópticos convencionales, y los giroscopios de fibra óptica, que forman el bucle con un anillo de fibra óptica monomodo, lo que resulta más sencillo. El campo de aplicación de estos giroscopios es análogo al de los giroscopios convencionales, como los de barcos, aviones, cohetes, misiles, etc. Sus ventajas potenciales sobre los convencionales son: menor peso, mejor tiempo de respuesta, por carecer de grandes masas móviles; respuesta no afectada por las grandes aceleraciones, y mayor fiabilidad. Aunque los giroscopios láser disponibles industrialmente son menos precisos que los convencionales, a nivel de laboratorio se han obtenido resultados comparables que, en un futuro muy próximo, se pondrán en producción.

El mayor esfuerzo investigador se está realizando en la actualidad en el campo de los giroscopios con fibra óptica, por su enorme simplicidad comparada con otros giroscopios.

#### **HIDROFONOS OPTICOS**

Los hidrófonos son dispositivos para la detección de ondas acústicas submarinas, y son de gran interés militar en la localización de submarinos e ingenios sumergidos.

Con el descubrimiento de la fibra óptica han sido posibles hidrófonos de alta sensibilidad y gran directividad, basados en la interacción de las ondas acústicas submarinas sobre la fibra monomodo, que altera el camino

óptico de la radiación láser que viaja por la fibra.

Esta alteración del camino óptico se detecta interferencialmente, por comparación con una señal de referencia con camino óptico constante.

Este tipo de hidrófono, además de mejorar las características técnicas, proporciona una importante reducción de peso.

### SIMULADORES Y JUEGOS DE GUERRA

Una utilización de láseres de baja potencia consiste en simuladores de impactos en maniobras militares. Cada soldado lleva un rifle con un pequeño láser, y un traje con fotocélulas para registrar los impactos. Este sistema ha sido adoptado por el ejército americano para mejorar el entrenamiento de sus tropas.

### COMUNICACIONES MILITARES POR LASER

En las redes de comunicaciones militares tienen una gran aplicación los sistemas de transmisión por fibras ópticas y las comunicaciones con láser por aire, que se tratarán en un capítulo aparte.

Además, se están investigando sistemas de transmisiones subacuáticas, utilizando láseres que emiten en el azul y el verde. Se han realizado dispositivos para la dirección y localización de objetos sumergidos y comunicaciones con submarinos y con plataformas sumergidas, y la comunicación tierra-submarino vía satélite.

Los láseres más utilizados para estas aplicaciones son los de haluro de gases raros y los de haluro de mercurio, que operan en la región espectral de los 400-600 nm (Figura 9).

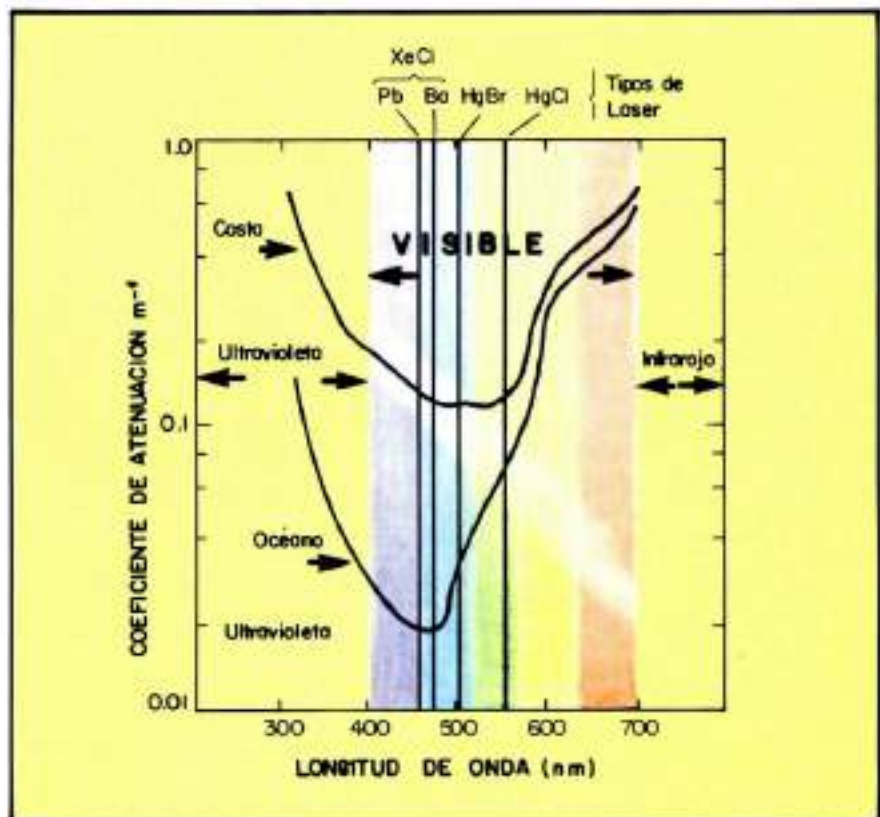


Figura 9. Curvas de pérdidas propagación del agua marina en función de la longitud de onda. Los láseres indicados en la figura son buenos candidatos para aplicaciones submarinas.

## APLICACIONES EN EL CAMPO DE LA ENERGIA

Desde hace unos años, con el descubrimiento de nuevos sistemas, se ha demostrado la posibilidad de la fotoquímica con láser, como una potente herramienta para la excitación de los átomos y moléculas de las sustancias a tratar.

Esta nueva técnica se puede utilizar para iniciar reacciones fotoquímicas; para la síntesis de compuestos; para nuevas técnicas analíticas no destructivas y de control directo de reacciones, de próxima aplicación industrial, como, por ejemplo, los nuevos sistemas de purificación y separación de isótopos; nitrificación de hidrocarburos; purificación de materiales semiconductores, y producción de microdeposición en superficie para la fabricación de componentes microelectrónicos y microópticos.

También resulta atractiva la síntesis o purificación de fármacos y drogas, así como la obtención de las vitaminas D y E, y de la penicilina (Figura 10).

El proceso fotoquímico es un proceso caro, comparado con otros procesos industriales, por lo que sólo es utilizable en materiales de alto valor, tal como en metales nobles, tierras raras, uranio, isótopos de elementos, etc.

Los resultados de estos trabajos se están utilizando principalmente en áreas relacionadas con la energía, como, por ejemplo, la purificación de materiales semiconductores para células solares, generación de energía nuclear, y en la industria del petróleo.

### SEPARACION DE ISOTOPOS MEDIANTE LASER

La primera demostración de separación de isótopos por láser se hizo en 1972 y, desde entonces, se han publicado distintos trabajos sobre este tema, aunque normalmente, debido a su interés, es información clasificada en el campo militar.

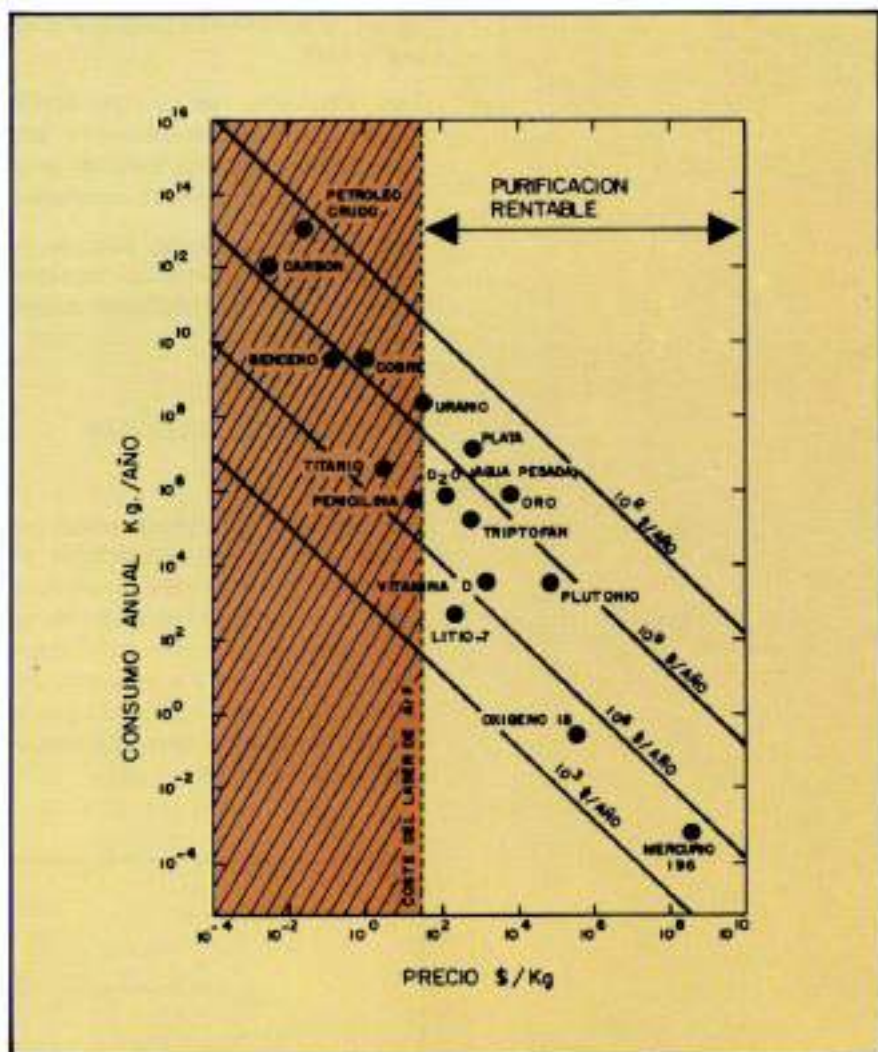


Figura 10. Costes de purificación de sustancias con un láser de argón-flúor.

La mayoría del esfuerzo de investigación se ha hecho con los isótopos del uranio. Por ejemplo, en los EE.UU., con la utilización industrial de esta técnica para la separación de isótopos de uranio, podrían duplicarse las reservas de uranio U-235, que es un combustible para reactores nucleares. Los procesos fotoquímicos para purificación de isótopos pueden clasificarse en dos grupos: los atómicos y los moleculares.

En el proceso fotoquímico atómico, desarrollado en el Lawrence Livermore National Laboratory, el uranio se calienta hasta vaporizarlo en parte. Luego se utilizan varios rayos de



láser para excitar energéticamente los átomos de uranio, hasta formar iones que, posteriormente, son separados mediante campos eléctricos y magnéticos.

Los distintos isótopos de uranio (U-235 y U-238) tienen un espectro de absorción diferente, debido a su diferente masa nuclear. Por lo tanto, pueden seleccionarse eligiendo la longitud de onda adecuada en el láser, para que su energía sea absorbida por unas moléculas, pero no por las otras. Este método puede utilizarse también para procesar otros materiales, tal como isótopos del calcio o elementos de tierras raras (Figura 11). Sus inconvenientes son necesitar unas altísimas temperaturas de

vaporización y requerir altísimas energías para ionizar los elementos.

El método de separación *molecular* de isótopos, es más eficiente que el anterior, por existir muchas sustancias con una presión de vapor razonable, que permite establecer unos métodos químicos que requieren mucha menos energía para la separación molecular. Esta técnica no es por el momento económica para la producción de deuterio, que es un isótopo pesado del hidrógeno y parte de la fusión nuclear en el futuro, pero, en cambio, parece que es económicamente interesante para la producción de isótopos más costosos, como el carbono 13 ( $C_{13}$ ) y el oxígeno 18 ( $O_{18}$ ).

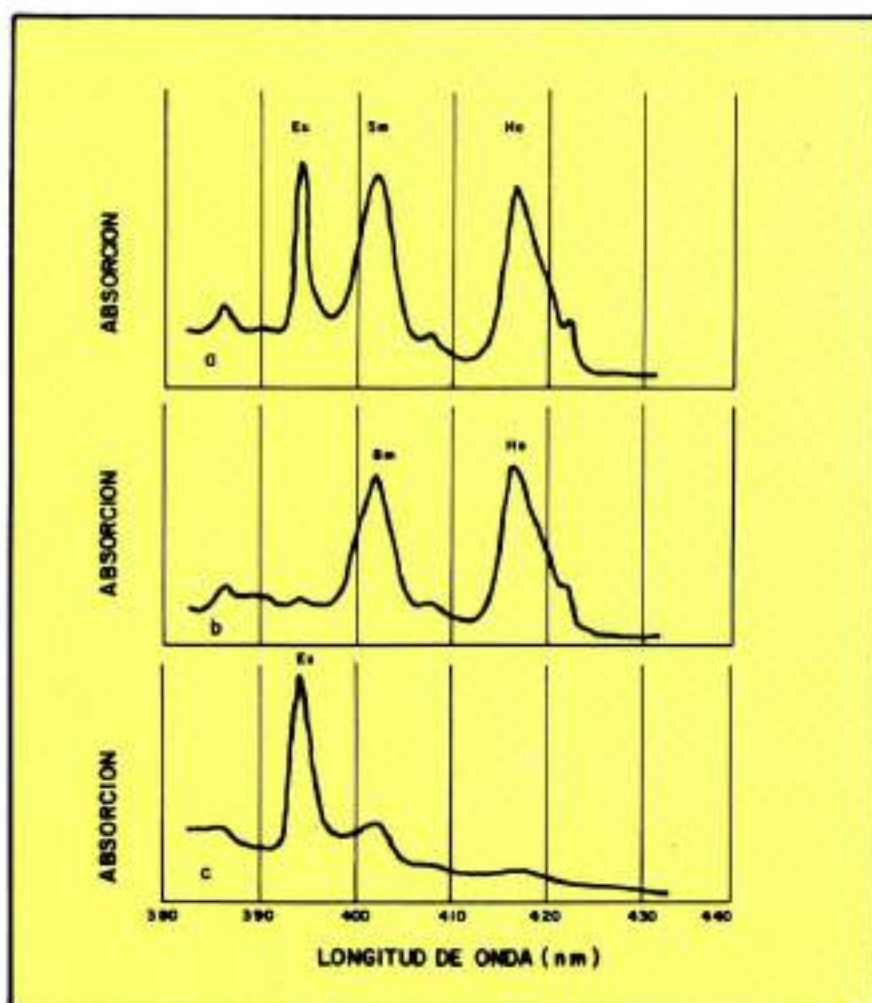


Figura 11: a) Absorción de la luz de una mezcla de tierras raras. EUROPIO (Eu), SAMARIO (Sm) y HOLMIO (Ho). b) Absorción de la luz después de extraer el Europio. c) Absorción del elemento extraído.

También es posible la fotodisociación molecular utilizando más de un láser a distintas longitudes de onda. En Los Alamos Scientific Laboratory se está empleando esta técnica para separar isótopos de uranio a partir de un gas con hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ), utilizando dos láseres de distintas longitudes de onda, cumpliendo cada uno de ellos distinta función de disociación en el proceso. Para estos procesos se están utilizando láseres de haluros de gases raros, como el de KrF (249 nm), XeBr (284 nm), XeCl (308 nm), así como salidas de otras longitudes de onda obtenidas por efecto Raman a partir de estos láseres. Se ha utilizado recientemente esta técnica para la obtención de imanes ligeros y de un alto campo magnético a partir de tierras raras (lantánidos), de mucho interés para la industria del automóvil debido a la reducción de peso.

#### Comparación de costes de distintas técnicas de separación de isótopos para enriquecimiento de uranio

En la Tabla 4 se comparan los costes de las técnicas más convencionales de enriquecimiento de uranio, como la técnica de difusión gaseosa y la centrifuga, con la moderna técnica de separación de isótopos por láser para plantas de enriquecimiento. Tanto la inversión en partes como los costes de producción se estiman más bajos que con los medios convencionales. Así, las inversiones en planta son del orden del 20% menos para las separaciones de isótopos por láser. En cambio, a los costes de producción las plantas de enriqueci-

miento de uranio mediante láser consumen sólo algo más del 6% de energía eléctrica que una planta de difusión gaseosa, por lo que el coste de producción molecular de enriquecimiento por láser es del 30% menos que por los métodos convencionales, y por el proceso atómico el coste es de un 10% menor que por los medios convencionales, dando un promedio de reducción de costes de producción del orden del 20%.

#### PURIFICACION DE MATERIALES

Otra aplicación de estas técnicas es la purificación de materiales, como, por ejemplo, los trabajos realizados en los laboratorios de Los Alamos (USA) implican una drástica reducción de costes en la purificación de los materiales básicos para hacer células solares de semiconductores de silicio utilizando un láser de argón-flúor (ArF). Con esta técnica pueden obtenerse niveles de pureza de una parte por billón.

#### SEPARACION DE ELEMENTOS DE RESIDUOS ATOMICOS

La fotoquímica mediante láser puede ser un medio eficaz de resolver el problema de los residuos atómicos, al hacer posible en éstos la separación de los elementos estables de los radiactivos. Los láseres más prometedores en esta nueva técnica son los láseres de haluros de gases raros y de mercurio. En una planta de 1.000 MW se regeneran unas 30 Tm por año de residuos, de los cuales apenas un 5% son los subproductos de la fisión al producirse la reacción nuclear. Existen más de 30 elementos

	Métodos convencionales		Separación de isótopos por láser
	Difusión gaseosa	Centrífuga	
Inversión en planta	4.400 M\$	4.100 M\$	500 a 1.000 M\$
Coste de producción (por kg.) . . . . .	40 \$	40 \$	32 \$ (media)

Tabla 4. Comparación de costes de las técnicas de enriquecimiento.

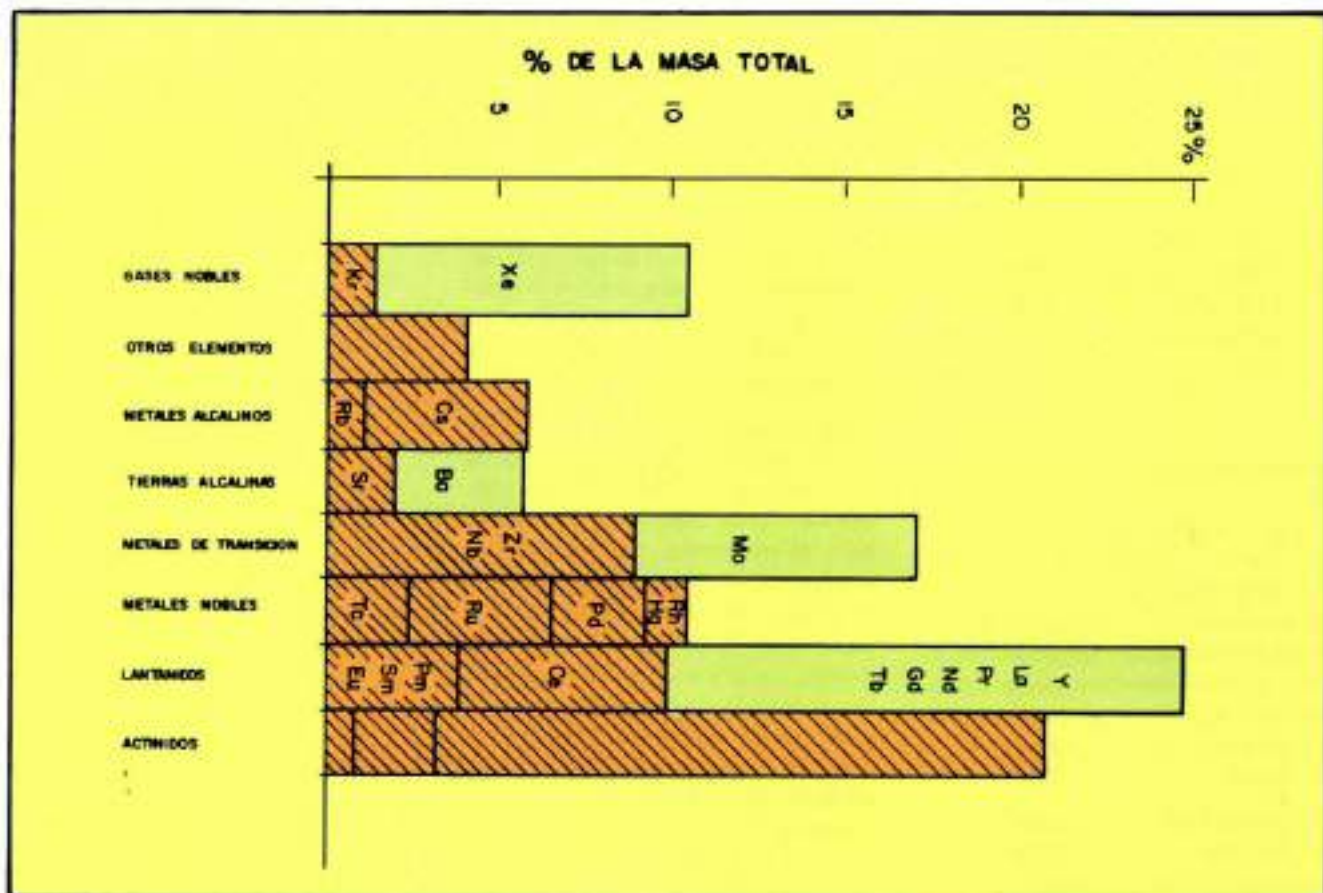


Figura 12. Elementos encontrados en residuos atómicos. El área indica la masa. Los elementos sombreados son radioactivos.

distintos en esta mezcla, desde algunos altamente radiactivos hasta otros que son isótopos estables (Figura 12) que se podrían reciclar con un buen rendimiento económico.

El paladio y el rodio, por ejemplo, son elementos muy utilizados en catálisis, como agentes endurecedores, contactos de relés, etc. Actualmente, los principales suministradores de estos materiales son Sudáfrica y la Unión Soviética. En los EE. UU. se ha estimado que hacia el año 2000 más del 80% de sus necesidades en estos materiales podrían reciclarse de los subproductos de los reactores de fisión nuclear.

Existe una gran cantidad de potencial de energía remanente en los residuos sin consumir del uranio U-235 y en el plutonio formado en las reacciones nucleares del U-238. Estos dos materiales fusionables pueden

reciclarse para su nueva utilización en generadores de energía nuclear. Francia, República Federal de Alemania e Inglaterra son muy activas en la investigación del reciclado de residuos de centrales nucleares. Entre las razones por las cuales resulta atractiva la utilización del láser para procesar los residuos atómicos, pueden citarse las siguientes:

- la conversión fotoquímica puede ser muchísimo más rápida que la realizada por química convencional, si se utilizan láseres con suficiente potencia;
- al acelerar mediante el proceso fotoquímico la velocidad de la reacción, se evita el problema de la destrucción por irradiación de los compuestos químicos utilizados;
- algunas de las reacciones sólo son posibles en presencia de la luz;

— al poderse enviar la luz del láser desde cierta distancia, puede evitarse la proximidad de los equipos a los agentes químicos y a las radiaciones, reduciendo así el riesgo para los equipos y el personal.

Todavía no están del todo disponibles industrialmente los láseres necesarios para realizar estos procesos, de los cuales se requiere una alta potencia pulsante en el ultravioleta.

#### **PRODUCCION DE AGUA PESADA**

Tanto en los EE.UU. como en Canadá e Israel, se están llevando a cabo programas de desarrollo de métodos de producción de agua pesada, mediante la excitación selectiva con láser, de moléculas de metano y amoníaco, con algún contenido de átomos de deuterio (isótopo pesado del hidrógeno).

El agua pesada ( $D_2O$ ) se utiliza como moderador y como refrigerante en algunos reactores nucleares de fisión. Por ejemplo, un tipo de reactor comercializado por Canadá y que utiliza uranio sin enriquecer, requiere del orden de 800 kg de agua pesada por megawatio de capacidad, representando el agua pesada casi un 20 % de su coste total. El Gobierno canadiense tiene prevista una planta piloto para producir una tonelada anual de agua pesada para 1983.

#### **DETECCION DE FUGAS RADIATIVAS**

En la Universidad de Minnesota (USA) se ha desarrollado una nueva técnica ultrasensible que permite la detección de fisuras diminutas de radiactividad de los reactores nucleares, utilizando un láser verde.

#### **INVESTIGACION EN LOS EE.UU. Y EUROPA**

Recientemente, en julio de 1982, la administración Reagan ha aprobado la exportación de láseres de tecnología

avanzada para investigación nuclear, a la República Federal de Alemania y a Francia, para simplificar y abaratar la producción de uranio y plutonio de alta pureza, utilizables en plantas nucleares y en la fabricación de bombas.

Estos láseres son de longitud de onda y potencia seleccionables y están fabricados por Laser Analytics Inc. especialmente para investigación sobre separación de isótopos por láser.

El Departamento de Energía de los EE.UU. ha firmado un contrato de 300 millones de dólares en 8 años con Lawrence Livermore Laboratory para el desarrollo de métodos de producción en gran escala y para demostraciones de separación de isótopos por láser para el enriquecimiento de uranio. Esto ha causado preocupación por el problema de la proliferación de armas nucleares, ya que esta planta es utilizable también en el enriquecimiento de plutonio residual de las plantas nucleares, para la fabricación de bombas.

Además de los programas oficiales, en los EE.UU. se están llevando a cabo programas de I+D en tecnologías de enriquecimiento del uranio por compañías privadas, como la EXXON Nuclear Company y la AVCO Everett Research Laboratory, íntimamente ligada con la anterior.

El Lawrence Livermore Laboratory está construyendo una planta piloto de enriquecimiento de uranio, que estará finalizada en 1986.

La compañía privada EXXON ha demostrado la factibilidad de enriquecer el uranio a partir de un componente orgánico que absorbe la radiación de un láser de  $CO_2$ , y tiene prevista la fabricación de una planta de demostración a escala comercial para antes de 1985, valorada en 150 MS.

#### **FUSION NUCLEAR MEDIANTE LASER**

La fusión nuclear entre dos átomos de un material ligero (por ejemplo,

hidrógeno) consiste en la unión íntima de sus núcleos para formar un átomo de un nuevo material más pesado y con una masa inferior a la suma de las masas de los átomos primitivos. La masa sobrante, o exceso de masa, se convierte en energía, según la correspondencia masa-energía establecida por Einstein. Parte de la energía liberada en la fusión de dos átomos produce la fusión de átomos contiguos, y éstos las de otros, produciéndose una reacción en cadena de la que se puede obtener una enorme cantidad de energía.

La fusión nuclear es una de las fuentes de energía más prometedoras para el futuro, porque, al contrario que en las actuales centrales nucleares de fisión, en las futuras centrales de fusión no se producirán residuos radiactivos.

Además, se parte de combustibles más elementales; es una fuente inagotable y potencialmente barata. La energía que se produce en el sol está producida por reacciones de fusión nuclear. La tecnología de fusión está en fase de desarrollo, y existen varias soluciones alternativas para iniciar y controlar la fusión. Se espera disponer de esta fuente de energía hacia finales de siglo.

Existen principalmente dos formas de producción de energía por fusión: la fusión por confinamiento magnético de un plasma excitado, y la fusión por confinamiento inercial. En esta última, una cápsula pequeñísima del combustible a fusionar se comprime y se calienta mediante la energía de un láser potentísimo, o con un haz de partículas de alta energía.

En la fusión nuclear con láser, la mencionada capsulita de combustible nuclear tiene del orden de unas micras de diámetro y contiene gas (deuterio o tritio, aunque también puede ser de material sólido o líquido). La capsulita se calienta hasta las temperaturas de ignición termonucleares (del orden de millones de grados Kelvin) por la irradiación con varios rayos láser. Estos intensos

rayos de luz se absorben en las capas externas de la capsulita, vaporizando dicha capa externa súbitamente.

El escape de estos vapores a altísima velocidad comprime el núcleo a grandes presiones, con efecto análogo a la fuerza de escape de un cohete. Las compresiones de los núcleos, necesarias para la fusión, equivalen a aumentar entre 100 y 1.000 veces su densidad original. Al alcanzar la compresión necesaria y calentarse hasta la temperatura de fusión nuclear, la capsulita explota como una microbomba de hidrógeno, lo que viene a llamarse implosión (Figura 13). En la Figura 14 aparece el diagrama de una central termonuclear por fusión basada en este principio.

El principal objetivo actual de la fusión nuclear mediante láser está en la construcción de uno que tenga la potencia requerida para alcanzar un

balance energético nulo entre la energía producida y la energía consumida. Para ello se necesita un láser con una energía del orden de 200.000 julios durante la milmillonésima parte de un segundo (1 ns) o, lo que es lo mismo, una potencia de pico, durante este tiempo mencionado, del orden de 300 billones de vatios (terawatios TW), lo que equivale a unas 20 veces la potencia media generada en todo el mundo. Ya se ha llegado a construir láseres de decenas de terawatios de potencia instantánea, pero todavía hay que hacer un gran esfuerzo por perfeccionarlos para poder utilizarlos en plantas reales, y con rendimientos al menos del 1%. Si respecto a los tiempos de duración de los impulsos no existen problemas, sí los hay en cuanto a la potencia de pico, al rendimiento, así como a la necesaria frecuencia de repetición de los impulsos ya que sólo se están obteniendo frecuencias de

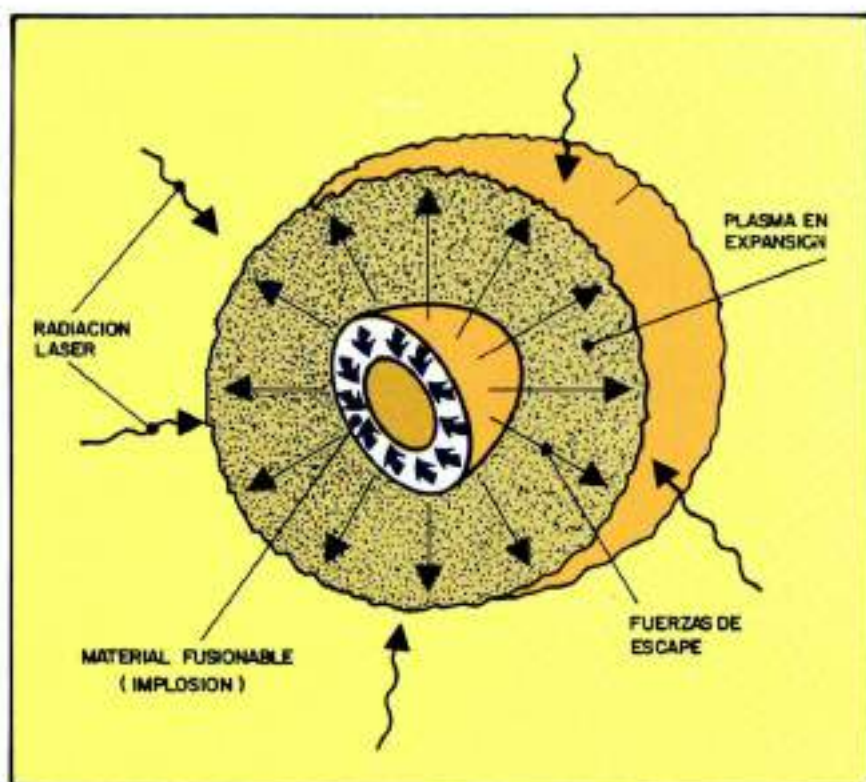


Figura 13. Sección de una microcápsula de deuterio-tritio durante la implosión provocada con irradiación láser.

algunos por día, siendo necesarios de 1 a 10 impulsos por segundo.

Se están estudiando actualmente soluciones basadas en los láseres de cristal sólido, láseres de haluros de gases raros, con eficiencias hasta del 10%, y otros tipos de láseres. La fusión por láser es uno de los temas de investigación más atractivos de la electrónica cuántica y está siendo el principal motor del desarrollo de láseres de alta potencia de pico, principalmente en los de neodimio y dióxido de carbono, con potencias del orden de las decenas de TW. Además, se han hecho grandes progresos en la obtención de nuevos materiales activos con alta eficiencia para la amplificación láser, y se han desarrollado técnicas de generación y tratamiento de pulsos ultrarrápidos. Tras un período de actividad muy intensa en el campo de fusión nuclear por láser, se ha llegado a un alto grado de madurez, que lleva a pensar en la obtención de resultados espectaculares en un futuro próximo.

#### SISTEMAS DE FUSION TERMONUCLEAR POR LASER

En los últimos 10 años se han construido en el mundo más de 20 láseres de neodimio para este tipo de experiencias, siendo el sistema Shiva, desarrollado en Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), el más potente de todos los que están en funcionamiento hasta la fecha.

Están previstos programas como el Gekko de Japón y el Nova de EE. UU. para el año 83 y 84 respectivamente, que tienen proyectado superar en potencia al sistema Shiva.

El Departamento de Energía de fusión inercial de la administración americana ha estado empleando unos fondos anuales del orden de 150 millones de dólares para el desarrollo de láseres para fusión. La instalación más importante del departamento es el sistema Shiva, y tiene en avanzado estado el sistema Nova,

con el que se espera poder lograr el balance positivo de energía generada a energía consumida. Además de este esfuerzo oficial, se están financiando proyectos de desarrollo en la industria privada.

En la actualidad, existe cierta polémica en los EE. UU. sobre la conveniencia o no de continuar dotando de fondos a estos programas, debido, por una parte, a las restricciones de fondos en general, y por otra, a ciertas dudas sobre las ventajas de la fusión por láser frente a otros métodos. Sin embargo, en la URSS se están empleando del orden del doble al triple de fondos que en EE. UU. en programas de fusión por confinamiento inercial. A continuación se describen brevemente los programas más importantes que existen en el mundo sobre los láseres para fusión termonuclear, mencionando sus principales características. En la Tabla 5 aparece un resumen de las mismas para cada uno de los sistemas.

Sistema	N. <sup>o</sup> de rayos	Elemento activo (longitud de onda)	Potencia de pico (duración impulso)	Energía	Año activación	País de desarrollo
Shiva	20	Vidrio de Nd (1,06 μm)	30 TW (90 ps)	15 KJ (35 ns)	1978	Estados Unidos
Omega	24	Nd - fosfato (1,06 μm)	12 TW (50 ps)	2 KJ (264 ps)	1980	Estados Unidos
Pharos II	2	Nd - fosfato (1,05 μm)		1 KJ (3 ns)	1981	Estados Unidos
Gekko (G-XII)	12	Nd - fosfato (1,05 μm)	50 TW (100 ps)	30 KJ (1 ns)	(1983)	Japón
	6	Nd: YAG (1,06 μm)	0,6 TW (100 ps)	0,18 KJ (1 ns)	1980	China
Vulcan	6 (+ 1)	Nd (1,05 μm a 0,26 μm)	6 TW (50-500 ps)	1,2 KJ (0,5-10 ns)	1981	Gran Bretaña
Helios	8	CO <sub>2</sub> (10,6 μm)	15 TW	10 KJ (0,5 ns)	1978	Estados Unidos
Lekko-VIII	8	CO <sub>2</sub> (10,6 μm)	10 TW (1 ns)	10 KJ (1 ns)	1981	Japón
GLD	1	Nd - fosfato (0,35 μm)	0,3 TW (100 ps)	0,1 KJ (0,5 ns)		Estados Unidos
Nova . . . . .	20	Nd - fosfato (1,05 μm)	200-300 KJ/TW (0,5 - 3 ns)		(1984)	Estados Unidos

Tabla 5. Principales sistemas para experiencias de fusión termonuclear.

### Sistema Shiva

El sistema Shiva tiene posibilidad de energía de irradiación de 15 KJulios o 30 TW a  $1,06 \mu\text{m}$  de longitud de onda, con posibilidad de generar pulsos con duración entre 0,09 y 35 ns, y está destinado a investigaciones sobre la fusión termonuclear. Consta de un láser de vidrio de neodimio de 20 rayos, de un sistema de alineamiento para poder enfocar los 20 rayos simultáneamente y de un sistema de diagnóstico de la microcápsula. El desarrollo de este sistema comenzó en 1972 y está en funcionamiento desde principios de 1978.

El láser está formado por veinte cadenas paralelas amplificadoras de luz, cada una de 40 m de largo y con una apertura final de 20 cm. Cada una de estas cadenas está optimizada para obtener pulsos de 1,5 TW con 0,1 ns de duración. Estos 20 ramales se excitan por un único rayo procedente de un láser de Nd:YAG, que da un tren de pulsos con control de enganche en fase, y pasa por un sistema divisor de haz, que obtiene los 20 rayos iguales y con los caminos ópticos compensados por un sistema de control automático.

Los 20 potentes rayos se enfocan simultáneamente en dos grupos de 10 rayos en sentido opuesto, formando cada uno de estos 10 rayos un cono de irradiación de  $45^\circ$ .

El sistema de alimentación del Shiva está compuesto por una gran batería de condensadores con su fuente de carga, redes formadoras de pulsos, conmutadores de alto voltaje, lámparas de destello de xenón y sus respectivos sistemas de control de diagnóstico.

El total de energía que hay que acumular por cada pulso del láser es de 24 millones de julios, que van a consumirse en unos 10 ns. En las experiencias de fusión nuclear realizadas con estos láseres, irradiando cápsulas microscópicas del material fusible, se han obtenido más de 30.000 millones de neutrones como

resultado de la microexplosión de la cápsula, al irradiarla con pulsos de 90 ns. También se han obtenido en el gas deuterio densidades superiores a  $20 \text{ gr/cm}^3$  (100 veces la densidad del líquido). Estas densidades obtenidas son aún unas diez veces inferiores a las necesarias para obtener más energía que la consumida en el proceso, lo cual se espera obtener antes de que finalice la presente década.

### Sistema OMEGA

Este sistema es un láser de neodimio-fosfato en estado sólido amorfo, con 24 rayos de salida, con una potencia total de 12 TW en pulsos de 50 ns, o de 6 TW con tiempos de 300 ns y a un ritmo de unos 2 pulsos por hora.

Se ha desarrollado en el Laboratory for Laser Energetics de la Universidad de Rochester. Este láser tiene 7 amplificadores de luz por cada una de sus 24 ramas, con una apertura total activa de  $1.526 \text{ cm}^2$ . Se utilizan unas 700 lámparas de xenón de alta energía para su excitación, alimentándose de una batería de condensadores que almacenan un total de 40 Mjulios de energía eléctrica, que luego es consumida en unos 100 ns por dichas lámparas.

Este sistema es capaz de generar un 30% de la energía consumida en la explosión.

### Sistema PHAROS II

Las últimas mejoras realizadas sobre el sistema Pharos II, desarrollado en el Naval Research Laboratory (NRL), da una potencia de iluminación uniforme sobre la muestra estudio, del orden de  $10$  a  $100 \text{ TW/cm}^2$ , en pulsos de unos 3 ns de duración y al ritmo de un pulso por hora. El oscilador maestro es de Nd:YLF (neodimio-itrio-litio-fluor) con "Q-Switch" oscilando a  $1,053 \mu\text{m}$ . Las dos ramas amplificadoras tienen cada una tres etapas amplificadoras cilíndricas y dos amplificadores de disco de 67 mm de apertura.

Con este láser se pueden irradiar muestras de algunos milímetros de diámetro, con la densidad de potencia mencionada anteriormente.

#### **Sistema GEKKO**

El proyecto GEKKO comenzó en 1967 y lo está llevando a cabo el Institute of Laser Engineering (ILE) de la Universidad de Osaka, en Japón. Hasta la fecha, el proyecto consta de 5 fases, que son las siguientes:

El GEKKO I fue completado en 1969 y consta de un láser de neodimio-fosfato de rayo único de una apertura de 40 mm de diámetro, y se utilizó en estudios de plasmas y en la producción de neutrones.

El GEKKO II, completado en 1975, consta de un láser de neodimio-fosfato, como el anterior, pero de dos rayos, con una apertura de 890 mm de diámetro. Se utiliza en experiencias de interacción y comprensión de átomos.

El GEKKO IV, puesto en funcionamiento en 1978, utiliza un vidrio de neodimio-fosfato, que a diferencia de los anteriores, tiene mayor rendimiento y mejor coste por watio extraído. Se trata de un láser de cuatro rayos, con una apertura de 110 mm de diámetro, y con una potencia de pico del orden de 1 TW por rayo, con anchuras de pulso de 100 ns. Se utiliza para producir altas compresiones en blancos esféricos, llegándose a densidades del orden de 5 gr/cm<sup>3</sup>.

El GEKKO MODULO II (GM-UU), completado en 1980, utiliza elementos activos como en el caso anterior. Genera dos rayos con una potencia de pico de 3,4 TW en 100 ns, y tiene una apertura de 200 mm de diámetro. Este módulo es el que se utiliza como base para la siguiente fase.

El GEKKO XII es un sistema con doce rayos con apertura de 350 mm de diámetro, y está prevista su puesta en funcionamiento para 1983. Utiliza como módulo básico el G-II. Hasta la fecha, se han conseguido energías de 2,6 Kjulios por rayo a 1 ns y se

esperan potencias de 53 TW en 0,1 ns o 31 Kjulios en 1 ns, que son sensiblemente mayores que las del sistema Shiva. Se espera obtener con este láser densidades de 50 gr/cm<sup>3</sup>, con ganancias energéticas de 10<sup>-3</sup>.

#### **Sistemas láser para fusión en China**

El Instituto de Optica de Shanghai inició su programa de desarrollo de láseres para fusión nuclear en 1965.

En 1973, finalizó el desarrollo de un sistema láser con una potencia de pico de salida de 0,01 TW que, al irradiar una microcápsula de material, produce 1.000 neutrones por disparo.

En 1974, se aumentó la potencia en un orden de magnitud (0,2 TW) o una energía de 0,4 Kjulios, con 2 ns de duración, obteniéndose 20.000 neutrones por cada disparo a la materia activa.

En 1975-77 se desarrolló un láser de 6 rayos con potencias de pico del orden de 0,03 TW por rayo, y energías de 30 julios/rayo.

Por último, en el período 1978-80 se consiguió un sistema con 6 rayos de 0,1 TW por rayo, con tiempos de impulso de 100 ns y energía del orden de 100 julios/rayo.

Este Instituto tiene planes para el desarrollo de un láser de 1 TW por rayo en los próximos años.

#### **Sistema VULCAN**

Este es un sistema para diversas aplicaciones y muy versátil, desarrollado en el Rutherford Laboratory para el uso de las Universidades británicas. Está en funcionamiento desde febrero de 1981. Su configuración es de dos láseres de gran potencia, un láser de 6 rayos para experimentos de implosión de materia, y otro láser independiente para el diagnóstico de la implosión, o bien para su utilización para impactar otro blanco. El sistema tiene una combinación versátil de energías de salida, frecuen-



cias de repetición, oscilador con enganche de modos o con "Q-switch", y duración de pulsos de 50 ps a 10 ns, con posibilidades de distintas longitudes de onda de salida.

En 1982 se han conseguido 6 rayos, a unos 10 TW. La gama de longitudes de onda es de 1,05, 0,53, 0,35 y 0,26  $\mu\text{m}$ .

#### Sistema HELIOS

Es un sistema en funcionamiento desde 1978 y desarrollado en el Laboratorio de Los Alamos (USA). A diferencia de los anteriores es un láser de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el infrarrojo lejano (10,6  $\mu\text{m}$ ), con 8 rayos y una potencia total de pico de unos 15 TW. Es un láser capaz de dar una frecuencia de repetición de 5 minutos por pulso.

#### Sistema LEKKO

Este sistema, desarrollado por el Institute of Laser Engineering de la Universidad de Osaka (Japón), es un láser de  $\text{CO}_2$ .

El programa LEKKO aparece resumido en la Tabla 6.

El sistema LEKKO VIII, que ocupa varias salas para el oscilador, el preamplificador, el amplificador principal, el ordenador de control y la cápsula de materia fusionable, es de una mezcla de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , He, en la proporción 1:2:1.

#### Sistema GLD

Es un sistema láser de alta potencia desarrollado por el Laboratory of Laser Energetics de la Universidad de Rochester. El material activo es de vidrio de neodimio-fosfato, que da una longitud de onda fundamental de 1,054  $\mu\text{m}$ , con potencias de 0,5 TW (50 ns) o energías de 150 julios (1 ns), y está triplicado en frecuencia para dar una longitud de onda de salida de 350 nm (ultravioleta), con una potencia de 0,2 TW (100 ns) o 54 julios (0,5 ns), y a un ritmo de unos 2 pulsos por hora. Su eficiencia total es mayor del 1%.

Se aplica para experiencias de fusión con longitud de onda corta, experimentos de absorción de materiales al ultravioleta, transporte de energía, generación de rayos X monocromáticos para estudios biológicos y físicos, etc.

#### Sistema NOVA

En este sistema está trabajando actualmente el Lawrence Livermore National Laboratory. Es un láser de 20 rayos con una previsión del orden de 200-300 KJ/TW, y está prevista su puesta en servicio para 1984.

Con este sistema, si se llega a completar con éxito, es posible que se logre obtener un balance positivo de potencia generada a potencia consumida.

Láser (operativo)	Número de rayos	Pot. Pico (Anchura pulso)	Energía	Experiencias
Lekko I (1976)	1	0,05 TW (3 ns)	1 KJul. (80 ns)	Desarrollo del láser/acoplo a la cápsula
Lekko II	2	0,5 TW (1 ns)	1 KJul. (2 ns)	Idem + Implosión de la cápsula
Lekko VIII (1981)	8	10 TW (1 ns)	10 KJul. (1 ns)	Idem

Tabla 6. Programa Lekko.

Durante la última década, los láseres están siendo utilizados en muchos procesos industriales, tales como soldaduras, tratamiento térmico de superficies en piezas de automóviles y aviones, corte de chapas en la industria del estampado y la matricería, corte de materiales en la confección de zapatería, taladrado de piezas especiales en relojería, aviación, electrónica, soldadura en la industria aeroespacial, etc. En todas estas operaciones, el láser ha contribuido al abaratamiento de costes y al aumento de la calidad y, en algunos casos, hace posible la realización de piezas y procesos que serían irrealizables con otros medios de producción. Analizando la evolución de la técnica en los pasados años, su estado actual y sus tendencias, es previsible que, en un futuro próximo, esta tecnología se extienda a muchos procesos industriales.

Como ya se conocí, el láser sirve como herramienta que actúa al aplicar un flujo de energía muy elevado en la superficie de la pieza a trabajar. Existen otras formas conocidas de aplicar energía, como son las llamas concentradas, sopletes, arcos eléctricos, chorros de plasma, etc., pero el láser tiene, en muchos casos, importantes ventajas sobre estos medios convencionales, tanto en la calidad como en la productividad, en la reducción de costes de las plantas de producción, en una mayor versatilidad de los medios de producción, etc.

Otro campo de aplicaciones industriales es el de las medidas y el control de los procesos de fabricación, permitiéndose así un preciso y rápido control de calidad de las piezas fabricadas y una automatización de ciertos procesos.

En la Tabla 7 se resumen las aplicaciones industriales del láser. Actualmente, aparte de las medidas, las aplicaciones más comunes son los taladros, aunque se observa una enorme tendencia a utilizar los nuevos sistemas de tratamientos super-

Proceso de materiales	Medidas y control
Taladro y escariado Corte Soldadura Tratamientos superficiales Grabado Ajuste Etcétera.	Pruebas no destructivas Alineamiento Inspección de piezas Control de procesos Estudios de esfuerzos Estudios de defectos Etcétera.

Tabla 7. Aplicaciones industriales del láser.

ficiales y las nuevas técnicas de corte.

Asimismo, las técnicas de medidas industriales por láser están teniendo una rápida implantación, y se observa una tendencia a aumentar aún más.

### CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS INDUSTRIALES POR LASER

Las características del láser como herramienta en los procesos industriales se basan en su altísima densidad de potencia y en la versatilidad de manejo del haz de luz.

El flujo de energía aplicado a la pieza a trabajar es absorbido prácticamente en su superficie, penetrando sólo unos 10 nm en su interior (una cienmilésima de milímetro) y es en esa zona donde el efecto de la alta densidad de energía hace su efecto. Con ello se consigue un rendimiento energético, del orden de 100 veces superior al de los sistemas convencionales de calentamiento, que calientan unos volúmenes mucho mayores de las piezas a trabajar. Por esta misma razón, el trabajo con láser no daña al resto de la pieza, ya que por aportar el calor en un tiempo mucho más breve, no tiene tiempo de propagarse, cosa que no sucede con los medios convencionales, por calentar las piezas mucho más de lo necesario, produciendo distorsiones y agrietamientos debido a las tensiones mecánicas y dando origen a una

menor fiabilidad y a un mayor porcentaje de piezas defectuosas. Esto hace que los medios de producción que utilizan láser sean más rentables, por acelerar el ritmo de la producción y evitar rechazos, sobre todo en la terminación de piezas muy costosas ya elaboradas, como es el caso de endurecimiento de dientes de engranajes, taladros de refrigeración en turbinas, tratamiento térmico de bloques de motores, etc.

En cuanto a la versatilidad de este tipo de herramienta láser, puede decirse que, al carecer de masa, el haz de luz puede desplazarse con cortos tiempos de respuesta y adaptarse fácilmente a los procesos automáticos computerizados. Además, el haz láser actúa a distancia de la pieza a trabajar, evitándose así la interacción del proceso de trabajo con el equipo. Además, la acción del rayo sobre la pieza no produce vibraciones ni efecto mecánico alguno, por lo que no necesita de sujeción. El trabajo con láser es limpio, rápido y se adapta perfectamente a los métodos de producción industrial.

Con respecto a los costes, los sistemas con láser tienen una alta rentabilidad en producción industrial a gran escala, por su alta velocidad. Por ejemplo, en ciertos materiales pueden hacerse taladros a una velocidad de cerca de doscientos por segundo, con el consiguiente aumento de la productividad frente a otros métodos más convencionales, reduciendo considerablemente los costes de la mano de obra. Como ejemplo,

un equipo de 80 millones de pesetas puede amortizarse en uno o dos años.

#### **TIPOS DE LASERES PARA APLICACIONES INDUSTRIALES**

Los láseres utilizados en este tipo de aplicaciones son de media y alta potencia, también conocidos como láseres blandos y duros. Los láseres de mediana potencia o blandos generan potencias que van desde unos vatios hasta algunos centenares de vatios y suelen ser en su mayoría láseres de estado sólido o de gas. Entre sus aplicaciones más frecuentes se encuentran el corte y taladro de los sustratos cerámicos de la industria microelectrónica, taladrado de rubíes de relojería y otras piezas similares, el corte de chapas metálicas, de tejidos, plásticos, madera, etc.

Los láseres de estado sólido de media potencia más utilizados son los de rubí (rojo) y los de vidrio dopado con neodimio (infrarrojo), que emiten generalmente en forma pulsante. Los láseres tipo Nd:YAG (cristal de itrio y aluminio dopado con neodimio) emiten en el infrarrojo (1.060 nm) y generalmente en forma continua, aunque también pueden hacerlo en forma pulsante. Sus longitudes de onda se adaptan bien a las aplicaciones de corte, soldadura, taladrado y tratamiento térmico en metales.

Entre los láseres de media potencia para aplicaciones industriales hay algunos de gas, como los de argón y los de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que suelen funcionar en onda continua y tienen la peculiaridad de que su alta coherencia permite una colimación del haz casi perfecta. Esto permite concentrar la energía en un punto de algunas micras de diámetro consiguiéndose una enorme densidad de energía, pudiendo ser utilizados en procesos de soldadura de gran penetración. Otra peculiaridad de estos láseres es su buen rendimiento energético, sobre todo en los de CO<sub>2</sub>.

Los láseres de alta potencia, o duros, para aplicaciones industriales gene-

ran potencia entre 1 kW y unas decenas de kW. Se tiende a su utilización en la industria pesada y en procesos de soldadura de oleoductos. En las industrias de automoción, aeronáutica y naval, son utilizados para el tratamiento térmico de superficies, taladros especiales, etc. La mayoría de estos láseres son de dióxido de carbono. En metrología, suelen utilizarse láseres de baja potencia y gran coherencia, siendo el más usual el de helio-neón.

#### **TALADRADO Y ESCARIADO**

El taladrado es una operación por la que se elimina material en una pieza. Al utilizar el láser como herramienta de taladrado, esta eliminación de material se hace fundiendo localmente, y vaporizando luego, el material, ya que eliminar el material en su forma líquida resulta difícil, sobre todo en taladros de cierta profundidad.

Desde el punto de vista energético, el taladro con láser es caro, sobre todo en la fase de vaporización del material fundido, en la que se consume unas diez veces más energía que en la fusión.

En un proceso de taladrado, cuando el material se está vaporizando, el vapor metálico tiende a ionizarse por la acción del calor, absorbiéndose unas diez veces más energía que en el proceso de vaporización. Además este vapor ionizado tiende a la formación del plasma, combinándose con los gases circundantes y haciendo de pantalla para la radiación láser. Este efecto de apantallamiento puede ser evitado generalmente bajando la pieza en una atmósfera de gas inerte (argón o helio) para dificultar la ionización. Aunque la formación de plasma es, en principio, una dificultad, también puede utilizarse para facilitar la eliminación del material, ya que al utilizar láseres pulsados, de mayor potencia instantánea, los fenómenos de dinámica de fluidos pueden producir una especie de detonación de la masa de

plasma, la cual sale del orificio a una enorme velocidad. Este fenómeno facilita la eliminación del material sobrante del taladrado, formado por el material fundido, la escoria y óxidos y nitruros sólidos. Por esta razón, los láseres sólidos son más utilizados para procesos de taladrado, ya que dan un mejor funcionamiento pulsante que los láseres de gas.

El taladrado por láser resulta, pues, un proceso caro, que sólo se utiliza en los casos de materiales difíciles de trabajar por su dureza, bien materiales abrasivos, como los cerámicos, bien materiales demasiado blandos como para que el taladro convencional pueda realizarse con precisión. En todos estos casos, la utilización por láser para el taladrado está hoy generalizada. Como ejemplo de ello se puede citar el taladrado de rubíes en la industria de relojería, el taladrado de los diamantes para el trefilado de alambres, el taladrado de sustratos cerámicos en la industria electrónica, el taladro de piezas especialmente duras en la industria espacial, el taladro de las tetinas de los biberones, válvulas de aerosoles, etc.

El coste de los taladros resulta bajo para taladros de pequeño diámetro ya que, aunque la inversión inicial es alta, se amortiza rápidamente por su alta productividad y porque se elimina la necesidad de otras herramientas.

En la industria pesada, el taladro por láser resulta, en principio, antieconómico, por el elevado coste energético necesario para la eliminación de grandes cantidades de material. Sin embargo, resulta muy útil para el acabado de taladros realizados por métodos más convencionales. Este proceso, llamado escariado, consiste en la eliminación del material sobrante de un taladro para ajustar su tolerancia o para dar una buena calidad de acabado. Esta técnica es particularmente útil en taladros ciegos, o que no traspasan la pieza, por la dificultad que tienen en ello las herramientas convencionales.

## CORTE DE MATERIALES

Para esta operación, el material a cortar tiene que ser llevado al punto de fusión, y eliminar entonces el metal líquido con un chorro de gas a presión, por lo que este proceso requiere menor energía, por unidad de volumen de material eliminado, que el proceso de taladrado. El gas utilizado para la eliminación del metal fundido suele ser el oxígeno o el nitrógeno, según los casos, dependiendo de la necesidad de reacciones oxidantes o nitrificantes. El oxígeno suele aumentar bastante la velocidad de corte de metales, debido a su reacción exotérmica con la mayoría de los metales a alta temperatura. Como ejemplos típicos de cortes de metales, puede citarse el corte de aceros al carbono y las chapas de aleación de titanio.

Una de las grandes ventajas del corte de materiales por láser es permitir una automatización total por ordenador, debido a la facilidad de controlar con precisión el haz de luz. Así, pueden conseguirse secuencias y formas de corte muy complicadas, compitiendo muy ventajosamente con las herramientas convencionales, como los discos de diamante, que son costosos y delicados y con mucha menor versatilidad. Así pues, el corte por láser con control numérico computerizado puede realizarse con mayor precisión, mayor repetitividad y mayor flexibilidad, consiguiéndose una productividad que puede ser hasta veinte veces la de los métodos tradicionales. Además, estos sistemas no producen vibración, ni ruido, ni contaminación, pudiendo amortizarse rápidamente la mayor inversión inicial necesaria,



que puede triplicar la de un sistema convencional.

La potencia de los láseres utilizados para esta aplicación oscilan entre 0,5 y 2 kW. Aparte del corte de chapas de materiales duros, el corte por láser tiene una gran aplicación en industrias que trabajan chapas metálicas con recubrimientos plásticos o de otro tipo; materiales orgánicos como la madera, cuero, aglomerados, tejidos, etc.; plásticos; cerámica; vidrios y otros materiales especiales.

Una aplicación del láser con grandes ventajas es el corte de tejidos para la confección, debido a la complicada forma de los patrones y a la necesidad de obtener cortes limpios y sellados con objeto de evitar el posterior desfleque. Estos sistemas están completamente automatizados y consiguen un elevado rendimiento.

Utilizando láseres del orden de 300 W se consigue una velocidad de corte del orden de un metro y medio por segundo, lo que significa cortar del orden de 40 trajes por hora.

## SOLDADURA POR LASER

Otra aplicación del láser, basada en la extraordinaria densidad de potencia que puede concentrar, es la soldadura de metales iguales o diferentes mediante láser. Existen dos mecanismos diferentes en el proceso de soldadura por láser: la soldadura por conducción y la soldadura por penetración.

En la *soldadura por conducción*, el foco de calor se sitúa en la superficie de la pieza, y la temperatura debe mantenerse por debajo del punto de evaporación para evitar la pérdida de material que pueda debilitar el punto de soldadura. Con este procedimiento, la profundidad de la soldadura no debe superar en una vez y media su diámetro, por lo tanto sólo es utilizable para láminas o chapas delgadas.

La *soldadura por penetración en profundidad* se consigue desplazando el foco de calor por debajo de la superficie del material, es decir, en el interior de la pieza. Para este tipo de soldadura se utilizan generalmente láseres de CO<sub>2</sub> de gran potencia. El mecanismo de soldadura consiste en crear en el interior de la pieza un núcleo de vapor metálico recalentado, rodeado del material fundido. El núcleo del vapor puede formarse en unos milisegundos si se utiliza un láser bien focalizado de la potencia adecuada. Este núcleo se va movien-



do según se va soldando. El material fundido llega a salir al exterior de la pieza debido a la presión interior del vapor recalentado, y allí permanece por la acción combinada de la gravedad, la viscosidad y la tensión superficial del material fundido. Esto forma el baño superficial que mejora las características mecánicas de la soldadura. Con este tipo de soldadura por penetración se consiguen relaciones de profundidad a anchura de hasta quince veces.

Los estudios metalográficos en estos tipos de soldadura por penetración con láser, demuestran la buena estructura cristalina, y, como consecuencia, las propiedades mecánicas son análogas o aun mejores que las del material básico.

Se ha utilizado con gran éxito este tipo de soldadura en las chapas de acero para la construcción de buques, en la soldadura de los tubos para oleoductos en climas árticos, etc. La soldadura del aluminio por penetración con láser tuvo sus dificultades al principio, pero el programa de desarrollo llevado a cabo por la NASA ha resuelto este problema en las chapas de titanio y de aluminio, llegándose a soldar, previo calentamiento, chapas con espesores de 13 mm.

#### **Ventajas de la soldadura con láser**

Entre las ventajas de la soldadura láser, frente a otros métodos, pueden citarse las siguientes: no se necesita la aportación de material o varillas fundentes; permite la soldadura de materiales diferentes; las deformaciones de las piezas se reducen al mínimo por no calentarse todo el volumen de las piezas a soldar. Es un método versátil por la facilidad de guiar el haz de luz mediante espejos, lo cual da fácil acceso a piezas con formas complicadas, y permiten la automatización sencilla de los procesos, incluso para los casos de soldaduras en piezas muy complejas, eliminándose la necesidad de personas

de gran habilidad para soldaduras difíciles. Así, por ejemplo, con láser pueden soldarse fácilmente materiales magnéticos y otros materiales que no permiten un calentamiento de su masa. También pueden hacerse soldaduras a través de materiales sellantes ópticamente transparentes.

#### **Aplicaciones de la soldadura con láser**

En la industria eléctrica y electrónica se producen aplicaciones importantes de la soldadura por láser, como, por ejemplo, soldar materiales diferentes, chapas de materiales recubiertos, en la sujeción de electrodos de baterías, la soldadura de componentes microelectrónicos, etc. El sistema para soldar electrodos de baterías desarrollado por United Technologies Corporation, basado en un láser de dióxido de carbono de 3 W, consigue unas mejoras de productividad en torno al 10%, además de importantes mejoras de calidad.

En la industria aeroespacial se ha sustituido la soldadura de haz electrónico por la soldadura láser, con la ventaja de no tener que soldar en el vacío. Como ejemplo, se puede mencionar la soldadura de nervaduras de refuerzo en carcasas de cohetes, la soldadura interna de los compartimentos de instrumentación, la soldadura de depósitos de aluminio y titanio para contener gases a alta presión y la soldadura de álabes y engranajes para turbinas.

En la industria del automóvil se ha comenzado a utilizar la soldadura láser para soldaduras de precisión en cajas de cambio y diferencial, engranajes, ejes, sensores de gases y partes del circuito de frenos.

#### **TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**

El tratamiento de superficies tiene un enorme campo de aplicaciones, como, por ejemplo, proteger piezas

contra entornos agresivos o dar ciertas propiedades especiales a las piezas tratadas, ya sean de tipo estético, eléctrico, de protección de dureza, etc. Los métodos de tratamiento superficial son de tres clases: el recubrimiento, la aleación superficial y el tratamiento térmico superficial. Este es uno de los campos de aplicaciones industriales del láser de mayor porvenir, porque pueden conseguirse propiedades superficiales de enorme interés, no realizables por otros métodos.

A continuación se describen los procesos de tratamiento superficial más utilizados.

#### **Tratamiento térmico superficial**

El tratamiento térmico superficial consiste en variar las propiedades superficiales de un material sin adición de otro material. Sus tres variantes más utilizadas son el templeado superficial, el satinado superficial y el endurecimiento por choque.

El *templado superficial* consiste en la producción de un cambio súbito de fase en la superficie del material para conseguir el endurecimiento superficial sin adición de material. En el templeado superficial, el haz láser genera un perfil de temperaturas determinado, de manera que la superficie se mantenga por debajo del punto de fusión mientras tiene lugar la transformación de fase del material a la profundidad deseada. Dado que el calor se aplica sólo en la superficie, la masa del material enfría bruscamente la misma al retirar la fuente de calor, con lo que se produce el templeado superficial.

El *satinado por láser* es similar al templeado superficial pero alcanzando el punto de fusión en la superficie. Al enfriarse bruscamente debido a la masa del material, por retirar el láser, se consigue en algunos materiales una capa superficial totalmente amorfa o vítrea de aspecto sanitario y mayor dureza.

El *endurecimiento por choque* se utiliza para conseguir mayor dureza superficial en las piezas que no pueden sufrir tratamiento térmico, como en el acero inoxidable, aluminio, etc. Con un láser de alta energía pulsante se crea en la superficie una presión de hasta un millón de atmósferas durante una millonésima de segundo. Con este tratamiento se consigue crear una compleja red de dislocaciones en la microestructura del material que mejora la resistencia y dureza de la superficie del material.

Entre las ventajas más destacadas del tratamiento térmico superficial, hay que citar su limpieza, debido a que la fuente de energía láser no contamina y a que no se necesitan líquidos para el enfriamiento brusco. Además, la alta precisión del láser limita el tratamiento a la parte estrictamente necesaria, incluso a las menos accesibles. Este tratamiento no distorsiona la pieza tratada y es utilizable en materiales imposibles de ser tratados por otros métodos.

Por último, la eficiencia de estos métodos es grande ya que sólo hay que generar energía en el momento de utilizarla. Su limitación más importante, en algunos casos, es que la profundidad del tratamiento sólo puede ser de 2 a 3 mm.

#### **Aleación superficial**

La aleación superficial es un proceso que ha sido posible gracias al láser. Consiste en disponer el material de la aleación sobre la pieza a tratar en forma de polvo, láminas o varillas. Al actuar el haz láser con su alta intensidad, se genera una alta temperatura superficial produciéndose la aleación en la propia superficie de la pieza, quedando íntimamente ligada a la misma. El enfriamiento brusco determina la microestructura metalográfica del material aleado. Mediante un control preciso de las condiciones del láser puede conseguirse la distribución deseada en profundidad del material aleado.

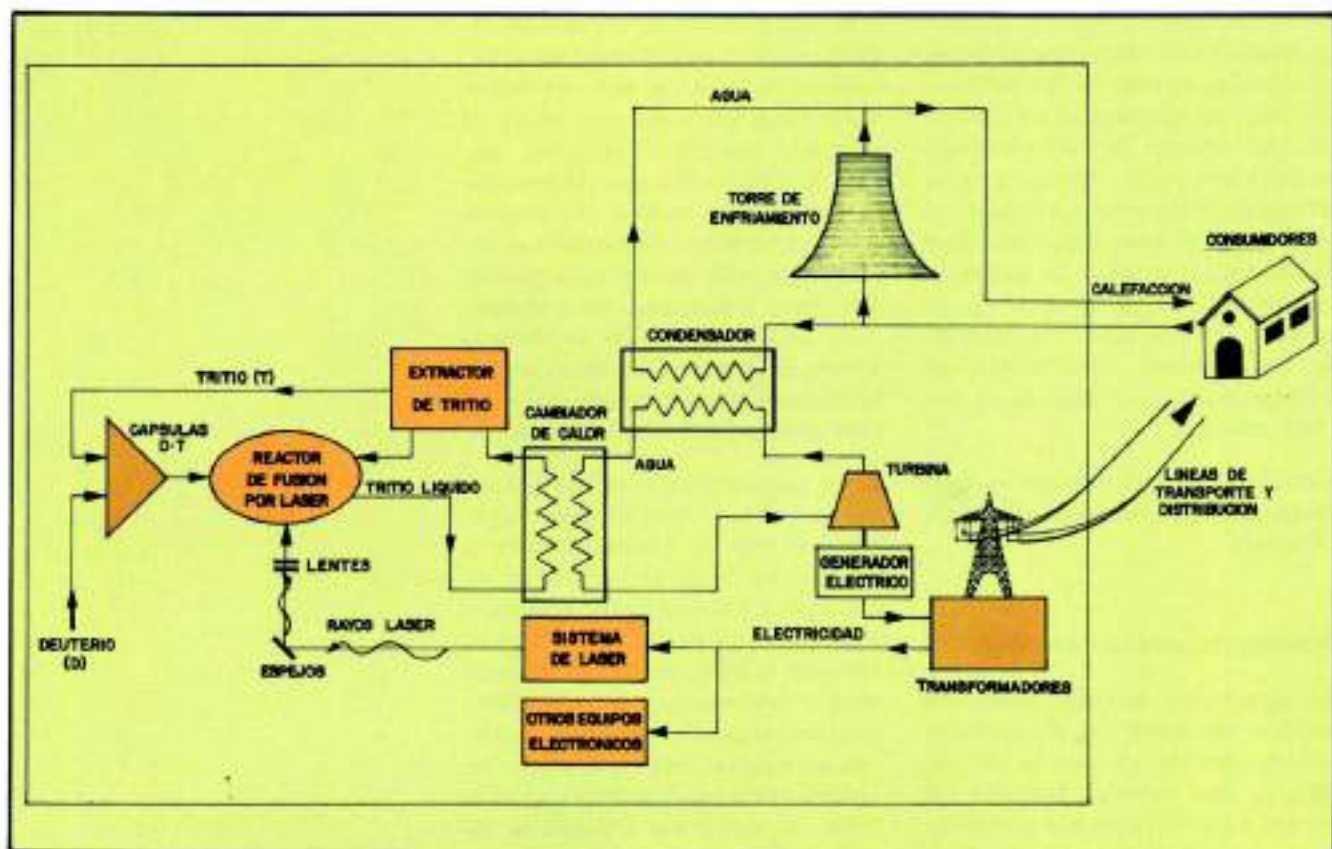


Figura 14. Diagrama de una central eléctrica por fusión termonuclear mediante láser.

Las ventajas que aporta el aleado superficial consisten en el ahorro de materiales caros para obtener piezas con las propiedades deseadas, utilizando materiales de base más fácilmente trabajables, y aleando superficialmente aquellas partes en las que son necesarias las propiedades del material costoso.

#### Recubrimiento superficial

El recubrimiento consiste en añadir una fina capa del material protector a la pieza a tratar. Como ejemplo puede citarse el recubrimiento de acero con aleaciones de cobalto. En esta clase de procesos, el láser aporta una mejora de productividad y la posibilidad de fácil automatización. En el proceso de recubrimiento superficial, los materiales no se alean, sino que se trata de un simple recubrimiento de la superficie con el material deseado.

#### GRABADO CON LASER

El grabado mediante láser es utilizado principalmente en la industria electrónica para producir circuitos integrados en tecnología de película delgada sobre sustratos cerámicos, o en la producción de componentes electrónicos activos o circuitos integrados en gran escala utilizando sustratos de silicio o de arseniuro de galio. Normalmente se emplean láseres de  $\text{CO}_2$  para grabar sobre sustratos cerámicos, y láseres de tipo YAG para grabado sobre el silicio.

Muy recientemente se está utilizando esta técnica de grabado con láseres para grabar guías ópticas, redes de difracción y otros componentes ópticos sobre sustratos de material, para formar circuitos integrados ópticos. Es esta una novísima tecnología de gran repercusión en el futuro, cuya aplicación industrial masiva aún está lejana.



## AJUSTE DE COMPONENTES ELECTRONICOS

Los láseres están siendo utilizados masivamente en el reajuste final de los valores de resistencias en los circuitos integrados híbridos con tecnologías de película delgada y película gruesa. El ajuste consiste en vaporizar una pequeña hendidura del material de la resistencia, hasta ajustarla al valor correcto. Existen equipos de ajustes automáticos y manuales utilizando en ellos láseres de Nd:YAG o de CO<sub>2</sub>. Los equipos automáticos para ajuste de circuitos pueden hacer hendiduras de ajuste del orden de la décima de milímetro, y utilizan

un ordenador para gobernar y medir el proceso de ajuste, incluso para cálculo de los filtros y ajuste automático de los mismos.

## MEDIDAS Y CONTROL POR LASER EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Cada vez está tomando más importancia en la industria el control de los procesos y el control de calidad de la producción. En muchos de estos procesos, el láser es un instrumento muy eficaz para este fin. Estos sistemas actúan como sensores electrónicos de alta velocidad, capaces de dar unas medidas muy precisas de

dimensiones, posición, calidad de superficies y defectos, llegando incluso a chequear a las mismas máquinas.

La importancia de la metrología por láser en la industria no se centra sólo en la precisión que se obtiene, sino también en su alta velocidad y en la posibilidad del control electrónico. Esto permite un total control automático del proceso y un control de calidad durante la realización, lo que elimina el chequeo manual, pudiendo introducir correcciones en el proceso. En la Figura 15 se muestra un diagrama esquemático de un sistema de control de una máquina herramienta. Los métodos más utilizados son los siguientes:

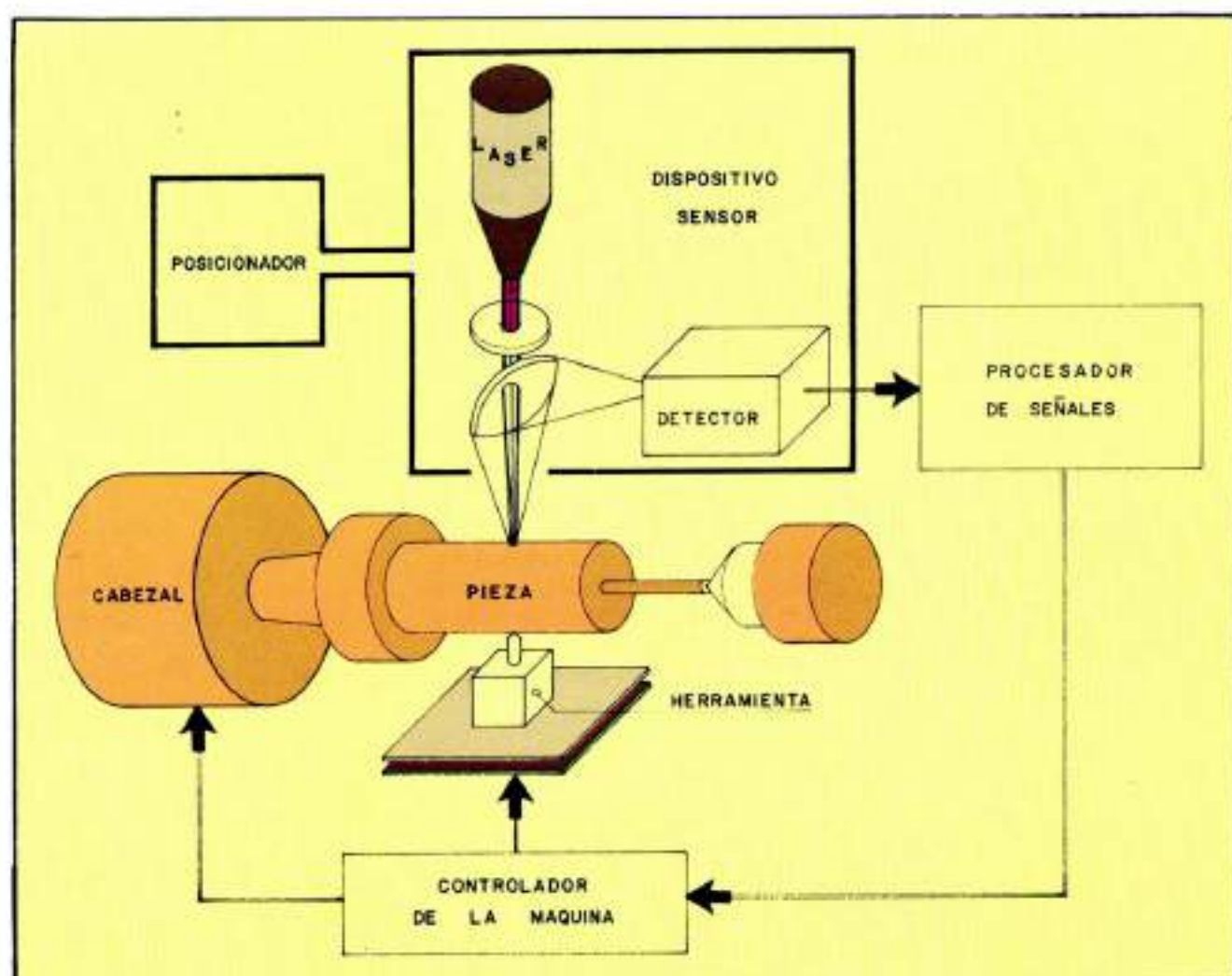


Figura 15. Sistema de control de una máquina herramienta.

### **Interferometría**

La interferometría es una técnica esencial en la metrología por láser. La luz producida por un láser, al ser una radiación coherente, puede ocasionar interferencias con otra onda, y así pueden medirse cambios de distancia del orden de la longitud de onda utilizada (una fracción de micra), analizando cambios de contraste en la interferencia de dos caminos ópticos, uno el de referencia y otro el del camino a seguir.

Existen diversas técnicas interferométricas utilizadas en los procesos industriales, para medir desde diferencias de temperaturas hasta presiones, flujos, dimensiones, velocidades, etc.

### **Holografía**

Una técnica interferencial que merece especial atención en metrología, es la holografía, que consiste en la interferencia de dos frentes de onda, uno de referencia y otro modulado espacialmente por el objeto. De esta manera se registra una información completa del objeto, es decir, en tres dimensiones y de su posición.

Con esta técnica pueden hacerse pruebas no destructivas de esfuerzos y resistencias mecánicas, análisis de defectos, calidad de superficies, identificación y selección de objetos por su forma y tamaño, etc.

### **Medidas no interferométricas**

En estos métodos no se utiliza la coherencia de la luz láser directamente, sino la posibilidad de enfocarlo en un círculo de muy pequeño diámetro, que permite una gran precisión en determinadas medidas, como imagen de perfiles, barrido con láser, alineamiento y triangulación.

La *imagen de perfiles* consiste en iluminar el borde del objeto a medir con una onda plana obtenida a partir del rayo. La sombra del objeto se analiza por una matriz fotosensible

para determinar su dimensión. Esta técnica sólo es utilizable para objetos de pequeño diámetro (hasta varios centímetros). Una aplicación actual de esta técnica es el control del diámetro de las fibras ópticas durante el proceso de fabricación en la torre de estirado. La medida del diámetro obtenido realimenta al sistema de control de la velocidad de estirado para corregir las posibles desviaciones.

El *barrido con láser* consiste en barrer con un rayo un objeto a velocidad constante, existiendo detrás un fotodetector. La medida del tiempo transcurrido sin luz en dicho fotodetector es proporcional a la dimensión del objeto medido. Este sistema es menos afectado que el anterior por la vibración del objeto durante la medida. Es muy utilizado en el control del trefilado de alambres, trenes de laminado de chapas, fabricación de perfiles, etcétera.

La *triangulación* consiste en iluminar la superficie a medir con un punto luminoso en un determinado ángulo. La imagen reflejada del punto se recoge en un detector que es posicionable automáticamente, siguiendo la imagen de dicho punto luminoso. Las variaciones en la posición del objeto se traducen en variaciones de posición de la imagen del punto luminoso que mide dicha posición.

La *detección de defectos en superficie* consiste en iluminar la superficie a trabajar con la luz láser. La luz dispersada por la pieza se analiza electrónicamente para determinar la calidad de dicha superficie, obteniéndose una clasificación de los defectos, incluso clasificados por tamaños.

## OTRAS APLICACIONES DEL LASER EN LA INDUSTRIA

Existen innumerables aplicaciones del láser que no se describen por estar aún muchas de ellas a nivel experimental, pero que pueden cobrar pronto un gran impulso en su utilización. Como ejemplo, se puede citar la utilización del láser como fuente de calor para la fabricación o el estirado de fibras ópticas, a partir de las preformas en las torres de estirado (Figura 16).

En la industria electrónica, la utilización para soldar conexiones a alta velocidad en los microcircuitos integrados se está realizando con un enorme aumento de la velocidad de producción.

Otra aplicación prometedora del láser en la industria electrónica es el tratamiento térmico de los materiales semiconductores, que consiste en utilizar impulsos de láser sobre la superficie del semiconductor para eliminar las imperfecciones después de la implantación iónica. Fundiendo



Figura 16. Torre de estirado de fibra óptica, utilizando un láser de  $CO_2$  para producir la fusión de la preforma de vidrio.

un material amorfo, se pueden crear estructuras cristalinas lo que puede hacer posible la construcción de circuitos integrados tridimensionales. Esta técnica, aún en etapa de investigación, probablemente se implantará en la industria antes del final de la década.

## ESTADO ACTUAL Y EVOLUCION DE LA TECNOLOGIA

Hasta ahora, la incorporación de los sistemas láser en los procesos industriales sólo se ha hecho en algunas industrias y para operaciones muy específicas, utilizándose para ello generalmente láseres de mediana po-

tencia (hasta 2 kW). Ya están empezando a implantarse láseres industriales de potencia diez veces superior, que permitirán una utilización más amplia en mayor número de procesos. Las primeras aplicaciones industriales son aquellas que ofrecen unas ventajas indudables frente a los métodos tradicionales, o aquellos procesos que sólo son posibles con esta tecnología.

Irán apareciendo sistemas industriales polivalentes que permitan su utilización para varios procesos con altos rendimientos económicos, extendiendo su uso a procesos en los que hoy no resulta rentable. Esta múltiple utilización de un mismo láser puede hacerse dividiendo el rayo original en varios rayos o utilizándolo en tiempo compartido; así, por ejemplo, en un área puede utilizarse para soldar y en otra, para tratamientos superficiales, con lo que el rendimiento del láser crece considerablemente.

En la actualidad, los sistemas industriales por láser, y sobre todo los de gran potencia, son bastante costosos, aunque se prevé una bajada de costes, según se vaya consolidando su tecnología y aumentando la producción de los mismos.

Esta tendencia de baja de precios, usual en toda nueva tecnología, contribuirá considerablemente en los costes de producción de los procesos que incorporen estos láseres.

Uno de los aspectos que hace enormemente atractiva la utilización del láser en procesos industriales es su posibilidad de automatización; por ello, la tendencia de estos sistemas es hacia la total automatización de los procesos, que además repercute en la calidad y repetitividad de los mismos.



## INSTRUMENTACION CIENTIFICA

Las primeras aplicaciones del láser se hicieron en investigación e instrumentación científica, y durante sus primeras etapas los instrumentos científicos fueron casi el único mercado existente para el láser. Hoy día, con el amplio abanico de aplicaciones del láser, esta situación ha cambiado radicalmente.

Las aplicaciones más notables del láser en la instrumentación científica son la espectroscopia, la instrumentación parafotoquímica, el radar láser, los análisis clínicos, la interferometría y holografía, los velocímetros "doppler", etc. De todas ellas, la espectrometría representa más de la mitad del mercado total. Recientemente han cobrado un gran interés la fotoquímica, los análisis clínicos y los radares ópticos.

### EL RADAR OPTICO CON LASER

Tras la búsqueda de nuevas frecuencias para obtener radares con algunas características peculiares, se construyó el primer radar óptico operativo en 1962, utilizando un láser de rubí, que emitía en el infrarrojo a 690 nm de longitud de onda.

El radar óptico o lidar se basa en el mismo principio que el láser de microondas, es decir, en la emisión de un potente pulso, en este caso de luz, de corta duración, que tras reflejarse en el blanco, es detectado por un fotodetector de alta sensibilidad. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso de luz, medido electrónicamente, da la información de la distancia del blanco. La desviación de la frecuencia óptica, da información sobre la velocidad, por efecto "doppler". La dirección y elevación angular en la que se recibe el eco, facilita información sobre la posición del blanco.

El eco, o porción de luz reflejada en el blanco que llega al receptor, son impulsos con potencias extremadamente pequeñas, del orden de las milmillonésimas de watio en algunos casos.

Se distinguen dos formas básicamente distintas de detección de estos impulsos tan pequeños: la llamada detección asincrónica, más sencilla, pero con la cual se pierde información sobre el objeto, y la detección sincrónica, en la que se tiene en cuenta la fase relativa de la señal recibida con la señal transmitida. Esta última forma de detecciones es bastante más sofisticada que la anterior, y logra extraer más información sobre el objeto.

### Características de los radares ópticos

Las características comparativas del radar óptico frente al radar de microondas se derivan de las propiedades de la radiación láser. Su gran precisión y resolución son consecuencia de su altísima frecuencia y gran coherencia, que permiten obtener rayos estrechos, muy directivos y sin lóbulos secundarios. Esto permite iluminar prácticamente cada punto del objeto con una luminosidad considerable. Su frecuencia, del orden de 30 billones de ciclos por segundo en el láser de CO<sub>2</sub>, es del orden de mil veces más alta que en los láseres de microondas (milimétricas). Todo esto hace que con el radar láser puedan detectarse objetos tan finos como alambres y localizar la posición de estos objetos con una gran precisión. La reflexión de estas altísimas frecuencias sobre un objeto móvil produce un gran desplazamiento de frecuencia, por el llamado efecto "doppler", que, por ejemplo, en un objeto que se mueva a la velocidad de una persona, a paso normal, produce un desplazamiento de frecuencia en el eco de unos 200.000 ciclos por segundo. Esto permite discernir, con mucha mayor precisión que con láseres de microondas, objetos en movimiento sobre un fondo estático.

Pese a sus grandes ventajas, los radares ópticos tienen serias limitaciones prácticas, siendo la más importante la limitación de propagación en malas condiciones atmosféricas, frente a los radares de microondas

que actúan prácticamente en cualquier condición meteorológica. Otra limitación de los radares ópticos es la dificultad de localización del blanco en el espacio, debido precisamente a su gran directividad, que contrasta con la facilidad de localización de los radares de microondas. Por último, hay que citar como una limitación la sensibilidad de los radares ópticos a la luz ambiente, y particularmente cuando miran al sol. Esta dificultad se afronta técnicamente con la utilización de filtros ópticos de gran selectividad al color de la luz láser. Las limitaciones de los láseres de microondas son la imprecisión en la localización del blanco, la sensibilidad a las contramedidas electrónicas y su limitada resolución angular y de distancia, que no permiten una buena separación de grupos de objetos y su identificación y puntería.

Los sistemas híbridos ópticos y de microondas son ideales para algunas aplicaciones, porque hacen uso de las ventajas complementarias de ambos sistemas.

En aplicaciones donde la limitación de propagación atmosférica no sea fundamental, los radares ópticos tienen un gran campo de aplicación, sobre todo en sistemas portátiles, por el bajo peso de estos equipos. Existen modelos que pesan menos de 2 kg con alcances del orden de 10 km.

#### Láseres utilizados con radares ópticos

Los tipos de láseres utilizados en radares ópticos se eligen en función de su longitud de onda o de su pequeño volumen para los sistemas portátiles.

En cuanto a la longitud de onda, existen varias "ventanas" de mínimos relativos de las pérdidas de propagación o absorción en la atmósfera terrestre. Las "ventanas" más utilizadas aparecen en la Tabla 8.

Otro factor importante en la elección de láseres para esta aplicación es la disponibilidad de fotodetectores en las distintas longitudes de onda.

Aunque históricamente fue el láser de rubí el primero utilizado como radar óptico, enseguida fue sustituido por el láser de Nd:YAG, con mayor potencia por unidad de volumen y mejores características de propagación en la atmósfera. El láser de CO<sub>2</sub> irá utilizándose más, a medida que se vayan consiguiéndose láseres tan compactos como son los actuales de Nd:YAG. Los láseres de CO<sub>2</sub>, hoy en día, no necesitan de circuitos permanentes de CO<sub>2</sub> y de refrigeración, sino que pueden funcionar a temperatura ambiente, en tubos de CO<sub>2</sub> sellados y con tiempos de vida razonables. Además, la radiación del CO<sub>2</sub> (10,6  $\mu$ m) se propaga mejor por la atmósfera, incluso penetrando en la niebla y el humo, mejor que el láser de Nd:YAG. Con lluvia, a razón de 4 mm/h, la radiación del láser de CO<sub>2</sub> se propaga con unas pérdidas del orden de 3 dB/Km (50%). Otra ventaja del láser de CO<sub>2</sub> es que su longitud de onda no se propaga por la pupila del ojo, evitándose así el riesgo de daño a la retina, que es más acusado con el láser de rubí o el de Nd:YAG. No obstante, el láser más empleado hoy día en los radares ópticos es el de Nd:YAG, y lo será aún durante bastante tiempo, al menos hasta disponer de láseres de CO<sub>2</sub> lo suficientemente pequeños, fiables y manejables.

Tipo de láser	Longitud de onda	Absorción en la atmósfera	
		Día claro	Niebla o bruma
Rubí	0,69 $\mu$ m (rojo)	1 dB/km (21 %)	5 dB/km (68 %)
Nd: YAG	1,06 $\mu$ m (IR cercano)	0,8 dB/km (17 %)	3 dB/km (50 %)
CO <sub>2</sub>	10,6 $\mu$ m (IR lejano)	0,6 dB/km (13 %)	1 dB/km (21 %)

Tabla 8.

### Principales aplicaciones de los radares ópticos

La aplicación más típica de los radares ópticos es la medida precisa de distancias y la localización de objetos en dirección y elevación; no obstante, sus especiales características permiten una amplia gama de aplicaciones, tanto en el campo militar como en el civil.

El radar óptico resulta un elemento muy útil en los sistemas de control de tiro para vehículos armados o aviones, e incluso para asentamientos artilleros en tierra. Estos sistemas permiten, además de la exacta localización del blanco, discernir justo el objeto deseado, e incluso en algunos casos, su identificación de entre otros circundantes.

En los sistemas de navegación, son de gran utilidad tanto por su conocida precisión, como por la facilidad de detección de detalles, que pasarían desapercibidos para un radar de microondas. Por ejemplo, para los helicópteros, resulta de gran ayuda la detección de cables aéreos de potencia o teléfonos, las antenas de radio, etc., que provocan gran cantidad de accidentes.

También es posible la guía de misiles y cohetes con gran precisión, sobre todo en los que vuelan a pequeña altitud, que son menos sensibles a las perturbaciones atmosféricas. Estos láseres, a bordo del misil junto con un sistema automático, son capaces de distinguir tanques y aviones enemigos de los propios, seguir la ruta de carreteras, ríos y vías del tren, evitar accidentes geográficos, etc.

El seguimiento de satélites es otra aplicación de estos instrumentos. Como ejemplo típico, puede citarse el sistema "Firepond", formado por un láser óptico de  $\text{CO}_2$  que emite pulsos de 10 kW de potencia de pico, y que trabaja junto con un láser de microondas. Este sistema es capaz de seguir satélites a más de 6.000 km de distancia y medir su distancia a la tie-

rra, su velocidad e incluso su rotación.

Para la investigación meteorológica, el radar óptico resulta un instrumento muy valioso. Por ejemplo, es capaz de detectar la presencia de partículas en suspensión, y de realizar mapas de vientos de una zona, con objeto de estudiar su posible explotación energética. También permite el estudio exhaustivo de tormentas (Figura 17).

### ESPECTROSCOPIA POR LASER

Las nuevas técnicas analíticas de espectroscopia por láser han revolucio-

nado este campo, ya que con los láseres de longitud de onda variable, de gran potencia y precisión, ha sido posible determinar características de frecuencia con una exactitud nunca alcanzada con las técnicas tradicionales. Así pues, pueden detectarse concentraciones moleculares de menos de una parte en  $10^{15}$ , e incluso, en condiciones especiales, puede detectarse un simple átomo o molécula en otra sustancia. Estas técnicas están ya suficientemente desarrolladas para su utilización industrial, permitiendo supervisar en tiempo real los procesos químicos industriales, para determinar y corregir automáticamente concentraciones moleculares,

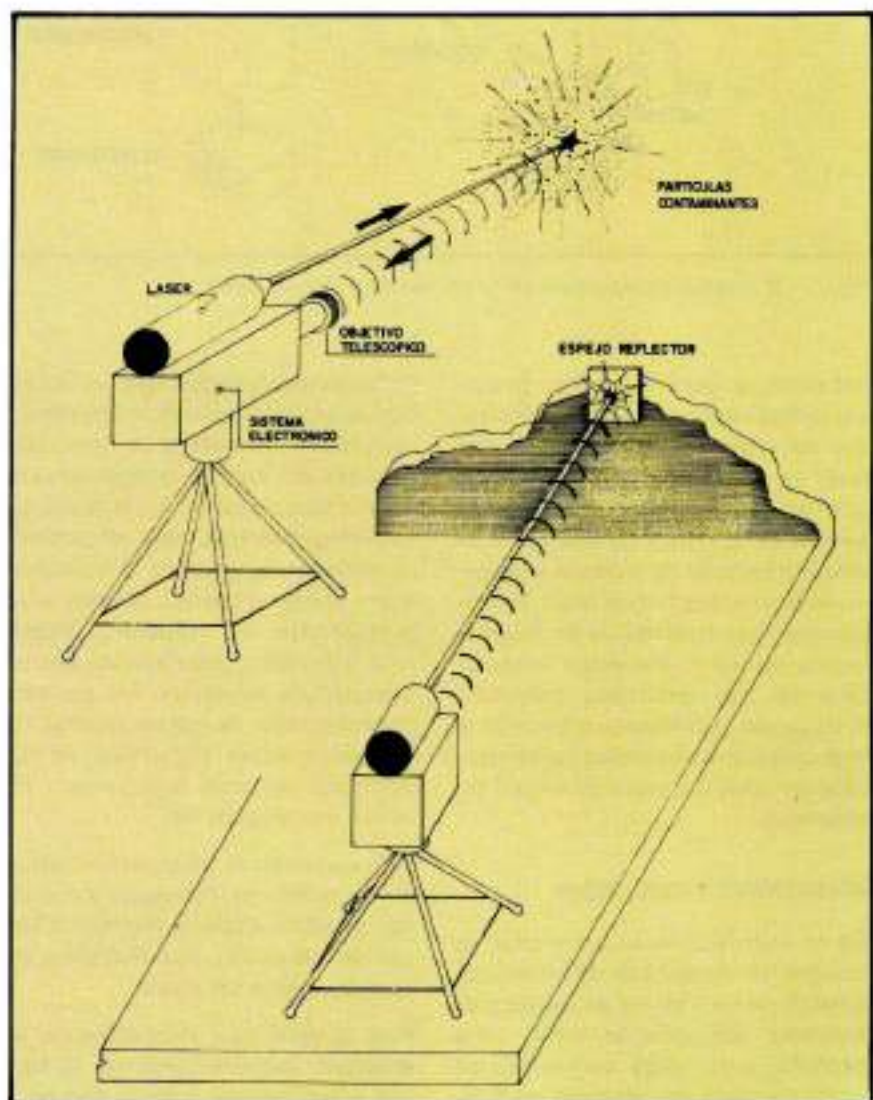


Figura 17. Medidas atmosféricas y de contaminación mediante radar de láser.

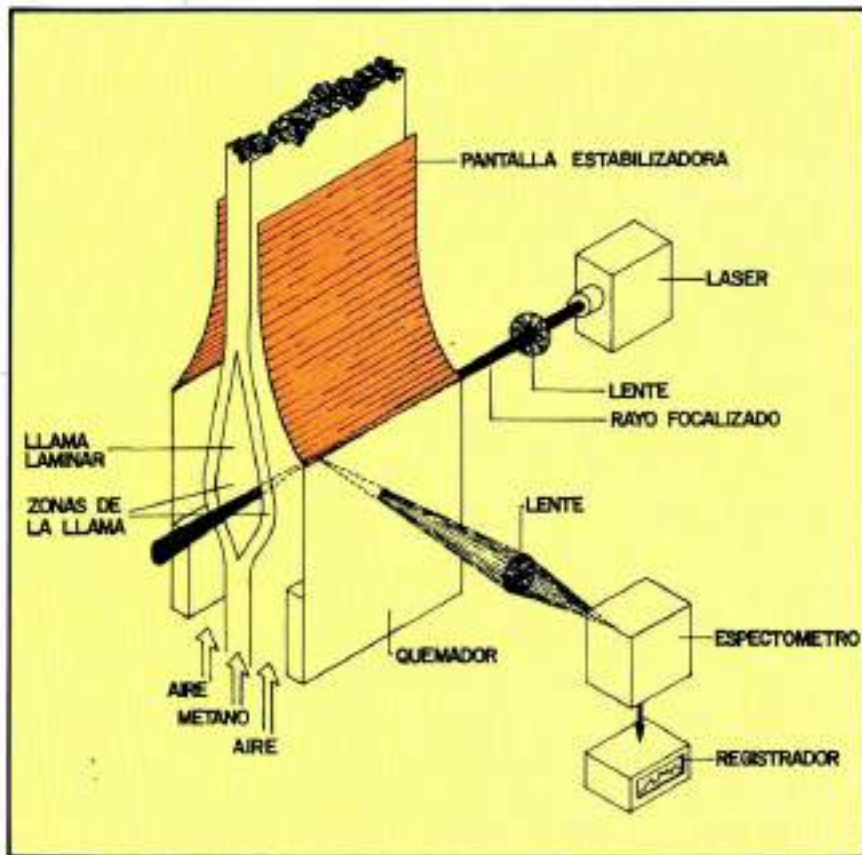


Figura 18. Análisis fotoquímico de la combustión de una llama.

temperatura, presión, etc., en procesos complicados. Un ejemplo ilustrativo del análisis espectroscópico por láser es el análisis de los procesos químicos de la combustión. Como se aprecia en la Figura 18, una llama de difusión laminar de metano y oxígeno es atravesada por un láser, produciéndose los fenómenos de fluorescencia de los compuestos intermedios de las reacciones químicas. Analizando esta fluorescencia con el espectrómetro se pueden hacer estudios de estos procesos químicos sin alterarlos.

#### MICROSCOPIA CON LASER

En la microscopía convencional, la imagen es visualizada directamente a través de un sistema de lentes, o se proyecta ópticamente sobre una pantalla, para luego convertirla en señal eléctrica, por ejemplo mediante un monitor de televisión.

En la microscopía con láser, el objeto o su imagen es barrido mediante un rayo láser enfocado a un área muy pequeña del objeto, recogiendo la luz que éste dispersa. Por lo tanto, no hay imagen directa, pero, en cambio, se obtiene mucha más información sobre el objeto barrido, debido a las propiedades de reflexión, dispersión, absorción, polarización, etc., de la superficie del objeto. Así, por este procedimiento se puede obtener información sobre rugosidad, forma, contorno, material, topografía o relieves, etc. (Figura 19).

Para optimizar la información extraída del objeto en microscopía con láser, pueden utilizarse distintas técnicas de detección, iluminación y de barrido, según los casos.

Para la detección, normalmente, se emplean fotodetectores de avalancha o fotomultiplicadores, con objeto de mejorar la sensibilidad del sis-



tema. Los principios básicos son dos: la detección con un simple detector o con múltiples detectores. El primer caso es mucho más simple y es utilizado normalmente en aplicaciones de pruebas de semiconductores, inspección de fotomáscaras para la fabricación de circuitos eléctricos y para la inspección de placas de circuito impreso. Los sistemas con múltiples detectores, más complejos, extraen más información del objeto, sobre todo si se hace el proceso electrónico adecuado de las señales obtenidas. Se utilizan para la discriminación de materiales diferentes, la identificación de defectos en circuitos impresos y microelectrónicos, el estudio de las deformaciones de materiales, la identificación de contornos, etc.

En cuanto a las técnicas de iluminación, pueden variar el tamaño y la forma del punto explorador, así como su longitud de onda para maximizar la información a obtener del objeto.

El barrido o exploración puede ser radial, paralelo, espiral o aleatorio, en función de la forma del objeto y de la información a obtener. La elección de una u otra forma de barrido puede facilitar el proceso electrónico de la señal.

Las aplicaciones de la microscopía con láser, aparte de las ya mencionadas en microelectrónica, son posibles en la inspección de fibras textiles, caracterización de materiales, biomedicina, etc. (Figura 19).

#### VELOCIMETROS DE PARTICULAS CON LASER

La radiación láser puede ser utilizada también en instrumentos de medida para medir la velocidad y el tamaño de partículas pequeñas. Estos instrumentos se basan en medir el tiempo que tarda una partícula en cruzar un determinado número de las franjas de interferencia que producen dos rayos diferentes de un mismo láser.

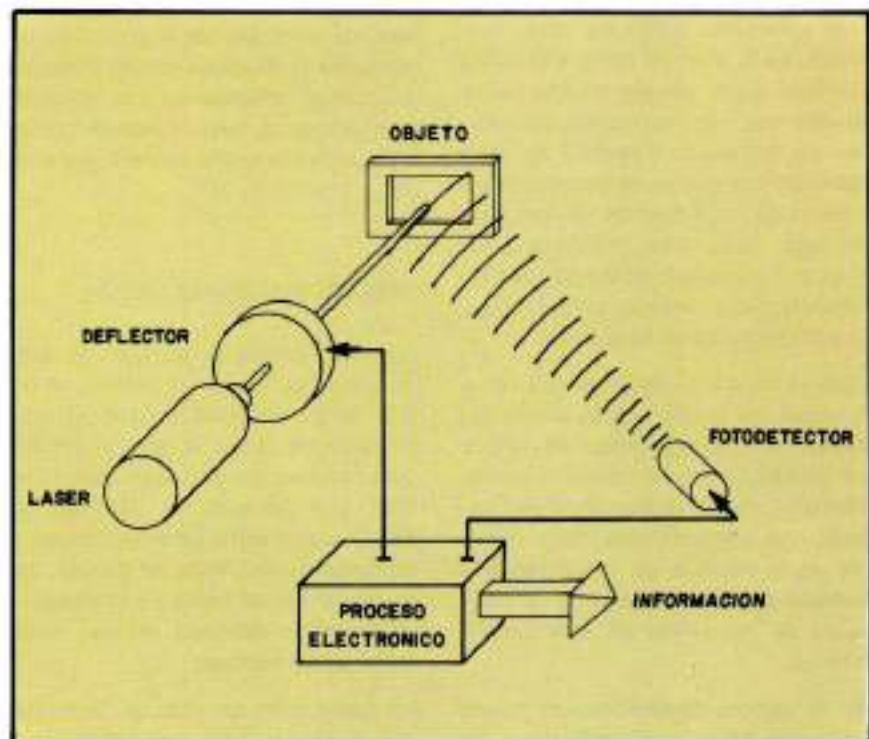


Figura 19. Principio de la microscopía con láser.

Otro principio utilizado es el conocido efecto "doppler" o de desviación de frecuencia de las ondas procedentes de objetos en movimiento. Este último efecto es similar al utilizado en astronomía para medir las velocidades galácticas observando la desviación de color de la emisión estelar entre uno y otro extremo de la galaxia.

Ya en el campo de los velocímetros de partículas con láser, éstos permiten la medida precisa de velocidades extremas de partículas, tanto muy bajas como muy altas. Además, es posible hacer estas medidas sin perturbación alguna del medio que se mide, puesto que no existe ninguna sonda material en dicho medio. También es posible hacer medidas de velocidad direccionales, para así calcular sus componentes vectoriales.

Esta clase de instrumentos han sido aplicados en diversos campos, siendo el más conocido el de la mecánica de fluidos, por ejemplo, en la medida de velocidades de flujos laminares de baja velocidad en los contenedores de líquidos.

Otra aplicación, difícil por otros métodos, es la medida de la velocidad del flujo de la sangre en los vasos sanguíneos o en los tejidos vasculares. La principal dificultad de esta aplicación radica en el acceso óptico a los vasos, que causa unas grandes pérdidas de la señal luminosa, pero esto se ha resuelto con sistemas de fotodetección ultrasensibles basados en contadores fotónicos.

Como ejemplo de aplicaciones de alta velocidad puede citarse la medida de turbulencias en túneles de vientos aerodinámicos, o en túneles hidrodinámicos, en los que se alcanzan velocidades supersónicas. Otro ejemplo es la medida de velocidades o turbulencias en aerosoles y la diagnosis de máquinas de combustión interna.

En el campo meteorológico puede utilizarse para la identificación de contaminantes, las medidas de tur-

bulencias de aire y de precipitaciones.

## INTERFEROMETRIA

La interferometría con láser es utilizada en infinidad de medidas, sobre todo en la medida de pequeñas partículas, deformaciones de materiales y medidas diferenciales de piezas en el rango de la fracción de longitud de onda de la luz utilizada. En estos sistemas se requiere una gran estabilidad en la longitud de onda de la radiación láser a utilizar, generalmente de helio-neón, así como del interferómetro que convierte la diferencia de fase de los dos caminos ópticos en una señal eléctrica. Por ello, generalmente, se comprueba continuamente la temperatura del entorno y del material, así como la presión atmosférica, y se utiliza un ordenador para la presentación de la información en el formato adecuado.

La utilización principal de los interferómetros con láser tiene lugar en el posicionamiento preciso en máquinas-herramienta y máquinas de medida, la calibración de patrones de medida secundarios y como transductores de desplazamiento lineal en máquinas-herramienta y de medida. La precisión que se alcanza con estos instrumentos oscila entre 1 parte en  $10^4$  a 1 parte en  $10^7$ .

## PROCESOS ULTRARRAPIDOS

Con los láseres se pueden generar impulsos de luz con duración del orden de picosegundos (billonésimas de segundo). Esto permite el estudio de procesos extremadamente rápidos; por ejemplo, al iluminar un objeto o sustancia en movimiento, o de estado cambiante, se puede "inmovilizar" en el tiempo y registrar la información deseada en ese corto instante de tiempo.

La generación de pulsos ultrarrápidos tiene también una interesante aplicación en la medida de las carac-



terísticas de propagación de las fibras ópticas. En estos casos se inyecta en la fibra a medir un tren de pulsos de duración prácticamente despreciable, y se detecta a su salida el impulso resultante. Analizando la deformación de este impulso pueden determinarse las características de propagación de las fibras.

#### **ANÁLISIS CLÍNICOS CON LASER**

La utilización del láser en instrumentación médica para análisis de sangre e incluso de otro tipo de sustancias, está cobrando un gran interés, por la simplificación de costes que implica la utilización de estos instrumentos.

Estos aparatos se basan en la medida de la luz láser dispersada por la muestra de sustancia a analizar, concretamente de sus ángulos, fases y polarización para calcular los parámetros básicos de la sustancia analizada, tales como peso molecular, contenido de glóbulos rojos y blancos, contenido de proteína, etc.

#### **LASERES UTILIZADOS EN FOTOQUÍMICA**

Existe una regla conjugada entre los láseres químicos y la fotoquímica por la cual en los láseres químicos, un sistema químico dinámico, como, por ejemplo, una explosión  $H_2 \cdot F_2$ , se acopla a una cavidad láser para producir un rayo láser, mientras que en química mediante láser, el rayo láser se utiliza para producir un efecto dinámico en un sistema químico. Esto último produce efectos debido a la posibilidad de enfocar los rayos del láser en un pequeño volumen. Así, se han observado, enfocando radiación infrarroja en sistemas químicos resonantes, efectos vibracionales tales como la absorción multifotón y la disociación molecular.

Se han hecho esfuerzos importantes de investigación y desarrollo de láseres especiales para resolver problemas fotoquímicos importantes, siendo un buen ejemplo de ello el desarrollo de láseres para el proceso de enriquecimiento del uranio. Dado el éxito obtenido con estas técnicas y el

gran nivel de actividad en este campo, es de prever un futuro brillante en la realización de láseres de las características adecuadas para este campo de la fotoquímica.

Pocos científicos dudan de la utilidad de los láseres para ciertas aplicaciones químicas industriales, tales como separación de isótopos y purificación de materiales, pero existe una discrepancia considerable en cuanto a la forma de adaptar estas técnicas a la producción en gran escala, por lo que es difícil prever su alcance industrial.

Los láseres diseñados para su utilización en fotoquímica son ya lo suficientemente versátiles para acceder selectivamente a los estados vibracional, rotacional y electrónico de prácticamente cualquier molécula de interés. El desarrollo tecnológico de los sistemas láser de estado sólido gas, líquido y químico, ha hecho disponer de energía fotónica en cualquier longitud de onda del ultravioleta visible e infrarrojo. La llegada de los nuevos sistemas, tales como haluros de gases raros, vapores metálicos y láseres de centros de color, así como sistemas más sofisticados, como los láseres de electrones libres, aumenta aún más la disponibilidad de fuentes adecuadas para la fotoquímica. Además, el desarrollo de las nuevas técnicas de desplazamiento y ajuste de frecuencia, ha permitido la obtención de grandes energías en las proximidades de la longitud de onda fundamental. Algunos ejemplos de métodos de conversión de frecuencia son el desplazamiento por efecto Raman y por "scattering", los osciladores ópticos paramétricos, la heterodinación y la mezcla de varias longitudes de onda.

Se han desarrollado, para análisis fotoquímicos espectroscópicos, láseres para la generación de radiación infrarroja de longitud de onda y de potencia ajustables en forma continua. También se han utilizado láseres de tinte, láseres de diodo semiconductor, láseres de gas ajustables,

láseres de efecto Raman, láseres de centro de color, generación de diferencia de frecuencias, y mezcla de infrarrojos con microondas. Todos estos tipos de láseres tienen actualmente algunos problemas como la limitación del rango espectral y del ajuste, baja potencia, la estructura indeseable de modos, o excesiva complejidad de manejo.

Los láseres de centros de color, recientemente utilizados para fotoquímica, tienen buenas posibilidades. Estos dispositivos tienen en la cavidad óptica una red de difracción como elemento de ajuste y acoplador de salida, junto con un dispositivo para su funcionamiento monomodo. Para longitudes de onda más cortas, entre 340 nm y 1.200 nm, los láseres de tinte pueden dar una potencia de salida considerable y un amplio rango de ajuste de longitud de onda, siendo muy adecuados tanto para espectroscopia como para fotoquímica. Entre los láseres moleculares útiles en el infrarrojo está el de  $C_2F_4$  que tiene emisión en numerosas frecuencias en la región de los  $16 \mu m$  con suficiente energía para aplicaciones fotoquímicas.

## APLICACIONES DEL LASER EN INFORMATICA

La utilización del láser en sistemas, o en parte de sistemas, controlados por ordenador está muy extendida en muchos campos: industrial, militar, comunicaciones, procesos fotoquímicos, etc. No obstante, en este apartado se consideran aplicaciones de informática a aquellos sistemas que, incluyendo algún láser entre sus componentes, realizan una función de proceso, de entrada, de salida o de almacenamiento de información para aplicaciones generales de proceso de datos.

Por ejemplo, las aplicaciones de facsímil y la confección de planchas de impresión, entre otras, aunque sean mediante ordenador, se consideran en el apartado de reprografía; en cambio, las impresoras por láser y las memorias ópticas, los puntos de venta, etc., se consideran aplicaciones de informática. Actualmente está tomando un gran auge el campo del proceso óptico de datos, los procesadores híbridos optodigitales y las memorias ópticas de masa.

### IMPRESORAS DE LINEA CON LASER

Las impresoras ópticas por láser tienen un gran interés porque, al estar exentas de impactos mecánicos para la impresión, pueden imprimir a una gran velocidad, dando así una buena salida de datos impresos de ordenador, con mayor eficiencia que las convencionales. La velocidad típica de impresión oscila entre 2.000 y 20.000 líneas de texto por minuto.

Las impresoras por láser están basadas en la deflexión de un rayo láser enfocado sobre el propio papel de impresión, o lo que es más normal, sobre un tambor o plancha fotosensible intermedia, que posteriormente imprime la información sobre el papel.

La diferencia de la impresora y el facsímil es que, en este último, la imagen a imprimir proviene de la codificación de una imagen original ya existente, y en la primera, la información a imprimir se genera en un or-

denador, o, en su caso, en un teclado local o remoto.

El principio de funcionamiento más extendido es el denominado electrofotográfico, que se representa esquemáticamente en la Figura 20. La secuencia de puntos a imprimir en cada línea de barrido del láser se genera electrónicamente y se pasa al rayo mediante una combinación de: 1) deflexión "x" por medio de un polígono de espejos giratorios deflectores que barren la línea sobre un tambor fotoconductor; 2) modulación "z" del rayo, mediante un modulador acustoóptico, que interrumpe el rayo según una secuencia preestablecida por los datos a imprimir, y 3) movimiento "y" de giro del tambor fotoconductor. Esta combinación coordinada de movimientos del rayo barre sobre el tambor fotoconductor una secuencia de puntos, formando los caracteres deseados, en una imagen electrostática.

El tambor fotoconductor está formado generalmente por una capa exterior de material aislante transparente, como poliéster de unas 25  $\mu\text{m}$  de espesor, seguida de una capa fotoconductor de sulfuro de cadmio (CdS) de unas 40  $\mu\text{m}$ , y un sustrato de aluminio. Simplificando, su funcionamiento consiste en cargar electrostáticamente el tambor fotoconductor con el cargador de efecto corona. Al incidir el barrido del láser sobre la superficie cargada, los puntos iluminados del sulfuro de cadmio se vuelven conductores, modificándose la carga eléctrica en dichos puntos. Tras un proceso electrostático, se anula la carga en los puntos no iluminados, quedando cargados electrostáticamente los puntos iluminados. Esta zona cargada, entra en el revelador, que es un recipiente que contiene una mezcla de partículas negras de plástico con partículas férricas. Estas partículas se adhieren a los puntos cargados electrostáticamente de la superficie del tambor, formando una imagen visible en el mismo. La transferencia al papel se hace cargando éste electrostática-

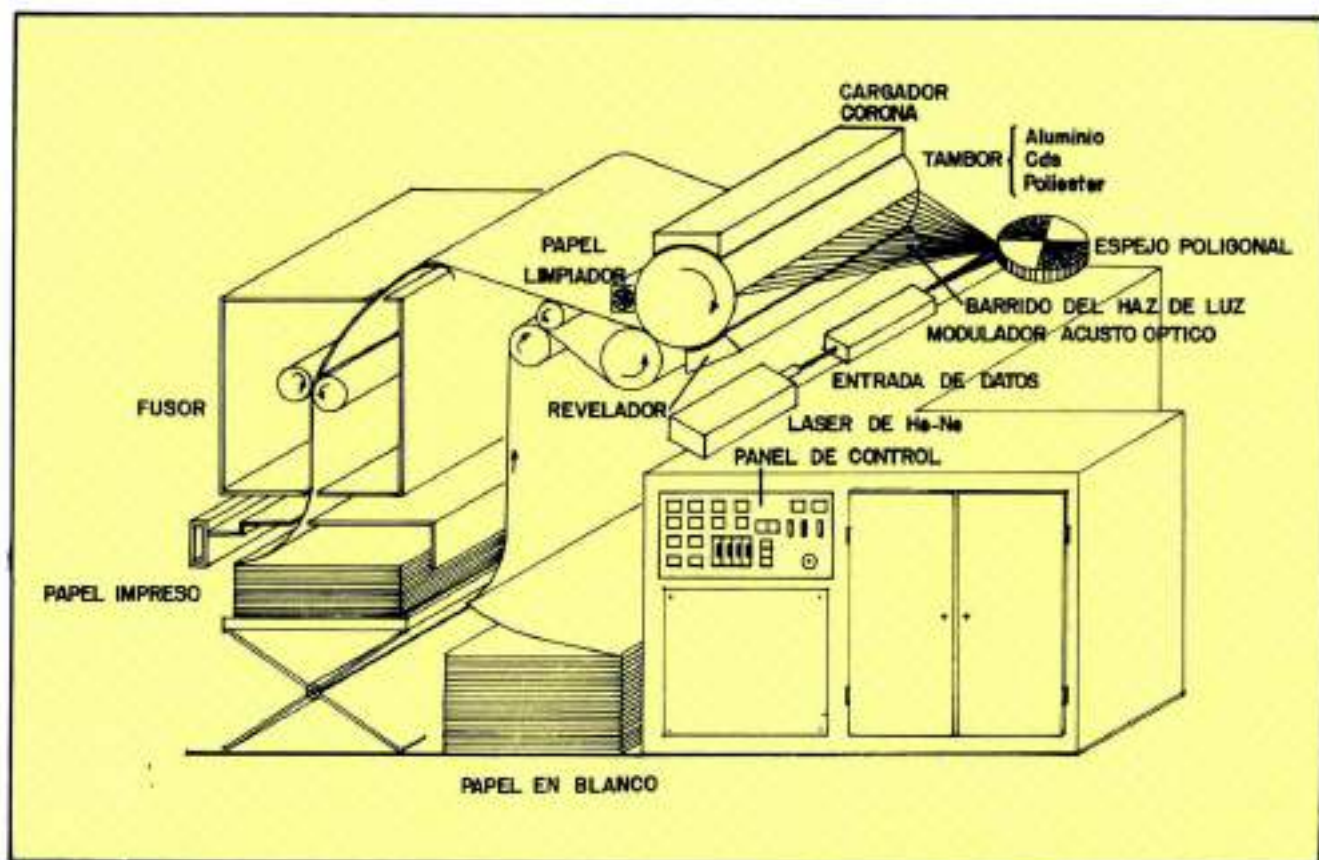


Figura 20. Diagrama de una impresora con láser.

mente con signo contrario al de las partículas adheridas al tambor mediante otro cargador corona. Una vez transferidos los caracteres al papel, es necesario fijarlos permanentemente, lo que se consigue mediante calor aplicado, que funde dichas partículas, adhiriéndolas permanentemente al papel. Una vez completado el proceso, y antes de repetirlo de una forma continua, se limpia el tambor mediante unas cuchillas de material plástico, ayudadas por un sistema de aspiración.

Se ha descrito en forma simplificada la configuración más frecuente de impresoras con láser, pudiéndose encontrar variaciones sustanciales sobre la misma. Lo más común es la utilización de láseres de He-Ne, aunque recientemente se observa una tendencia a la utilización de láseres de semiconductor. A veces se utili-

zan también láseres He-Cd, que emiten entre el violeta y ultravioleta, y láseres iónicos de argón. En todo caso, las potencias empleadas son del orden de las decenas de mW.

Los moduladores más empleados son los acustoópticos, basados en un cristal piezoeléctrico, que vibra con una señal de radiofrecuencia aplicada, formándose en él una onda estacionaria que deflece el haz de luz. Otros moduladores empleados son los basados en el efecto "Pockel", monocristales cuyo plano de polarización depende de un voltaje aplicado. Otro tipo más reciente es el llamado de reflexión total interna, basado en la creación de una red de difracción de la luz en un cristal electroóptico mediante un campo eléctrico periódico.

En cuanto a los sistemas de deflexión, los más empleados son los me-

cánicos galvanométricos y los de espejos giratorios. En los primeros, la deflexión es producida por un espejo movido por un galvanómetro, y se caracterizan por su poca inercia mecánica. En los segundos, la deflexión es producida por un polígono de espejos giratorios como el mostrado en la Figura 20. El deflector holográfico consiste en mover una red de difracción holográfica para deflecar y focalizar simultáneamente el rayo. Los deflectores de estado sólido, hasta la fecha, no han conseguido las características de los deflectores mecánicos, pero aun así, se sigue haciendo un esfuerzo investigador en este campo, a fin de mejorar sus características y la velocidad de barrido. Se basan principalmente en los efectos piezoeléctricos de ciertos cristales y en la variación del índice de refracción de los mismos con los esfuerzos mecánicos a los que se so-

mete por vibración. Modernamente, se trabaja en deflectores de cristal líquido, que tienen las ventajas de su fácil control electrónico y de su bajo coste.

#### **UNIDAD DE SALIDA DE ORDENADOR POR MICROFILM**

Los periféricos de ordenador con microfilm funcionan condensando la información de salida del ordenador en un pequeño espacio de microfilm, y también accediendo a unos *bits* específicos, usando mini o microordenadores, en un tiempo de acceso pequeño. En algunos sistemas, la imagen de los datos está cargada en microfichas, que son leídas mediante un fotodetector de carga estática, y posteriormente se convierte en código binario, que se transmite eléctricamente (por líneas telefónicas, microondas o cualquier otro medio de transmisión) para reproducirlo en un punto remoto a gran velocidad. Las ventajas de utilizar láser para leer y grabar microfichas o microfilmes son la de eliminar la necesidad del proceso de revelado con líquidos y la facilidad de modular el rayo digitalmente para adaptarlo a los códigos del ordenador, eliminándose la necesidad de una grabación intermedia en cinta magnética antes de la microfilmación.

Los láseres más utilizados son los HeNe con potencias del orden de 5 a 10 mW.

El sistema KOMSTAR, comercializado por Kodak, graba sobre un microfilm con matrices de  $7 \times 9$  puntos, y puede producir entre 6.000 y 10.000 páginas por hora. El microfilm, una vez impresionado por el láser, es revelado en cinco segundos. Tiene una resolución de 1.000 líneas por milímetro. La velocidad de impresión se mejora dividiendo el rayo original en nueve rayos separados, modulados y controlados cada uno individualmente, escribiendo así una columna de un carácter simultáneamente. El láser se controla por moduladores acustoópticos excitados a la frecuen-

cia de 30 a 50 millones de ciclos por segundo, dando como resultado una velocidad de escritura de 10.000 a 20.000 caracteres por segundo.

#### **MEMORIAS OPTICAS**

La sociedad actual requiere cada vez más capacidad de almacenar información en pequeños espacios y de acceder a ella automáticamente en tiempos cortos y de forma económica. En las técnicas más convencionales, se han conseguido soportes, tales como la cinta y el disco magnético, de almacenamiento masivo de datos, que no pueden obtener mejoras sustanciales en cuanto a la capacidad de información.

En los últimos años se han desarrollado memorias ópticas capaces de almacenar mayores cantidades de información que las memorias de cinta y disco magnético. Estos sistemas son particularmente útiles para almacenar información gráfica, como documentos codificados, imágenes, etc., que requieren una gran cantidad de memoria. Por ejemplo, en un cuadrado de  $4 \times 4$  cm, con una resolución de unos 80 bit/cm, pueden almacenarse unas 5.000 palabras de texto escrito codificadas. Una fotografía se almacena en forma de miles de "palabras" codificadas.

El principio de funcionamiento del almacenamiento óptico de datos es similar al principio del video-disco, es decir, que mediante un láser se hacen agujeros microscópicos en una película reflectante, que siguen un código determinado de datos digitales. La lectura de los datos es realizada con un rayo menos potente que se refleja o no, según la ausencia o presencia de los microagujeros. La luz reflejada es detectada mediante un fotodetector para convertirla en señal eléctrica, que puede ser almacenada en la memoria del ordenador para procesarla, imprimirla o transmitirla a puntos remotos. Esta forma de almacenamiento de datos ha resultado más práctica que las memo-

rias holográficas que, en un principio, parecían más viables como memorias ópticas de masa.

En los sistemas desarrollados recientemente (Figura 21) pueden almacenarse de 10.000 a 100.000 millones de bits de información en un disco óptico de 30 cm de diámetro, para reproducirlos a velocidades de 50 a 300 millones de bits/s y con unos tiempos medios de acceso de unas 7 centésimas de segundo. Estos discos están cubiertos con una aleación de telurio y grabados con una serie de surcos, en los cuales incide el láser para fundir localmente los pequeños hoyos, que representan los bits de información. Estos pequeños huecos son de una micra de diámetro y se hacen con un láser de pulsos de unos 20 mW, con duración de 50 ns. En cada uno de los discos puede al-

macenarse la información equivalente a unos 200 volúmenes; por lo tanto, un soporte con 100 discos puede contener una librería de 20.000 volúmenes, con posibilidad de acceder a cualquier parte de uno de estos volúmenes en sólo unos segundos.

El coste potencial estimado para las memorias ópticas de masas es del orden de unas 50 pesetas por cada mil millones de bits almacenados, bien entendido que estos costes están calculados en el supuesto de una producción en gran escala.

Los láseres más utilizados en los sistemas de memoria óptica de datos son los de helio-cadmio, los iónicos de argón y los de helio-neón, aunque más recientemente se tiende a la utilización de láseres de semiconductor de GaAlAs.

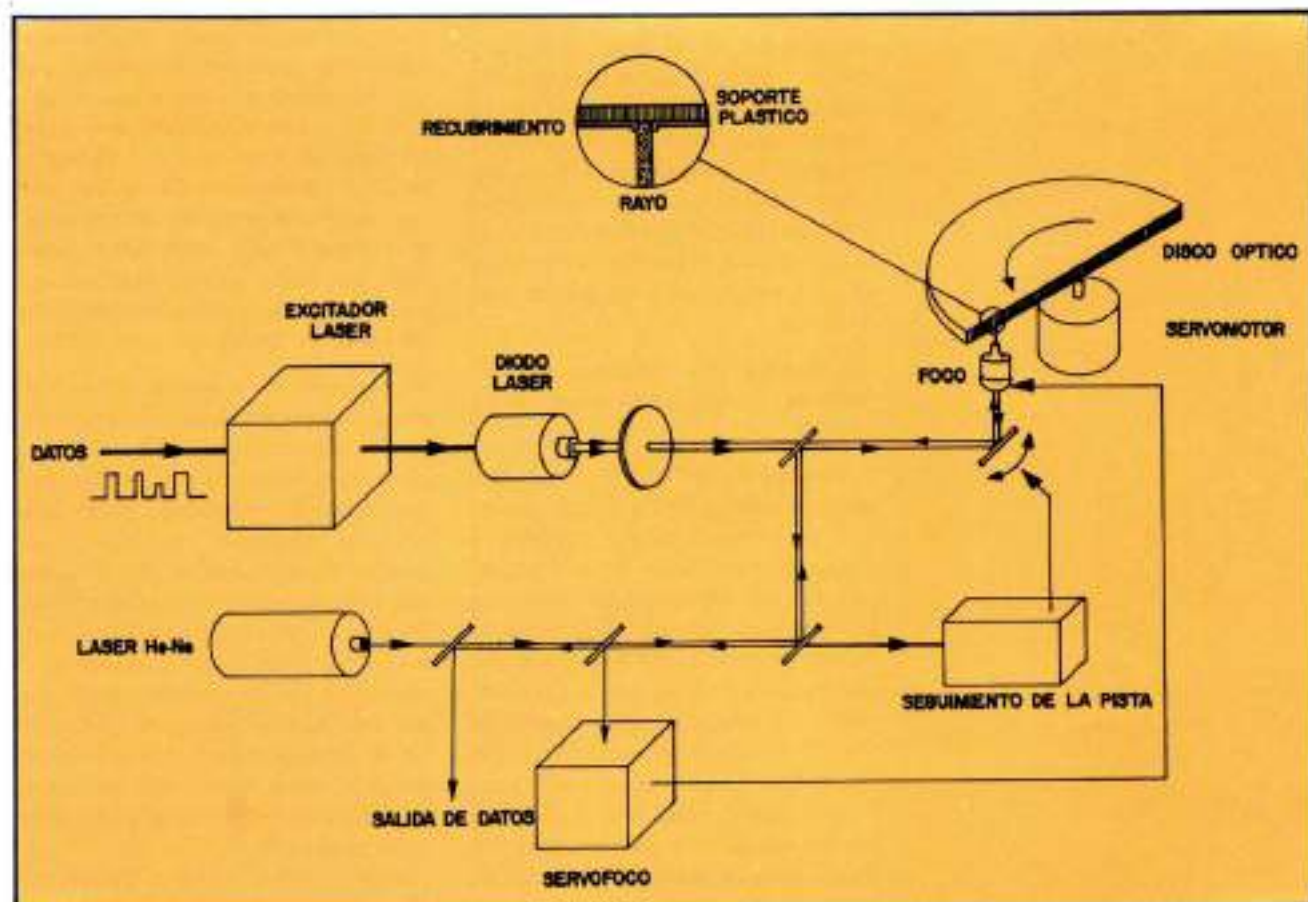


Figura 21. Memoria óptica de disco de lectura y escritura.



Las potencias manejadas dependen del material empleado en los discos o placas de memoria, pero por término medio son del orden de 40 mW de pico para la grabación de datos, y potencias mucho menores para la lectura, con objeto de evitar el deterioro de los discos. Una de las ventajas de los diodos semiconductores es que pueden modularse los datos directamente, actuando sobre la corriente de excitación del mismo, mientras que los otros tipos de láseres requieren moduladores externos acustoópticos o electroópticos.

#### **LECTORES DE PUNTOS DE VENTA**

Los terminales llamados lectores de puntos de venta o de caja se utilizan para leer e introducir en un computador la información de cada producto vendido en los supermercados, grandes almacenes, etc. El láser lee por reflexión un código de barras grabadas en todos los productos en venta.

La luz reflejada en la etiqueta codificada se detecta con un fotodetector y se introduce en un terminal que proporciona un listado detallado de la compra, e introduce los datos en el ordenador central. Con estos terminales se consigue ganar del orden del 25% del tiempo, comparado con el método tradicional de teclear en la máquina registradora, y aún más si se consideran los productos sin etiqueta de precio. Otra ventaja de este método automático es que evita los errores de la cajera que, normalmente, favorecen al cliente, ya que éste suele corregir los errores en su contra. Además, al tener toda la información pormenorizada de las ventas en el ordenador central, puede obtenerse diariamente la información de las clases de productos vendidos, lo que permite optimizar la eficiencia de las ventas.

La lectura de las etiquetas con láser ha demostrado resultados y costes más competitivos que otras soluciones alternativas, como son la lectura magnética o electrostática.

#### **LECTURA DE TEXTOS POR RECONOCIMIENTO ÓPTICO DE CARACTERES**

Desde hace años se está trabajando en el campo del reconocimiento de formas por medios ópticos en general, y en el reconocimiento de caracteres gráficos en particular. Recientemente se está reavivando el interés por este campo, para su utilización como interfaz de entrada de datos en ordenadores y en otros sistemas.

Las aplicaciones principales del reconocimiento óptico de caracteres son la entrada de datos, el proceso de textos y la lectura automática de textos para la producción de periódicos.

La entrada de datos consiste en la lectura de letras o números mecanografiados o manuscritos en impresos bancarios, fichas médicas, mensajes militares, noticias periodísticas, anuncios clasificados, etc. La información, por lo general, requiere que esté posicionada en un impreso en forma preestablecida, evitándose con este procedimiento teclear la información y generar una tarjeta perforada para que sea leída por un ordenador.

En el proceso de textos, la instalación de los procesadores de textos puede sustituirse por varias máquinas de escribir eléctricas y un sistema de reconocimiento óptico de caracteres como entrada hacia el ordenador del texto mecanografiado, y utilizando sólo un periférico de salida para la obtención de las copias procesadas. Con esto puede reducirse a la mitad el coste de un sistema de proceso de textos.

La lectura automática de textos para la producción de periódicos se utiliza como periférico de entrada hacia los sistemas de fotocomposición. Admite directamente los textos mecanografiados evitándose un nuevo teclado del texto para la composición definitiva de la página.

Los tipos de láser más utilizados hasta la fecha son el de HeNe, pero igualmente se tiende a la utilización

de los láseres de semiconductor de GaAlAs.

### PROCESO OPTICO DE DATOS

Un campo con un gran futuro es el proceso óptico de información, que permite realizar con una gran rapidez ciertas operaciones sumamente complejas para ser realizadas con computadores digitales. Existen diversas variantes de estos sistemas, generalmente diseñados para procesos específicos.

Los procesadores ópticos pueden combinarse con los ordenadores digitales, para conseguir sistemas de proceso más potentes y versátiles. Estos sistemas (Figura 22) constan de un codificador electroóptico, que codifica los datos digitales en ópticos en una especie de pantalla. Esta pantalla, con una imagen bidimensional de los datos, se ilumina con un frente de onda procedente de un láser y la luz resultante, modulada por la información de la pantalla, se procesa mediante lentes y filtros ópticos especiales para realizar las fun-

ciones deseadas. Una vez realizadas esas funciones, se vuelve a convertir los datos obtenidos en digitales, mediante otro dispositivo optoelectrónico. De esta forma pueden realizarse con suma rapidez procesos que, realizados con computadores digitales, durarían horas. La razón de la rapidez del proceso óptico es que todos los puntos de información de la pantalla, que puede llegar a 10 millones de bits, se procesan simultáneamente al pasar por los elementos ópticos del procesador. Esto permite realizar operaciones matemáticas complica-

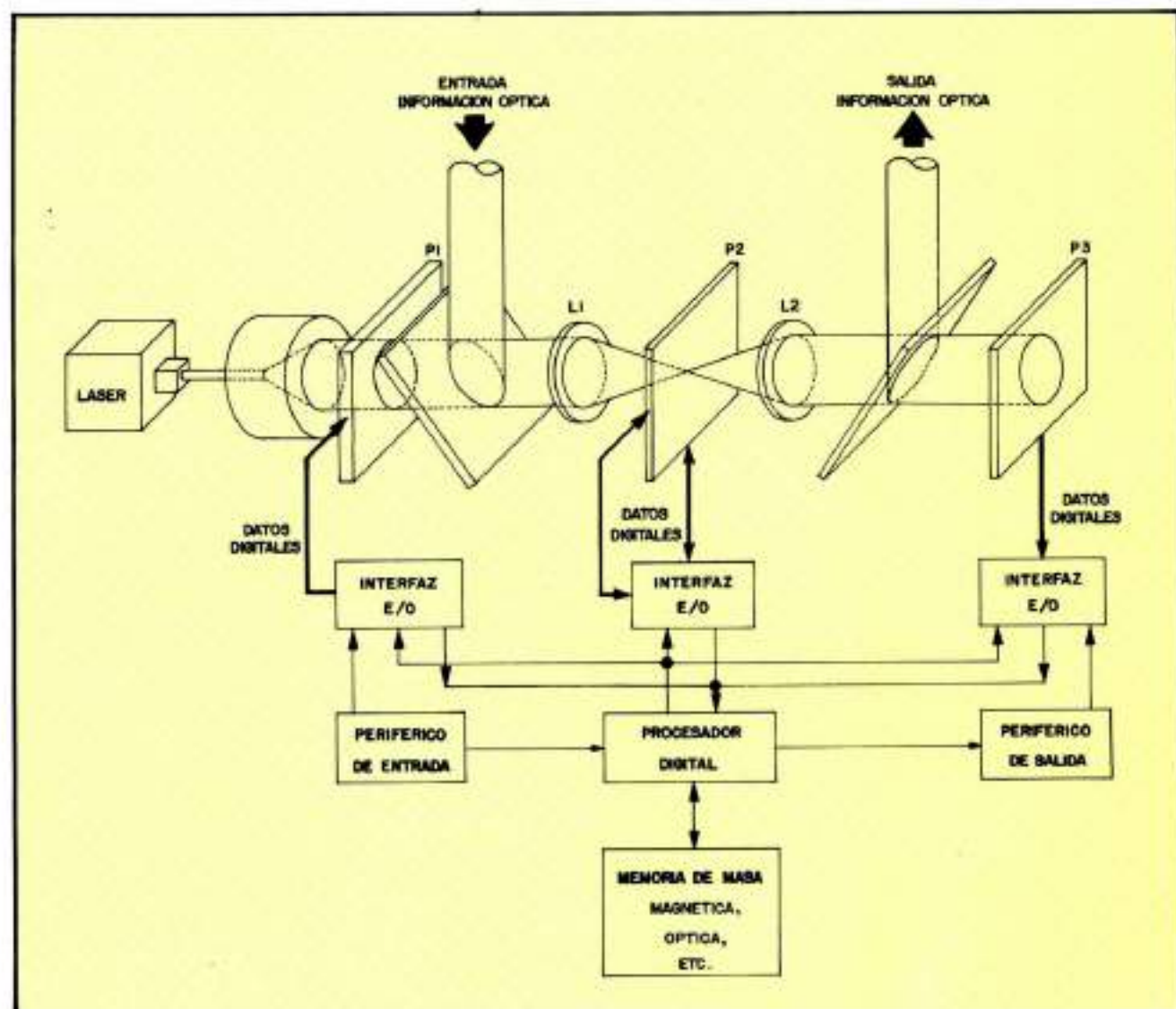


Figura 22. Esquema simplificado de un procesador híbrido optodigital de función de transferencia controlable por el procesador digital, P1, P2 y P3, son filtros ópticos o bien filtros fijos.

das, como transformadas de Fourier con varias variables, síntesis de filtros, operaciones de convolución, clasificación e identificación de imágenes, análisis de terrenos, robótica, resolución de ecuaciones matriciales complicadas, etc.

La corrección de imágenes defectuosas es otra operación que puede hacerse de forma muy simple con un procesador óptico en fracciones de segundo, mientras esta misma operación, realizada por un procesador digital, podría durar horas. De esta forma, se pueden corregir imágenes movidas, desenfocadas y borrosas o deformadas debido a turbulencias atmosféricas o aberraciones de los instrumentos. Esta técnica tiene especial aplicación en la investigación espacial y meteorológica y está basada en técnicas de filtros especiales e iluminación con luz coherente, o bien en la holografía.

El reconocimiento óptico de formas simples o de caracteres es otra técnica de gran utilidad en robótica y en periféricos de entrada de datos en ordenadores (descritos en el apartado anterior). Estos sistemas se han utilizado para identificación de huellas digitales, identificación de palabras clave en documentos para clasificación de los mismos, en sistemas

militares de identificación de blancos, en satélites militares, etc.

El radar de apertura sintética es otra aplicación del proceso óptico coherente, que consiste en la obtención de una imagen de alta resolución a partir de una antena de radar de pequeña apertura en movimiento, y un procesado posterior de la información obtenida.

## TRANSMISIÓN DE DATOS

La transmisión de datos entre ordenadores a gran velocidad y la transmisión entre periféricos y ordenadores puede realizarse a través de fibra óptica, utilizando como elemento emisor de luz un láser semiconductor o un diodo electroluminiscente modulado a altísima velocidad (millones de bits/s). Esto permite la transmisión de un gran volumen de información en un cortísimo espacio de tiempo y a grandes o pequeñas distancias (según los casos), lo cual permite construir redes de transmisión de datos a altísima velocidad. Este tema de la transmisión por fibra óptica en todas sus vertientes se expone con detalle en el apartado de aplicaciones del láser en comunicaciones.

Marca/Modelo	Impresión	Velocidad fotodetector	Láser	Modulador	N. <sup>o</sup> rayos	Deflexión	Resolución (elementos/mm)
IBM-3800	Electro-fotográfica	740 mm/s	He-Ne (20mW)	A/O			7,1 x 5,7
Siemens-3352 (ND-2)	Electro-fotográfica	740 mm/s	He-Ne (20mW)	A/O	6	políg. 14 caras 3000 rpm	7,1 x 5,7
Hitachi H-8196	Electro-fotográfica	890 mm/s	He-Cd (30mW)	A/O (30Mb/s)		políg. 12 caras 42.000 rpm	9,45 x 9,45
Xerox-5700	Electro-fotográfica	274 mm/s	He-Ne (5mW)			políg. 18 caras 10.800 rpm	11,8 x 11,8
Benson B-100	Electro-fotográfica	36 mm/s	GaAlAs			12 caras holográfica	10,1 x 10,1

Características de las impresoras láser más conocidas.

## **APLICACIONES DEL LASER EN CONSTRUCCION, OBRAS PUBLICAS Y AGRICULTURA**

Las aplicaciones del láser en la construcción y la agricultura se basan en la propagación en línea recta de la luz y en la poca divergencia del haz láser, que permiten tener una excelente referencia en el alineamiento, en la medida de ángulos y distancias, en la determinación de líneas y planos verticales y horizontales, etc., con un considerable aumento de la productividad, debido principalmente a la disminución de mano de obra, la mejora de calidad y el ahorro de materia prima. La reducción de costes, en general, puede estimarse de un 20 a un 25%.

Las primeras aplicaciones del láser en la construcción tuvieron lugar en 1964 y, desde entonces, ha existido un interés creciente por parte de los constructores y agricultores de los países tecnológicamente avanzados. Pese a ello, todavía en la inmensa mayoría de los casos se utilizan las técnicas convencionales de alineamiento, medidas, etc. Actualmente, las técnicas láser se emplean en problemas específicos, sin que hayan sustituido masivamente a los métodos convencionales.

Las aplicaciones principales del láser en este campo son el alineamiento de tuberías y canalizaciones, la construcción de túneles, las medidas de elevación y control, detección de planos, control de máquinas de movimiento de tierras y la medida de distancias.

El principal campo de aplicaciones en la agricultura se centra en el control de máquinas y en los proyectos de irrigación.

### **TIPOS DE LASERES UTILIZADOS EN CONSTRUCCION Y AGRICULTURA**

Los láseres más utilizados en este tipo de aplicación son de baja potencia y, principalmente, los visibles de HeNe, que, aun a la luz del sol, son perfectamente visibles, proyectado el haz sobre una superficie.

En aplicaciones de alineaciones, por ejemplo, se necesita luz visible a

simple vista, con poca potencia y poca divergencia. Para aplicaciones al aire libre son suficientes potencias del orden de 1 a 3 mW; en cambio, en el alineamiento de túneles es suficiente con potencias del orden de 0,5 mW.

En los láseres para medidas de elevación y control de máquinas, pueden utilizarse los de HeNe, pero más modernamente se están utilizando los láseres infrarrojos de semiconductor, que tienen las ventajas de su menor coste, peso y volumen.

En cuanto a las condiciones mecánicas, estos sistemas deben estar preparados para soportar el agua y la humedad, fuertes vibraciones, e incluso en algunos casos, explosiones. Se requiere también una gran portabilidad y autonomía de las baterías de alimentación.

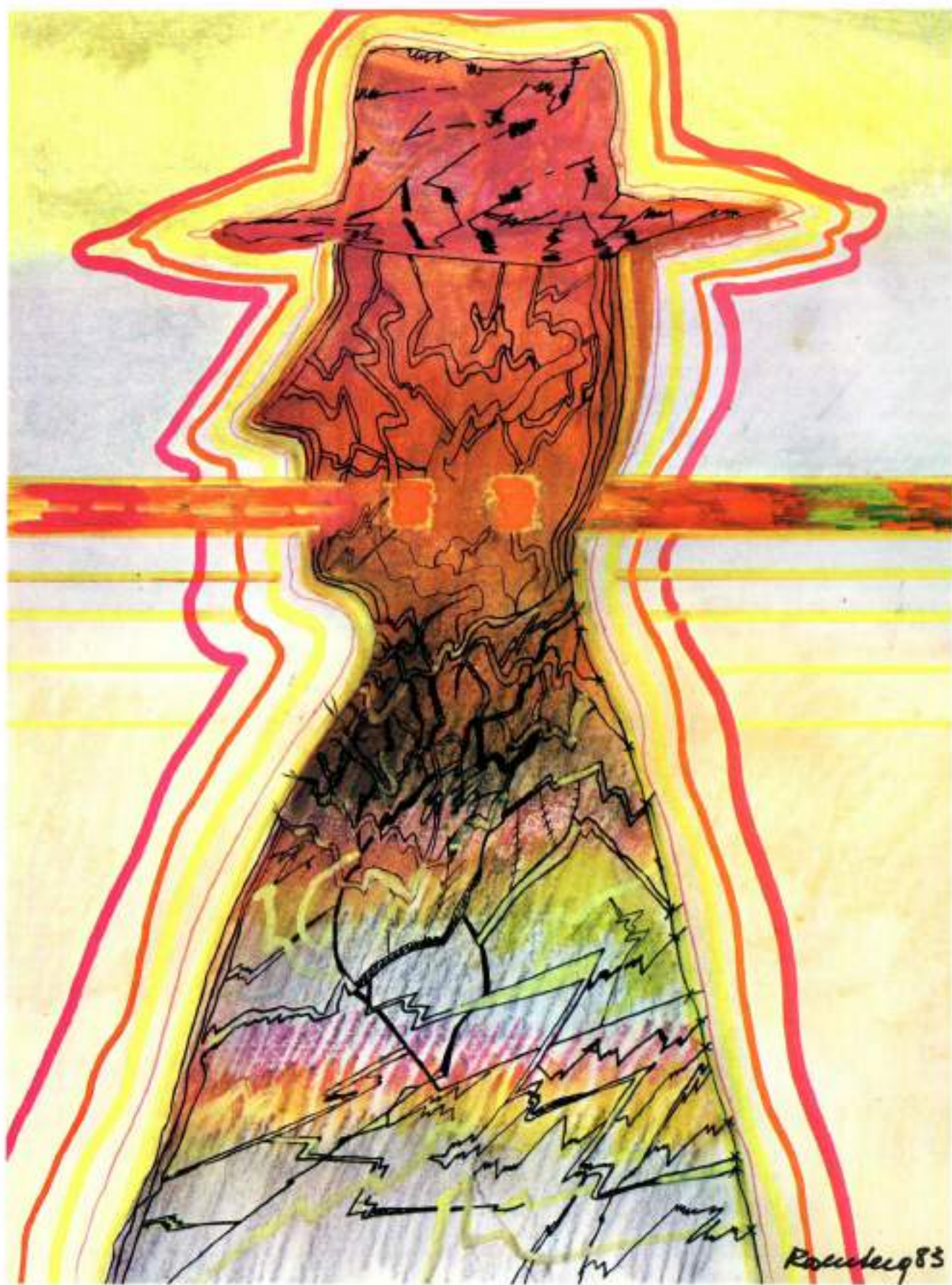
### **APLICACIONES DE ALINEACION**

Las primeras aplicaciones de láser en alineación fueron desarrolladas en los laboratorios, para alinear piezas mecánicas o de óptica, utilizándose para ello láseres de luz visible que no estaban específicamente diseñados para esta función.

Las funciones de alineación en la instalación del acelerador lineal de partículas de unos 3.200 m de longitud en Stanford (California), y la construcción del túnel subacuático que enlaza San Francisco con Oakland, se hicieron con láseres experimentales, y, a partir de entonces, las compañías constructoras se interesaron por el desarrollo de instrumentos con láser, específicos para funciones de alineamiento, aptos para su utilización en el campo.

Actualmente, existen multitud de instrumentos diseñados específicamente para alineación en obras de construcción de acueductos, oleoductos, regadíos, túneles, alcantarillado, etc.

El principio de funcionamiento se basa en la escasa divergencia del rayo.



Este rayo, enfocado con un telescopio, puede proyectarse a cientos de metros con diámetros similares a los del punto de partida, facilitando así la colocación de las piezas en la construcción de que se trate, con una simple comprobación visual, ya que los láseres utilizados son visibles aún con la luz solar, en las peores condiciones. Normalmente se hace comprobación visual con un 10% de error posible, pero si se desea más precisión, puede hacerse la comprobación electrónicamente con ayuda de fotodetectores, con lo que se consiguen precisiones en el alineamiento del orden del 4%, incluso considerando las perturbaciones de la atmósfera, y de las vibraciones normales en estas obras.

Una de las aplicaciones más frecuentes del láser en la construcción es la alineación de las tuberías de alcantarillado, que normalmente tienen una cierta inclinación sobre la horizontal para facilitar la acción de la gravedad en la conducción de las aguas residuales o de lluvia.

La forma de utilización del láser en estas aplicaciones consiste en enfocar el láser al principio de la canalización con la inclinación necesaria. El operario pone al otro extremo del tubo una pantalla transparente, donde incide el punto de luz, lo cual permite fácilmente mantener centradas las secciones de la canalización (Figura 23).

Los instrumentos modernos para este tipo de aplicación llevan un ajuste automático del ángulo deseado con la horizontal. Aparte de la precisión intrínseca a este método, se elimina la necesidad de mano de obra similar, ya que el mismo operario conoce exactamente, sin necesidad de ayuda adicional, la posición en que debe colocar cada sección del tubo, aumentándose la productividad entre un 30 y un 50%.

La reducción de costes es tan importante en estos casos que los países industrializados utilizan casi exclusivamente este método de alineamiento en obras que requieren una optimización de costes.

En la construcción de túneles, la utilización del láser para alineación está muy extendida por la gran facilidad que supone tan buena referencia a los trabajos subterráneos. No sólo se utilizan para alineación recta, sino que en algunos casos, se utiliza un grupo de láseres e instrumentos ópticos para definir la curvatura de un techo o de una pared.

También se utilizan en la alineación de máquinas transportadoras de rocas, cintas transportadoras, etc. Como ejemplo de alineación en la construcción de túneles hay que citar un túnel en Nevada de unos 7 km a través de roca volcánica y el túnel de Navajo en Nuevo México.

#### APLICACIONES A LA MEDIDA DE ELEVACION

En esta aplicación, en lugar de utilizar el rayo en su propagación en línea recta como referencia, es utilizado para crear un plano de referencia. Esto se consigue enviando el rayo

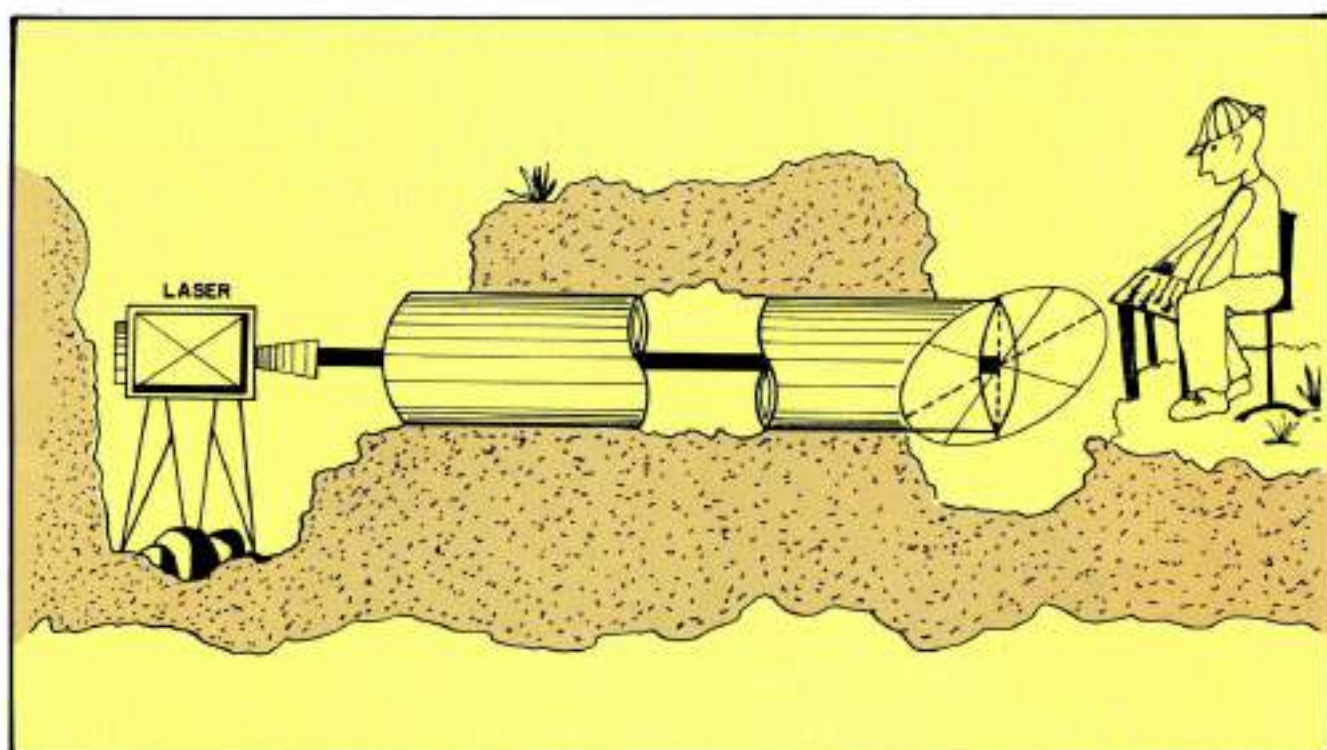


Figura 23. Tendido de tuberías con alineamiento por láser.

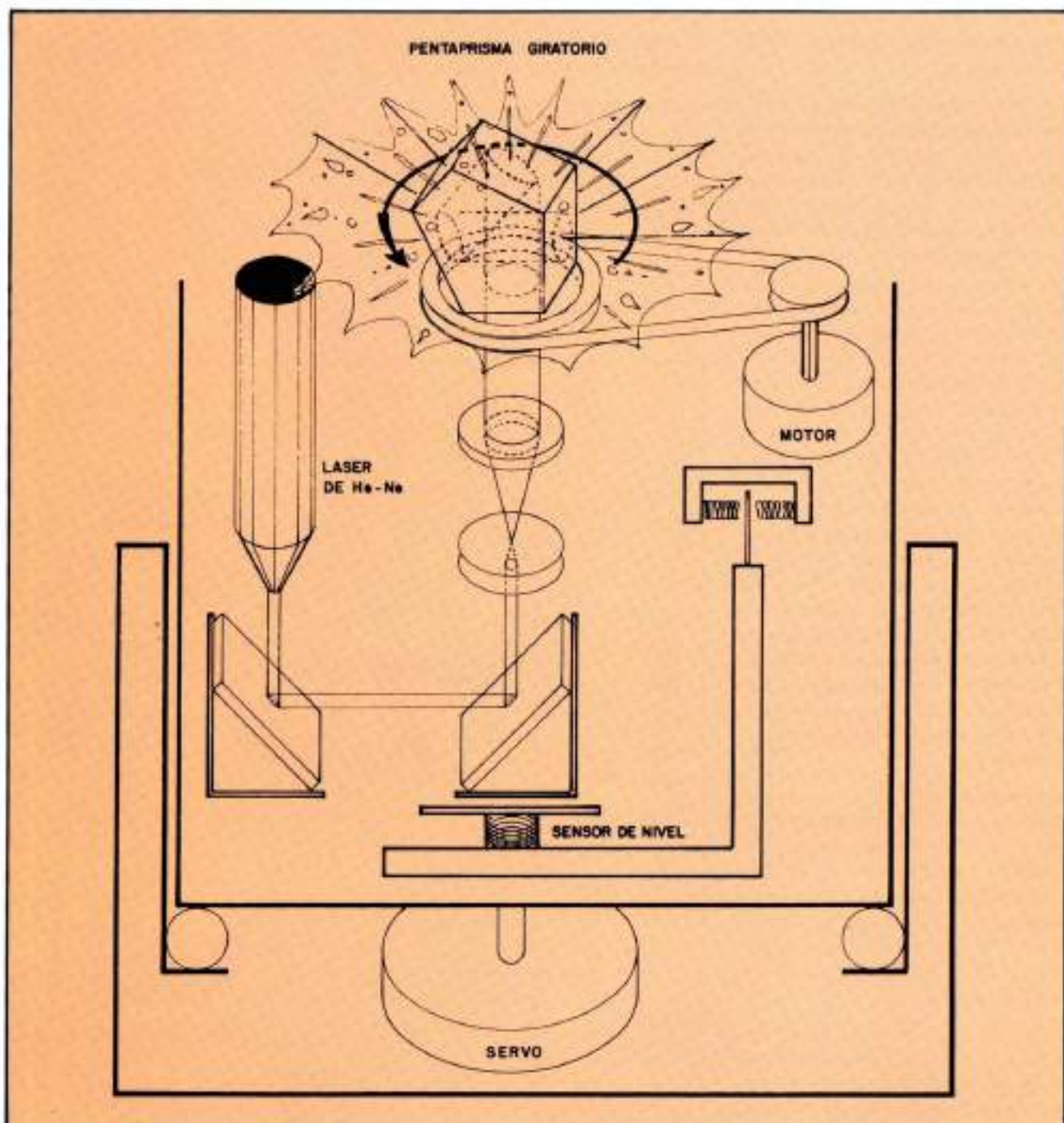


Figura 24. Generación de un plano óptico de referencia.

hacia un sistema de espejos o un pentaprisma giratorio, haciendo así girar el rayo, y formando un plano de luz perpendicular a la dirección original del rayo (Figura 24).

En este procedimiento puede generarse un plano de referencia en un radio de acción de 300 m o más, si se

cumplen los requisitos exigidos de precisión en el instrumento. Dicho instrumento lleva un sensor electrónico de nivel horizontal de manera que, con gran precisión, puede ajustarse el plano de referencia al ángulo deseado sobre la horizontal.

Los instrumentos existentes en el

mercado pueden ajustarse hasta un 10% de inclinación, con una resolución de 0,01%.

Las condiciones ambientales que deben cumplir estos instrumentos son, a veces, muy exigentes. Por ejemplo, se han utilizado en la construcción de canalizaciones de Alaska a 20°C bajo cero, y en el desierto de Sudán, a 60°C sobre cero.

Los láseres utilizados para esta aplicación suelen ser de HeNe, aunque últimamente se tiende a la utilización de láseres infrarrojos de semiconductor con menor peso y coste. Para la detección del plano en cualquier punto del área cubierta por el instrumento suelen utilizarse detectores electrónicos, tanto para detectar la radiación roja del láser de HeNe, como para la de los modernos instrumentos con infrarrojos. El detector consiste en una fotocélula de silicio desacoplada de la luz ambiente mediante un filtro interferencial, que sólo deja pasar la longitud de onda del instrumento. Estos detectores dan una señal visual, y, a veces, también una señal acústica al detectar el centro del rayo.

Las ventajas del láser en esta aplicación son su mayor precisión (del orden de 10 veces superior a la de los métodos tradicionales); la eliminación de los errores puesto que con el láser es una sola persona la que hace la medida y la que realiza la acción (Figura 25) y, por último, su mayor radio de acción.

La construcción de suelos de hormigón es un buen ejemplo de aumento de la productividad, debido a la reducción del tiempo y de las personas necesarias, y al ahorro de material, por ajustarse más exactamente a los espesores de material especificados.

Estos instrumentos láser se utilizan también para construir techos y paredes, para la instalación de tuberías y conducciones de aire acondicionado y ventilación, conducciones eléctricas, ventanas y otros elementos en la construcción, con las ventajas de la mayor velocidad de construcción,

mayor precisión y menor necesidad de retoques para encajar los elementos finales (puertas, ventanas, etc.).

Existen algunos sistemas que operan automáticamente con servomecanismos electrónicos controlados por el rayo, para realizar diversos tipos de construcciones.

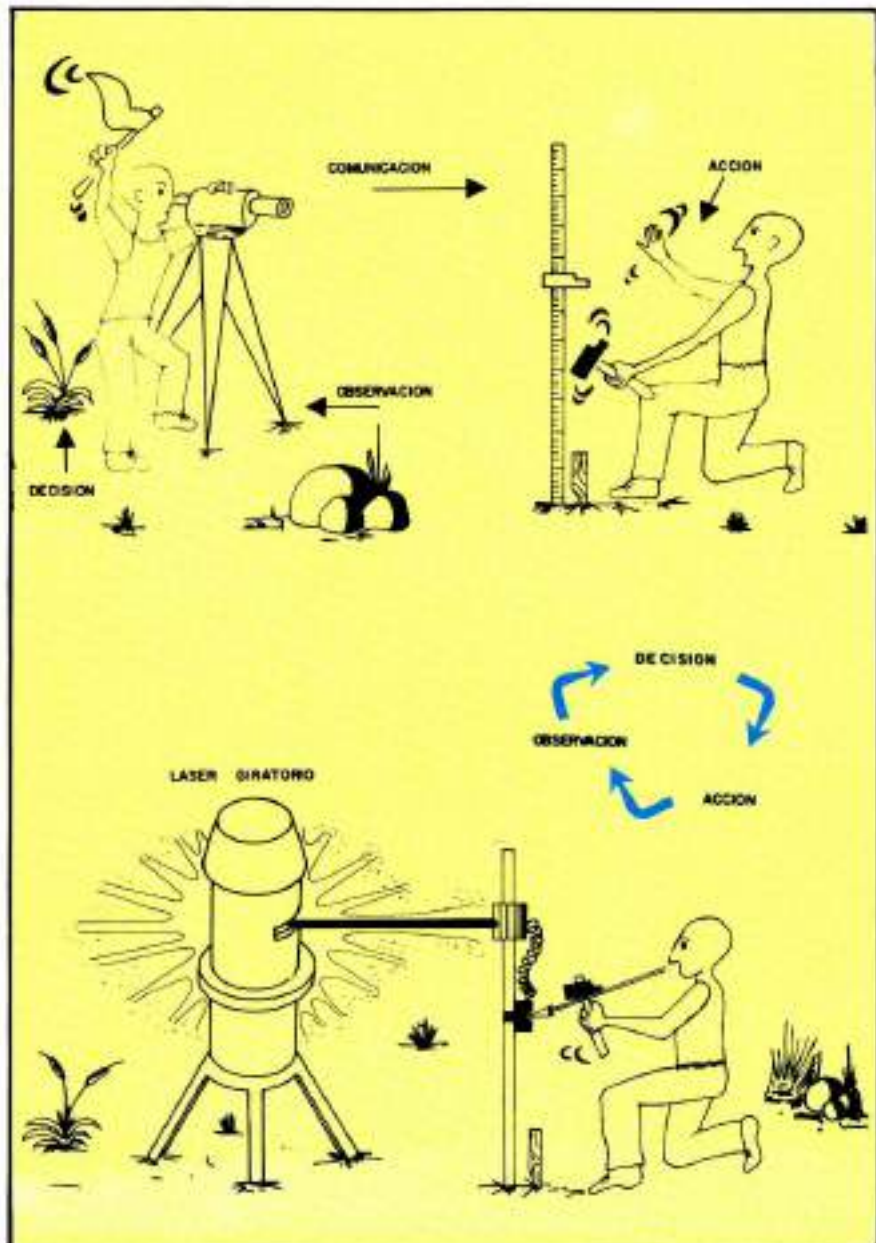


Figura 25. Medidas topográficas de elevación a) Método convencional. b) Mediante láser.



## **CONTROL DE MAQUINAS DE MOVIMIENTO DE TIERRAS**

Tanto en la construcción como en la agricultura, es de gran interés el control de las máquinas de movimiento de tierras, que se basa en la instalación de un detector de láser a cierta altura sobre la cuchilla de la excavadora o de la máquina de que se trate. En los sistemas manuales, el operario de la máquina recibe continuamente información relativa sobre la altura que debe mantener la cuchilla, a partir del láser que genera el plano o la línea de luz de referencia. En los sistemas automáticos, toda la máquina puede comandarse de una forma completamente automática desde el láser, por mediación de motores hidráulicos controlados electrónicamente. La utilización de estos métodos, tanto en la construcción como en la agricultura, llevan consigo un aumento muy considerable de la productividad. El láser se instala a unos 3 a 4 metros de altura sobre el suelo para evitar los obstáculos y para minimizar las perturbaciones atmosféricas. El detector de láser es omnidireccional, para poder captar la radiación procedente de cualquier dirección.

La utilidad de la aplicación de estas técnicas a la construcción es considerable, por ejemplo, para grandes superficies planas (aeropuertos, campos de deportes, grandes construcciones industriales, etc.), evitándose costosos procedimientos de supervisión y gran cantidad de mano de obra. El ahorro de material de construcción y de volumen de tierra a mover es considerable, y se tiene la gran ventaja adicional de la mayor calidad de acabado. El ahorro de materiales, tales como hormigón, grava, asfalto, etc., se debe a que con estos nuevos métodos no es necesario el exceso de material que se emplea con los métodos tradicionales para asegurar el cumplimiento de las especificaciones mínimas.

En la agricultura, se utilizan las máquinas controladas con láser para

tender conducciones de drenaje en los campos que se saturan de agua fácilmente con la lluvia. Esto permite trabajar la tierra después de la lluvia, aumentándose así la productividad de las cosechas. Para el tendido de las conducciones se pueden utilizar estas máquinas controladas por un haz láser giratorio. Otra aplicación en la agricultura es el aplanamiento horizontal del terreno para incrementar la productividad, al permitir un mejor aprovechamiento del agua y un menor consumo de energía de bombeo.

Otra de las aplicaciones es la marca de los diques en los campos de cultivo de arroz, que permiten un determinado nivel de agua, necesario en cierta etapa del cultivo, con un mínimo consumo de agua. Estos pequeños diques forman contornos con la misma elevación. Para conseguir esto con gran rendimiento se utilizan máquinas guiadas por un plano de luz de referencia.

## **MEDICION DE DISTANCIAS**

La medición de distancias puede hacerse electrónicamente utilizando el principio del radar óptico (lidar), que se describe con detalle en el apartado sobre instrumentación científica.

Los lidars para aplicación en la medición de terrenos y de edificios, utilizan, por lo general, un láser de semiconductor como fuente de luz, debido a que el rango de distancias normalmente manejadas es pequeño.

Pueden medirse por este procedimiento distancias de cientos de metros con precisiones superiores a 1 cm.

Existen sistemas más sofisticados que, además de la distancia, miden ángulos electrónicamente y tienen cierta capacidad de cálculo y de almacenamiento de información, por lo que un levantamiento topográfico o las mediciones de un edificio pueden realizarse casi automáticamente y con una gran precisión.

## APLICACIONES DEL LASER EN ARTES GRAFICAS

La industria gráfica está sufriendo una profunda transformación debido a la introducción de los nuevos sistemas computerizados para el tratamiento de la información y el control de las máquinas de impresión.

La industria periodística está asumiendo este cambio tecnológico a pasos agigantados, dada la agilidad necesaria para manejar la gran cantidad de información escrita que se genera, y sobre todo en la fotocomposición automática y el tratamiento de textos. Otras áreas en donde se está produciendo este cambio tecnológico son la de impresión de revistas periódicas, la de libros y la industria gráfica en general.

La utilización del láser en la tecnología de reprografía afecta fundamentalmente a los campos de confección de planchas, facsímil, fotoimpresión scanner de color, impresoras de imágenes y todos aquellos sistemas de reproducción o composición de textos escritos e imágenes gráficas que utilicen un láser para la lectura del original y/o para la reproducción de las copias impresas. Aquellos campos en los que la utilización del láser no tenga como fin primordial la reproducción de información gráfica a partir de originales, locales o remotos, serán considerados en otros capítulos.

En este campo de aplicaciones del láser son de interés la monocromaticidad de su radiación luminosa y la posibilidad de concentrar toda la energía en un punto muy pequeño y definido. También tiene importancia el efecto físico que produce dicha energía, luminosa o calorífica, sobre la superficie en la que incide, en función de la longitud de onda de la radiación.

### TIPOS DE LASER PARA REPROGRAFIA

La lectura del original por medios ópticos se hace barriando en líneas la imagen original y recogiendo la reflexión puntual en un fotodetector.

Los láseres más utilizados actualmente para este fin son los de HeNe, con potencias del orden de 1 mW por término medio. Existen casos en los que se utilizan láseres iónicos de argón. Actualmente existe tendencia a utilizar láseres de semiconductor.

La impresión, en general, puede hacerse directamente sobre la copia (caso de las planchas de impresión y de la reproducción fotográfica) o indirectamente, impresionando previamente un tambor fotosensible que, por medios electrostáticos, imprime la imagen sobre la copia (caso de las telecopiadoras y algunos facsímiles).

Para el terminal reproductor o copiador a veces se utiliza el mismo láser físico que para la lectura. Otras veces se utiliza otro láser, de unos 10 mW, que suele ser de HeNe, para el grabado indirecto. Para el grabado directo, como en el caso de la termoimpresión, se utiliza un láser iónico de argón del orden de unos vatios, o bien uno de Nd:YAG.

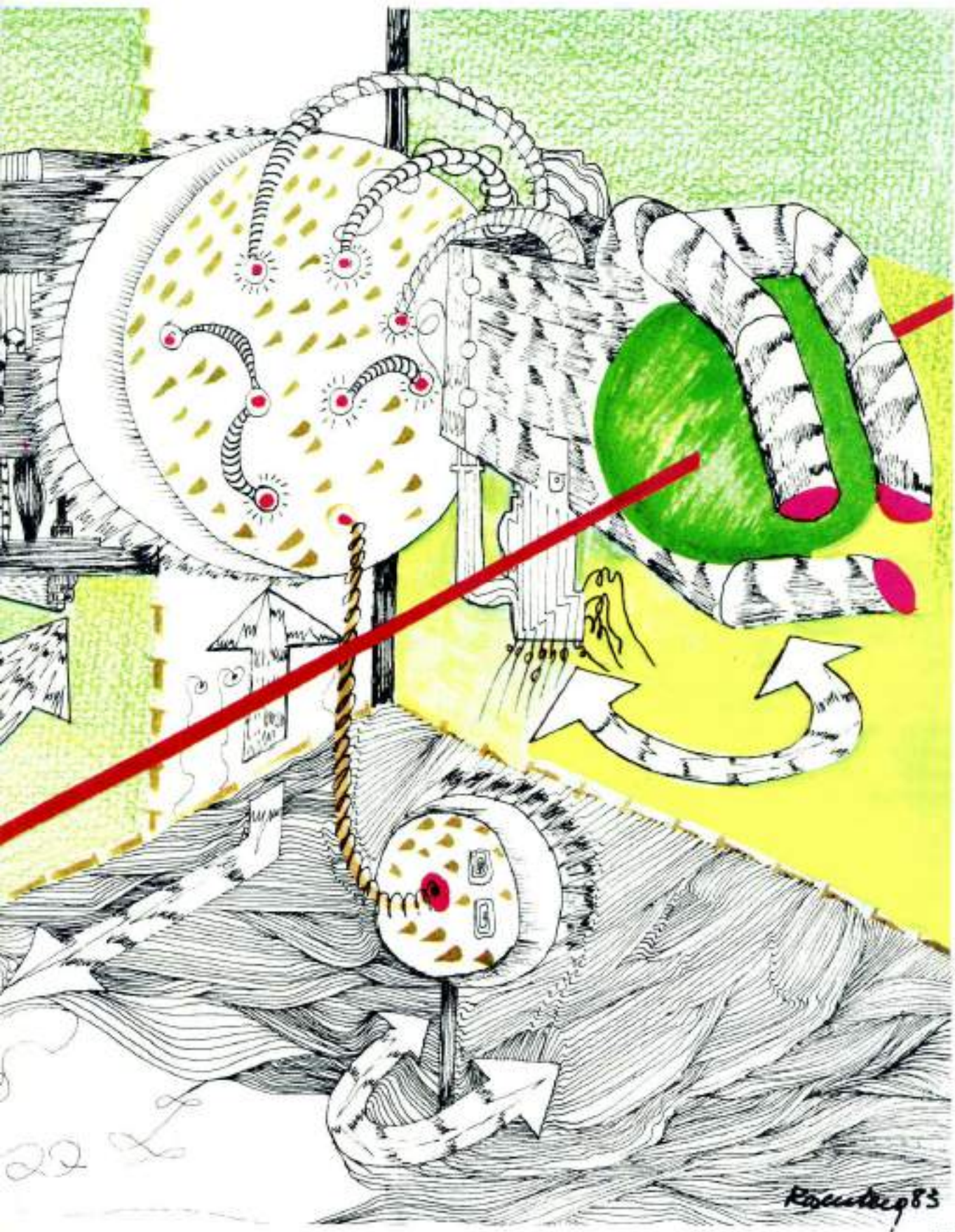
El láser no es un elemento fundamental para realizar las funciones básicas de la reprografía, pero su utilización permite construir máquinas que operan a mucha mayor velocidad y con mayor eficiencia y calidad, pudiéndose mejorar así la productividad, al hacer las máquinas mucho más compatibles con las velocidades y los tipos de señales que manejan los sistemas computerizados.

### CONFECCION DE PLANCHAS DE IMPRESION

El sistema convencional de obtención de planchas de impresión, partiendo de un modelo original compuesto de fotos, textos, dibujos, etc., consistía en fotografiar dicho modelo, revelar la película en el laboratorio fotográfico, impresionar la plancha a partir del negativo, y procesarla químicamente, para obtener al fin la plancha de impresión.

Los nuevos sistemas simplifican considerablemente el proceso, ya





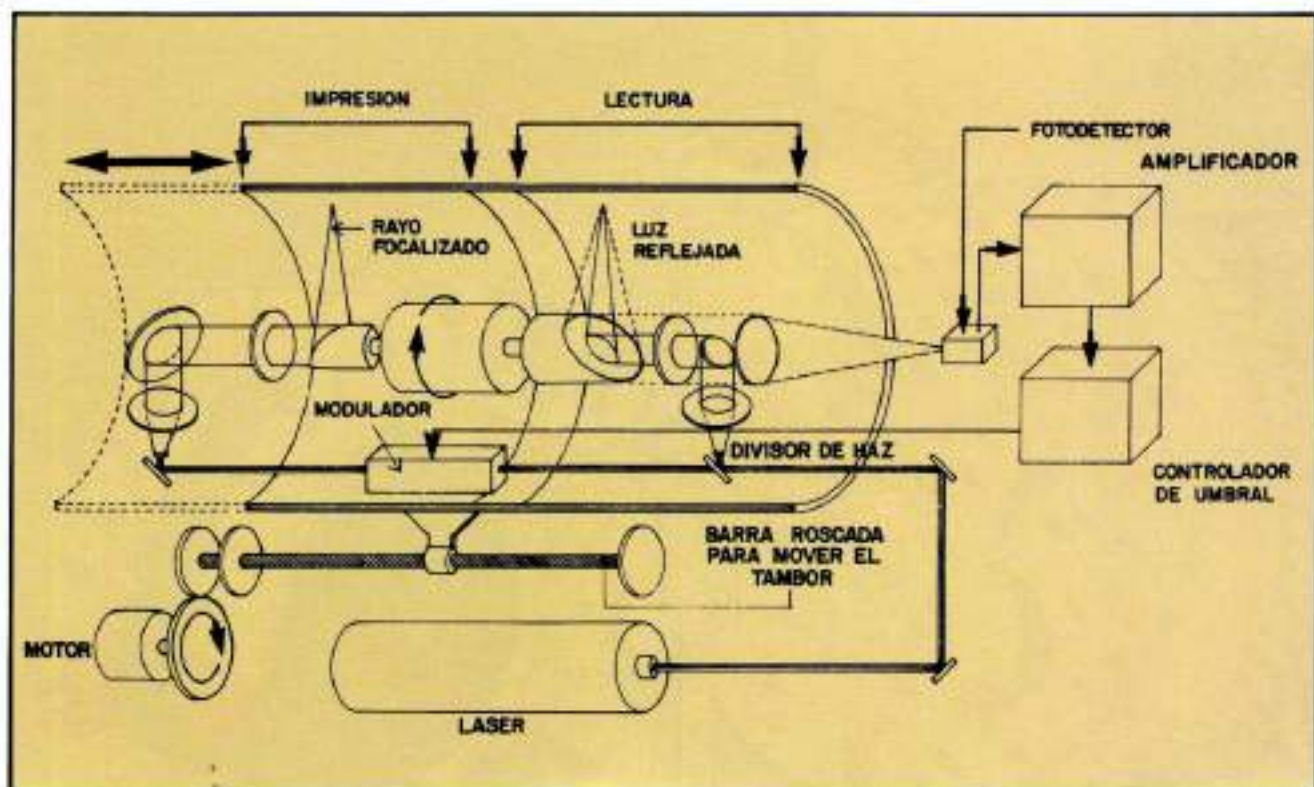


Figura 26. Configuración de un sistema de confección de planchas de impresión.

que, partiendo del mismo modelo original, se introduce un láser y un fotodetector, para leer y transmitir la información hacia el terminal grabador. En éste, otro láser impresiona la plancha que necesitará o no un procesado químico dependiendo de la tecnología utilizada. Así, se reduce a la mitad el número de pasos del proceso, con el consiguiente ahorro. Uniendo a esto las enormes posibilidades del tratamiento automático de la información, se comprende fácilmente el interés que estos sistemas despiertan en las industrias gráficas.

Los usuarios principales de estos sistemas son la industria periodística y los editores e impresores de libros, siendo aquélla la más necesitada de los nuevos sistemas automáticos.

Los primeros sistemas de composición de planchas de impresión surgieron al principio de los años 70 y desde entonces se han ido perfeccionando, al incorporar nuevas facilidades de impresión sobre distintos ma-

teriales, de transmisión a impresores láser remotos y de proceso digital con ordenador.

En la Figura 26 aparece la configuración de un sistema sencillo de realización de planchas, llamado sistema LITE-1830, desarrollado por Lincoln Laser en 1974. Este sistema utiliza el mismo láser para el barrido del texto que para la impresión en la placa (un láser visible iónico de argón de unos 3 vatios). En este sistema, el rayo principal se divide en dos caminos, que se enfocan por dos sistemas de lentes en puntos luminosos del orden de  $25 \mu\text{m}$  de diámetro, barriendo mediante dos espejos giratorios a  $45^\circ$  el texto original y la placa fotosensible.

El original y la placa están fijados en la superficie de un carrete transparente, que se desplaza longitudinalmente. Uno de los puntos luminosos lee el original, al reflejarse en las partes claras y oscuras del mismo, absorbiendo o reflejando luz. La luz re-

flejada se detecta mediante un fotodiodo, convirtiéndose en una señal eléctrica, que se procesa en un controlador de umbral, y luego modula al otro rayo que impresiona, de una forma sincronizada con el rayo lector, la placa fotosensible. Este sistema puede explorar e impresionar dos originales en cuatro minutos, con una definición de 120 líneas.

Existen otros sistemas más sofisticados, como por ejemplo el sistema PAGEFAX, de Muirhead Ltd., que consta de una unidad transmisora y mediante un láser de HeNe de 10 mW explora el original para convertir la información en señal eléctrica y transmitiría hacia la unidad receptora o grabador. La señal eléctrica recibida modula y sincroniza el rayo de un láser iónico de argón de 2 w, para impresionar la placa de un cliché litográfico, offset o placas de magnesio, según los casos. Para el caso de sistemas con compresión digital, se utilizan láseres de argón de 10 mW. Estos sistemas pueden utili-

zarse en planta para la producción de planchas de offset u otro tipo, directamente a partir del original. También pueden utilizarse como facsímil de banda ancha para enlazar, vía satélite, cable coaxial, microondas u otros medios de transmisión, el centro de composición con la planta de impresión, situada a gran distancia del anterior. Cuando el coste de la vía de transmisión deba minimizarse, se pueden utilizar las facilidades de compresión digital para reducción de anchura de banda. Estos sistemas suelen hacerse compatibles con los ya existentes, y pueden utilizarse también como unidades rápidas de entrada y salida de ordenador, en técnicas automáticas de composición de páginas. Los tiempos necesarios para la impresión de una página completa de un periódico son del orden de 0,5 a 2 minutos, eliminándose además varios pasos intermedios, en muchos casos.

Existen sistemas como el LOGESCAN, que utilizan un láser Nd: YAG, de 10 W, que hace la impresión en forma térmica sobre una lámina plástica no fotosensible, colocada en contacto con una plancha de aluminio a la que se transfieren, por efecto térmico, los caracteres a imprimir. El resultado es una plancha litográfica de aluminio, con una imagen en positivo, y una lámina de plástico con una imagen en negativo. No sin dificultades, los sistemas láser de confección de planchas de impresión se han ganado una buena credibilidad en la industria periodística. La tendencia hacia la automatización y la necesidad de manejar, almacenar y procesar información gráfica con gran velocidad y versatilidad, hacen que los sistemas con láser tengan un buen futuro. Las tendencias apuntan hacia plantas de impresión por zonas, para toda clase de periódicos, pequeños y grandes, lo cual implica la utilización de sistemas de comunicaciones de banda ancha para los periódicos grandes, así como sistemas computerizados basados en entrada o salida por láser a alta velocidad.

Se tiende a la simplificación, a la unificación y a la reducción de los precios de estos sistemas.

La utilización de sistemas automáticos de confección de planchas de impresión con láser y con sistemas computerizados tiende a generalizarse a partir de las afortunadas experiencias realizadas por grandes diarios mundiales.

### SCANNER DE COLOR POR LASER

La idea básica de los scanner de color con láser es la de sustituir la lámpara de incandescencia de un scanner electrónico convencional de color por un láser, para producir la separación de color en tono continuo. La ventaja del láser estriba en su mayor rapidez, mayor precisión y una modulación más eficiente que en las lámparas de incandescencia. Además, su salida puede digitalizarse y cargarse en un ordenador, o bien ser transmitida digitalmente a través de un medio de transmisión.

Por ejemplo, el sistema CHROMA-GRAPH-300, de Hell, está equipado con un láser iónico de argón, cuyo rayo de salida se divide en seis rayos separados, de la misma intensidad, mediante un sistema de espejos. Cada rayo se modula con un modulador digital, controlado por una señal digital procedente de un ordenador con pantalla. Cada uno de los rayos modulados es transmitido, mediante un cable de fibras ópticas, hacia la cabeza de grabación, donde es proyectado a un carrete de grabación mediante una lente zoom. La película fotosensible montada en el carrete es impresionada con dichos rayos sobre una línea de grabaciones. El láser utilizado para esta máquina es iónico de argón, con potencia entre unos 10 y 40 mW, y está fabricado por Spectra Physics, con American Laser Corporation como segunda fuente.

Las ventajas de la utilización del láser en estos sistemas son su alta intensidad, que permite un tiempo más corto del proceso; una mayor

vida que las lámparas de incandescencia y la posibilidad de utilizar películas más baratas, u otro tipo de material, como planchas litográficas. También tienen la posibilidad de salida digitalizada, para registrarla en disco o cinta magnética, o transmitirla a un terminal remoto por cualquier medio de transmisión. Los principales inconvenientes actuales son la necesidad de cambiar los tubos de plasma del láser cada cuatro meses, aproximadamente, con el coste que esto implica. Respecto a la efectividad del láser en los scanner de color, aún no hay unanimidad de criterios, aunque el principal fabricante, Hell, utiliza láser en su tercera generación de máquinas.

### FACSIMIL CON LASER Y TELECOPIADORAS

El facsímil es un sistema de transmisión de información gráfica consistente en un terminal transmisor, que toma la información directamente del documento a transmitir, un terminal receptor, cuya salida es una copia de dicho documento y un medio de transmisión.

Existen cinco grupos de facsímiles: baja velocidad (4 a 6 minutos); media velocidad (2 a 3 minutos); alta velocidad (menos de un minuto); equipos especiales y los facsímiles de banda ancha. En todos ellos pueden utilizarse canales telefónicos para la transmisión de la información. Los facsímiles comerciales son los tres primeros grupos. Los facsímiles especiales están adaptados para la transmisión de fotografías para periódicos, datos meteorológicos, datos de perforaciones en plataformas petrolíferas, etc. Los facsímiles de banda ancha tienen también aplicaciones limitadas, como, por ejemplo, las redes militares de facsímil digital a banda ancha, que operan a 1,5 M bit/s, y que pueden reproducir una página completa en menos de un segundo. Los facsímiles de banda ancha irán tomando un mayor auge en el futuro, debido a su mayor calidad

de reproducción y a la implantación paulatina de los nuevos sistemas digitales de transmisión y conmutación, así como de los nuevos medios de transmisión de gran capacidad. Estos sistemas de banda ancha se utilizarán como terminales periféricos locales y remotos y como duplicadores de alta velocidad controlados por ordenador.

El sistema comercializado por Xerox es un facsimil para aplicaciones generales, que trabaja sobre papel blanco normal a un ritmo de unos dos minutos por copia tamaño folio. Entra en la categoría de velocidad intermedia, aunque no es compatible con las recomendaciones del CCITT. En este sistema, la entrada de los documentos y la transmisión se producen de forma automática. El barrido se hace con un rayo de láser enfocado, que es deflectado mediante un sistema galvanométrico. La reflexión o absorción en el documento se detecta con un fotodetector, es procesada electrónicamente y transmitida hacia el terminal receptor o telecopiadora. La señal recibida por éste, tras procesarla electrónicamente, es utilizada para modular el mismo láser del barrido. El elemento fotosensible se carga electrostáticamente antes de la exposición, y el rayo láser forma una imagen electrostática al barrerlo. La imagen se transfiere al papel y se fija mediante calor. El láser utilizado es de HeNe, con una potencia del orden de 1 mW.

El sistema Laser Photo de Harris Corp., opera de una forma similar al anterior, pero imprime sobre papel fotosensible con revelado térmico, y utiliza un láser de HeNe de unos 2 mW. El tiempo necesario para copiar un documento tamaño folio con 112 líneas/cm de resolución es del orden de un minuto. Existen diversos modelos según la aplicación. El modelo 500 es un sistema con calidad fotográfica para transmitir a alta velocidad, con escala de grises. El modelo 600, también con calidad fotográfica, es digital y es utilizado para transmitir imágenes de satélites, en medici-

na, en imágenes ultrasónicas, en imágenes nucleares, en gráficas de ordenador, etc. Otros modelos distintos son utilizados para transmisión de fotografías, huellas digitales, datos meteorológicos, etc.

Existen otros facsimiles de diferentes fabricantes, diseñados para aplicaciones específicas como el Muirhead 300, diseñado para transmitir imágenes de satélites meteorológicos, y el sistema Datalog Washfax III, que es un sistema digital de alta velocidad instalado a un número restringido de abonados en el área de Washington D. C. Este sistema opera a diez páginas por minuto, en papel normal.

#### REPRODUCCION DE FOTOGRAFIAS CON LASER

Esta técnica permite sacar copias en positivo o en negativo de una fotografía, negativo o diapositiva, imprimiendo la copia sobre papel o sobre película. Las copias sobre papel se revelan automáticamente en la propia máquina, sin necesidad de pasar por el cuarto oscuro, instalar conducciones de fontanería, ni utilizar los líquidos reveladores. Por ello, estas máquinas pueden ser instaladas en la sala de composición de sus principales usuarios, los periódicos, o en los departamentos de publicidad. Las copias sobre películas se hacen en rollos o cassettes especiales, que luego se revelan por procedimientos convencionales.

Las copias son obtenidas mediante un barrido secuencial del original, con resoluciones del orden de 100 líneas, reticuladas con distintos formatos, pudiéndose obtener ampliaciones y reducciones con bastante versatilidad. Los láseres utilizados son, por lo general, de HeNe, con potencias del orden de 5 mW.

Existen versiones que son compatibles con ordenador al estar la información codificada digitalmente, permitiendo así el almacenamiento de la información gráfica en un ordena-

dor, o bien su transmisión a un terminal remoto, por cualquier medio de transmisión. En algunos sistemas, incluso se compatibiliza el almacenamiento, el proceso y la transmisión de imágenes y de textos escritos, lo cual posibilita un tratamiento completamente automático de este tipo de informaciones.

Los principales usuarios de estos sistemas son los periódicos y revistas y la industria gráfica en general, en donde puede hacerse una importante reducción de costes con el consiguiente aumento de la productividad.

#### COMPOSICION DE TEXTOS

Un sistema completo de composición de textos consiste en un sistema de reproducción de fotografías, intensificador de imagen, mezclador de imagen y textos, paginación, y todo lo necesario para producir la página de un periódico.

Aunque en la actualidad los sistemas de fotocomposición con láser están en desarrollo, éstos tienen grandes ventajas sobre otros métodos, porque el sistema con láser puede acomodarse a todas las clases de métodos de impresión, por su gran versatilidad. Por ello, en un futuro próximo pueden sustituir a las unidades de fotocomposición con salida por pantalla de vídeo.

## APLICACIONES DEL LASER EN TELECOMUNICACIONES

Las comunicaciones utilizando la luz como portadora de la información datan de la antigüedad. Sirvan de ejemplos las comunicaciones mediante señales de humo durante el día, o mediante hogueras durante la noche, la utilización de espejos en combinación con la luz del sol, los modernos heliógrafos, etc. El mismo Bell inventó un teléfono óptico basado en la modulación de un haz de luz por la reflexión de una membrana vibrante.

La utilización de la luz como portadora de la información no ha alcanzado un grado de aplicación importante, hasta que no se ha dispuesto de fuentes de luz lo suficientemente buenas como para permitir la transmisión, a larga distancia, de grandes cantidades de información, a un precio y con una seguridad razonables.

La fuente de luz que ha hecho esto posible es el láser. En este apartado, se consideran aplicaciones del láser en comunicaciones aquellas en las que la energía luminosa emitida es la portadora de la información que se transmite. Por tanto, quedan excluidos aquellos sistemas en los que, aun utilizando algún láser entre sus componentes para leer o grabar in-

formación, la transmisión se hace por medios no ópticos (radio, cables de cobre, etc.), como por ejemplo los facsimiles y las teleimpresoras con láser.

En cuanto al medio de transmisión, las aplicaciones del láser en comunicaciones pueden clasificarse en comunicaciones por guías de onda ópticas o fibras ópticas, comunicaciones atmosféricas o por espacio libre, y comunicaciones submarinas. De estos tres grupos, las comunicaciones por fibras ópticas destacan enormemente sobre las otras dos, y también en muchos casos sobre otros sistemas de comunicaciones más convencionales, por sus grandes ventajas técnicas y económicas, de las que se ha dicho que representan una nueva revolución de las telecomunicaciones.

### COMUNICACIONES POR FIBRA OPTICA

Los dos grandes grupos de sistemas de transmisión existentes en la actualidad son las comunicaciones por ondas que se propagan por el espacio, y las comunicaciones por ondas o señales eléctricas guiadas median-

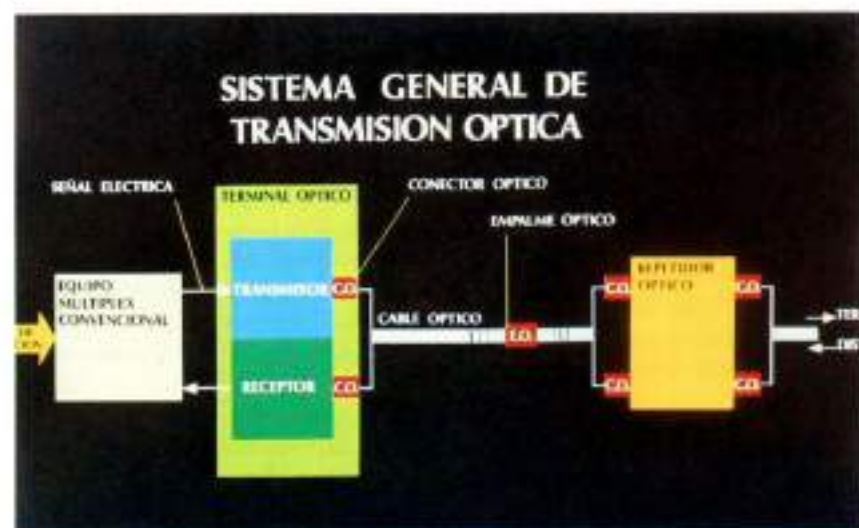


Figura 27. Diagrama de un sistema genérico de comunicaciones por fibra óptica.

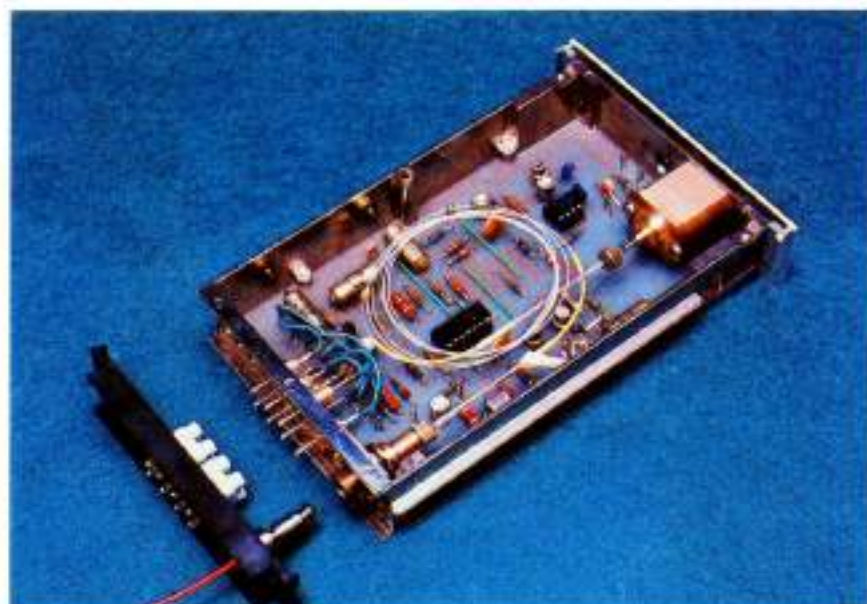


Figura 28. Transmisor óptico.

te guías de ondas o cables. Las comunicaciones por fibra óptica caen dentro del segundo grupo, puesto que se basan en la transmisión de ondas luminosas, utilizando como medio físico de propagación una guía de onda óptica, o fibra óptica, que es capaz de propagar la luz con una gran eficacia a grandes distancias.

La idea básica de la fibra óptica como medio de transmisión pertenece a los científicos K.K. Kao y G.A. Hockham en su artículo "Dielectric Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies" (1966). La tecnología de entonces no permitía la transmisión a distancias mayores de algunas decenas de centímetros. Desde entonces, la tecnología se ha ido perfeccionando hasta el punto en que ya se ha superado la fase inicial de experimentación con la instalación de sistemas de transmisión de largo alcance y gran capacidad de información en muchos países, entre ellos España.

#### Configuración de un sistema genérico

En la actualidad, casi la totalidad de los sistemas de transmisión, utilizan

señales eléctricas para codificar y transmitir la información de sonido, imagen o datos en general. Un sistema para transmitir información por fibra óptica (Figura 27) necesita un transmisor óptico (Figura 28) que convierta las señales eléctricas que contienen la información, en señales luminosas capaces de propagarse por la fibra hasta el extremo receptor en el que se realiza la función inversa. Como es habitual en los sistemas convencionales, si la distancia a cubrir por un sistema óptico es mayor que la que permiten sus características, se colocan repetidores ópticos, que son regeneradores de la señal óptica. Estos repetidores, actualmente, regeneran la señal luminosa convirtiéndola previamente en señal eléctrica, que una vez amplificada, modula a un nuevo transmisor óptico. Para el mejor aprovechamiento del medio de transmisión, es prácticamente habitual la utilización de equipos *multiplex*, cuya misión es la de combinar muchas informaciones distintas a su entrada, en una señal única de características especiales, que contiene simultáneamente todas estas informaciones. También realiza la función inversa en la dirección de recepción.



En el caso de los modernos sistemas digitales, en Europa están normalizados sistemas de 2, 8, 34, 140, 565 y 1.200 Megabit/s (millones de impulsos por segundo), que corresponden con 30, 120, 480, 1.920, 7.680 y 15.360 canales telefónicos simultáneos en la misma señal, o sus equivalentes en otras informaciones (televisión, etc.).

Existen también sistemas llamados analógicos, que son más convencionales y que combinan las señales a base de modular portadoras de distintas frecuencias con cada información.

A continuación se ofrece una breve descripción de los principales componentes de un sistema de transmisión por fibra óptica, poniendo un mayor énfasis en las fuentes de luz.

#### La fibra óptica

El componente principal de estos sistemas es, obviamente, la fibra óptica. Están formadas de material transparente, generalmente de vidrio o sílice y, en algunos casos, de material plástico. Su estructura más sencilla es la de un hilo o fibra de vidrio del

diámetro de un cabello humano, formado por un núcleo o alma, rodeado de una envoltura con un índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo (Figura 29). La luz es inyectada por uno de sus extremos al núcleo de la fibra con un láser de semiconductor y es propagada por éste gracias al rebote o reflexión sucesivo de los distintos rayos en la superficie de separación entre núcleo y envoltura. Esto ocurre debido a la ley física de la reflexión total entre dos medios de distinto índice de refracción, cuando el ángulo de incidencia de los rayos de luz es mayor que el llamado ángulo límite (o menor respecto al eje).

El seno del ángulo máximo respecto al eje, que puede propagarse por la fibra (ángulo límite), define la llamada apertura numérica de la fibra. Todos los rayos contenidos dentro de la apertura numérica pueden, pues, ser aceptados y propagados por la fibra a grandes distancias.

Las pérdidas de transmisión de las fibras, o atenuación, es una relación entre la potencia después de recorrer la luz una cierta longitud de fibra, y la potencia antes de recorrer dicha lon-



Figura 29. Fundamento de la fibra óptica.

gitud. Se mide en decibelios dB/km ( $\text{dB} = 10 \log (\text{Pot. de salida}/\text{Pot. de entrada})$ ). Tal es la pureza de los vidrios utilizados que se han conseguido fibras que, en la propagación, pierden menos del 2% de la energía, en 1 km de longitud. Como ejemplo ilustrativo, si el agua del océano tuviese unas pérdidas parecidas a la transmisión de la luz se podría ver desde la superficie el fondo de la fosa más profunda. Estos pequeños valores de pérdidas permiten alcanzar grandes distancias de transmisión.

El otro parámetro importante de este nuevo medio de transmisión está relacionado con la cantidad de información que cada fibra es capaz de transmitir. Se denomina dispersión y es una medida de la deformación de los impulsos de luz al propagarse por la fibra, debido al distinto retardo de los rayos, que según su ángulo de incidencia recorren mayor o menor camino óptico. La dispersión depende de las características de la fibra y de la fuente de luz utilizada.

Existen fibras llamadas multimodo de índice constante, que tienen un valor alto de dispersión, y que sólo se utilizan en sistemas de baja capacidad. Las fibras multimodo de índice gradual tienen un bajo valor de dispersión y pueden utilizarse hasta en sistemas de mediana a alta capacidad (140 Mbits/s). Las fibras monomodo están especialmente diseñadas para minimizar, e incluso anular, la dispersión y son adecuadas para sistemas de muy alta capacidad (a partir de 140 Mbit/s.).

### El cable óptico

La fibra óptica, como se ha dicho, es un hilo de vidrio con un diámetro de una décima y cuarto de milímetro. Por lo tanto, para su utilización en sistemas de transmisión, es necesaria su protección mecánica mediante la formación de cables de fibras ópticas.

La fibra de vidrio se cubre de una primera capa de plástico flexible (silico-

na) y luego de un material plástico como nylon, dándole un diámetro total del orden de 1 mm, para hacer las fibras más manejables. Con estas fibras ya protegidas, se forman cables, añadiendo elementos de refuerzo mecánico y distintas cubiertas de material plástico. Con ello se consiguen estructuras de unas 6 u 8 fibras, con unos 8 mm de diámetro, de una gran flexibilidad y resistencia mecánica del orden de centenares de kilos. Se han fabricado incluso cables que llegan hasta varios centenares de fibras.

### Las fuentes de luz

Las fuentes de luz utilizadas en los sistemas de transmisión por fibra óptica son otro de los componentes básicos, debiendo cumplir una serie de requisitos que permitan la utilización eficaz de las propiedades de la fibra. Los láseres de semiconductor cumplen todos estos requisitos, que, a grandes rasgos, son los siguientes:

- a) *Longitud de onda adecuada.* No todas las longitudes de onda se propagan por las fibras con la misma eficacia. En general, las pérdidas disminuyen al aumentar la longitud de onda, existiendo algunas irregularidades debido a la absorción de las impurezas del vidrio. Esto da lugar a "ventanas" o mínimos relativos de pérdidas, principalmente a 850, 1.300 y 1.500 nm de longitud de onda, denominadas primera, segunda y tercera ventanas respectivamente. En la actualidad puede alcanzarse una distancia entre repetidores de 10 a 15 km en la primera ventana, de 20 a 50 km en la segunda y de hasta 100 km en la tercera (Tabla 9), pudiéndose, en un futuro, aumentar considerablemente estas distancias de repetición. A título comparativo, los sistemas de transmisión convencionales alcanzan distancias de repetición entre 1 y 5 km de promedio (dependiendo del tipo de sistema).

Velocidad de transmisión (Mbit/s)		2	8	34	140	565	1.200
N.º de canales telefónicos		30	120	480	1.920	7.680	15.360
Cable Convencional	paros FV	1,5-4,5	—	—	—	—	—
	coax. 2,9 mm	—	4	2	—	—	—
	coax. 4,4 mm	—	8	4	2	1	—
	coax. 9,5 mm	—	—	9	4,5	2	1,5
Fibra óptica ( $\lambda = 850$ nm)	Multimodo	15	14	12	10	—	—
	Monomodo	—	—	—	—	7	5
Fibra óptica ( $\lambda = 1.300$ nm)	Multimodo	50	47	39	20	—	—
	Monomodo	—	—	50	38	27	21

Tabla 9. Distancia de repetición de sistemas de transmisión convencionales y de fibra óptica.

b) *Coherencia.* Esta es una característica fundamental en los sistemas de alta capacidad y en los futuros sistemas con detección coherente. El principal factor que limita la capacidad de información de un sistema de fibra óptica es la dispersión, o deformación de los impulsos de luz en la fibra, que, como se ha dicho, depende en parte de la estructura de la propia fibra y de la coherencia de la luz que se propaga por ella.

Es decir, que cuanto más pureza espectral tenga la luz, menos se deforman los impulsos al propagarse, y, por lo tanto más capacidad tendrá una fibra óptica determinada, sobre todo en los sistemas de muy alta capacidad utilizando fibras monomodo. Estas permiten la transmisión simultánea de decenas de miles de conversaciones por la misma fibra. En cuanto a los sistemas con detección coherente, es fundamental una gran coherencia en la fuente de luz, tanto en el transmisor como en el láser utilizado en el receptor coherente, para mezclar su luz con la luz recibida. Esta tecnología puede decirse que aún está a nivel experimental.

c) *Tamaño, directividad y potencia.* Tanto el tamaño de la fuente de luz, como su diagrama de radiación deben ser compatibles con

las dimensiones y características de la fibra, con objeto de conseguir una máxima eficiencia en el acoplamiento de la energía. El núcleo de la fibra tiene un diámetro de  $50 \mu\text{m}$  a  $4 \mu\text{m}$  (dependiendo del tipo de fibra). Los láseres de semiconductor tienen unas superficies radiantes de unas  $2 \times 10 \mu\text{m}$  en término medio y emiten la luz bastante concentrada en su eje. Las eficiencias de acoplamiento obtenidas oscilan entre el 10 y el 90%, dependiendo del tipo de láser, del tipo de fibra y de la técnica de acoplamiento utilizada. La potencia de los láseres de semiconductor utilizados en comunicaciones por fibra óptica, son del orden de 10 mW. Una vez modulado, la potencia media que puede acoplarse al núcleo de la fibra es del orden de 1 mW.

d) *Facilidad de modulación.* Para poder transmitir información por un rayo de luz es necesario modularlo, es decir, hacer variar, al ritmo de la información, alguno de los parámetros de dicho rayo de luz. La forma más sencilla de modular un rayo es variando su intensidad.

En un láser de semiconductor resulta muy sencilla la modulación de intensidad, ya que para ello basta con variar la intensidad de la corriente de excitación del mis-

mo, electrónicamente. Se ha dicho con anterioridad que la cantidad de información contenida en una señal, depende de su frecuencia de variación. Por ejemplo, en un sistema de 140 Mbit/s, que transmite la información de 1.920 conversaciones telefónicas simultáneas, hay que modular el láser (o encenderlo y apagarlo) a un tirno de 140 millones de impulsos cada segundo, lo que significa que cada impulso de luz duraría un máximo de 7 milmillonésimas de segundo. Para ello es necesario que el láser tarde al menos una milmillonésima de segundo en cambiar de estado (luz a no luz y viceversa).

Esto sólo puede lograrse con la combinación de circuitos electrónicos superrápidos y láseres de semiconductor de muy buenas características.

- e) *Fiabilidad.* Los grandes sistemas de telecomunicaciones están diseñados para una vida superior a 15 años, por lo tanto los componentes utilizados en ellos han de cumplir con esta exigencia. Un inconveniente de los láseres de semiconductor ha sido su relativa corta vida, ya que se han venido manejando cifras de 1 a 2 años de vida. Hoy día, puede afirmarse que, en las condiciones reales de funcionamiento de un sistema, pueden conseguirse cifras de esperanza de vida perfectamente aceptables para un sistema de telecomunicación.

Teniendo en cuenta todos estos requisitos que han de cumplir las fuentes luminosas de los transmisores ópticos, se deduce que el componente ideal es el diodo láser de semiconductor, que además tiene la ventaja de un bajo coste potencial, cuando se realice la producción a gran escala.

En sistemas no tan exigentes, puede utilizarse un componente más económico que el láser, aunque de peores características. Este componente es el diodo electroluminiscente o

LED, con el que se consigue unas 50 veces menos potencia en la fibra. Además, al no ser una fuente coherente, no es válida para sistemas de alta capacidad, ya que daría un alto componente de dispersión.

### Los fotodetectores

Los fotodetectores realizan, en el extremo receptor, la función inversa que las fuentes de luz en el extremo transmisor. La luz, a lo largo de su propagación por la fibra, se va degradando, debido a las pérdidas. Por lo tanto, al final de un enlace, el nivel de potencia luminosa puede ser muy pequeño. Es, por tanto, necesario un elemento muy sensible para volver a realizar la conversión óptico-eléctrica con suficiente calidad. Existen dos tipos principales de fotodetectores: PIN y de avalancha.

En los fotodetectores PIN, cada fotón o elemento de luz incidente en el dispositivo se convierte aproximadamente en un electrón que da lugar a la fotocorriente (en la práctica el factor de conversión es de 0,6 a 0,8). Esta corriente se amplifica y regenera para recuperar la información original.

En los receptores de avalancha, se produce un fenómeno de amplificación dentro del mismo dispositivo, de forma que cada fotón incidente genera muchos electrones (del orden de 100) y, por lo tanto, su sensibilidad de conversión es mayor (unas 30 veces) que en el PIN (15 dB).

Las sensibilidades que se consiguen en los sistemas de detección actuales son del orden de la milmillonésima de watio, lo que significa tan sólo la detección de algunos centenares de fotones por cada impulso de información. Con los sistemas de detección coherentes, se esperan sensibilidades bastante mayores, cercanas al límite cuántico.

### Las técnicas de acoplamiento

Las técnicas y los componentes de acoplamiento están encaminados a

conseguir la máxima eficiencia del acoplamiento de la luz entre emisor y fibra, entre dos fibras o entre fibra y detector. A continuación se mencionan brevemente los más significativos:

- a) *Empalmes de fibras.* Consiste en unir permanentemente dos fibras con la máxima eficiencia posible y al menor coste. La técnica más extendida en la actualidad es la soldadura de las fibras por fusión de las caras, con lo cual se consigue una eficiencia de acoplamiento del orden del 98%.
- b) *Conectores de fibras.* Son componentes que permiten conectar o desconectar voluntariamente dos fibras. Para lograr una alta eficiencia es necesaria una alta precisión mecánica o la utilización de técnicas microópticas. La eficiencia que se logra oscila entre un 80 y un 90%.
- c) *Acoplamiento fuente-fibra-detector.* De estos, el más crítico es el acoplamiento fuente-fibra. La forma más sencilla es el centrado de la cara de la fibra, con corte plano, al láser, con lo que se consigue una eficiencia del 25%. Con la formación de microlentes especiales puede conseguirse una eficiencia del 80 al 90%. En el caso del acoplamiento fibra-detector, suele utilizarse un simple acoplamiento por aproximación, con eficiencias del 80 al 90%. Es bastante frecuente que estos componentes estén en el mercado con un tallo de fibra óptica integrado ya en el mismo.
- d) *Otros componentes de acoplamiento.* Existen otros componentes de acoplamiento como, por ejemplo, los acopladores en estrellas, que sirven para derivar una fibra en varias ramas (sistema en estrella); los derivadores, para derivar parte de la señal luminosa; los acopladores direccionales; los multiplexores de longitud de onda, para mezclar o separar varias longitudes de onda; los conmutadores ópticos, etc.

## La óptica integrada

Es ésta una nueva tecnología que, sobre todo para la fibra monomodo, tiene un gran porvenir. Esta técnica permite integrar sobre un mismo sustrato diversos componentes ópticos y electroópticos para realizar ciertas funciones. Por ejemplo, puede integrarse un multiplexor de longitudes de onda, un acoplador direccional, conmutadores, regeneradores ópticos, etc.

## Características de los sistemas de transmisión por fibra óptica

La gran aceptación de los sistemas de transmisión por fibra óptica es debida a sus considerables ventajas frente a otros medios más convencionales. Todas estas ventajas se derivan de las características del material de que están construidas las fibras (vidrio) y de la propia naturaleza de la luz. Una de las características más importante, es su gran capacidad de transmitir información que puede llegar a ser de varias decenas de miles de canales telefónicos por fibra, ya que la frecuencia portadora de dicha información, la luz, es elevadísima: varios centenares de billones de ciclos por segundo.

Las bajas pérdidas de transmisión de las fibras permiten alcanzar, en la actualidad, decenas y, en un futuro próximo centenas de kilómetros sin necesidad de repetidores. La disminución del número de repetidores, e incluso su eliminación, en algunos casos, permiten una gran simplificación de los sistemas.

Debido a la naturaleza de la luz, las señales que se transmiten por fibra óptica, son inmunes a todo tipo de radiaciones electromagnéticas, perturbaciones de tipo eléctrico, etc., lo que hace que este medio sea de una gran calidad. Al ser el material de la fibra completamente aislante, es inmune, por ejemplo, a la caída de rayos en sus proximidades, no puede producir chispas por cortocircuito, e incluso se podría colgar física-

mente en una línea de alta tensión, sin el menor riesgo para las personas y los equipos en los terminales. Asimismo, estos cables pueden atravesar áreas de atmósfera explosiva sin riesgo de incendio, por ejemplo, en plantas petroquímicas.

Debido a la ausencia de corrientes eléctricas por la fibra resulta prácticamente imposible interceptar o interferir la información que circula por ella, así como su localización mediante detectores de campo magnético o de metales, lo que hace de éste un medio de transmisión de alta seguridad.

El pequeñísimo tamaño de las fibras, y como consecuencia el de los cables ópticos, simplifica considerablemente su instalación, pudiéndose reducir drásticamente la obra civil necesaria en las redes telefónicas. Su bajo pe-

so (de 10 a 50 kg/km para un cable de 6 a 10 fibras) permite una drástica reducción de peso en los vehículos (aviones, barcos, etc.), y, al mismo tiempo un aumento de su seguridad.

El vidrio es menos sensible a los agentes externos que el cobre, por lo que puede utilizarse en entornos con condiciones más adversas de temperatura, humedad, radiaciones, etc., sin variar apreciablemente sus características.

Por último, la materia prima con que se fabrica la fibra es potencialmente muy barata, sobre todo comparada con el cobre, cada vez más escaso y caro. Obviamente, son las razones económicas, aparte de las ventajas técnicas, las que harán que los sistemas ópticos se implanten masivamente en un futuro no muy lejano.

## Aplicaciones de las fibras ópticas

### Redes Telefónicas

La aplicación más importante de la fibra óptica tiene lugar en las redes de telecomunicación, tanto en las comunicaciones telefónicas entre centrales urbanas de las grandes ciudades, como en los enlaces entre ciudades; los enlaces de gran capacidad y larga distancia, o arterias principales de comunicaciones; los enlaces submarinos intercontinentales, etc. En todos estos tipos de enlaces, las ventajas de las fibras son importantes, sobre todo su gran capacidad de información, su bajo coste por canal telefónico y su mayor facilidad de instalación, que hacen que estos sistemas sean más económicos a medida que aumenta su capacidad. En redes privadas de telecomunicaciones,

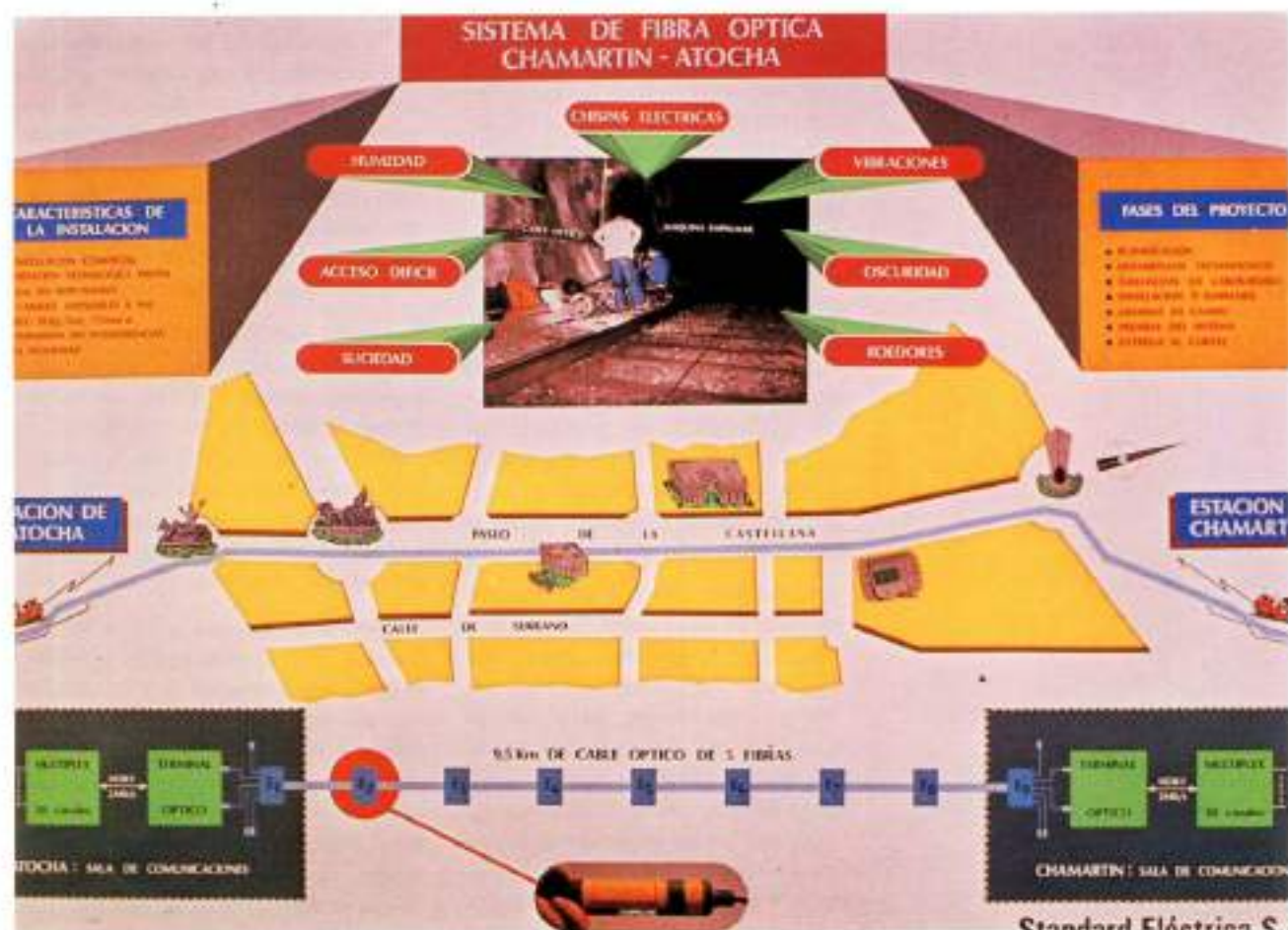


Figura 30. Primera instalación de fibra óptica en España. Sistema Chamartín-Atocha.

como, por ejemplo, en compañías eléctricas, ferrocarriles, etc., tienen gran interés los sistemas de pequeña y mediana capacidad, por sus grandes ventajas técnicas de inmunidad a perturbaciones eléctricas y su gran aislamiento. En muchos países, se han instalado sistemas experimentales que han pasado ya a cursar tráfico real. Sirva de ejemplo el sistema de 2 Mbit/s, instalado en 1980 entre las estaciones de Renfe de Chamartín y Atocha (Figura 30) y los sistemas de 34 y 140 Mbit/s que están siendo instalados por la CTNE en la actualidad.

En el futuro, la fibra óptica podrá llegar hasta la propia casa del usuario. Ya se han iniciado en diversos países experiencias en redes de abonados, llamadas de banda ancha, mediante fibra óptica, haciendo llegar a los abonados servicios tales como distribución de canales de televisión, videoteléfono, canales musicales de alta fidelidad, videotexto, transmisión de datos, aparte de los correspondientes canales telefónicos. Se pueden citar como ejemplo las experiencias en la ciudad de Biarritz y en Berlín (proyecto BIGFON). Desde el punto de vista del láser como componente, de tener éxito estas experiencias, ésta sería desde luego su mayor aplicación.

#### *Redes de distribución de televisión*

La fibra óptica es un buen candidato para las redes de distribución de televisión por cable, ya que puede resultar económica frente a los cables coaxiales, por tener mayor alcance, mayor capacidad de transmisión y menor coste de instalación.

En algunos países, como EE. UU., existen redes de distribución (CATV) por cable coaxial desde hace algún tiempo, en las que los abonados al servicio se conectan en ramales, compartiendo todos el mismo cable de distribución. Esta estructura de redes es la única económicamente posible con cable coaxial, aunque tiene el inconveniente de que el pago

de cuota no es proporcional a la utilización del servicio. La fibra óptica permite configurar económicamente redes estrelladas desde el centro de distribución o desde subcentros más próximos a los abonados. Las configuraciones de estas futuras redes de distribución de televisión por fibra están siendo pensadas para su futura integración con la red telefónica de abonado de banda ancha antes mencionada, que parece ser que es la configuración definitiva que se va a implantar hacia el final de esta década.

#### *Televisión en circuito cerrado*

La televisión en circuito cerrado, tanto en aplicaciones de distribución privada dentro de recintos, como en aplicaciones de supervisión, vigilancia y telecontrol, son aplicaciones idóneas para las fibras ópticas, debido a las características ya mencionadas.

Se han realizado experiencias de sistemas de vigilancia en ferrocarriles, subestaciones eléctricas y recintos militares. La distribución de televisión en circuito cerrado tiene también aplicaciones didácticas en colegios y Universidades, aplicaciones médicas en hospitales, vigilancia del tráfico, telerreuniones, etc.

#### *Centros de producción y distribución de televisión*

En los centros de producción de programas de televisión la fibra óptica ofrece una solución atractiva, debido a su pequeño tamaño y a su gran calidad de transmisión. Se han realizado experiencias en enlaces entre estudios y unidades móviles de televisión. También en los centros de distribución de programas, donde se manejan varias decenas de señales de televisión entre la torre de antenas y el centro de control de exteriores, puede ser utilizada la fibra óptica como solución, por sus importantes ventajas frente a los medios tradicionalmente utilizados.

#### *Interconexión de ordenadores*

La fibra óptica resulta un medio de transmisión para la interconexión de ordenadores, en sistemas multiprocesadores, o la conexión entre ordenadores y periféricos. Esta clase de enlaces suelen ser de distancias cortas, es decir, distancias entre decenas de metros y un máximo de 1 a 2 km. Hasta el momento, las fuentes luminosas utilizadas en estos sistemas, son diodos electroluminiscentes (LED), pero existe una cierta tendencia hacia la creciente utilización de diodos láser en el futuro, debido a la mayor velocidad de modulación y al mayor alcance de los sistemas. Los modernos sistemas procesadores manejan cada vez más volumen de información, y requieren medios de transmisión que admitan cada vez más cantidad de información con mayor velocidad y seguridad. Los grandes fabricantes de estas máquinas muestran un gran interés en la fibra óptica como medio de interconexión de altísima velocidad, utilizando láseres de alta fiabilidad como fuente de luz.

Por otra parte, las futuras redes de fibra óptica para abonados telefónicos permitirán integrar las redes de transmisión telefónica y de distribución de televisión, con la red de transmisión de datos, con posibilidades para esta última de manejar gran volumen de datos a alta velocidad en redes dedicadas o conmutadas.

#### *Telemando-telemedida y señalización*

La fibra óptica es una buena solución para la transmisión de señales de telemando y telemedida en entornos de fuertes perturbaciones eléctricas, como centrales y estaciones eléctricas, redes ferroviarias, o líneas de energía. También resulta medio de transmisión altamente seguro para atravesar zonas con riesgo de incendio, como refineries y petroquímicas en general. Como ejemplo, en España se pueden citar la experiencia realizada en 1980 en un embalse hidroeléctrico y la realizada recientemente

en junio de 1982, en la subestación eléctrica de 420 KV de Morata de Tajuña (Figura 31).

Igualmente, el láser es un componente fundamental en los sistemas con sensores ópticos, que consisten en la telemedida de magnitudes físicas (voltajes, presiones, niveles, flujos, etc.), con sensores de fibra óptica, por variación de algún parámetro óptico sensible a la radiación del láser.

#### *Tendencias de la tecnología de comunicaciones ópticas*

La llamada primera generación de sistemas de transmisión por fibra óptica está funcionando. Son los llamados sistemas de la primera ventana, algunos de los cuales llevan en funcionamiento cinco años.

Las tendencias tecnológicas apuntan hacia sistemas de capacidad cada vez más grandes, con fibras monomodo (de altísima capacidad) que requieren láseres monomodo muy especiales y de los cuales existen modelos en funcionamiento. Los sistemas terminales tienden a la digitalización e integración de sus circuitos electroópticos, existiendo algunas

experiencias de transmisores mololíticos y receptores ópticos integrados.

En cuanto a la longitud de onda, las tres primeras ventanas (850, 1.300 y 1.500 nm) perdurarán aún mucho tiempo, pues ya se ha comenzado a explorar materiales para construir fibras en la gama de 2 a 10  $\mu\text{m}$  de longitud de onda, que podrían tener pérdidas prácticamente nulas. Sería necesario en este caso el desarrollo de láseres de semiconductor en esta gama, lo que industrialmente, está lejos de conseguirse.

La tecnología de la fibra óptica no está más que comenzando. Hoy nadie duda de su masiva implantación futura en las redes de telecomunicación, llegando incluso hasta la propia casa del usuario y creando un canal con enorme capacidad de transmisión de información.

#### *Comunicaciones láser en el espacio libre*

Los primeros intentos de utilización de la luz láser para comunicaciones, tal como se entiende hoy en día, emplearon la atmósfera como medio de propagación de aquella, realizándose

se, hacia principios de los años 60, experiencias de este tipo. Pese a la existencia de láseres con longitudes de onda muy adecuadas para la propagación atmosférica, la fiabilidad de funcionamiento depende en gran manera de las condiciones atmosféricas, lo que resulta inaceptable para sistemas de telecomunicación permanentes. Más tarde, el descubrimiento de la fibra óptica hizo viable la transmisión con luz láser por ondas guiadas con una gran fiabilidad, como ya se ha descrito anteriormente.

Pese a sus limitaciones, las comunicaciones atmosféricas con láser aún conservan un campo de aplicación, por ejemplo en sistemas portátiles de transmisión, en aplicaciones militares, comunicaciones entre edificios no muy lejanos, comunicaciones espaciales en determinados casos, etc. Sirvan de ejemplo los sistemas telefónicos diseñados para cubrir unos 25 km de distancia en determinadas condiciones atmosféricas, y algunos sistemas de transmisión de señales de televisión para cubrir distancias del orden de un kilómetro.

El láser para comunicaciones puede ser utilizado también en el espacio libre, tanto para comunicaciones tierra-satélite, como para comunicaciones entre naves espaciales. Estas técnicas se han empleado en ciertas experiencias espaciales debido a su dificultad de interceptación, al contrario de lo que ocurre con las ondas de radio, aunque tienen el inconveniente antes mencionado de la sensibilidad a las condiciones atmosféricas.

Por último, puede utilizarse también el láser en comunicaciones submarinas, utilizando las ventanas de mínimas pérdidas de las aguas oceánicas (ver el apartado de las aplicaciones militares).



Figura 31. Vista parcial de la subestación de Morata, donde está instalado el sistema experimental TRACOF<sup>®</sup>



## APLICACIONES MEDICAS DEL LASER

Las nuevas técnicas quirúrgicas y de tratamiento de enfermedades con láser está llegando a ser una nueva especialidad de la medicina.

Las aplicaciones más atractivas de la cirugía con láser son aquellas en que las técnicas quirúrgicas convencionales no son satisfactorias por la dificultad de acceso a la zona afectada, por el traumatismo que pueden producir o por el tiempo que hay que emplear. Así, la técnica láser resulta idónea para la extirpación de tumores en ciertos puntos vitales del sistema nervioso central o del cerebro, en los que cualquier esfuerzo puede originar una parálisis irreversible. La oftalmología es quizás una de las primeras especialidades médicas en las que se utiliza el láser con bastante éxito en operaciones de desprendimiento de retina, fotocoagulación de lesiones periféricas en la retina, tratamiento de tumores, etc., de manera que algunas de estas técnicas han pasado ya a ser clásicas en los centros oftalmológicos. Las operaciones en órganos con muchos vasos sanguíneos en los que es difícil la sutura o la electrocoagulación, como por ejemplo, el bazo, requieren las técnicas de fotocoagulación por láser. También tienen interés estas técnicas en operaciones de pacientes con problemas de coagulación, donde las hemorragias podrían ser incontrolables con otros métodos. Algunos tumores o roturas en pequeños vasos sanguíneos son muy poco accesibles con técnicas quirúrgicas convencionales, como, por ejemplo, los pólipos en las cuerdas vocales, los tumores en la tráquea o los bronquios. Ciertas afecciones de la piel están formadas por una dilatación anormal de multitud de pequeños vasos, que no pueden extirparse individualmente. Con estas nuevas técnicas resulta sencilla su eliminación.

En realidad, la introducción de las nuevas técnicas quirúrgicas en la medicina no es sencilla, por el lógico carácter prudente de la profesión médica y porque el desarrollo e incluso la utilización de estos nuevos

instrumentos, tecnológicamente sofisticados, requieren una estrecha colaboración de la profesión médica con los científicos y técnicos y un constante entrenamiento de los profesionales.

### Tipos de láser utilizados

El primer láser que se empleó en medicina fue el de rubí en el tratamiento de ciertas lesiones de la piel. Más recientemente, se están utilizando láseres de argón, de dióxido de carbono y de Nd:YAG, fundamentalmente en función de la absorción por los distintos tejidos y fluidos del organismo según la longitud de onda (Figura 32).

El láser de argón basa su gran utilidad en el campo de la medicina en que su longitud de onda es absorbida por la hemoglobina de la sangre, y no por el agua, produciendo la ruptura de los glóbulos rojos, junto con otra cadena de fenómenos que causan la coagulación, cortándose así las pequeñas hemorragias y produciéndose la fotocoagulación en ciertos tejidos, como la retina. Su longitud de onda permite la transmisión del rayo por una fibra de silice de unas 300  $\mu\text{m}$  de diámetro, por lo que se puede tener acceso a lugares más difíciles sin producir grandes traumatismos. Un equipo con láser para estas aplicaciones se compone, además del láser y la fibra óptica, de un medidor de potencia, un mecanismo de ajuste de la misma, un rayo de referencia para localizar en forma precisa la zona irradiada y un temporizador para regular el tiempo de exposición, si se desea. Las potencias de salida son del orden de 1 a 5 W a la salida de la fibra, pudiendo llegar algunos más especiales hasta 25 W.

Los láseres de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emiten una radiación que es casi totalmente absorbida por el agua y, en cambio, poco absorbida por la hemoglobina de la sangre. Al estar el organismo compuesto por un 90% de agua, resulta fácil vaporizar y cortar tejidos con estos láseres. El alto nivel de absorción de energía

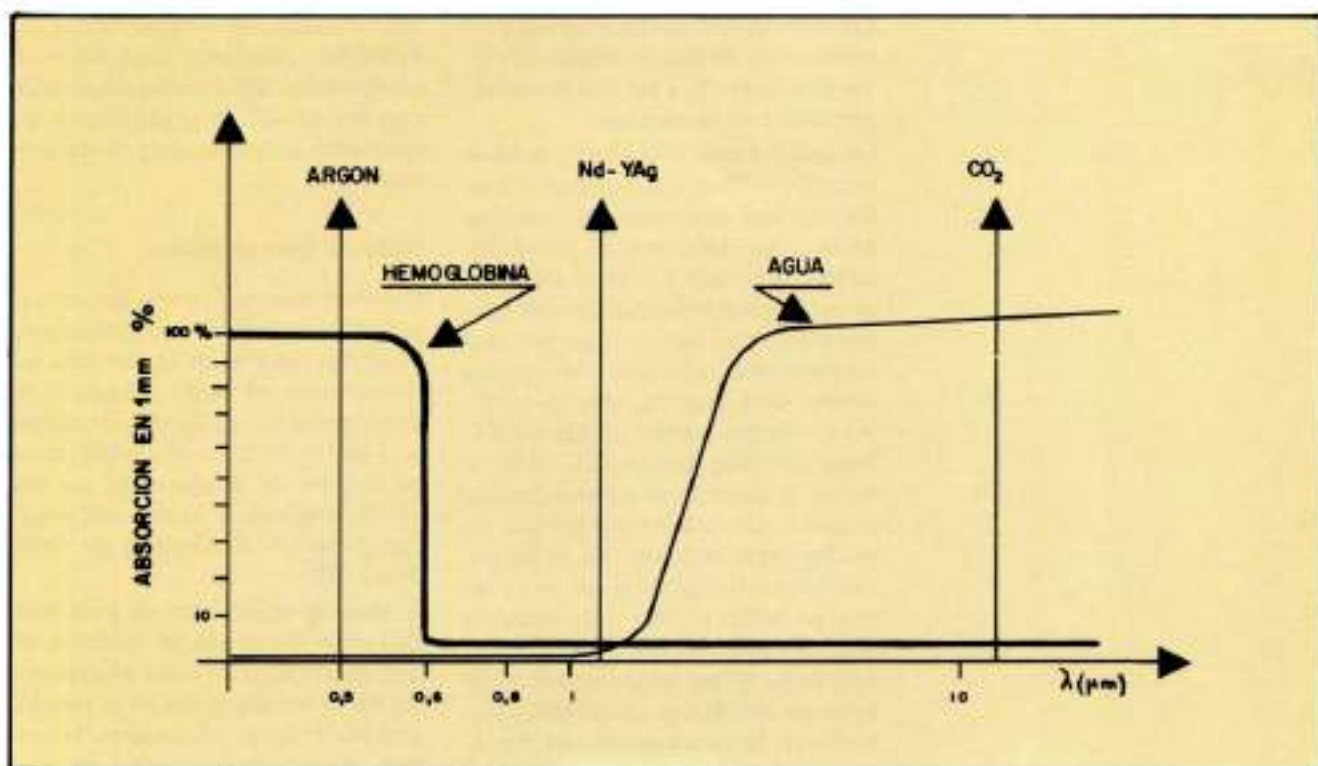


Figura 32. Absorción del agua y la hemoglobina a distintas longitudes de onda.

hace que sólo esté afectada la zona directamente irradiada, sin afectar a los tejidos circundantes. Esta propiedad permite hacer delicadas intervenciones de extirpación de tumores cerebrales.

Los niveles de potencias de estos equipos oscilan entre 1 y 80 W, dependiendo de la aplicación concreta. La radiación del láser de Nd:YAG no es absorbida excesivamente ni por el agua ni por la hemoglobina, lo que le permite atravesar coágulos de sangre para producir la coagulación de vasos sanguíneos más grandes. También es posible la transmisión por el agua, la orina en la vejiga, o los jugos gástricos del estómago. La radiación del láser Nd:YAG penetra del orden de 3 a 5 veces más que el láser de argón, quemando más tejidos en la zona irradiada y sus alrededores. Las potencias típicas que manejan estos láseres son de 35 a 90 W, que, al ser láseres de pulsos, implican irradiancias de 600 a 1.200 jul/cm<sup>2</sup>.

Una nueva área de investigación es la utilización de agentes que puedan intensificar la acción del láser sobre ciertos tejidos, lo cual permitirá tratar con más eficacia los órganos o tejidos enfermos, sin afectar a los circundantes.

La utilización de endoscopios con fibra óptica, transmitiendo la radiación láser, permite la realización de ciertas operaciones sin necesidad de incisiones ni anestesia, principalmente en el esófago, estómago, duodeno y el colon. Para los láseres de CO<sub>2</sub> aún no existen hoy en día fibras con una transmisión eficaz.

Los inconvenientes de los láseres para aplicaciones en medicina son su elevado coste (entre 3 y 20 millones de pesetas), su volumen, ya que ocupa un espacio considerable; la relativa poca movilidad; los problemas de mantenimiento; las instalaciones especiales eléctricas y de circuitos de refrigeración, etc. Pese a ello, la utilización del láser en medicina significa

un gran avance y una herramienta insustituible en muchos casos.

#### APLICACIONES EN OFTALMOLOGÍA

En el campo de la oftalmología, el láser se ha convertido en un instrumento insustituible, y hoy su utilización ha pasado a ser una técnica habitual, sobre todo para reparar las lesiones de retina, en la coagulación de los vasos sanguíneos que, al crecer, causan pérdida de visión en enfermos de retinopatía y ciertos tipos de glaucoma. También se utiliza en tratamientos e infecciones de la córnea, tumores del iris o glándulas, desprendimiento de retina, coagulación de pequeñas hemorragias, tratamiento de parásitos, etc.

Otra interesante aplicación del láser en oftalmología es la medida automática de defectos de refracción, como miopía, hipermetropía, astigmatismo, etc. Este instrumento proporciona información muy precisa sobre

estos defectos de los sistemas ópticos.

#### **APLICACIONES EN CIRUGIA GASTROINTESTINAL**

En la medida en que casi todo el aparato digestivo puede ser explorado con endoscopio, el láser puede ser aplicado (a través de una fibra óptica colocada en el mismo) a muchas partes de aquél.

En los casos de hemorragias en el esófago, provocadas por úlceras varicosas sangrantes, la hemorragia puede ser controlada por fotocoagulación mediante láser de Nd:YAG en un 90% de los casos. Este método no es curativo, pero permite un posterior tratamiento curativo sin la premura de la urgencia. La mortalidad en el control de la hemorragia por cirugía convencional puede oscilar entre el 20 y el 60%.

Actualmente se está aplicando la tecnología láser al tratamiento de úlceras sangrantes del estómago y del duodeno. En una estadística realizada con casi dos mil pacientes tratados con láser Nd:YAG, en el 90% de los casos se ha controlado perfectamente la hemorragia, habiéndose producido la perforación debido al tratamiento, en el 2% de los casos. En los casos tratados con láser de argón, se ha controlado el 70% de las hemorragias. Pese a los buenos resultados, estos estudios no demuestran diferencias significativas con las técnicas médicas convencionales, pero tienen la indudable ventaja del menor daño producido a partes sanas.

Las malformaciones arteriovenosas de los conductos gastrointestinales, tales como úlceras o venas varicosas, no causan hemorragias, pero sí una fatiga crónica y anemia.

Estos casos han sido tratados con éxito en dieciocho pacientes con malformaciones vasculares en el estómago y en el colon, utilizando un láser de Nd:YAG con una irradiancia de 200 a 300 julios/cm<sup>2</sup>.

También se han realizado experiencias en la extirpación de anomalías de la mucosa de los conductos gastrointestinales, que pueden convertirse a veces en malignas. Esta operación se realiza satisfactoriamente con láser de Nd:YAG.

Los pacientes con múltiples pólipos en el colon pueden tener entre 5 y 500 lesiones que, con el tiempo, pueden evolucionar hacia tumores malignos. Estas lesiones han sido tratadas utilizando una sonda con fibra óptica y un láser de argón con una irradiancia de 300 jul/cm<sup>2</sup>. Son conocidos algunos casos de extirpación de más de doscientos pólipos sin complicación alguna, y sin afectar a las capas musculares.

También se han tratado, en el Japón y en los EE. UU., casos de cáncer superficial de la mucosa del estómago, con láser de Nd:YAG, así como cánceres inoperables del esófago y del recto.

En algunos pacientes, el mal ha llegado a obstruir los conductos, y el tratamiento ha consistido, en estos casos, en perforar el tumor cuando está tan avanzado que no es posible su extirpación.

#### **APLICACIONES EN CIRUGIA PLASTICA Y DERMATOLOGIA**

Existen ciertas afecciones de la piel en la cara, cuello o tronco que son difíciles de eliminar por técnicas convencionales, resultando a veces ineficaces. En su lugar se ha empleado con bastante éxito un láser de argón, cuya radiación es absorbida por la hemoglobina de los vasos dilatados que causan el aspecto coloreado de estas lesiones. Se han empleado irradiancias de 20 a 40 julios/cm<sup>2</sup> a razón de 1 a 2 W con un área iluminada de 2 mm de diámetro durante 0,2 s. Con este tratamiento se puede eliminar la lesión en el 10% de los casos, y mejorarla considerablemente en el 75%.

La eliminación de tatuajes resulta muy eficaz utilizando láseres de ar-

gón o de CO<sub>2</sub>, con resultados similares. La radiación láser debe penetrar lo suficiente para vaporizar los pigmentos introducidos en la piel. También se ha utilizado láser de rubí, con buenos resultados.

#### **APLICACIONES EN OBSTETRICIA Y GINECOLOGIA**

Se están utilizando láseres de CO<sub>2</sub> para extirpar tumores premalignos y malignos de la vagina y del cuello del útero, tratando previamente la zona afectada con ciertas sustancias químicas y con tintes, para ayudar a identificar las células sanas de las enfermas y aumentar la eficiencia del tratamiento. El láser es acoplado con la ayuda de un culoscopio, microscopio especial que permite observar con detalle la zona afectada durante el proceso. Se han empleado técnicas similares para el tratamiento de cáncer de vulva o de piel en los genitales.

En el tratamiento de algunos casos de esterilidad causados por ciertas infecciones que originan malformación u obstrucción de la trompa de Falopio, puede utilizarse el láser de CO<sub>2</sub> con grandes posibilidades de éxito.

En el tratamiento de algunas anomalías, tales como la endometriosis, afección producida en los ovarios o en sus conductos, puede utilizarse el láser de CO<sub>2</sub> para eliminar los tejidos depositados en los órganos por esta afección. También se ha utilizado con éxito el láser de argón, cuya longitud de onda permite una más fácil transmisión por fibra óptica, realizándose el tratamiento a través de un endoscopio, sin necesidad de abrir la cavidad abdominal.

La menorragia, anomalía que se produce en algunas mujeres durante la menopausia, debido principalmente a un desequilibrio hormonal y que se manifiesta principalmente con secreciones mucosas y con hemorragias, ha sido tratada mediante láser Nd:YAG en 70 pacientes (a través de una

fibra en un histeroscopio), evitándose en todas ellas la necesidad de una intervención de extirpación más complicada.

En un plano más experimental se ha conseguido la amputación de extremidades en fetos de ovejas, introduciendo la fibra en el útero a través de la piel y enviando así el rayo de un láser de Nd:YAG. Una aplicación práctica de esta técnica podría servir para intervenciones en fetos a través del útero (por ejemplo, en la extirpación de tumores, etc.).

#### **APLICACIONES EN NEUROCIRUGIA**

En las intervenciones del cerebro y del sistema nervioso central, la precisión y la ausencia de esfuerzos sobre el órgano operado son fundamentales.

Se han realizado con éxito extirpaciones de tumores cerebrales por vaporización con un láser de CO<sub>2</sub> acoplado a un microscopio especial. Se ha utilizado un rayo de 2 mm de diámetro, con potencia de unos 60 W, con excelentes resultados.

Para mejorar la hidrocefalia, consistente en un ensanchamiento de las cavidades del cerebro, debido a la obstrucción de los capilares que conducen los fluidos de la espina dorsal, puede utilizarse un láser de argón para coagular el conducto capilar.

#### **APLICACIONES EN UROLOGIA**

El láser más empleado en urología es el de Nd:YAG a través de fibra óptica. Se ha utilizado este tipo de instrumento para evaporar tumores de vejiga, introduciendo la fibra a través de un ureteroscopio. El tratamiento con láser evita dañar los tejidos sanos circundantes y los traumatismos de una intervención quirúrgica convencional.

También se ha aplicado una técnica parecida para tratar ciertas afecciones del uréter.



#### **APLICACIONES EN TRAUMATOLOGIA**

En operaciones de columna, en las que el cirujano tiene que manipular cerca de la médula espinal, se necesita extraer eficazmente trozos de hueso y la sangre producida por la misma operación o por hemorragias provocadas por el traumatismo. Para ello se ha utilizado un dispositivo succionador con un láser de argón incorporado, que permite la extracción de residuos y la fotocoagulación

simultáneamente, facilitando al cirujano estas delicadas operaciones.

Una lesión muy frecuente, sobre todo en deportistas, es la fractura de menisco, o cartilagos de la rodilla. Se han realizado experiencias consistentes en sacar el líquido sinovial y sustituirlo por dióxido de carbono, para evitar que la radiación del láser de  $\text{CO}_2$  sea absorbida por el agua. El láser de  $\text{CO}_2$  es introducido en la articulación a través de un endoscopio y dirigido hacia el cartilago afectado,

lo que permite con gran precisión remodelar dicho cartilago. Cuando se disponga de fibras capaces de transmitir eficazmente la radiación del láser de  $\text{CO}_2$ , esta operación se simplificará considerablemente.

#### **APLICACIONES EN OTORRINOLARINGOLOGIA**

La anatomía del oído, nariz y garganta son muy aptas para distintos tipos de aplicaciones del láser, por ejemplo para la extirpación o vaporización de tumores en las cuerdas vocales, en los conductos nasales, en la garganta o en la tráquea, en donde la cirugía convencional resulta difícil por la complejidad del instrumental empleado. La aplicación del láser de  $\text{CO}_2$  en estos casos resulta muy eficaz, normalmente acompañada de la utilización de un microscopio especial para facilitar la visibilidad de la zona tratada.

Otra aplicación del láser de  $\text{CO}_2$  consiste en eliminar la obstrucción de la comunicación entre los conductos nasales y la garganta, cuando no se abren normalmente. Esta obstrucción suele ser relativamente gruesa y está formada por membranas, mucosas, hueso y epitelios. La radiación del láser de  $\text{CO}_2$  es aplicada con la ayuda de un microscopio especial, a través del conducto nasal. Se viene utilizando un láser de argón de 2 W, con irradiancias de 200 a 300 julios/ $\text{cm}^2$ , para fotocoagular membranas mucosas, reduciendo la posibilidad de hemorragias. Aunque esto no supone una curación definitiva, resulta mucho más eficaz para el alivio del paciente, que otras técnicas.

#### **APLICACIONES EN CIRUGIA GENERAL**

Hasta la fecha no se ha utilizado sistemáticamente el láser en cirugía general aunque se han publicado algunas experiencias como, por ejemplo, el control de las hemorragias del bazo. Este órgano tiene multitud de va-

sos sanguíneos, que pueden sangrar masivamente al romperse, por ejemplo, en traumatismos producidos por accidentes de automóvil. La práctica habitual en estos casos es extirpar el órgano, con los consiguientes problemas secundarios que esto ocasiona. Se ha empleado un láser de argón, combinado con la ligadura de vasos por sutura, ya que los vasos mayores no pueden ser controlados por fotocoagulación. Se han realizado también experiencias de vaporizar pequeños tumores en el hígado, ya que con las técnicas quirúrgicas normales se extirpa parte del órgano. Esta técnica no está aún consolidada para su uso habitual.

Se está investigando, aún en laboratorio, la posibilidad de utilizar un láser de Nd:YAG para volatizar tumores inoperables en los conductos biliares, especialmente en el interior del hígado.

#### **OTRAS APLICACIONES MEDICAS**

Existen otras muchas aplicaciones que están en fase de experimentación y cuyo uso aún no se ha generalizado. Por ejemplo, la holografía como método de diagnóstico combinado con los ultrasonidos para la obtención de imágenes tridimensionales de órganos internos.

La circulación de la sangre puede ser medida con un instrumento basado en láser.

La artritis está siendo tratada experimentalmente en ciertos hospitales americanos, con resultados prometedores hasta el momento.

En odontología, parece que el láser puede tener un gran interés. Ya hoy son utilizados para fundir los empastes metálicos y para hacer imágenes holográficas de las piezas dentales. Tiene un gran interés el área de la prevención, basada en aumentar la aportación de flúor con el aumento de temperatura. También pueden hacerse recubrimientos protectores superficiales para tapar las posibles

grietas de las piezas y prevenir así las caries.

Se ha desarrollado un catéter con láser, que introduce, por una fibra óptica, un rayo de láser. La fibra se introduce por los vasos sanguíneos para vaporizar las obstrucciones.

Para el tratamiento del cáncer, se ha experimentado en animales, comprobando que las células cancerosas absorben longitudes de onda diferentes que las células sanas, lo cual permitirá un ataque selectivo a las células malignas sin dañar las sanas.

Existen también aplicaciones consistentes en estimular ciertos centros nerviosos con láser, mediante técnicas parecidas a la acupuntura.

En microbiología se está experimentando con técnicas holográficas de identificación de microorganismos, así como en análisis clínicos.

#### **TENDENCIAS DE INVESTIGACION EN LA INSTRUMENTACION MEDICA CON LASER**

Las investigaciones tienden, por una parte, a la búsqueda de nuevas aplicaciones o nuevas tareas donde el láser pueda ser utilizado con ventajas sobre las técnicas convencionales. Por otra, se tiende a investigar la absorción de distintas células, tejidos u órganos a las distintas longitudes de onda, y el comportamiento de ciertas sustancias químicas de protección o de intensificación de la absorción, en partes u órganos concretos. Como consecuencia de esto, se tiende a la construcción de instrumentación con láseres de longitud de onda ajustable, que permitan seleccionar la longitud de onda y la potencia para cada utilización concreta. Un buen candidato para esta aplicación es el láser de tinte, aunque tiene el inconveniente de su limitada potencia. Probablemente puedan emplearse pequeños láseres ajustables de electrones libres, cuando éstos se desarrollen lo suficiente.

Otro campo importante de investigación es la construcción de fibras ópticas que propaguen, con pérdidas aceptables, la radiación del láser de CO<sub>2</sub>, y que sean de material no tóxico. Esto daría acceso a muchos puntos del organismo con esta longitud de onda que de otra forma sería absorbida por el agua.

Debido a la limitación de espacio de los quirófanos y a la cantidad de equipos existentes en ellos, es conveniente trabajar en la línea de reducción de volumen y peso de los equipos.

En los láseres que requieren refrigeración por agua, se está trabajando en la línea de sistemas que funcionan a temperatura ambiente refrigerados por aire, para evitar así complicadas instalaciones que, además, quitan movilidad al equipo.

Otra tendencia importante es la reducción de costes, para poder extender sus áreas de aplicación.

El aspecto operacional es también muy importante y se trabaja en la línea de obtener instrumentos versátiles para múltiples usos, que sean portátiles, con suficiente fiabilidad ante impactos y relativo mal trato y con mantenimiento mínimo.

## VIDEODISCOS CON LASER

El videodisco es una técnica de almacenamiento y reproducción de imágenes de vídeo, análogo a las conocidas cintas, pero con la particularidad de que los aparatos de videodisco no permiten, de momento, la grabación por parte del usuario, sino sólo la reproducción. Como contrapartida, ofrecen un menor coste potencial del disco frente a la cinta, un menor tiempo de acceso a una grabación o escena concreta, y una mayor calidad de imagen y de sonido.

Los reproductores de videodisco aparecieron en el mercado de consumo en el año 1980, tras un entusiástico empuje por parte de las empresas líderes de los EE. UU., Japón y Europa. Tras el primer año en el mercado, algunos estudios de mercado del año 1981 se muestran convencidos de que el futuro comercial del reproductor de videodisco con láser es mediocre, dándose como argumentos la fría acogida de los consumidores y las pocas ventajas de estos sistemas frente a sus principales com-

petidores, las cintas de vídeo y videodiscos basados en otros principios. Esta situación puede haber cambiado, ya que informaciones de los principales fabricantes de estos aparatos aseguran que durante el verano de 1982 se incrementaron espectacularmente las ventas de reproductores de videodiscos, dándose como segura la explosión de la demanda para antes del año 1984.

Los principios en los que se basan los videodiscos ópticos son análogos a los de las memorias ópticas de masas, aunque en el caso de los videodiscos existen diferentes sistemas de reproducción.

Un primer sistema llamado TED, ya obsoleto, utiliza un captador de vibraciones relativamente similar a los discos de sonido. En la actualidad, están compitiendo fundamentalmente dos sistemas, y un tercero que está en desarrollo. De los dos sistemas disponibles, uno es el llamado Laser Vision (LV) de Philips/MCA, que a su vez tiene dos varian-

Sistema	CAV "Láser Visión"	CLV "Láser Visión"	CED	VHD
Fabricante	Philips-MCA	Philips-MCA	RCA	JVC
Método de lectura	Óptica por reflexión	Óptica por reflexión	Capacitiva	Capacitiva
Velocidad constante	Angular (1.800 rpm)	Lineal (1.800-600 <sup>2</sup> rpm)	Angular (450 rpm)	Angular (900 rpm)
Material del disco	Plástico con recubrimiento metálico	Plástico con recubrimiento metálico	Plástico conductor (lubricado)	Plástico conductor
Tiempo de grabación	1/2 hora	1 hora	1 hora	1 hora
Parada de imagen	sí	no	sí	sí
Cámara lenta	sí	no	no	sí
Material del disco	Plástico con recubrimiento metálico	Plástico con recubrimiento metálico	Plástico conductor (lubricado)	Plástico conductor
Método de lectura	Reflexión láser	Reflexión láser	Capacitiva	Capacitiva
Velocidad (rpm)	1.800	1.800-600	450	900
Sonido	Stereo	Stereo	Stereo	Stereo
Localización Automática	sí	sí	sí	sí

Tabla 10. Características principales de los distintos sistemas videodisco.

tes: de velocidad angular del disco constante (CAV) y de velocidad lineal del surco constante (CLV). El otro sistema es el llamado de lectura capacitiva (CED), desarrollado por RCA. Existe un sistema similar, también de lectura capacitiva (VHD) que se está desarrollando en Japón por JVC. En la Tabla 10 aparecen las características principales de estos sistemas.

Estos sistemas son incompatibles, es decir, los discos de un sistema no pueden ser reproducidos en los demás. No obstante, los tres sistemas tienen mucho en común. En efecto, en todos ellos se utilizan discos giratorios de material plástico como soporte de la información, estando registrada la misma en la superficie del disco por cambios físicos en ésta. La lectura de la información se hace en cada sistema por distintos métodos para, finalmente, convertirla en señal compatible con un receptor de televisión, tanto en imagen como en sonido. Todos los discos tienen el surco

en espiral y los huecos microscópicos que contienen la información de imagen y de sonido están codificados variando su frecuencia en el surco. Los requisitos de calidad de los discos, tanto en los materiales utilizados, como su uniformidad, su planitud y estabilidad con el tiempo, son parecidos en los distintos sistemas, obteniendo una calidad similar en la imagen.

Todos los sistemas tienen discos con duración del orden de las dos horas, tiempo elegido estadísticamente en función de la duración razonable de películas y programas.

Si se compara la lectura óptica con láser con la lectura capacitiva en los discos, existe una mayor calidad en la primera, debido a su mayor complejidad y perfección técnica, pero a mayor precio que en la segunda.

El proceso de fabricación del videodisco (Figura 33) consiste en grabar la información de video y sonido, convenientemente codificadas, en

un disco patrón, normalmente de metal.

Aunque existen diversas técnicas, una forma eficaz de grabar el disco patrón es mediante un láser focalizado sobre la pista y modulado convenientemente con la señal procedente de un magnetoscopio. Con el disco patrón metálico, sirviendo de molde en una prensa, se fabrican en serie los discos de material plástico. Posteriormente, en el caso de videodisco para reproducción mediante láser, se recubre el disco plástico con una delgada capa metálica, uniéndose dos de ellos para formar uno de doble cara.

En el reproductor de videodisco con lectura por láser (Figura 34) se utiliza para lectura de la información de las pistas un rayo de láser de semiconductor enfocado hacia la pista, recogiendo la luz reflejada por la misma en un fotodetector. La señal reflejada, convertida en señal eléctrica, es tratada electrónicamente para ha-

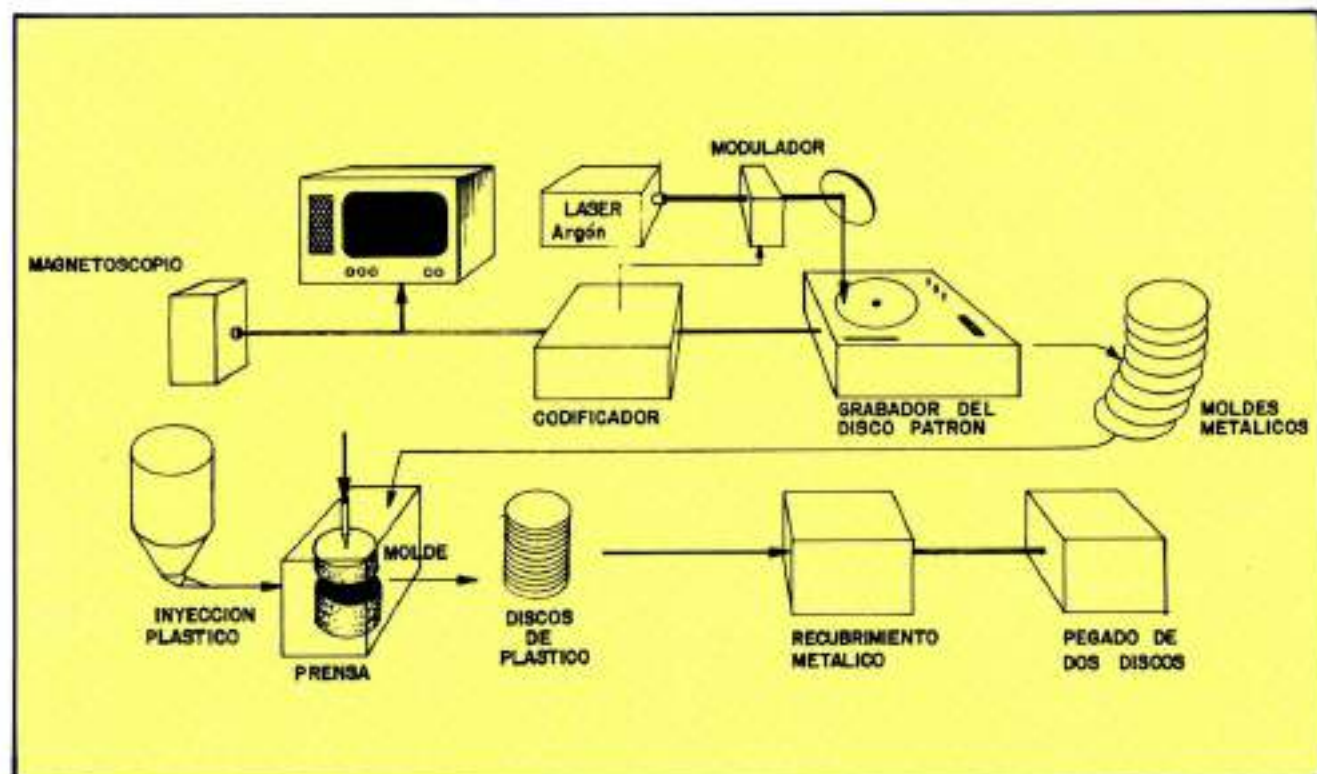


Figura 33. Proceso de fabricación de videodiscos.



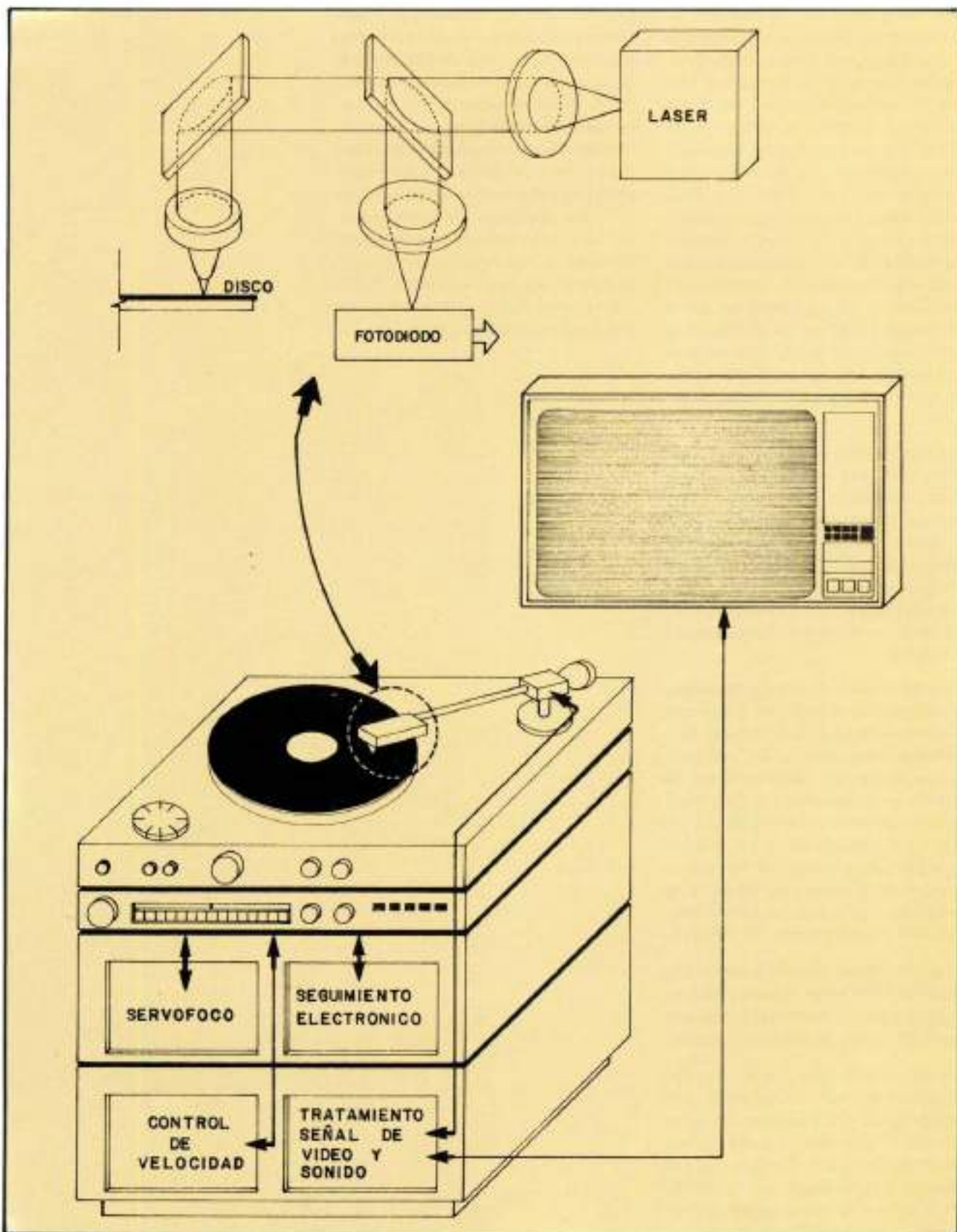


Figura 34. Reproductor de videodisco con láser.

cería compatible con un televisor. El sistema tiene diversos controles que son críticos para su buen funcionamiento, como son el control automático de velocidad de rotación, el seguimiento electrónico de la pista del disco y el servofoco para mantener permanentemente enfocado el láser sobre el surco del disco, con independencia de sus posibles irregularidades. En otros sistemas, el método de fabricación es relativamente parecido al descrito, y el de reproducción también, en líneas generales, salvo en el procedimiento de lectura de la información del surco, que se hace por variaciones de capacidad eléctrica entre el disco y la cabeza de lectura.

Las velocidades de rotación del disco más normales son de 450, 900 y 1.800 revoluciones por minuto, que corresponden a cuatro, dos y una imágenes por revolución, respectivamente. También puede seguirse la imagen en algunos sistemas mientras se localiza, o conseguir imagen estática, o movimiento lento, cuadro a cuadro.

Pese al actual entusiasmo detectado en USA por el videodisco, y que previsiblemente pasará a Europa, este sistema tiene importantes competidores, como son otros sistemas de grabación y reproducción; los sistemas de difusión de televisión por cable; la red de televisión vía satélite, que permite la recepción de programas de distintos países; las salas de exhibición de vídeo, las videoconferencias, y otros medios de difusión.

Si el videodisco tiene la acogida que muchos fabricantes esperan, esta industria será un importante mercado para los láseres de semiconductores.

Existen discos para grabar información en vídeo con alta densidad para aplicaciones profesionales. En estos discos, la información suele grabarse en forma digital, a frecuencias que pueden variar, según los casos, de 20 a 320 millones de pulsos por segundo, y que permiten grabar varios canales simultáneamente. En la ac-

tualidad, se han demostrado hasta nueve canales simultáneos grabados digitalmente al ritmo de 320 Mbits/s, correspondientes a 35,56 Mbits/s por canal. Estos vidediscos profesionales permiten una densidad de información mucho mayor que los videodiscos de gran público, admitiendo cada uno del orden de un máximo de  $10^{11}$  bits por disco. También permiten un acceso inmediato a cualquier parte de la información, dar imágenes estáticas, reproducción a distintas velocidades, movimientos inversos e incluso efectos especiales.

## MERCADO DEL LASER

Si bien la aparición del láser data de 1960, su utilización ha estado restringida durante bastante tiempo a las aplicaciones militares y científicas. Sólo en la segunda parte de la década de los 70 se ha iniciado lo que ahora puede calificarse como una explosión del campo de aplicación de este dispositivo.

En estos momentos existen más de 500 aplicaciones de los 40 ó 50 tipos de láser conocidos, lo que dificulta enormemente la tarea de evaluación del mercado global. Por otra parte, en muchas de esas aplicaciones es muy difícil separar el propio láser, a efectos de coste, del sistema o subsistema al que va incorporado. Si a esto se añade las lógicas dificultades para obtener información sobre las aplicaciones en el ámbito militar (que representan casi la mitad del mercado mundial), se comprenderá fácilmente la amplia dispersión de las cifras recogidas en los diversos estudios de mercado disponibles.

Las estimaciones que se indican a continuación recogen las más recientes tendencias observadas en la evolución de cada área de aplicaciones, así como de los costes unitarios de aquellos tipos de láseres cuya producción va alcanzando cantidades significativas.

El futuro de esta industria parece bastante prometedor en su conjunto, dado el auge de los principales campos de actividad en los que ha penetrado, si bien la segmentación de tipos y aplicaciones, junto con la sofisticada tecnología de fabricación de los propios láseres, dificulta la incorporación de nuevos fabricantes.

En la Tabla 11 están recogidas las estimaciones de mercado agrupadas en las distintas áreas de aplicación. Además de las cifras reales correspondientes a 1980 y 1981, se muestra la estimación para 1982 y una extrapolación a 1985, basada en la citada combinación de las expansiones previstas en cada área de aplicación, con la lógica disminución del coste en aquellos casos en que se llegue a producir masivamente determinados tipos de láser.

La tasa media de crecimiento anual del mercado global durante el período 1980-85 se espera que alcance un 20,3%, con una ligera caída hasta el 18% durante el quinquenio siguiente. Como puede verse en la tabla, el hito de los 1.000 millones de dólares se va a sobrepasar durante 1982, esperándose rebasar la barrera de los 2.000 millones en 1985.

En cuanto al peso específico de cada una de las áreas de aplicación, en la

	1980	1981	1982	1985
Defensa . . . . .	381	469	570	949
Energía . . . . .	133	164	198	313
Industria . . . . .	83	102	129	221
Ciencia . . . . .	73	89	103	143
Puntos de Venta . . . . .	32	39	51	114
Construcción . . . . .	32	39	45	67
Ordenadores . . . . .	23	29	38	84
Artes Gráficas . . . . .	14	18	22	54
Telecomunicaciones . . . . .	13	16	21	40
Medicina . . . . .	13	16	18	24
Ocio y otras . . . . .	1	1	2	3
<b>Total . . . . .</b>	<b>798</b>	<b>982</b>	<b>1.200</b>	<b>2.012</b>

Tabla 11. Mercado mundial de láser, según aplicaciones (M \$).

	1981	1985
	%	
Defensa .....	47,7	47,2
Energía .....	16,7	15,6
Industria .....	10,4	11,0
Ciencia .....	9,1	7,1
Puntos de Venta .....	4,0	5,7
Construcción .....	4,0	3,3
Ordenadores .....	3,0	4,2
Artes Gráficas .....	1,8	2,6
Telecomunicaciones .....	1,6	2,0
Medicina .....	1,6	1,2
Ocio .....	0,1	0,1
<b>Total .....</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Tabla 12. Estructura del Mercado, por aplicaciones.

Tabla 12 se puede apreciar la situación correspondiente a 1981 y las previsiones para 1985. Las aplicaciones militares representan casi un 48% del total del mercado y tienden a crecer a un ritmo ligeramente inferior a la tasa media global del quinquenio, esperándose un menor dinamismo (en términos económicos) para los años 1985-90, en que se implantarán sistemas de láser para direccionamiento de tiro en casi todos los tanques y aviones de los ejércitos más modernos del mundo.

El segundo rango corresponde al área de la energía (fusión, enriquecimiento de uranio, producción de agua pesada y otras aplicaciones), con un 16,7% del mercado total de 1981, pero con una tendencia menos creciente que la media del sector, por lo que disminuirá su importancia relativa. Ello se debe, sobre todo, a la caída de las expectativas anteriormente surgidas en torno a la fusión por láser, a cuyos proyectos de investigación se han destinado hasta ahora la mayor parte de las inversiones en láser de este área, y cuyo futuro aparece incierto desde la perspectiva de 1983.

En tercer lugar se encuentra el amplio campo de las aplicaciones industriales, con un 10,4% del total en 1981, y un crecimiento medio previsto de casi un 22% anual, si bien durante el segundo quinquenio de la

década se espera un crecimiento superior al 25% anual.

La instrumentación científica es el área de aplicación de láser más antigua, si bien su importancia cuantitativa está decreciendo, pues se trata de un mercado que aumenta a un ritmo ligeramente inferior al del conjunto. Esta tendencia será incluso más acusada hacia el final de la década.

Tras estos cuatro grandes segmentos, quedan una serie de aplicaciones muy variadas y espectaculares, pero cuyo volumen conjunto de mercado apenas rebasa el 16% del total. Destacan por sus elevados crecimientos las aplicaciones en artes gráficas, ordenadores y puntos de venta, cuyos respectivos mercados aumentan a razón de un 30% anual. El de telecomunicaciones también se muestra muy dinámico, con crecimientos en torno al 25% anual (Figura 35).

En cuanto a la distribución del mercado según los tipos de láseres, tal como se indica en la Figura 36, los de estado sólido cubren el 42% del mismo, mientras que los de CO<sub>2</sub> abarcan el 20%, y los de iones y HeNe/HeCd, el 16% y 15%, respectivamente.

#### APLICACIONES MILITARES

Hay fuertes discrepancias entre los analistas de mercados respecto a las cifras correspondientes a las diversas aplicaciones militares del láser, debido a la natural reserva con que se suelen tratar estos proyectos. Ateniéndose a los estudios más recientes, las principales áreas de aplicación, durante 1981, son las indicadas en la Tabla 13, donde puede apreciarse que el 93% del volumen total se destinó a las áreas de alta energía y armas guiadas por láser.

En el apartado de alta energía se incluyen las armas a base de láseres de suficiente potencia como para destruir aviones, misiles y satélites. El 65% de los fondos dedicados a es-

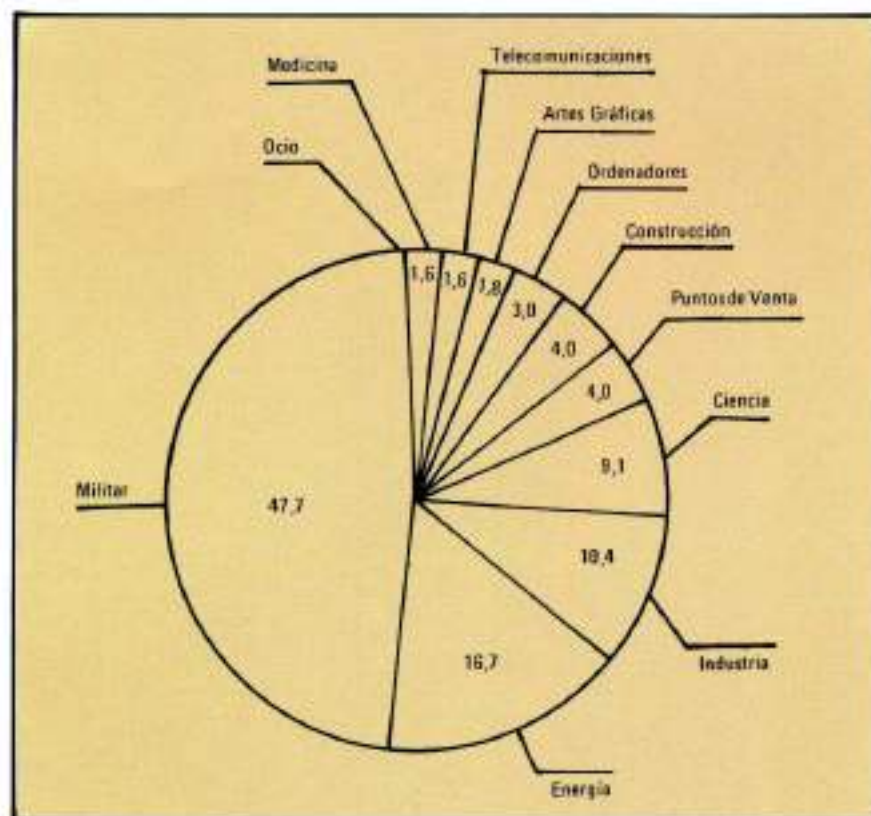


Figura 35. Estructura del mercado por aplicaciones (1981 - en %)

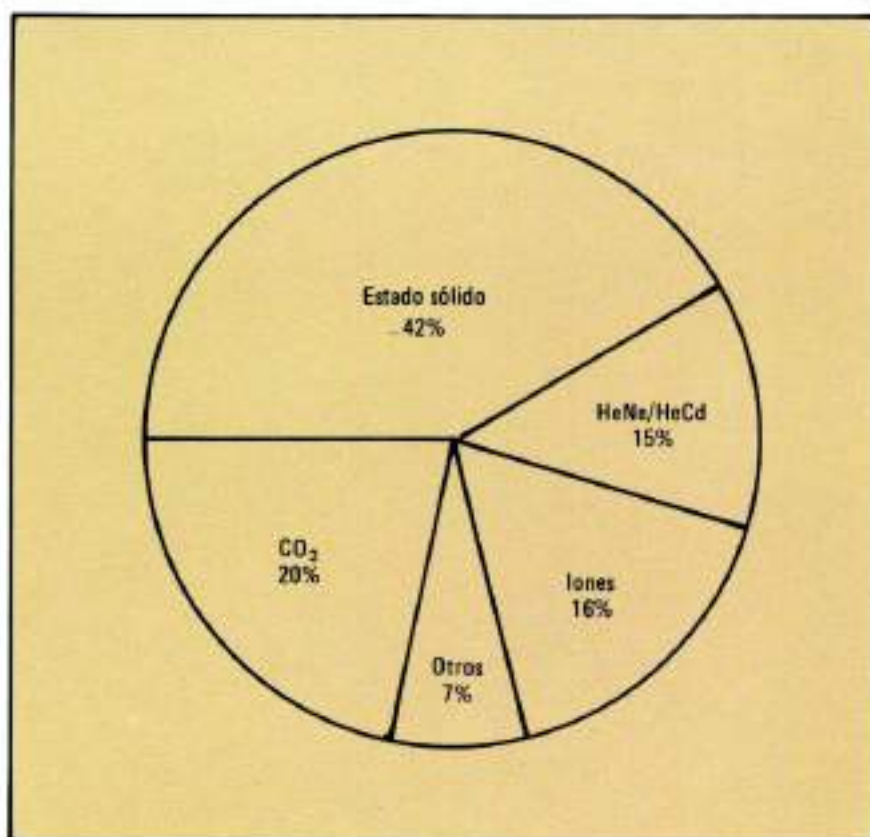


Figura 36. Reparto del mercado según los tipos de láser - 1980.



Aplicación	Mercado en 1981	Crecimiento 1981/80 (%)
Alta energía . . .	224	10
Armas guiadas por láser . . . .	211	13
Simuladores . . .	3	65
Comunicaciones especiales . . .	10	43
Giróscopos . . .	21	1
Total . . . .	469	34

Tabla 13. Mercado de aplicaciones militares (M \$).

te tipo de armas se destina a proyectos que tienen por finalidad el desarrollo y lanzamiento de satélites dotados con láseres de hasta 5 MW de potencia, capaces de emitir 1.000 impulsos con alcances máximos de 5.000 km. Cada impulso sería capaz de destruir un misil. Según los planes actuales, se espera disponer en 1985 de un sistema experimental, si bien se especula ya con la posibilidad de que este tipo de superarmas basadas en láser sean desbancadas por las que utilicen haces de partículas (protones, electrones, iones).

Mientras tanto, la Administración Reagan presta una gran atención al desarrollo de estas armas espaciales con láser, dedicando presupuestos del orden de los 180 M\$ (1982) anuales, con crecimientos superiores al 20% cada año, lo que llevará a superar los 770 M\$ durante 1990. Las relaciones con la Unión Soviética y la marcha de las conversaciones sobre desarme pueden hacer variar sensiblemente estas cifras.

Otro apartado de las aplicaciones militares de láseres de alta energía es el de las armas destinadas a ser utilizadas dentro de la atmósfera, contra aviones y misiles tácticos, que representan un 18% del mercado total de láseres aplicados al área militar (85 M\$, en 1981). No obstante, se prevé que el crecimiento de este segmento será más lento que el del apartado espacial, con tasas interanuales situadas en torno al 13%.

En cuanto al capítulo de localización y detección de objetivos, que repre-

sentó el 45% del mercado militar de láser en 1981, se trata de una serie de sistemas, operativos desde hace años, tales como: bombas guiadas por láser; detectores de blancos para aviones; localizadores de blancos para carros; misiles guiados por láser, y diversos localizadores y detectores de blancos portátiles. Las expectativas de este mercado son de crecimientos anuales superiores al 20%, pues se están incorporando estos dispositivos a los aviones y tanques de los principales ejércitos.

Concretamente, las empresas españolas ENOSA y Experiencias Industriales han firmado, a finales de 1982, un contrato para la realización de una dirección de tiro en el carro M-48. Se utilizará tecnología de Hughes Aircraft, a través de la licenciatura holandesa Oldelft.

Los principales fabricantes mundiales de armas basadas en láser son los norteamericanos Martin Marietta, Hughes Aircraft, Texas Instruments y Rockwell International.

Entre el resto de las aplicaciones militares de láser, aunque solamente representan el 7% de este mercado, merece la pena destacar los simuladores y juegos de guerra, y las comunicaciones espaciales.

Los primeros constan de un láser de pequeña potencia montado sobre el fusil de cada soldado que, a su vez, va provisto de células fotovoltaicas para registrar los "disparos" del contrario durante las maniobras. El Ejército de los EE. UU. tiene previsto realizar fuertes adquisiciones de estos dispositivos, que fabrica fundamentalmente la firma Xerox.

En cuanto a las comunicaciones, existen varios proyectos para la utilización combinada de satélites y láser, a fin de enlazar barcos y submarinos con sus respectivas bases.

## ENERGIA

Este área representó, en 1981, el 16,7% del mercado de aplicaciones

del láser, con un volumen de 164 M\$, si bien aparece con un crecimiento inferior al 20,3% obtenido por el conjunto del mercado.

Los grandes capítulos del área energética aparecen en la Tabla 14, refiriéndose las cifras a 1981.

Aplicación	Mercado en 1981	Crecimiento 1981/80 (%)
Fusión . . . . .	98	8
Enriquecimiento de uranio . . . . .	49	16,6
Otros . . . . .	17	42,5
Total . . . . .	164	18,5

Tabla 14. Mercado de aplicaciones para la producción de energía (M \$).

Aunque la fusión termonuclear es considerada como la futura principal fuente de energía, el protagonismo no parece que vaya a corresponder al láser, sino a los haces de partículas y a la fusión por vía magnética. Por ello, el crecimiento de este segmento del mercado no será superior al 8% en los próximos años y, en todo caso, estará limitado a los proyectos actualmente en marcha.

Sin embargo, la utilización del láser en los procesos de enriquecimiento del uranio 235, usado en las centrales nucleares de agua ligera, parece tener un futuro muy prometedor. Una vez puestas en marcha las primeras plantas experimentales, se espera un fuerte crecimiento de este mercado, cuyo líder es, por el momento, la casa Exxon.

Entre el resto de aplicaciones del láser en el campo de la energía, destacan la producción de agua pesada para ciertos tipos de reactores nucleares; el reprocesamiento de materiales radiactivos de desecho; la detección de fugas radiactivas en centrales nucleares, y la fabricación de células fotovoltaicas para conversión de energía solar.

## INDUSTRIA

En este apartado se incluye una gran variedad de aplicaciones del láser en

procesos industriales, generalmente para tratamiento de materiales y realización de medidas. Las más importantes están recogidas en la Tabla 15, con cifras correspondientes al año 1981.

Aplicación	Mercado en 1981	Incremento 1981/80 (%)
Medición . . .	34	24
Perforación de materiales . . .	18	13
Soldadura . . .	18	23
Corte . . . . .	15	27
Tratamiento de superficies . . .	14	30
Recocido, tratamiento de semiconductores, y otros . . .	3	50
Total . . . . .	102	24

Tabla 15. Aplicaciones industriales (M \$).

Como se aprecia en dicha tabla, el mercado de aplicaciones industriales se encuentra en clara expansión en todos sus epígrafes, con un crecimiento global previsto para los próximos años que alcanzará niveles del 25%.

El éxito del láser en procesos industriales radica fundamentalmente en su velocidad de actuación, que incrementa drásticamente la productividad del proceso en cuestión, hasta el punto de que las inversiones necesarias para su implantación llegan a amortizarse tan sólo en uno o dos años. También contribuyen a este éxito la elevadísima precisión que el láser confiere a las máquinas donde se incorpora, y su compatibilidad con el control automático por ordenador. Además, como se suprime el contacto físico con las piezas, el movimiento automatizado de éstas se simplifica enormemente. El único inconveniente es el elevado coste de los equipos y sistemas con láser, que va desde los 125.000 \$ por término medio para potencias de 1 kW, hasta los 800.000 \$, si la potencia es de 15 kW (precios de 1981). No obstante, los aumentos de productividad suelen justificar sobradamente dichas inversiones.

De cara a los próximos años, el principal factor limitativo de la expansión de este tipo de aplicaciones del láser será el desconocimiento que los propios usuarios potenciales tienen de las posibilidades de su utilización. A su vez, la capacidad de producción de los actuales fabricantes es todavía relativamente limitada.

En cuanto a los tipos de láser más utilizados en aplicaciones industriales destacan los de CO<sub>2</sub>, Nd:YAG y helio-neón.

La principal aplicación, por su volumen, es la de medición de tamaños, posiciones y características físico-químicas, dentro de procesos generales de control de calidad automatizados.

Las áreas de perforación, soldadura y corte de materiales (metales, vidrios, cerámica, textiles, papel, madera) son las de mayor tradición, y se extienden ya por varios sectores de transformación, tales como siderurgias, automóviles, aeroespacial, textil, calzado, vidrio, cerámica, plásticos, electrónica, etc. Sus posibilidades de expansión son aún incalculables.

Sin embargo, la aplicación con mayor futuro potencial, dentro del campo de la preparación de materiales, es la del tratamiento de superficies, con una tasa de crecimiento estimado superior al 30% anual, durante los próximos años. Principalmente, este tipo de aplicación se centra en el endurecimiento de superficies mediante tratamiento térmico, que se utiliza sobre todo en la industria del automóvil, con ahorros energéticos del orden del 90%, respecto a la alternativa del horno o del método de calentamiento por inducción.

#### INSTRUMENTACION CIENTIFICA

Durante varios años, el campo de la instrumentación científica fue el primero en la utilización del láser y prácticamente el único mercado existente. En la actualidad, ocupa el cuarto lugar, con el 9% del volumen



total del mercado, pero su crecimiento es inferior a la media y se espera que hacia 1985 su volumen apenas represente el 7% del conjunto. No obstante el comportamiento de este epígrafe está fuertemente condicionado a los altibajos de los presupuestos destinados por cada Gobierno a la financiación de actividades de investigación y desarrollo (I + D).

Los principales apartados de este área aparecen en la Tabla 16, donde puede comprobarse que la principal aplicación es la de espectroscopia, con un 55% del mercado. Muy lejos de este nivel se encuentran los clasificadores de células, utilizados en los laboratorios médicos para los análisis de sangre instantáneos, y que cuentan con un futuro claramente expansivo.

Aplicación	Mercado en 1981	Incremento 1981/80 (%)
Espectroscopia . . . . .	49	15
Clasificadores de células . . . . .	10	16
Fotoquímica . . . . .	9	21
Otras . . . . .	21	16
Total . . . . .	89	16

Tabla 16. Mercado de aplicaciones del láser a la instrumentación científica (M \$).

También se prevé un fuerte crecimiento de la aplicación del láser en fotoquímica, para la producción de ciertos compuestos, purificación, separación de isótopos y detección de elementos con alta sensibilidad.

Entre el resto de aplicaciones, merece la pena destacar el lidar (radar de láser), utilizable para medir la contaminación del aire o la velocidad del viento, por ejemplo.

Los principales fabricantes de instrumentación científica con láser son Spectra Physics y Coherent Inc., que copan entre los dos más del 80% del mercado.

#### PUNTOS DE VENTA

Se trata de una de las aplicaciones con perspectivas de más rápido cre-

cimiento: del orden de un 29% durante los próximos años. Además de ahorrar tiempo en la operación de venta y de reducir el porcentaje de errores, permite mecanizar el control de stocks y disponer de una información estadística, incluso diaria, de las ventas de cada producto.

En Europa y Japón está todavía poco introducida esta aplicación del láser, pero en USA existen ya unos 5.000 supermercados con sistemas de lectura automática de los códigos que identifican a cada producto.

Los principales suministradores son National Cash Register e IBM, seguidos a distancia por National Semiconductor, Sweda, Data Terminal y Nippon Electric.

#### CONSTRUCCION

Con sus 39 M\$ en 1981, representa el 4% del mercado, con tendencia a crecer más despacio que el conjunto global de las aplicaciones. En este área se incluyen las aplicaciones en el terreno agrícola (construcción de redes de irrigación, control de máquinas), la construcción de túneles y la edificación en general (nivelación, alineamiento).

El control automático de grandes máquinas (para remover tierra, en túneles, etc.) parece ser el sector con mayor futuro, dentro de este campo.

Los principales suministradores son Hewlett-Packard, Spectra-Physics, Laser Alignment, Micro Grade y Construction Laser.

#### ORDENADORES

Durante 1981 se vendieron en todo el mundo 29 M\$ en equipos con láser incorporados a sistemas de ordenadores. Los principales campos fueron entrada y salida de datos (lectura óptica, impresoras).

No obstante, la introducción de memorias y procesadores ópticos, en un futuro próximo, permite pensar

en una fuerte expansión de las aplicaciones de láser en el mundo del tratamiento de la información, donde también estarán presentes los sistemas de fibra óptica.

Las actuales impresoras con láser son todavía bastante caras, aunque los precios están descendiendo drásticamente. Los principales fabricantes son Xerox, Hewlett-Packard, Canon, IBM, Mita Industrial y Siemens.

## ARTES GRÁFICAS

La utilización del láser en tareas de impresión se basa, sobre todo, en la gran velocidad que confiere al proceso y en la posibilidad de integrarse en sistemas con ordenador para producir gráficos a partir de la salida del mismo.

La principal aplicación es la de confección de planchas para imprimir periódicos, que permite alcanzar en la actualidad un coste de 2 \$ por plancha, con una inversión media de 200.000 \$ por sistema. Los principales suministradores en USA son Lag Escan, EOCOM, Muirhead, Laser Graphic Systems, Dest Data e Image Information, que han instalado en todo el mundo unos 200 sistemas. En Japón, Nippon Electric y Matsushita han diseñado conjuntamente un sistema, y en Gran Bretaña está la firma Monotype, que instaló un sistema en el Diario del Pueblo, de Pekín.

En la actualidad, los principales diarios del mundo utilizan con éxito la confección de planchas con láser, lo que hace prever una fuerte expansión de este mercado, a ritmos superiores al 30% de crecimiento anual, máxime cuando ya se anuncian mejoras tecnológicas que reducirán el coste a solamente 1 \$ por plancha.

El siguiente paso consistirá en la integración total del proceso que comienza en el terminal de ordenador instalado en el puesto de trabajo del redactor y termina en la impresión de la plancha, lo cual aumentará la competitividad de los periódicos

frente a los nuevos servicios tipo videotex.

Otras aplicaciones en el área de las artes gráficas son la fotocomposición, la impresión de imágenes, la exploración de color y el facsímil.

## TELECOMUNICACIONES

De los dos modos de aplicación del láser al terreno de las telecomunicaciones, que se reparten el mercado actual a partes iguales, el de la fibra óptica tendrá una fuerte expansión en los próximos años, del orden del 30% anual, mientras que el de transmisión libre por la atmósfera apenas alcanzará crecimientos del orden del 13%.

La utilización de la fibra óptica permite aumentar drásticamente la anchura de banda de los sistemas de transmisión, reduciendo el tamaño y el peso en comparación con los actuales cables metálicos, y eliminando la posibilidad de interferencias eléctricas, al tiempo que se aumenta la distancia entre repetidores. Todo ello abarata los costes de transmisión para distancias medias (unos cientos de kilómetros), aunque todavía la fibra óptica no llega a ser competitiva con el satélite para grandes distancias y elevados volúmenes de información.

En la actualidad existen sistemas con 3.000 km de fibra en USA. En España, el primer sistema comercial se instaló entre las estaciones de Atocha y Chamartín, en Madrid, durante 1981, y hay una instalación industrial de Standard Eléctrica, S. A., que fabrica cables ópticos.

## MEDICINA

El mercado de aplicaciones médicas ha sido muy similar al de telecomunicaciones en los últimos años, pero la expectativa es de un crecimiento mucho más lento, incluso inferior a la media.

Excepto en el campo de la oftalmología, donde el láser se ha convertido

en una técnica indispensable, el grado de penetración en el resto de las áreas médicas es muy lento, debido fundamentalmente al coste de los equipos, al conservadurismo del personal sanitario y a la escasez de técnicos en electrónica en los hospitales, que ayudan a familiarizarse con este instrumental.

La principal aplicación, en cuanto a cifras de mercado, es la fotocoagulación, que representa el 60% de las ventas de equipos médicos con láser.

El segundo apartado es el de los bisturíes con láser, especialmente útiles para operaciones en pequeñas cavidades internas. El tipo de láser más utilizado es el de CO<sub>2</sub>, del que existen unos 150 bisturíes en todo el mundo, y se espera un fuerte crecimiento durante los próximos años.

Otras aplicaciones mucho menos extendidas son las de cirugía dermatológica, holografía para diagnóstico, medición de la circulación sanguínea, broncoscopia, ortodoncia, tratamiento de artritis y como catéter destructor de obstrucciones en los vasos sanguíneos.

Dentro de los avances previsibles, la utilización combinada de láser fibra óptica permitirá nuevas aplicaciones aún desconocidas, y se generalizará la presencia de instrumentos con láser en los hospitales, desbordando la cifra total de 5.000 actualmente en uso.

El principal fabricante, sobre todo en el terreno de la fotocoagulación, es Coherent Inc., seguido de Cavitron y Photon Sources, por lo que se refiere a los EE. UU. En Europa, las primeras firmas son MBB, Garching Instruments y Carl Zeiss. En Israel se encuentra el principal fabricante de láseres quirúrgicos de CO<sub>2</sub>: Laser Industries.

## **OCIO Y OTRAS**

Aunque con poca relevancia en el mercado mundial, existe una gran

diversidad de aplicaciones del láser no incluidas en los apartados anteriores, entre las que destacan las relativas a espectáculos públicos y reproductores de videodiscos.

Es precisamente el campo del espectáculo el que ha contribuido en mayor medida a popularizar el láser, sobre todo en Europa, donde se muestra como un mercado muy dinámico. En España representa la mayor porción del mercado total, lo cual indica la pobre y atípica penetración del láser en nuestro país.

En cuanto a los videodiscos, no parece despejado su futuro, por la fuerte competencia de las videocintas. Tal vez sea en el terreno de los discos de audio de alta densidad donde el láser encuentre un mercado más claro y prometedor, como parecen apuntar los últimos esfuerzos realizados por firmas tales como Philips, Pioneer, Sony, 3M, etc.

## LA INDUSTRIA DEL LASER

Su principal característica es la de estar compuesta por una enorme variedad de segmentos, como consecuencia de la proliferación de tipos de láser y de aplicaciones.

La mayor parte de dichos segmentos está encabezada por empresas norteamericanas, que dominan entre el 70 y el 80% del mercado mundial, si bien con tendencia a disminuir. Esta preponderancia se debe, fundamentalmente, a la continua evolución tecnológica provocada por los planes de investigación y desarrollo, sobre todo en el terreno militar, que absorbe casi la mitad del mercado actual.

Normalmente, las empresas que comenzaron fabricando los propios láseres han ido evolucionando hasta convertirse en fabricantes de sistemas y de maquinaria, donde el láser no pasa de ser un componente, aunque, eso sí, el más importante de todos. Esto ha propiciado la irrupción, en el mercado del láser, de numerosas empresas que inicialmente actuaban en otras áreas.

En EE. UU. hay más de 40 empresas, encabezadas por Spectra-Physics, de California. La principal concentración de industrias se encuentra en Silicon Valley, al igual que ocurre con los fabricantes de semiconductores. Por otra parte, rara es la institución que desarrolle actividades de I + D que no tenga varios programas en alguna de las áreas de láser, destacando los Bell Telephone Laboratories, que han contribuido de forma importante al desarrollo del láser y sus aplicaciones.

En Europa, fueron las multinacionales americanas quienes comenzaron implantándose y dominando el mercado. En la actualidad, aunque las grandes firmas europeas siguen actuando de forma conservadora y no invierten en este terreno sino después de observar los éxitos de las compañías americanas o japonesas, los programas gubernamentales están activando el sector.

El mercado europeo representa solamente el 15% del mundial y está encabezado por la República Federal de Alemania, que supone el 34% de todo el mercado europeo, seguida por Gran Bretaña, con el 20%, y Francia e Italia (15% cada una). A su vez, los principales segmentos del mercado europeo son el militar, médico y tratamiento de materiales (industria del automóvil, sobre todo).

Por lo que se refiere a Japón, el tamaño del mercado es muy similar al de la República Federal de Alemania, si bien las industrias japonesas se están imponiendo mundialmente en algunas parcelas, como es el caso de las aplicaciones médicas, algunas industriales y en el terreno de la informática. Los principales proyectos en marcha se refieren a instrumental médico (con fibra óptica); sistemas automáticos de fabricación con corte y soldadura; telecomunicaciones, y electrónica de consumo.

En España son escasísimas las aplicaciones del láser. En el área militar, ya ha sido mencionada la unión temporal de EISA y ENOSA para la realización de una dirección de tiro para el carro M-48, con tecnología de Hughes Aircraft. Por otro lado, dentro del plan de modernización del carro 40/70, el Taller de Precisión de la División de Investigación y Desarrollo, de la Dirección General de Armamento y Material, desarrolla con tecnología propia un láser para artillería del ejército español, que será fabricado en el futuro por EISA.

En telecomunicaciones, Standard Eléctrica ha diseñado e instalado varios sistemas con componentes importados. Algunos instrumentos científicos y médicos, junto con los láseres de pequeña potencia utilizados en salas de fiestas completan en exiguo panorama de las aplicaciones del láser en nuestro país.











## Relación de empresas que desarrollan en España actividades en el campo del láser\*

ERBATRON, S. A.

EXPERIENCIAS INDUSTRIALES

SIEMENS, S. A.

### Componentes mecánicos

KREMATRONIC, S. A.

LEANDRO CASTELLS QUINTANA, S. A.  
(TECNORADIO) (PRODUCTOS TR)

### Componentes ópticos

BENITO MANSO ALONSO

COMPAÑIA ELECTRONICA DE TECNICAS  
APLICADAS, S. A. (COMELTA, S. A.)

C. R. MARES, S. A.

KREMATRONIC, S. A.

LEANDRO CASTELLS QUINTANA, S. A.  
(TECNORADIO) (PRODUCTOS TR)

SUMINISTROS TECNICOS INDUSTRIALES,  
S. A. (SUTEIN, S. A.)

THOMSON CSF COMPONENTES Y TUBOS,  
S. A.

### Cristales

KREMATRONIC, S. A.

LEANDRO CASTELLS QUINTANA, S. A.  
(TECNORADIO) (PRODUCTOS TR)

### Equipos de corte y taladro

ALAVA INGENIEROS, S. A.

C. R. MARES, S. A.

EVIL ELECTRONICA

FIRSTRONIC

INGENIERIA ESPAÑOLA DE PROCESOS  
Y CONTROL, S. A. (IEP CONTROL)

M. GABARRO, S. A.

### Equipos de soldadura

ALAVA INGENIEROS, S. A.

C. R. MARES, S. A.

ESMI, S. A.

FIRSTRONIC

INGENIERIA ESPAÑOLA DE PROCESOS  
Y CONTROL, S. A.

### Interferómetros

METRONIC, S. A.

### Otros equipos

ALAVA INGENIEROS, S. A.

BENITO MANSO ALONSO

C. R. MARES, S. A.

EUROTRONICA, S. A.

EXPERIENCIAS INDUSTRIALES, S. A.

LEANDRO CASTELLS QUINTANA, S. A.  
(TECNORADIO) (PRODUCTOS TR)

PACISA (PRODUCTOS Y APARATOS  
CIENTIFICOS E INDUSTRIALES, S. A.)

RASMEL SYSTEMS ESPAÑOLA, S. A.

STANDARD ELECTRICA, S. A.

### Semiconductores

SUMINISTROS TECNICOS INDUSTRIALES,  
S. A. (SUTEIN, S. A.)

### Sistemas de medición

ALAVA INGENIEROS, S. A.

BENITO MANSO ALONSO

EXPERIENCIAS INDUSTRIALES, S. A.

UNITRONICS, S. A.

### Tubos

BOLEN ELECTRONICA, S. A.

C. R. MARES, S. A.

KREMATRONIC, S. A.

LEANDRO CASTELLS QUINTANA, S. A.  
(TECNORADIO)

\* Ruta de compras del sector electrónico 1983. Mundo electrónico de Boixareu Editores

## AGRADECIMIENTO

El presente documento ha sido elaborado por

Baldomero Fernández Rondán (Centro de Investigación de Standard Eléctrica, S. A.)

Angel Luis Gonzalo Pérez (Centro de Investigación de Standard Eléctrica, S. A.)

El CDTI les expresa su agradecimiento.



**La Innovación Industrial y las relaciones Industria-Universidad**



**La Innovación Industrial y su Tratamiento Fiscal**



**La conversión fotovoltaica de la energía solar**



**La ingeniería genética en la biotecnología**



**Innovación industrial y sistema educativo**



**¿Qué es la innovación tecnológica?**



**La telemática**



**Innovación Industrial y Empleo**



**Robótica Industrial**



**La financiación de la innovación industrial.**



**Pequeñas centrales hidráulicas**



**El microprocesador en la industria**



**Aprovechamiento energético de la biomasa**



**Innovación y Diseño Industrial**



**La investigación industrial farmacéutica.  
La política de patentes**

CDTI

Centro para el  
Desarrollo Tecnológico  
Industrial

Ministerio  
de Industria y Energía

Edificio Gan  
Ramírez de Arellano s/n  
Madrid 27  
España

Apto. de Correos: 29136  
Telef: (91) 416 2016  
Telex: 23121 CDTI-E