



Escuela Universitaria
de Ingeniería Técnica
Industrial de Zaragoza



PROYECTO FIN DE CARRERA

MEMORIA

**ESTUDIO SOBRE LAS
APLICACIONES INDUSTRIALES
DEL LÁSER**

Alumno: Javier Esténoz Valenzuela

Especialidad: Electrónica Industrial

Director: Miguel Ángel Torres Portero

Convocatoria: Marzo 2011



Índice

1.- Introducción histórica.....	4
2.- Estructura y funcionamiento del láser.....	7
2.1.- Absorción.....	10
2.2.- Emisión espontánea de radiación.....	11
2.3.- Emisión estimulada de radiación.....	12
2.4.- Bombeo.....	12
2.5.- Resonador óptico.....	15
3.- Tipos de láseres.....	18
3.1.- Láser sólido.....	18
3.1.1.- Láser de cromo en rubí sintético.....	18
3.1.2.- Láser de neodimio-YAG.....	23
3.2.- Láser de gas	24
3.2.1.- Láser de helio-neón.....	25
3.2.2.- Láser de CO₂.....	31
3.3.- Láser semiconductor.....	33
3.3.1.- Funcionamiento y características principales.....	33
3.3.2.- Láser de heteroestructura.....	43
3.3.3.- Láser de pozo cuántico.....	46
3.3.4.- Láser de hilo cuántico.....	51
3.3.5.- Láser de punto cuántico.....	52
3.3.6.- Diodo láser azul.....	53
3.4.- Otros láseres	54
4.- Seguridad.....	58
5.- Tratamiento del haz.....	67
5.1.- Transformaciones de un haz láser.....	67





7.3.4.- Comparativa con otros métodos de perforado.....	147
7.4.- Marcaje de materiales.....	149
7.4.1.- Proceso de marcaje por láser.....	149
7.4.2.- Tipos de marcaje.....	156
7.4.3.- Ejemplos de aplicación.....	165
7.4.4.- Comparativa con otros métodos de marcaje.....	170
7.5.- Tratamiento superficial.....	174
7.5.1.- Proceso de tratamiento superficial por láser.....	174
7.5.2.- Endurecimiento térmico.....	175
7.5.3.- Fusión superficial.....	177
7.5.4.- Aleación superficial.....	179
7.5.5.- Ejemplos de aplicación.....	181
7.6.- Otras aplicaciones.....	188
6.4.1.- Medición tridimensional con láser.....	188
6.4.2.- Medición de velocidad.....	199
6.4.3.- Sistemas de conteo.....	212
6.4.4.- Nivelación de terrenos agrícolas.....	216
8.- Perspectivas de futuro de las aplicaciones del láser.....	218
9.- Normativa.....	230
10.- Bibliografía.....	241



1.- Introducción histórica.

La palabra láser, que significa light amplification by stimulated emission of radiation, proporciona una idea clara de la naturaleza del sistema. Se trata de un dispositivo que produce luz amplificada por emisión estimulada, lo que genera un haz de gran intensidad, direccionalidad y coherencia. El término láser abarca la gran variedad de sistemas capaces de producir este tipo de radiación, independientemente de los mecanismos que se empleen para conseguirlo.

La historia del láser se remonta al año de 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos, según el cual un átomo que recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir, es estimulado a emitirla en ese instante.

El siguiente trabajo fundamental para la evolución posterior del láser fue el del bombeo óptico, desarrollado a principios de la década de los cincuenta por Alfred Kastler (1902-1984), nacido en Guewiller, Alsacia, y educado en Colmar, entonces posesión alemana. Durante la primera Guerra Mundial Kastler fue enrolado en el ejército alemán, pero al concluir la guerra ingresó a la École Normale Supérieure en París, donde obtuvo su maestría. Más tarde obtuvo el doctorado en física en la Universidad de Bourdeaux. Desde entonces hasta su muerte vivió en Francia. En 1974 Kastler estuvo de visita algunos días en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, en Tonantzintla, Puebla. Era una persona dotada de un gran carisma y sencillez, que afirmaba que los grandes descubrimientos científicos como los que él había hecho se lograban simplemente manteniendo la mente despierta para examinar cualquier acontecimiento imprevisto. El trabajo de Kastler sobre el bombeo óptico, basado en técnicas de resonancia ópticas, fue desarrollado con la colaboración de su alumno Jean Brossel, de la École Normale Supérieure de París, y fructificó con el descubrimiento de métodos para subir el nivel energético de los átomos; dicho de otro modo, métodos para que los electrones de los átomos suban al nivel deseado, utilizando efectos de resonancia óptica. Estos métodos recibieron el nombre de bombeo óptico por el mismo Kastler, quien mereció el premio Nobel de física en 1966.



Charles H. Townes (1915-) se encontraba en la ciudad de Washington el mes de abril de 1951, para asistir a una reunión científica. En el hotel compartía una habitación con su amigo, Arthur Schawlow. En esta época Townes se encontraba muy preocupado por encontrar un método para producir ondas de radio de longitud de onda muy corta, del orden de milímetros. Townes, casado y con hijos, tenía la costumbre de levantarse muy temprano, mientras que Schawlow, que era soltero, acostumbraba levantarse muy tarde. La mañana del día 26, Townes, como de costumbre, se levantó muy temprano, y para no molestar a su amigo salió del cuarto en silencio y se dirigió al parque Franklin, cercano al hotel. Cuenta el mismo Townes que fue en ese parque, aquella mañana, donde se le ocurrió un método para producir microondas usando el fenómeno de la emisión estimulada, basándose en la predicción de Einstein y en los estudios sobre bombeo óptico que realizó Alfred Kastler. La comprobación de su idea se la propuso como trabajo de tesis doctoral a su alumno James P. Gordon, en la Universidad de Columbia. Tres años les tomó construir, con la colaboración de Herbert Zeiger, un dispositivo que amplificaba microondas mediante emisión estimulada, al que llamaron máser (microwave amplification by stimulated emission of radiation).

Independientemente, sin tener ninguna conexión con Townes, Nicolai G. Basov (1922-) y Aleksandr M. Prokhorov (1916-) obtuvieron resultados similares en el Instituto Lebedev de Moscú. Townes, Basov y Prokhorov compartieron el premio Nobel de física en 1964. En septiembre de 1957, Townes, junto con su colega, amigo y ahora cuñado Arthur Schowlow, comenzaron a pensar en el problema de construir ahora otro dispositivo similar al máser, pero que emitiera luz en lugar de microondas. Es interesante conocer la anécdota de que Townes solicitó una patente para artefactos que emitieran luz por el mecanismo de emisión estimulada, y de que poco después lo hizo también otro investigador de la misma Universidad de Columbia, llamado Gordon Gould, reclamando prioridad. Hay algunos que creen que Gould tenía razón. Lo cierto es que nadie niega que sí hizo algunos descubrimientos similares independientemente. Hasta la fecha sigue el pleito legal sobre quién tiene la razón.



En 1957, los físicos americanos A.Javan y H.Mainan lograron la producción de osciladores de tipo radioeléctrico que operaban gracias a la emisión estimulada y cuya cuyas longitudes de onda pertenecían a la región visible. Finalmente, Theodore H. Maiman en 1960 consiguió la producción de luz láser utilizando un cristal de rubí, óxido de aluminio con pequeñas impurezas de cromo.



2.- Estructura y funcionamiento del láser.

Un láser es, ante todo, una fuente de luz. Sin embargo, la luz generada por un láser tiene unas propiedades que la distinguen de la luz obtenida por las fuentes convencionales y la hacen mucho más útil y manejable. El grado de coherencia temporal y espacial, a potencias muy elevadas, es de muchos órdenes de magnitud superior a cualquier otra fuente de luz conocida.

A fin de ilustrar lo anterior, consideremos una fuente luminosa muy pequeña a la que llamaremos puntual, que emite luz cuyos frentes de onda son esféricos y concéntricos con dicho punto. Si colocamos una lente convergente frente a esta fuente luminosa, como se muestra en la figura 1(a), veremos que la onda se refracta, haciéndose ahora el haz luminoso convergente a un punto después de esta lente. Este ejemplo es sólo imaginario e idealizado, pues las fuentes luminosas puntuales no existen en la vida real, ya que por pequeñas que sean tienen un tamaño finito. Por lo tanto, las fuentes luminosas reales no emiten una sola onda con frentes de onda esféricos, sino una multitud, cada una de ellas saliendo de un punto diferente sobre la fuente. Al colocar ahora la lente convergente frente a esta fuente de luz, la energía luminosa ya no se concentra en un punto infinitamente pequeño después de la lente, como en nuestro experimento imaginario. Lo que se obtiene es simplemente una imagen de la fuente luminosa, con la energía distribuida sobre toda su área, como se muestra en la figura 1(b).

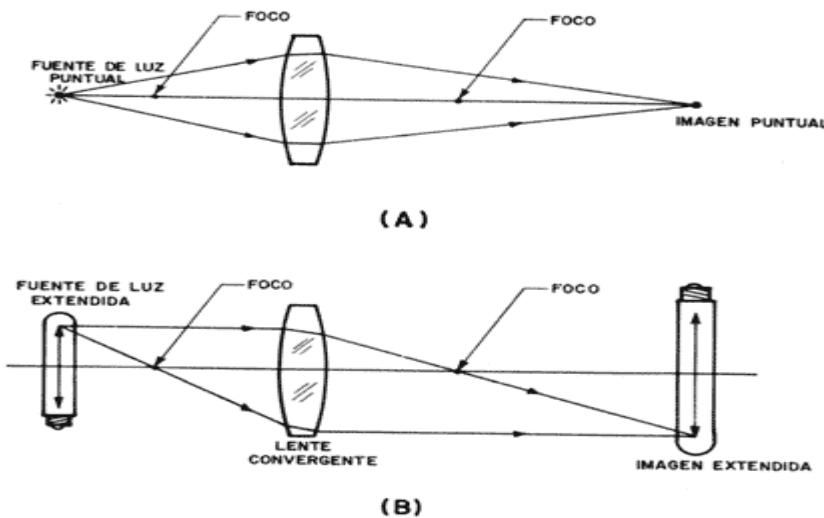


Figura 1. Lente convergente frente a una fuente luminosa a una distancia mayor que su distancia focal. (a) Fuente puntual y (b) fuente extendida.



Volviendo de nuevo a nuestro experimento idealizado, supongamos que la lente se coloca frente a la fuente luminosa puntual, de tal manera que quede sobre el foco de la lente convergente, como se muestra en la figura 2(a). La luz saldría entonces de la lente en un haz de rayos paralelos, o lo que es lo mismo, con frentes de onda planos y paralelos entre sí, como se muestra en esta misma figura. Como las fuentes luminosas no son infinitamente pequeñas, la luz no saldrá como un haz de rayos paralelos, sino como una multitud de haces, todos viajando en diferentes direcciones, como se muestra en la figura 2(b). De esta manera se esparce la energía luminosa en la forma de un cono divergente. Se dice que la fuente infinitamente pequeña o puntual tiene una coherencia espacial perfecta, mientras que la extendida la tiene muy pobre.

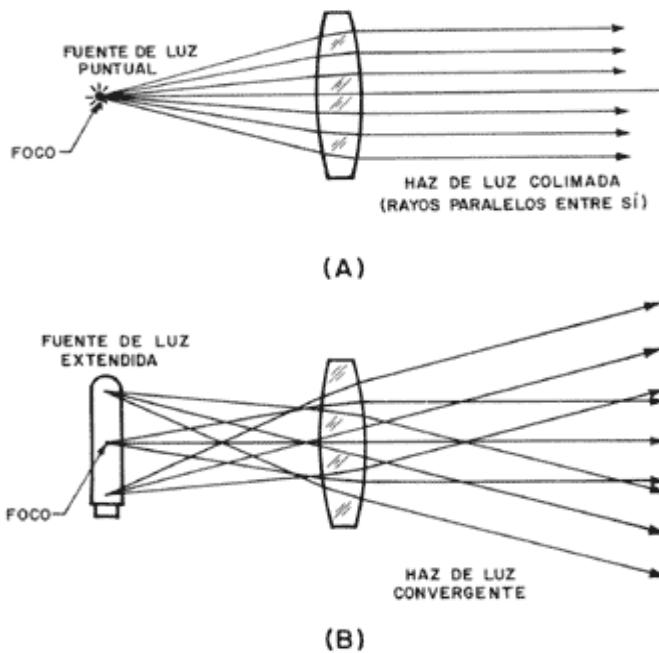


Figura 2. Lente convergente con una fuente luminosa colocada en su foco anterior. (a) Fuente puntual y (b) fuente extendida.

Desafortunadamente, son muchísimas las situaciones en las que es necesario tener una gran coherencia espacial: por ejemplo, para tener un frente de onda único en interferometría, para concentrar la energía luminosa en un punto muy pequeño a fin de obtener una densidad de energía muy alta, o para enviar el haz luminoso a gran distancia. Como es fácil de entender, se puede obtener una fuente luminosa de gran coherencia espacial colocando simplemente una hoja de papel aluminio con una perforación muy pequeña hecha con una aguja sobre una fuente de luz extendida. Sin



embargo, de esta manera se reduce considerablemente la intensidad luminosa, como se muestra en la figura 3. Otra manera sería alejar la fuente una gran distancia, hasta que ya no se le aprecie ningún tamaño, sino que se le vea como un punto, como es el caso de las estrellas. También en este caso se reduce la intensidad luminosa de manera considerable. La luz de un láser tiene una coherencia espacial casi perfecta, sin ningún sacrificio de su intensidad.

La segunda propiedad del láser tiene que ver con la cantidad de colores que emite la fuente luminosa simultáneamente, es decir, con el grado de monocromaticidad. Por ejemplo, una fuente de luz blanca no es nada monocromática, pues emite todos los colores del arco iris al mismo tiempo. La luz emitida por un foco rojo o de cualquier otro color sería menos policromática, porque contiene luz de varios colores cercanos al rojo, por ejemplo, naranja e infrarrojo. Una fuente de luz bastante monocromática se puede obtener mediante varios procedimientos basados en los fenómenos de la dispersión de la luz en un prisma, en el de la difracción en una rejilla de difracción o en el de la interferencia en los filtros de interferencia. Desafortunadamente todos estos métodos se basan en la eliminación de los colores indeseados, pero de ninguna manera refuerzan el deseado. Por lo tanto, el haz de luz se hace sumamente débil. Mientras más monocromático sea un haz luminoso, se dice que tiene más coherencia temporal. En cambio, la luz de un láser tiene coherencia temporal casi perfecta, es decir, tiene una alta monocromaticidad.

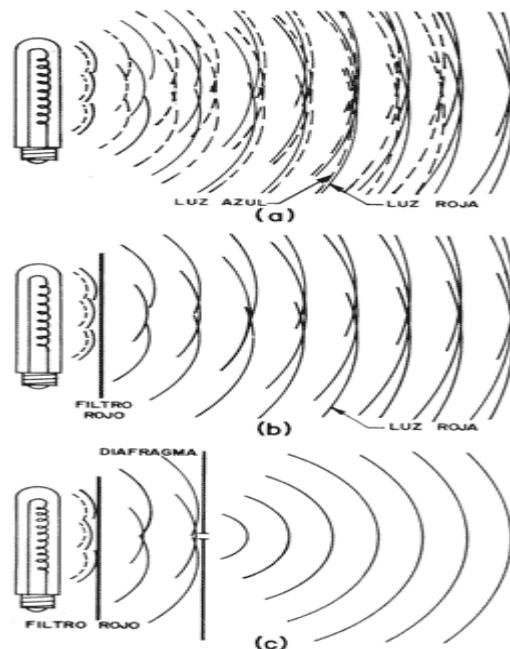


Figura 3. Simulación de una fuente de luz con coherencia tanto espacial como temporal, por medio de una pequeña perforación, y un filtro de color con banda de transmisión muy angosta. (a) Fuente luminosa, (b) fuente luminosa con filtro de color y (c) fuente luminosa con filtro de color y diafragma.

Recordemos ahora que la luz es una onda electromagnética idéntica en todo a una onda de radio o televisión, sólo que su frecuencia es mucho más alta, y por lo tanto su longitud de onda (distancia entre dos crestas de la onda) es mucho más corta. Cuando decíamos que la fuente de luz debería ser muy pequeña para tener coherencia espacial grande, lo pequeño o grande de la fuente era en comparación con la longitud de onda de la onda luminosa. De aquí se puede concluir que es relativamente más fácil producir una onda de radio coherente que una onda de luz coherente. Esta es la razón por la cual prácticamente todas las ondas de radio y televisión son coherentes, y por supuesto existen mucho antes de la aparición del láser.

2.1.- Absorción.

La materia está formada por átomos y moléculas. Cuando un material absorbe energía, los átomos y moléculas son los que, en definitiva, lo hacen.

Cada átomo o molécula pueden encontrarse en determinados niveles energéticos discretos. Normalmente se encuentran en el nivel fundamental o de energía inferior (E_0), cuando absorben energía pasan a un nivel energético superior y se dice que está en un estado excitado ($E_1, E_2\dots$)



Las formas en que se puede excitar la materia son diversas: por calor, con luz, por medio de una descarga eléctrica, por una reacción química, etc. Las transiciones que originan una emisión de luz se denominan radioactivas.

Supongamos un átomo inmerso en una onda electromagnética, por el fenómeno de absorción, este átomo que posee la energía correspondiente a un nivel energético dado (E_m) pasa a un estado energético superior (E_n) absorbiendo un fotón de frecuencia $F = (E_n - E_m)/h$, siendo h la constante de Planck, con lo cual nos encontramos que una onda electromagnética se va amortiguando a medida que avanza por un medio con átomos que absorben sus fotones al efectuar esta transición.

El coeficiente de absorción por unidad de longitud es directamente proporcional a la densidad de átomos que se encuentran en el nivel inferior N_n y por lo tanto en disposición de ser excitados.

2.2.- Emisión espontánea de radiación

Cuando un átomo se encuentra o molécula se encuentra en un estado excitado tiende, de forma espontánea, a volver al nivel energético fundamental liberando la diferencia de energía.

El paso de un estado excitado al fundamental no tiene por qué ser directo, sino que puede realizarse pasando por estado energético excitados intermedios. Para desexcitarse puede hacerlo de diversas formas: transfiriendo la energía a otros átomos por colisión o emitiéndola en forma de luz. Cada vez que se produce una desexcitación por emisión de luz se dice que se ha emitido una luz.

Cada fotón tiene una frecuencia asociada característica que es igual a la diferencia de energía entre los niveles que interviene en la desexcitación dividida por la constante de Plack. Los niveles energéticos de cada átomo o molécula están determinados y constituyen su diagrama energético, por lo cual los fotones que pueden emitir son característicos de cada uno de ellos y componen el llamado espectro de emisión de ese material.



2.3.- Emisión estimulada de radiación

Un átomo excitado posee una determinada probabilidad de emitir un fotón de forma espontánea, pero si se encuentra dentro de una onda luminosa de la misma frecuencia que el fotón que emitiría, a esa probabilidad se le añade otra que es directamente proporcional a la intensidad de la luz a la que es sometido. Es decir, el átomo podrá emitir su fotón por un proceso de emisión espontánea o por un proceso de emisión estimulada. Si lo hace de la segunda manera, el fotón que emitirá tendrá la misma dirección que la onda de luz que interaccionó con él. Asimismo, si esta onda estaba polarizada el fotón también lo estará, en otras palabras el fotón se unirá a la onda electromagnética reforzándola.

El coeficiente con el que se refuerza la onda por unidad de longitud es directamente proporcional a la densidad de átomos que se encuentran en el nivel superior N_n y por tanto capaces de emitir un fotón que se una a la onda.

2.4.- Bombeo

Dado que existen dos procesos físicamente opuestos, el primero tendente a amortiguar la onda luminosa y el segundo a reforzarla, para que existe amplificación neta es necesario que el segundo proceso prevalezca sobre el primero.

Un medio se dice que es amplificador cuando el coeficiente de refuerzo de la onda es mayor que el de absorción. Ello implica, que la condición indispensable para que se produzca una amplificación neta es que existan más átomos en el nivel de mayor energía que en el de menor energía, esto es lo que se denomina *inversión de población*.

El láser es una onda de luz originada en un medio amplificador en el cual prevalece la emisión estimulada sobre la absorción. Dado que los átomos y moléculas que constituyen los distintos medios activos de los diversos láseres existentes, tienden de forma espontánea a ocupar el nivel de energía más bajo, será necesario transferir energía al medio activo para mantener la inversión de población mientras se quiera emitir luz láser. A este aporte de energía se le denomina *bombeo energético*.



El bombeo energético permite al medio activo que sus átomos ocupen niveles de energía superiores al fundamental y que entre dos de ellos sea posible la inversión de población requerida.

Muchos láseres se ajustan de manera aproximada a los esquemas de tres o cuatro niveles energéticos. En el esquema de tres niveles el bombeo se efectúa desde el fundamental E_0 hasta el nivel E_2 , de allí pasa al nivel E_1 que actuará como nivel superior de la transición láser. La transición radiactiva que origina la emisión de luz es la que hace descender al átomo desde el nivel E_1 hasta el fundamental que actúa como nivel inferior láser (Figura 4a).

En el esquema de láser de cuatro niveles, el nivel inferior láser no es el fundamental sino un nivel excitado que a continuación debe efectuar una transición hacia el fundamental (Figura 4b).

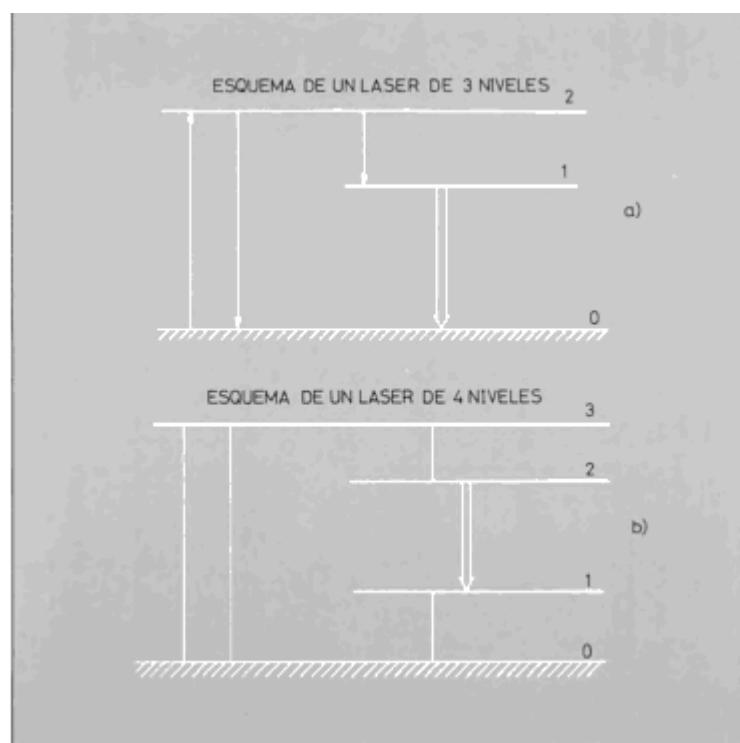


Figura 4. Esquema de niveles típico de un láser de 3 y 4 niveles.

Existen diversos métodos de producir el bombeo dependiendo del tipo de medio activo que se esté excitando. En el caso de bombeo óptico la excitación del medio activo se debe a luz emitida por un sistema ajeno al mismo. Por ejemplo, en los láseres de rubí



y Nd:YAG, se utiliza una lámpara flash de xenón o kriptón y en los láseres de colorante se utiliza otro láser.

En el primero de los casos, el medio activo está constituido por un cristal cortado en forma cilíndrica. La forma de disponer la lámpara de flash con respecto al medio activo será tal que la mayor cantidad de luz que emita la lámpara incida sobre el medio activo para que éste reciba la máxima energía posible.

En el caso en que la excitación se produzca por otro láser, bombeo coherente, la luz de éste se focaliza en el medio activo excitándolo. Este tipo de excitación es la utilizada por los láseres de colorante, donde el medio activo son moléculas fluorescentes, en forma de disolución líquida, que se hacen circular por el lugar donde el láser que se usa para el bombeo está focalizado

El bombeo por paso de corriente eléctrica a través del medio activo es uno de los más usados, principalmente en los láseres con medio activo gaseoso. Este tipo de excitación consiste, generalmente, en un tubo de descarga que contiene el medio gaseoso. La descarga se produce por una tensión elevada entre un cátodo y un ánodo situados en su interior. Los electrones generados por la descarga, adquieren una gran energía cinética que transfieren a los átomos y moléculas al colisionar en el interior del tubo de descarga, con lo cual se pueblan los distintos niveles de energía de moléculas, además de producirse iones.

Otro caso de excitación por el paso de corriente eléctrica es el que se emplea en los diodos láser de AsGa cada vez más utilizados en electrónica y comunicaciones. En este caso, la excitación se produce por el paso de una corriente eléctrica a través de un componente en estado sólido con una unión P-N. En la zona de la unión es precisamente donde se produce la inversión de población.

Existen otros sistemas de bombeo del medio activo, pero no suelen emplearse en los láseres utilizados en la industria.



2.5.- Resonador óptico

En un medio activo en el que se produce un bombeo y, por consiguiente, obtenemos una inversión de población entre dos niveles energéticos (E_n , E_m), de forma espontánea, los átomos que se encuentran en el nivel E_n se desexcitarán y pasarán a tener una energía E_m emitiendo el fotón correspondiente a esa transición. Este fotón recorrerá el medio activo y antes de salir de él influirá en otros átomos que se encuentren en el nivel E_n haciendo que estos se desexciten por un proceso de emisión estimulada de fotones que se unirán al primero e irán en la misma dirección y sentido.

Si el medio activo posee una longitud mayor en un eje que en los otros dos, los fotones que sean emitidos en la dirección de ese eje interaccionarán con muchos más átomos, consiguiéndose una amplificación mayor en ese eje que en los otros dos, donde los fotones llegarán rápidamente al límite físico del medio activo interrumpiendo su amplificación.

Si se coloca un espejo en cada extremo del eje mayor, orientados perpendicularmente a éste, forzaremos a la onda luminosa que sale por estos extremos del medio activo, a volver a entrar en él. Es muy importante que los espejos estén orientados perfectamente paralelos entre sí ya que una desviación por muy pequeña que fuera haría que la onda se perdiera lateralmente en unas pocas reflexiones consecutivas.

Con este método se selecciona la dirección en que se van a emitir los fotones que genere el medio ya que tenemos una onda intensa que se mueve en una dirección del medio activo y que fuerza la mayoría de átomos que se encuentran en el nivel energético E_n a desexcitarse, emitiendo un fotón que se une a ella.

Para conseguir una extracción de la luz que está confinada entre los dos espejos se coloca uno de ellos semitransparente de forma que un porcentaje de la luz que llega a él se refleja y el resto lo atraviesa. Esta parte de luz que atraviesa el espejo es un haz de luz láser.

La onda que recorre el medio activo va despoblando el nivel superior de la transición y hace que disminuya la inversión de población. Al mismo tiempo, la potencia de la onda que sale por el espejo delantero va aumentando, hasta que llega una



situación de equilibrio en la cual la energía que gana la onda en un recorrido completo, ida y vuelta por el medio activo, se iguala a la energía que pierde debido a la transmisión por el espejo delantero. La ganancia del medio se ha saturado en un valor en el que las pérdidas del sistema se igualan a las ganancias en un recorrido, de este modo se obtiene una potencia de salida constante.

Cuando se llega a esta situación estacionaria, el aumento de inversión de población, debida al bombeo del medio activo, se ve compensada exactamente por la disminución que sufre por la emisión estimulada que se genera.

El resonador es el lugar donde tenemos confinada la onda que sufre la amplificación y que determina la forma que va a tener el rayo. Por lo tanto, el resonador en un láser está, en general, abierto en dos de sus ejes y cerrado por dos espejos en el otro eje, uno de los cuales introduce pérdidas en el sistema. Son estas pérdidas, precisamente, lo que se aprovecha del sistema, y configuran lo que denominamos rayo láser.

Para que el resonador sea estable debe suceder que la onda que se propaga por su interior se encuentre en el mismo estado después de haber realizado un recorrido completo dentro del resonador. La calidad del haz generado en un resonador estable es mayor, tanto en lo que se refiere a su distribución en potencia como a su divergencia.

Matemáticamente, la condición de estabilidad está determinada por la siguiente ecuación: $0 \leq \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \leq 1$. Donde R_1 y R_2 son los radios de los espejos del resonador y L la distancia entre ellos.

Un resonador láser constituido únicamente por el medio activo y los dos espejos emitirá un haz aleatoriamente polarizado, es decir, variable con el tiempo. Existen dispositivos que permiten la emisión de un haz láser linealmente polarizado de forma estable. El dispositivo más comúnmente utilizado para conseguir una emisión polarizada consiste en la colocación de una lámina de un material transparente a la radiación del láser en algún lugar entre los espejos, con una inclinación característica que depende del material y de la longitud de onda. El ángulo que forma la lámina con el



eje del resonador se denomina ángulo de Brewster y es igual a la arcotangente del índice de refracción del material que constituye la lámina (figura 5).

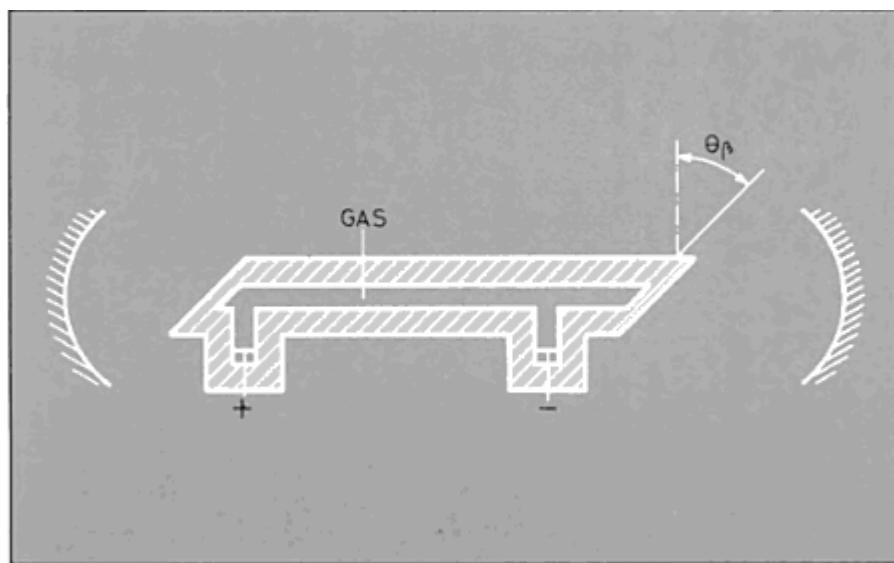


Figura 5. Resonador láser con emisión de luz polarizada por la colocación intracavidad de dos láminas en ángulo de Brewster.

El funcionamiento de este sencillo dispositivo se basa en una propiedad de los materiales no conductores. Existe para estos materiales un ángulo (Brewster) para el cual la reflexión de la luz polarizada en la dirección paralela al plano de incidencia es nula. No sucede lo mismo para la luz polarizada en sentido perpendicular al plano de incidencia, en cuyo caso parte de la luz es transmitida y parte es reflejada.

Al favorecer un sentido de polarización dentro del resonador, los nuevos fotones que se sumen a la onda por un efecto de emisión estimulada tienen una mayor probabilidad de hacerlo con la polarización predominante. De esta forma, la luz polarizada en sentido normal se extingue rápidamente al cabo de unos poco recorridos, y el láser emite un haz de luz linealmente polarizado en la dirección paralela al plano de incidencia sobre el de Brewster.



3.- Tipos de láseres

Los diferentes tipos de láseres se clasifican ateniendo a la naturaleza de su medio activo:

3.1.- Láser sólido

El término estado sólido se refiere a láseres de estructura cristalina o de materiales vítreos dopados con ion apropiado, no incluye los láseres semiconductores. Los láseres considerados aquí se bombean ópticamente. La energía eléctrica se convierte en luz de banda ancha mediante una descarga de arco o un filamento caliente. Para usar esta luz de modo que se produzca inversión de población en el medio activo del láser, debe inventarse un medio eficiente de acoplamiento óptico. Cuando el medio activo de láser está contenido en un resonador óptico, la ganancia resultante de la inversión de población causa oscilación y se emite radiación coherente intensa.

3.1.1.- Láser de cromo en rubí sintético

Este tipo de láser posee como sustancia ópticamente activa una barra de rubí sintético con impurezas de cromo. El rubí es una piedra preciosa formada por cristales de óxido de aluminio Al_2O_3 , que contiene una pequeña concentración de alrededor de 0.05% de impurezas de óxido de cromo Cr_2O_3 (el óxido de aluminio puro, Al_2O_3 , se llama zafiro). La presencia del óxido de cromo hace que el transparente cristal puro de óxido de aluminio se torne rosado y llegue a ser hasta rojizo si la concentración de óxido de cromo aumenta. Las longitudes de la barra no sobrepasan los 20 cm y secciones transversales máximas de 2 cm. Las impurezas de cromo son las responsables de proporcionar los niveles energéticos requeridos para la operatividad de este dispositivo. Como fuente de excitación usa una lámpara de helicoidal de destello, hecha de cuarzo y con gas xenón en su interior. Esta lámpara es la encargada de producir la inversión de población.

Este láser opera con un sistema de tres niveles, aunque el nivel de mayor energía en realidad corresponde a una banda de energía producida por el hecho de que el cromo se encuentra en una estructura cristalina. El nivel intermedio corresponde a un estado



metaestable (nivel láser). Entre el nivel fundamental y el nivel intermedio se producirá la inversión de población. (Figura 6).

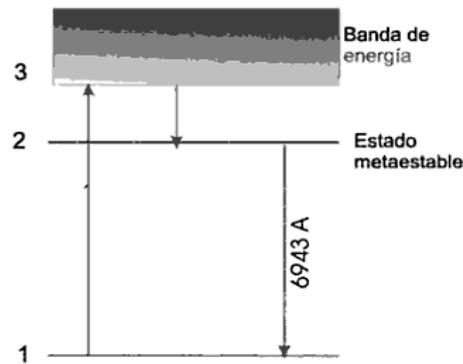


Figura 6. Diagrama de energías del medio activo Cr⁺⁺ del láser de rubí.

Como cavidad óptica resonante, el sistema utiliza un par de espejos en los extremos de la barra que, por lo general, son construidos pulimentando cuidadosamente las secciones transversales opuestas de la barra, las cuales se recubren con una capa de plata, de tal manera que una de las caras resulta prácticamente reflectora y la otra totalmente reflectora; por la capa especular de reflexión parcial se libera el haz de luz amplificado.

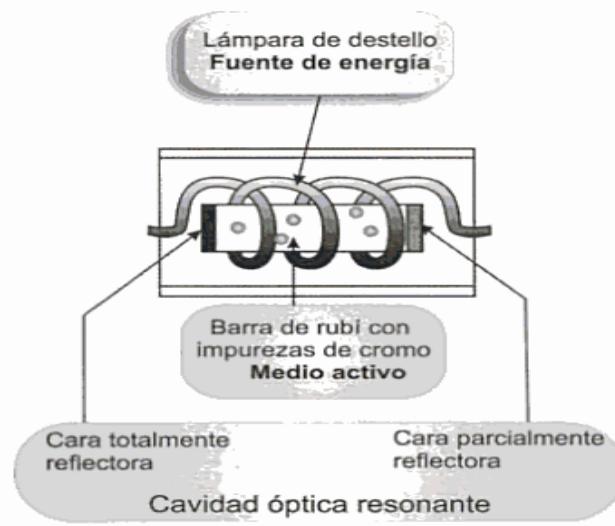


Figura 7. Componentes de láser sólido de rubí: fuente de energía, medio activo y cavidad resonante.

El proceso de emisión de láser se produce de la siguiente manera:

Al recibir energía por destello de la lámpara de xenón (bombeo óptico), los iones de cromo se excitan hacia los estados de la banda de energía superior (transición 1→3



en la figura 6). La gama de frecuencias necesarias para ingresar en la banda de energía de esta región corresponde al intervalo de colores amarillo-verde del espectro. Después de una muy corta duración en la banda ($\approx 10^{-8}$ seg), se produce una transmisión de emisión espontánea hacia los niveles de menor energía 1 y 2. La probabilidad de transición al estado 1 resulta mucho menor, por esta razón la gran mayoría lo hace hacia el estado 2 (transición 3→2 en la figura 6), con un tiempo de permanencia en este estado del orden de los 10^{-3} seg. Si la potencia de la fuente de energía es suficiente, se logra el número de estados excitados en el nivel 2 sea mayor que en el nivel fundamental 1 y, en consecuencia, se consigue la inversión de población entre los niveles 1 y 2.

Conseguida la inversión de población, la siguiente transición ocurre entre el nivel metaestable y el fundamental (transición 2→1 en la figura 6) en la que se emiten fotones con una longitud de onda igual a 6943 Å perteneciente al color rojo del espectro. Estos fotones inducen transiciones sobre los estados excitados en el nivel metaestable de iones vecinos que estimulan en cascada una producción de fotones por emisión estimulada.

Aquellos fotones paralelos o que forman un ángulo pequeño con el eje de la barra de rubí sufren sucesivas reflexiones entre los espejos de la cavidad estimulando a su paso un número cada vez mayor de fotones (en el caso de emisión estimulada, el fotón emitido posee la misma dirección, fase, polarización y frecuencia del fotón incidente). Aquellos fotones que son emitidos en otras direcciones se escapan por los laterales del cristal.

Como el recorrido de los fotones a lo largo del eje de la barra es grande comparado con la sección transversal, se va a producir una cascada de fotones con un sentido preferencial en dirección al eje. Después de un gran número de reflexiones en los espejos, que hacen posible la existencia de un haz luminoso lo suficientemente intenso, una parte escapa hacia el exterior de la cavidad por el espejo semirreflector conformando el rayo láser de salida.

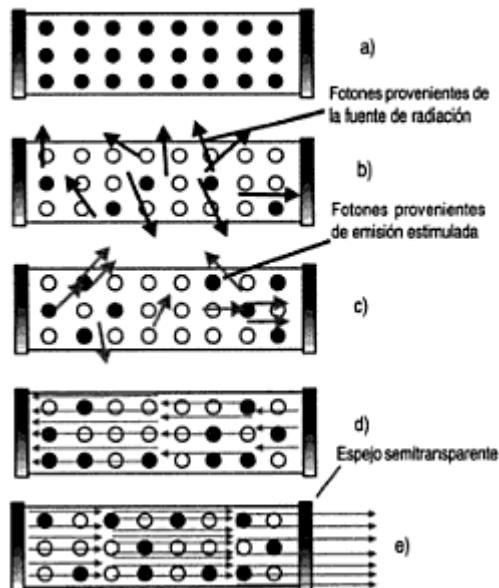


Figura 8. Etapas del láser. a) Los iones de cromo se encuentran en el estado fundamental. b) Se aplica la fuente de excitación, muchos iones pasan a su estado de excitación. c) Algunas emisiones de los iones excitados estimulan emisiones de iones vecinos. d) Los fotones que se mueven en dirección paralela al eje de la barra de rubí se reflejan por los espejos. e) La proporción del haz que se escapa por espejos semirreflector conforma el rayo láser de salida

Para evitar la interferencia destructiva del alto número de trenes de onda originados por las múltiples reflexiones de la luz en la cavidad, se requiere que la distancia entre los espejos L corresponda con un múltiplo de semilongitudes de onda:

$$\lambda = \frac{2L}{N},$$

Con N : número entero positivo que define la oscilación

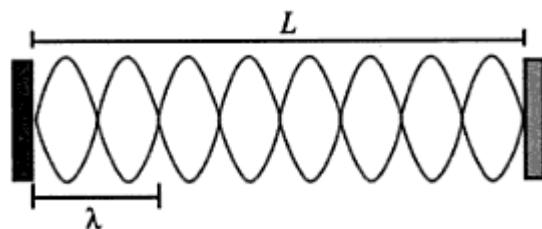


Figura 9. Ondas estacionarias en una cavidad resonante

La condición expuesta genera lo que se denomina una onda estacionaria en una cavidad resonante. En realidad, la monocromaticidad perfecta no se da. La luz emitida presenta una dispersión que se manifiesta en el acho de la líneapectral. De este intervalo de dispersión, la cavidad únicamente selecciona aquellas longitudes de onda que cumplen el requisito de la ecuación anterior.



Debido a que únicamente los fotones con dirección paralela al eje de la barra de rubí son reflejados un gran número de veces, el haz resultante presenta una dispersión angular muy pequeña. Esta propiedad de direccionalidad es determinante, ya que la energía transportada puede ser colectada y enfocada fácilmente sobre áreas muy pequeñas.

Cuando la luz abandona la cavidad, el grado de divergencia básicamente se da por el fenómeno de difracción. El ángulo de divergencia en radianes (en el límite de difracción) está dado por:

$$\theta = \frac{K\lambda}{D},$$

donde K es un factor numérico del orden de la unidad, D es el diámetro de la apertura por donde sale el haz y λ corresponde a la longitud de onda del haz. El ángulo de divergencia para el láser de rubí corresponde aproximadamente a 5mrad.

Los láseres de rubí suelen trabajar en régimen pulsado, siendo su rendimiento inferior al 0.1%. Si opera con un dispositivo *Q-switch* se pueden obtener pulsos de 10 a 50 MW de una duración que oscila entre 10 y 20ns.

Comutación de Q

Si se observa la radiación producida por el láser de rubí, se encuentra una distribución de intensidad totalmente carente de uniformidad, ya que el destello luminoso responsable de la excitación del medio activo, aunque posee una duración muy pequeña, da tiempo suficiente para que ocurran cargas y descargas de la población excitada con emisión estimulada. Esto se traduce en la presencia de una serie de impulsos muy cortos presentes en la emisión láser.

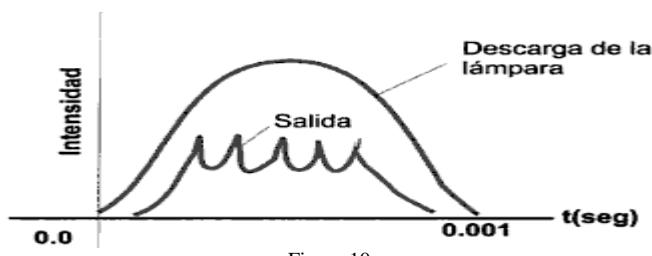


Figura 10.



Para evitar ciclos de inversión de población y descarga de mientras aún la lámpara no ha cesado su emisión (hecho que desfavorece la emisión de un solo destello de gran potencia), se acude a mecanismos capaces de sincronizar la duración del destello con el nivel correspondiente de inversión de población. Uno de estos mecanismos consiste en suprimir uno de los espejos mientras la lámpara de destello este actuando, lo cual no permite que por reflexiones sucesivas de los fotones se produzca la descarga de estados excitados. Para suprimir uno de los espejos de la cavidad con un tiempo de ausencia sincronizado con el destello de la lámpara, se puede hacer uso de un espejo de tipo rotatorio, con frecuencia de rotación sintonizada para que sea perpendicular al eje de la barra de rubí cuando se requiera producir la descarga de la inversión de población; con esto, se consigue un solo pulso de gran intensidad. Este tipo de procedimiento toma el nombre de conmutación en Q activo.

Existe una versión de conmutación en Q pasivo, en la cual se hace uso de la rodamina, cuyas moléculas tienen la propiedad de ser opacas a la luz y hacerse transparentes una vez que la han absorbido. Si se cubre uno de los espejos del láser de rubí con esta sustancia, cuando prende la lámpara, la sustancia absorbe la luz, hecho que no permite que el espejo pueda cumplir su tarea reflectiva y, por tanto, se comporta como si estuviera ausente. Como en el caso anterior, esto no permite que se produzca un pulso de descarga de población de estados excitados del medio activo mientras que la lámpara de aún se encuentra encendida. Y como la sustancia se hace transparente una vez absorbida la luz, el espejo se habilita nuevamente para permitir la operación amplificadora de la cavidad resonante y la emisión de rayo láser. Una vez que se emite el pulso láser, la sustancia se desactiva para volverse nuevamente opaca a la luz, e iniciar el nuevo ciclo

3.1.2.- Láser de neodimio-YAG

Los iones triplemente cargados del neodimio, una de las tierras raras, se utilizan como impurezas en una gran variedad de materiales, teniendo una amplia gama de propiedades útiles. El esquema básico de los cuatro niveles de energía permanece prácticamente inalterado aun en materiales huéspedes tan diversos como el tungstato de calcio cristalino y vidrio óptico. En todos los materiales huéspedes irradia a 1.06 micrones, en el infrarrojo. Este comportamiento tan constante es debido al efecto



pantalla de las capas exteriores cerradas en la estructura electrónica de los iones de las tierras raras. Sin embargo, el huésped tiene influencia en la relativa importancia de las bandas de bombeo.

Un material que tiene mejores propiedades térmicas que el tungstato de calcio cristalino es el granate de ytrio y aluminio impurificado con neodimio (YAG). Los láseres con un medio activo conformado por YAG impurificado con neodimio son de cuatro niveles. El sistema de bombeo es similar al de láser de rubí haciendo uso de una lámpara de destello, y puede funcionar en emisión continua con una longitud de onda aproximada de 1060 nm que corresponde al infrarrojo.

Si las impurezas de neodimio se colocan en vidrio de fosfato y silicato, se pueden obtener barras de un tamaño considerable y con mayor potencia que en el caso YAG, aunque su modo de operación resulta a impulsos. La longitud de onda del láser de neodimio en vidrio es igual a la de neodimio-YAG.

3.2.- Láser de gas

Desde que se propuso el sistema láser con un medio activo gaseoso, son numerosos los tipos de láser fabricados con esta opción. Estos medios gaseosos han resultado ventajosos en cuanto a la coherencia, a la monocromaticidad, a la estabilidad, etc. Una clasificación de este tipo de láseres resulta un poco difícil debido a la gran de sustancias utilizadas, sin embargo, pueden agruparse en tres clases:

* Láseres atómicos, con potencias que pueden alcanzar el orden del vatio. Uno de los láseres más conocidos es el de helio-neón.

* Láseres moleculares, capaces de producir potencias de orden de los megavatios en impulsos muy breves.

* Láseres iónicos, que producen longitudes de onda en el espectro visible ultravioleta con potencias que van desde una fracción de vatio hasta algunos cientos de vatios. Entre los más significativos están los de argón y criptón.

Todos los láseres gaseosos operan con transiciones entre dos niveles de energía de algún átomo o molécula.



3.2.1.- Láser de helio-neón

Este láser fue diseñado por William Bennett, Ali Javan y Donald Herriot en 1961 y se constituyó en el primer láser de gas de emisión continua. Este tipo de dispositivo es bombeado por un proceso de excitación por electrones que consiste en utilizar la energía presente en una descarga eléctrica para producir la inversión de población. Como sustancia activa se utiliza una mezcla de helio-neón (diez partes de helio por una de neón) encerrada en un tubo de vidrio, en el cual se encuentran los electrodos sometidos a una diferencia de potencial del orden de los 2000 a 4000V responsables de producir la descarga eléctrica. El neón experimenta la inversión de población, mientras que el helio, que se excita por la descarga eléctrica, es la sustancia responsable de producir dicha inversión por colisión.

- Estructura del láser de He-Ne

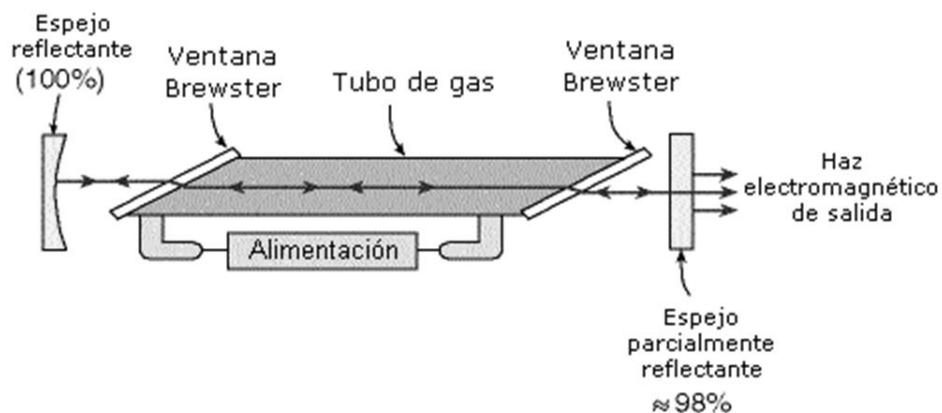


Figura 11.

El láser de Helio Neón tiene tres partes principales:

a) *Tubo de Plasma del Láser de He-Ne:*

El delgado tubo interior tiene un diámetro de alrededor de 2 [mm] y una longitud de decenas de centímetros. El tubo interior está rodeado por un tubo exterior grueso con un diámetro de alrededor de 2.5 [cm] y está sellado por fuera. Los propósitos del tubo exterior son: conseguir una estructura estable que proteja de los movimientos el tubo interior y los espejos del láser; y actuar como gran reserva de gas que reponga el Neón gas que está siendo absorbido por el cátodo.



El proceso láser, que produce la radiación electromagnética, está confinado dentro del tubo interior que está lleno de la mezcla de gases. La mezcla de gases es 85-90% de Helio gas, y 10-15 % de Neón gas, una proporción de 1:6 a 1:10. La presión del gas es 0.01 atmósferas (» 10 [torr]). En los extremos del tubo, los electrodos están conectados a una fuente de potencia de alto voltaje (AC o DC).

b) Cavidad Óptica del Láser de He-Ne:

La cavidad óptica resonante está conformada por dos espejos cóncavos de rubí ajustables, uno de ellos es parcialmente reflector, al igual que en láser de rubí. Para garantizar la resonancia de la luz en la cavidad y habilitar la tarea de amplificadora, la separación entre los espejos debe ser un múltiplo entero de semilongitud de onda. Únicamente aquellas longitudes de onda que satisfagan esta condición serán amplificadas por la cavidad, las restantes van a experimentar fenómenos de interferencia destructiva que las inhabilita para participar en el campo de radiación. Las longitudes de onda que pueden resonar en la cavidad corresponden a los modos longitudinales del láser, mientras que todas las frecuencias resonantes determinan el ancho de banda de la luz láser emitida por el sistema. La existencia de los modos longitudinales en la cavidad restringe la longitud de coherencia del haz de la salida, ya que modos diferentes, aunque producidos en fase, terminan en su recorrido por encontrarse totalmente desfasados, produciéndose de esta manera interferencia destructiva entre ellos.

c) Fuente de Potencia del Láser de He-Ne:

Los láseres de He-Ne que producen una potencia de 1 [mW] (el tipo estándar que usan los estudiantes para experimentos de laboratorio), habitualmente utilizan una fuente de potencia de Alto Voltaje DC (Corriente directa) de 2,000 [Voltios]. El láser necesita una corriente constante (suministro constante de electrones), de forma que se emplea un suministro de corriente estable.

Para iniciar la acción láser, se necesita ionizar el gas dentro del tubo. Esto se produce por un pulso de máximo voltaje de la fuente de potencia. Este voltaje se conoce como Voltaje de Ignición del láser. En el momento del comienzo de la descarga, la resistencia eléctrica del tubo cae de repente a un valor bajo. Esto significa que el voltaje

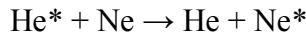


disminuye repentinamente, mientras la corriente aumenta. Por lo tanto, según la ley de Ohm esto es una resistencia eléctrica negativa (Disminuye el voltaje con aumento de la corriente). Para superar este problema, se conecta una Resistencia lastre muy cerca del ánodo, en serie con la fuente de potencia. El papel del resistencia lastre es limitar la corriente a través del tubo cuando la resistencia cae.

-Proceso de bombeo:

En primer lugar, los electrones producidos en la descarga eléctrica colisionan con los átomos de helio, cediendo parte de su energía para producir en el helio transiciones hacia niveles de energía metaestable. Para este caso, se presentan dos niveles posibles y se da la transferencia de energía por resonancia, pues los átomos de helio y neón pueden interactuar. Esto ocurre si la diferencia de energía ΔE entre el estado excita del He y el estado de energía que adquiere el neón es pequeña, ya que la probabilidad de que se produzca esta transferencia depende de la cantidad $e^{-\Delta E / kT}$.

Si He^* es el átomo de helio que ha sido excitado por la descarga eléctrica y Ne^* es el átomo de neón sin excitar, una vez que se produce la colisión entre el helio y el neón, el helio pierde la energía absorbida a costa de la excitación del neón Ne^* .



Supóngase que el átomo de helio ha sido excitado al estado M_1 (figura 11). Al presentarse transferencia de energía por resonancia con un átomo de helio, el neón es excitado a un nivel (que se denotara como 4) con energía igual o cercana al nivel M_1 . De allí puede realizar la transferencia al nivel fundamental pasando antes por los niveles de energía intermedios (nombrados como 2 y 3)

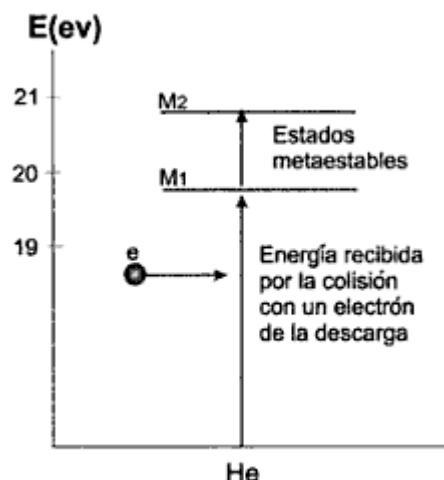


Figura 12. Transiciones en el átomo de helio ocasionadas por colisiones con electrones provenientes de la descarga eléctrica.

Si el átomo de helio se encuentra excitado en el nivel M_2 , los átomos de neón son excitados hasta un nivel superior notado como 6. Desde este estado se pueden realizar varias transiciones, como las indicadas en la figura 12. La transición $6 \rightarrow 3$, que emite una longitud de onda de 632.8 nm (luz roja), corresponde a una de las transiciones más importantes.

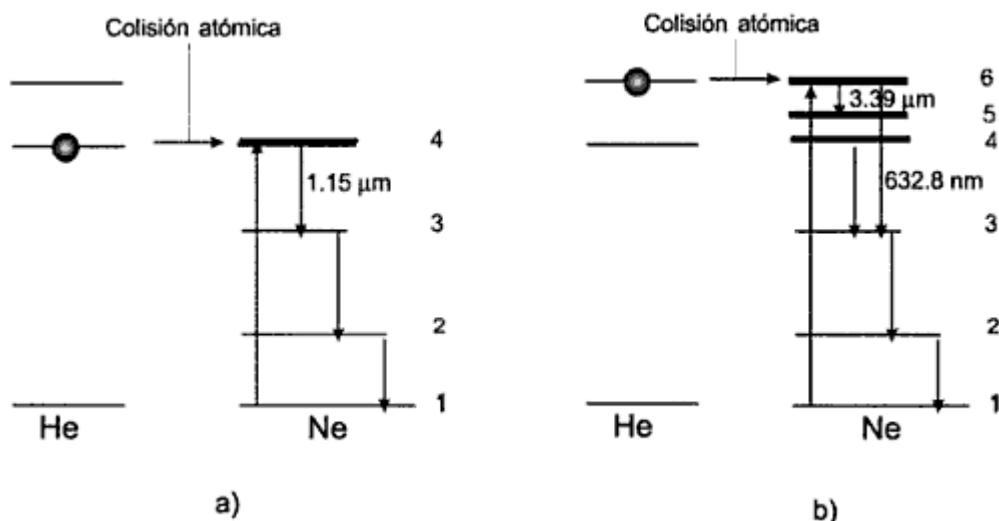


Figura 12. Posibles transiciones que se producen en los átomos de neón excitados: a) Excitación debida a átomos de helio en el estado M_1 . b) Excitación debida a átomos de helio en el estado M_2 .

-Absorción y amplificación en el láser He-Ne:

Mientras la luz se mueve a través del medio activo, tienen lugar dos procesos diferentes sobre la radiación: absorción y amplificación. En un láser de He-Ne estándar, la amplificación producida por el medio activo es del orden del 2%.



Durante un paso a través del medio activo (desde un espejo al otro) la cantidad de radiación dentro, aumenta en un factor de 1.02. Por lo tanto, para conseguir amplificación de luz, todas las pérdidas, incluyendo las colisiones de los átomos excitados con las paredes del tubo de gas, absorción por parte de otras moléculas, etc. deben ser menores del 2%.

El láser de He-Ne es un láser de 4 niveles, por lo que el tiempo de vida del nivel láser inferior debe ser muy corto. En el gas Ne, que es el gas activo del láser, la transición desde el nivel láser inferior no es suficientemente rápida, pero se acelera por las colisiones con las paredes del tubo. Debido a que el número de colisiones con las paredes del tubo aumenta a medida que el tubo se hace más estrecho, la ganancia del láser es inversamente proporcional al radio del tubo. Por lo tanto, el diámetro del tubo de un láser de He-Ne debe ser lo más pequeño posible.

La baja ganancia del medio activo en un láser de He-Ne limita la potencia de salida a potencia baja. En prototipos de laboratorio se consiguen potencias de salida del orden de 100 [mW], pero los láseres comerciales están disponibles sólo en un rango de salida del orden de 0.5-50 miliwattios [mW].

El acoplador de salida del láser de He-Ne es un espejo con un recubrimiento que transmite alrededor del 1 % de la radiación de la salida. Esto significa que la potencia dentro de la cavidad óptica es unas 100 veces mayor que la potencia emitida.

En un láser como el de helio-neón pueden formarse modos transversales TEM_{qp} que son debidos a la existencia de ondas permanentes a lo largo de una línea que forma ángulo con el eje de la cavidad. Los TEM_{qp} hacen referencia a la forma como se distribuyen los vectores de campo eléctrico y magnético a través de la sección transversal del tubo láser, con subíndices que hacen referencia al número de zonas de intensidad nula que producen en dirección horizontal (q) y dirección vertical (p). El modo fundamental TEM_{00} (carece de pasillos) corresponde a una zona única de brillo circular con una irradiancia dependiente de la distancia radial medida desde el centro de la zona, y que puede ser modelada mediante un comportamiento de tipo gaussiano.

$$I(R) \approx e^{-r^2}$$



Cuando el láser de He-Ne se utiliza para holografía, el modo TEM_{00} resulta ser el más adecuado. Se trata de un modo de mínima divergencia del haz, de enfoque óptimo en una zona de diámetro reducido, además de poseer una coherencia espacial perfecta.

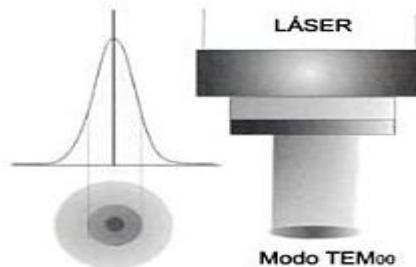


Figura 13. Distribución gaussiana de la intensidad del modo TEM_{00} .

El láser de helio-neón es de reducida potencia ya que opera entre 1 y 50 mW, aunque tiene la ventaja de emitir en forma continua por alguna horas. La longitud de coherencia típica es del orden de los 20-30 cm.

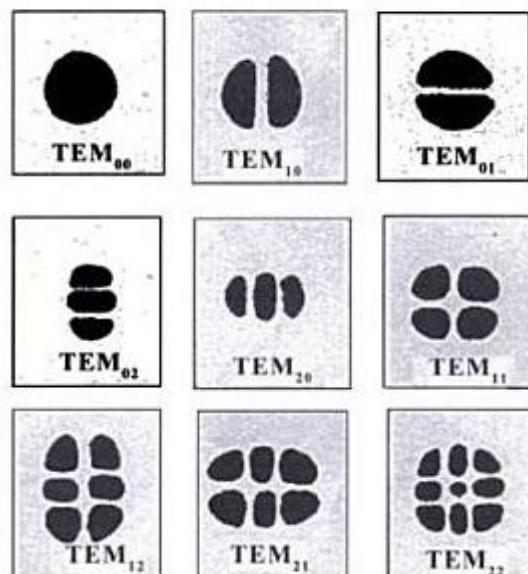


Figura 14. Algunos modos transversales para el láser. Los subíndices indican el número de pasillos en dirección horizontal y vertical, respectivamente.



3.2.2.- Láser de CO₂

El láser de dióxido de carbono opera con un gas de moléculas de CO₂ que son excitadas por colisión resonante por moléculas de N₂ (gas que facilita la inversión de población). Para la emisión láser, los estados de excitación del CO₂ son de tipo vibracional.

El mecanismo para producir luz láser opera de la siguiente manera: por descarga eléctrica, las moléculas de N₂ absorben energía que permite que se produzcan excitaciones, en particular a un nivel de energía muy similar al nivel 001 de la molécula de CO₂ (figura 15). Por colisión resonante entre moléculas de N₂ y CO₂, se logra excitar las moléculas de CO₂ al mencionado nivel 001. De este nivel, se pueden producir dos transiciones láser: una al nivel 100 con una longitud de onda de 10600nm (transición más común) y otra al nivel 020 con longitud de onda de 9600nm, emisiones que corresponden al infrarrojo. El láser de CO₂ básicamente está caracterizado por la longitud de onda de 10600nm debido a que este tipo de radiación resulta la dominante.

Para evitar la permanencia sensible en el nivel 010, lo cual resulta indeseable para la inversión de población, se hace uso de las moléculas de He que contribuyen a vaciar dicho nivel y al enfriamiento de los gases, debido a su alta conductividad térmica.

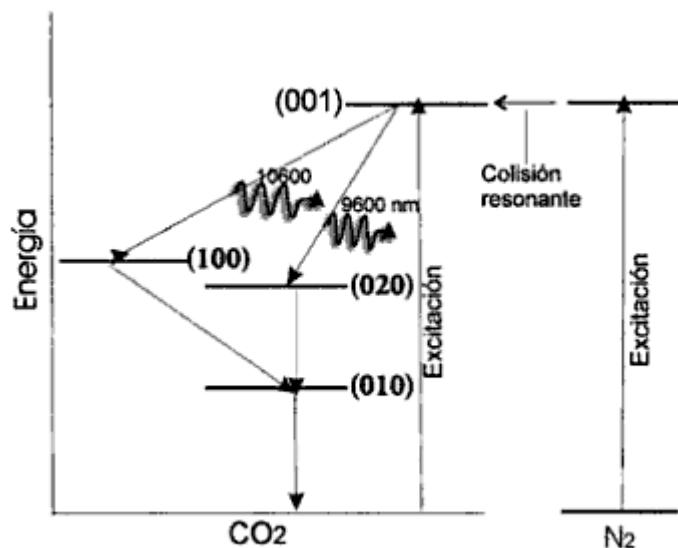


Figura 15. Diagrama de los niveles de energía de las molécula de CO₂ y N₂.



Los gases están contenidos en un tubo de vidrio de alta resistencia térmica, en donde el flujo axial de gas se mantiene a lo largo del tubo. Dos espejos en sus extremos conforman la cavidad resonante, uno totalmente reflector y el otro solo parcialmente (85%).

En otro tipo de láser de CO₂, denominado de tubo sencillo, el gas se encuentra en un depósito que rodea al tubo de descarga, con los espejos situados en el exterior de dicho tubo. El láser de CO₂ puede emitir en modo continuo o en modo pulsante, con un rango de potencia de salida que va desde algunas fracciones de vatios hasta los miles de vatios. La siguiente imagen muestra los componentes fundamentales de un láser de CO₂.

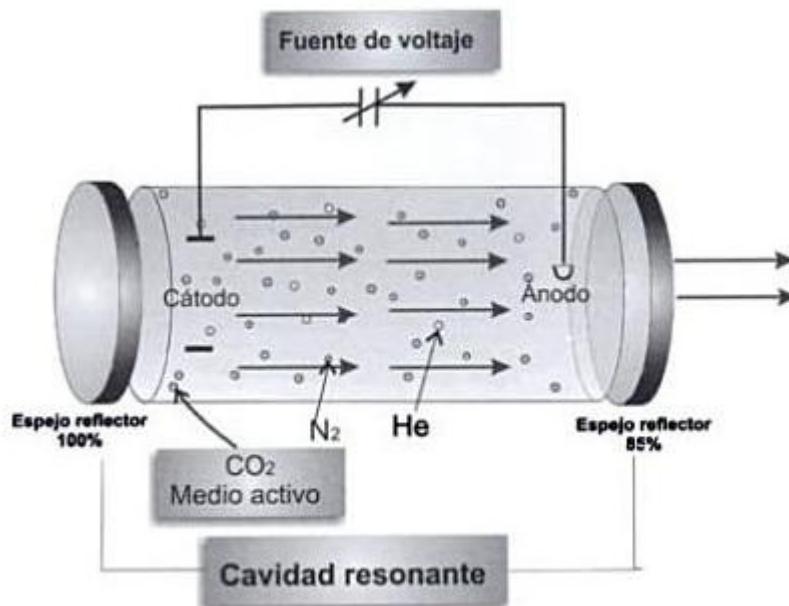


Figura 16. Componentes fundamentales del láser de CO₂.

La fuente de energía está conformada por una fuente de voltaje necesaria para producir la descarga eléctrica responsable de la excitación de las moléculas de N₂. La sustancia activa es una mezcla de gas de CO₂ con N₂, en el primero se produce la inversión de población. La cavidad resonante conformada por dos espejos total y parcialmente reflectores colocados en los extremos de un tubo de vidrio resistente al calor.



3.3.- Láser semiconductor

Los láseres semiconductores corresponden simplemente a diodos semiconductores capaces de emitir luz coherente cuando se excitan con una corriente eléctrica. Aunque su monocromaticidad no es tan pura como en otros láseres, resultan significativamente importantes en la industria de las comunicaciones, optoelectrónica, microelectrónica, computación, entre otras aplicaciones.

El primer estudio teórico sobre la utilización de semiconductores para la realización de un láser fue realizado por Basov en 1961. En 1962, R. Hall construyó el primero de estos dispositivos con una temperatura de operación de -196° C, limitación que fue superada en 1970, cuando se fabricó el primer láser semiconductor que podía trabajar a temperatura ambiente.

3.3.1.- Funcionamiento y características principales.

- Emisión y absorción de radiación en la unión P-N

En un material cristalino semiconductor se pueden producir tres procesos de carácter óptico: absorción espontánea de radiación, emisión espontánea y emisión estimulada. Cuando se produce la absorción espontánea, un portador de carga excitado por un fotón cuya energía supera el gap entre la banda de valencia y la de excitación, Ahora, si un electrón es el portador excitado en la banda de conducción, después de un tiempo de vida media muy pequeño decae a la banda de valencia, eliminando un hueco y radiando un fotón con una energía correspondiente a la de transición. Para el caso de semiconductores extrínsecos dopados con impurezas, también pueden tener lugar transiciones entre las bandas referidas y los niveles de energía de impurezas, o entre estos niveles de impurezas.

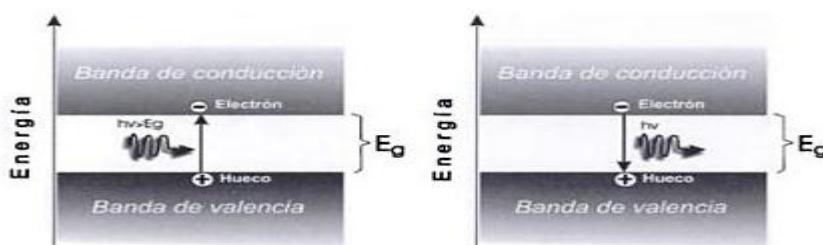


Figura 17. Proceso de absorción espontánea de radiación.



Si la transición espontánea toma lugar entre estados correspondientes al valor mínimo de la banda de conducción de energía E_c y el valor máximo de la banda de valencia E_v separados por una energía $E_g = E_c + E_v$ y ya que la rapidez del fotón puede escribirse como $c = \lambda v$ y su energía como $E = hv$, que es igual a E_g , la longitud de onda del fotón emitido por la transición del gap puede ser obtenida de la expresión:

$$\lambda_g = \frac{h_g c}{E_g}.$$

Cuando un electrón ha sido excitado y se encuentra en la banda de conducción, un fotón puede inducir su transición a la banda de valencia generándose la emisión de un fotón de la misma frecuencia y fase del fotón incidente. Este tipo de radiación se denomina radiación estimulada. A partir de este tipo de radiación se va concretar la posibilidad de producir radiación láser con el uso de materiales semiconductores.

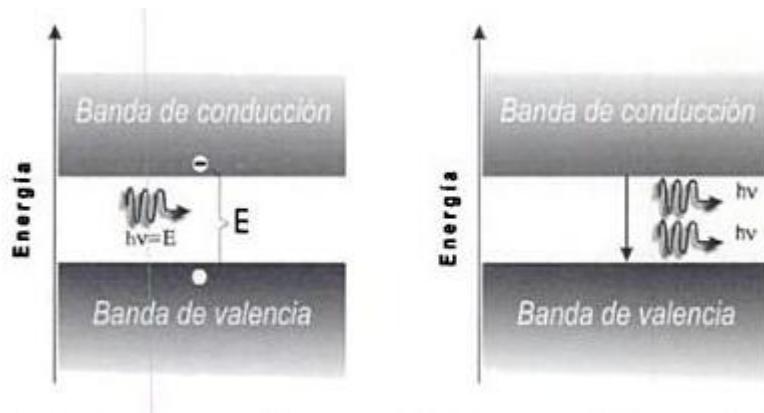


Figura 18. Emisión estimulada.

- Inyección de portadores minoritarios

El punto de partida para la configuración de un láser semiconductor es una unión P-N, la cual se encuentra conformada por un material semiconductor dopado con impurezas receptoras o donadoras que conforman una región de transición de extraordinarias ventajas para poder diseñar un dispositivo que convierta energía eléctrica en lumínica. Cuando la unión P-N se polariza inversamente, la barrera de potencial de contacto se incrementa impidiendo la inyección de portadores de carga de una región a otra. Cuando la unión P-N se polariza directamente, se produce la reducción de la barrera de potencial, favoreciendo el flujo de portadores de carga



negativa de la región N a la región P y de huecos de la región P a la región N. Como en la región P los portadores con carga negativa son minoritarios se habla de inyección de portadores minoritarios. Este incremento de portadores minoritarios en P produce una recombinación de huecos dando lugar, en consecuencia, a emisión de radiación. Algo similar ocurre con el flujo de huecos de la región P a N, en donde los huecos son minoritarios.

En un diodo emisor de luz no todos los portadores minoritarios se recombinan de la forma indicada y, por tanto, no se puede asociar a cada portador que fluye por la unión un fotón emitido. Se define la eficiencia del dispositivo en términos de eficiencia cuántica, la cual está dada como la relación entre la tasa de emisión de fotones y la tasa de electrones suministrados. El número de recombinaciones capaces de radiar luz resulta proporcional a la tasa de inyección de portadores y, por tanto, de la corriente. La relación entre la corriente y el voltaje en una unión semiconductora se expresa como:

$$I = I_0 e^{eV/kT} - 1$$

Esta ecuación permite determinar la corriente a través de la unión bajo la acción de tensiones directas $V > 0$ e inversas $V < 0$. Ahora, la corriente a través de la unión tiene como componentes a la corriente de difusión de portadores minoritarios negativos (electrones), a la corriente de difusión de portadores minoritarios positivos (huecos) y a la corriente de recombinación en la zona de transición. Las densidades de corriente para estos tres casos se pueden expresar como:

$$J_n = \frac{eD_n n_p}{L_n} (e^{eV/kT} - 1)$$

$$J_p = \frac{eD_p p_n}{L_p} (e^{eV/kT} - 1)$$

$$J_r = \frac{en_i W}{2\tau} (e^{eV/kT} - 1)$$

en donde D_n y D_p corresponden a las constantes de difusión de electrones y huecos en las regiones p y n; n_p y p_n corresponden a las densidades de electrones y huecos en la regiones p y n, respectivamente; L_n y L_p son las longitudes de difusión para electrones y huecos; W es el ancho de transición; τ , el tiempo de recombinación en la región de ancho W ; n_i es la concentración intrínseca de electrones en la banda de conducción. A



partir de estas densidades de corrientes, se hace posible definir la eficiencia de inyección: $\xi = \frac{J_n}{J_n + J_p + J_r}$ la cual corresponde a la razón entre la densidad de corriente de difusión de portadores minoritarios negativos y la densidad de corriente total del diodo.

- Inversión de población

Para lograr que un diodo produzca luz láser, se requiere, primero de todo, el medio activo, que en este caso va a ser la unión P-N; en segundo lugar, una inversión de población de estados que permita la producción de radiación estimulada. En un diodo común emisor (LED), la emisión es básicamente espontánea. La condición de inversión debe darse cuando se logre producir en una región del dispositivo una gran cantidad de electrones excitados y huecos en la banda de conducción con los cuales dichos electrones puedan recombinarse en procesos radiactivos. El uso de la unión P-N drásticamente dopada con impurezas que garantizan una inversión de población por inyección de portadores minoritarios. Esto permite que el nivel de Fermi se ubique dentro de las bandas de valencia y de conducción de las regiones n y p.

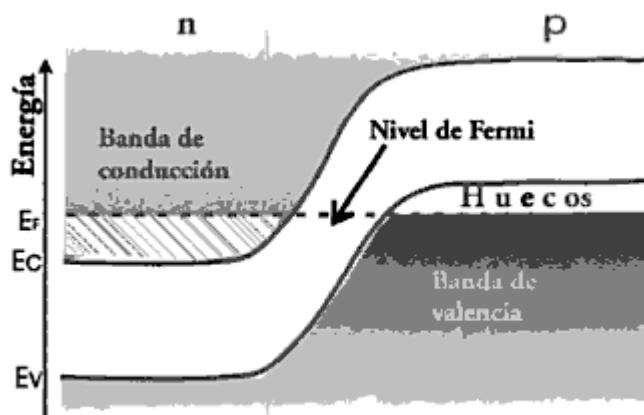


Figura 19. Diodo dopado fuertemente para permitir que el nivel de Fermi se sitúe dentro de las bandas de valencia y conducción

Si este tipo de diodo de gran dopado se polariza directamente, electrones y huecos son inyectados a través de la unión en un número suficiente para producir la



inversión de población. Esta inversión se produce en una zona muy delgada, correspondiente a la denominada región activa.

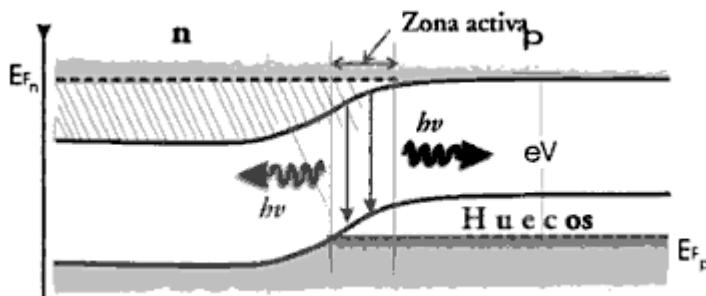


Figura 20. Al polarizar directamente el diodo se produce una inyección de portadores minoritarios suficientes para liberar la inversión de población

En la región activa, existen dos niveles de Fermi, uno en la banda de conducción y otro en la banda de valencia. El nivel de Fermi en la banda de conducción E_{Fc} indica un 50% de ocupación de estados por electrón en dicha banda, mientras que el nivel de fermi en la banda de valencia E_{Fv} indica un 50% de ocupación por huecos en la banda de conducción.

La producción de inversión de población se podría conseguir a través de bombeo óptico, pero con una tensión de polarización de muy bajo valor se puede satisfacer dicha condición, una simple fuente de continua de voltaje conectada al diodo semiconductor es suficiente para la tarea de inversión de población. Para conseguir una cavidad resonante necesaria para la amplificación de la luz producida en la región activa y facilitar la operación del dispositivo, se utilizan dos de las caras perpendiculares a la unión, las cuales, si son paralelas y planas, se convierten en una especie de espejos semitransparentes para la luz que se produce en el interior de la región activa. Así una proporción de los fotones generados en la región activa que incidan sobre estas caras van a ser reflejados nuevamente al interior de la región para contribuir con la emisión estimulada de nuevos fotones con la misma fase y energía. Aquella porción de radiación que se escapa de la región a través de caras consideradas va a conformar el haz de radiación de láser.



- Cavidad resonante y modos de oscilación

La condición de resonancia establece que si la longitud óptica corresponde a un número entero de semilongitud de onda de la luz, se produce interferencia constructiva en la cavidad:

$$\tau = N \frac{\lambda}{2} \text{ con } N=1,2\dots$$

donde λ es la longitud de onda en el espacio libre.

La zona activa del diodo, con caras perpendiculares a la unión perfectamente paralelas y planas, puede ser considerada como un interferómetro Fabry-Perot (dispositivo utilizado para medir longitudes de onda). Esto determina que ciertas longitudes de onda pueden resonar (modos normales de oscilación para la cavidad) y, por tanto, que la radiación láser producida esté constituida básicamente por longitudes que satisfagan la condición de resonancia de la ecuación (modos axiales).

Para que la cavidad pueda únicamente obtener pocos modos, aspecto que contribuiría en forma definitiva a la monocromaticidad de la luz que abandona la cavidad, se necesitaría que las dimensiones de la cavidad (distancia entre espejos) fuesen del mismo orden de magnitud de la longitud de la onda; sin embargo, esto se hace de difícil cumplimiento para el caso de radiación óptica, pues la longitudes de onda exigirían longitudes de la cavidad de tamaño tan reducido que la cantidad de material activo no sería suficiente para la operación del dispositivo.

Para la cavidad resonante cerrada con dimensiones mucho mayores a la longitud de onda, el número de modos resonantes por unidad de banda de frecuencia y por unidad de volumen puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$\rho(v) = \frac{8\pi}{c^3} v^3$$

expresión que permite obtener el número de modos que llenan el ancho de la línea espectral correspondiente a una determina transición atómica. Para frecuencias ópticas típicas, el número de modos por cm^3 resulta de orden de 10^9 , cantidad importante que



exige que se acuda a procedimientos adecuados para suprimir una gran parte de ellos sin sacrificar la eficiencia de operación del láser. Una forma para reducir el número de modos es emplear cavidades conformadas por dos espejos, estas cavidades mantienen únicamente los modos que no experimenten absorción de las partes no reflectoras o las que no satisfacen la condición de resonancia.

- Coeficiente de ganancia

Como la luz dentro de la zona activa tiene que atravesar un medio material, se va a producir un proceso de absorción de la radiación que resulta de gran importancia cuando se evalúa la operación de láser. Para un haz monocromático que transita por un medio absorbente que se asume heterogéneo, se satisface la ecuación $I = I_0 e^{-ar}$. El coeficiente de absorción a puede ser evaluado con algún detalle bajo la suposición de que la absorción de la luz se da para electrones que al absorberla realizan la transición entre los niveles $E_i \rightarrow E_f$. El grado de absorción dependerá del número de átomos N_i con electrones en el estado E_i y del número de átomos N_f con electrones en el estado E_f . La absorción sería máxima si el número N_f fuese nulo, y sería mínima si N_i fuese nulo; esto provocaría una elevada probabilidad de emisión estimulada. Si g_i y g_f , corresponde a la degeneración del nivel de energía i y f , respectivamente, B_{fi} al coeficiente de Einstein, v la frecuencia de transición entre los niveles considerados y n_f el índice de refracción del medio, el coeficiente de refracción puede ser escrito como:

$$a = \left(\frac{g_f}{g_i} N_i - N_f \right) \frac{B_{fi} h v n_f}{c}$$

que indica una dependencia del coeficiente de absorción con la diferencia de población de electrones en los dos niveles de energía supuesto E_i y E_f . Ahora, en equilibrio térmico $\frac{g_f}{g_i} N_i > N_f$, por lo tanto, $a > 0$, con lo que la intensidad de radiación se ve reducida exponencialmente con la distancia de propagación dentro del medio. Con la inversión de población, se consigue que $\frac{g_f}{g_i} N_i < N_f$, y esto trae como consecuencia que el coeficiente de absorción sea positivo y, por lo tanto, la ecuación para la intensidad de la radiación del medio quede escrita como



$$I = I_0 e^{br}$$
$$\text{con } b = \left(N_f - \frac{g_f}{g_i} N_i \right)^{\frac{B_f i h v n_f}{c}}$$

La constante b se califica como un coeficiente de ganancia

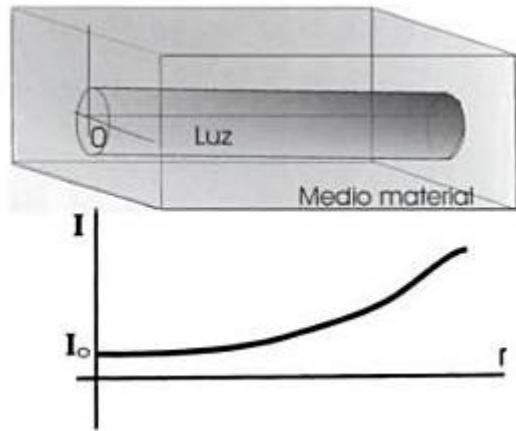


Figura 21. La intensidad de la luz en el medio material experimental un crecimiento exponencial cuando el coeficiente a resulta positivo

- Pérdidas y umbral de densidad de corriente

Para alcanzar un estado de emisión en modo continuo del láser, se requiere que la tasa de amplificación esté balanceada por la tasa de pérdidas. Se necesita una ganancia suficiente para contrarrestar las pérdidas. El umbral de ganancia hace referencia a la mínima inversión de población requerida para que se dé la acción del láser.

Las pérdidas básicamente son debidas a:

1. La absorción de luz en el medio por transiciones diferentes a las requeridas para inversión de población.
2. Dispersión de luz por los espejos de la cavidad.
3. Como las superficies reflectoras son parcialmente transmisoras, cierta cantidad de luz abandona la cavidad por transmisión. Por supuesto, la salida láser de la cavidad se debe al hecho de contar con superficies parcialmente reflectoras.
4. Dispersión de la luz ocasionada por inhomogeneidades en el medio.



Sea γ el coeficiente que cuantifica las correspondientes pérdidas (excepto por transmisión). Para la ecuación que determina el comportamiento de la intensidad de la luz con la distancia, se hace necesario incluir este coeficiente:

$$I = I_0 e^{(b-\gamma)r}$$

Si R_1 y R_2 corresponden a reflectancias de los espejos separados una distancia L , la intensidad de la luz se modifica al transitar de un espejo al otro en la cantidad:

$$I(r = L) = I_0 e^{(b-\gamma)L}$$

Después de que la luz se ha reflejado, la radianza se ha convertido en $I(r=L)R_2$. Si se define la razón entre la radianza final después de un viaje completo, ida y vuelta entre los espejos, y la radianza inicial, se obtiene la ganancia del viaje completo por la cavidad, la cual está dada por:

$$G = R_1 R_2 e^{2(b-\gamma)L}$$

Si $G > 1$, tendrá lugar la amplificación de la luz en la cavidad del láser y, por supuesto, la generación de oscilaciones resonantes. Si $G < 1$, no se pueden producir dichas oscilaciones y el láser no podrá entrar en fase activa. Se identifica una condición umbral, la cual se da para $G = 1$ y corresponde con un coeficiente de ganancia umbral b_u tal que:

$$R_1 R_2 e^{2(b-\gamma)L} = 1$$

en donde al despejar se b_u se obtienen:

$$b_u = \gamma + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

Del valor que tome la ganancia umbral y de la eficiencia cuántica interna dependerá del umbral de densidad de corriente que se requiere para que se dé la transmisión de emisión espontánea a estimulada en la cavidad resonante:



$$J_u \sim b_u$$

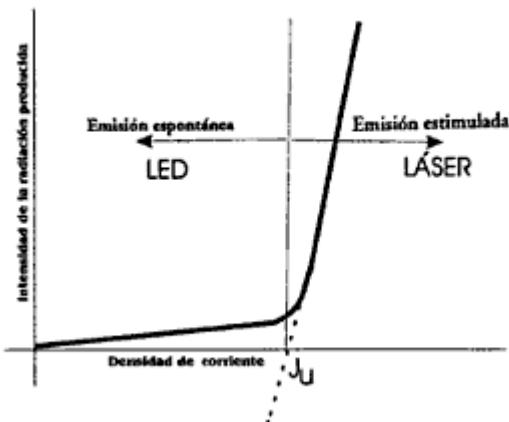


Figura 22. Dependencia funcional entre la corriente en el diodo y la intensidad de la radiación producida en la cavidad. Para corrientes umbrales superiores a J_u se produce emisión estimulada

- Modulación

Ya que la correspondiente salida óptica del láser semiconductor depende de la densidad de corriente, esto permite que la modulación del haz láser se pueda lograr modulando la corriente que se le suministra al dispositivo.

-Dependencia de la temperatura con la corriente umbral

Para el caso del láser semiconductor, la densidad de intensidad umbral presenta una gran dependencia a la temperatura. En el caso de GaAs para valores por debajo de los 30°K, las variaciones de la corriente son relativamente leves, si se superan los 100°K, la densidad de corriente umbral se hace drásticamente creciente con la temperatura.

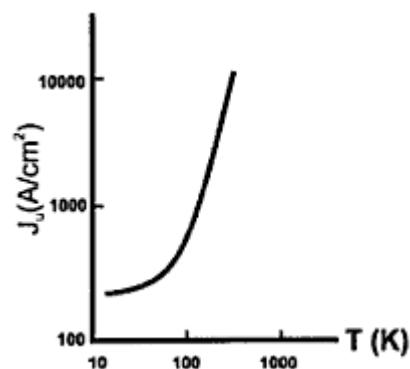


Figura 23. Dependencia de la densidad umbral de corriente con la temperatura en el láser semiconductor GaAs.



Esta dependencia que presenta el umbral de densidad de corriente con la temperatura obliga a considerar la longitud de onda emitida por el dispositivo igualmente dependiente con la temperatura a la que está operando.

3.3.2.- Láser de heteroestructura

El láser de homoestructura (una simple unión p-n), primero de los dispositivos semiconductores fabricados para producir radiación coherente, requiere para su operación altos umbrales de densidad de corriente (25 a 100KA/cm^2) para producir emisión estimulada (debido a grandes valores del parámetro γ). Esto obliga a mejorar el sistema de una unión simple para hacer más funcional el dispositivo.

Para reducir el umbral de densidad de corriente se pueden utilizar las denominadas heteroestructuras (láser de heterounión), que básicamente cumplen con la tarea de conseguir que los procesos que dan origen a la producción del láser ocurran en un volumen lo más reducido posible. Por ejemplo, si se hace fluir la corriente a través de un canal estrecho, se logran densidades de corrientes que favorecen valores bajos de umbral. Por otra parte, si se limitan las regiones donde se dan las recombinaciones electrón-hueco, el resultado será una densidad alta de fotones emitidos; en consecuencia, se aumenta notablemente la emisión estimulada. Finalmente, si se logra canalizar la luz en una región bien delgada, se mejorará notablemente el comportamiento amplificador que se debe tener dentro de la cavidad resonante para alcanzar los valores de intensidad característicos de este tipo de dispositivos.

La geometría de la heteroestructura se fundamenta en el uso de ciertos materiales que hacen que la capa activa quede en regiones donde la separación de las bandas sea grande (la capa activa se rodea con materiales con grandes separaciones entre las bandas de valencia y conducción e índices de refracción menores al de la capa activa, conformando lo que se denomina una heteroestructura encerrada). Esto permite la existencia de barreras energéticas que impiden que los portadores de carga se difundan fuera de la capa activa, contribuyendo con el propósito de restringir el volumen donde se producen estos fenómenos. Esto favorece que la luz no se escape fácilmente de la zona y pueda estimular con mayor eficiencia los electrones excitados.

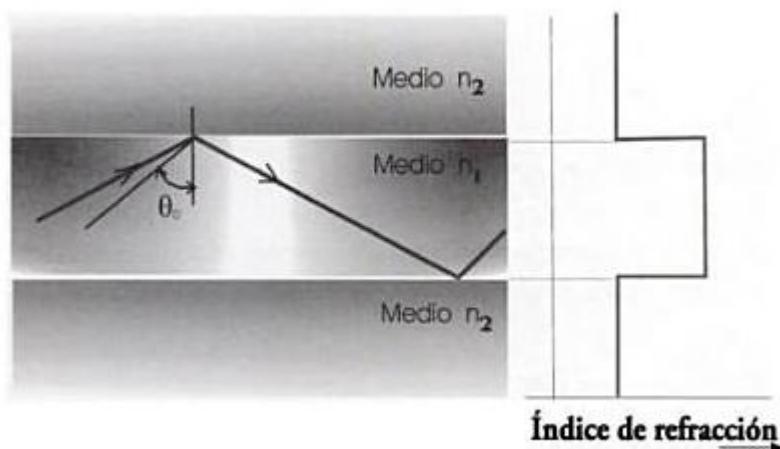


Figura 24. Reflexión total.

Una heteroestructura podría estar formada por una capa de GaAs colocada entre dos capas de un compuesto con un gap de energía superior al del GaAs, tal como el compuesto ternario $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (en el GaAs se reemplaza una fracción del sitio de la red por otro elemento compuesto. Así, una fracción ‘x’ de átomos de Ga por átomos de aluminio: $\text{Ga}_{x-1}\text{Al}_x\text{As}$ (compuesto ternario). El nuevo semiconductor posee la misma constante de red, pero se incrementa el gap de energía, lo cual depende de ‘x’.
 $E_g=1.424+1.247x$, con $0 < x < 0.45$), material que posee un índice bajo de refracción.

Supóngase el caso de una homoestructura n-p que conforma un diodo láser GaAs. En este caso, el tipo de material, con dos tipos diferentes de dopantes, que se utiliza para la conformación de la unión posee índices de refracción parecidos entre sí, produciendo un perfil uniforme para la unión y las regiones p-n. En estas condiciones, el confinamiento para la luz no se beneficia por reflexión total y, por tanto, la eficiencia del dispositivo no resulta del todo favorecida.

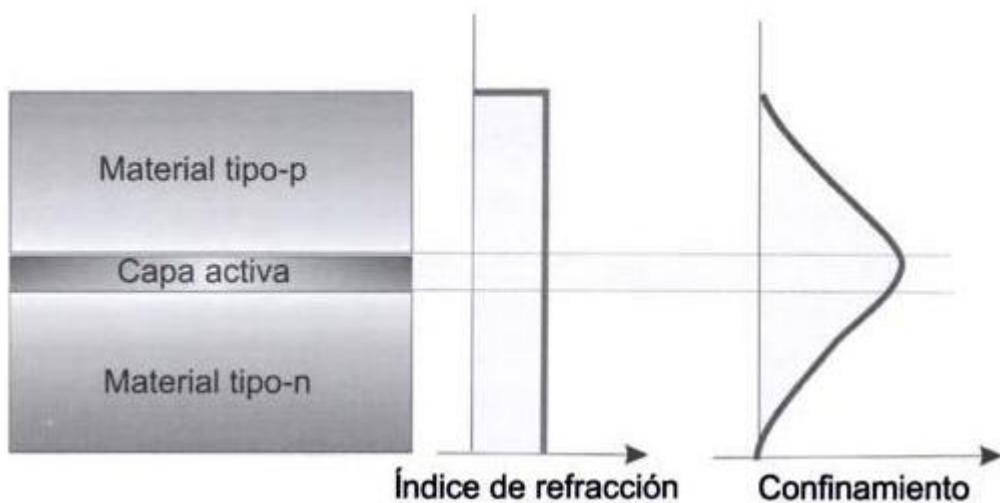


Figura 25. El perfil de índice de refracción no favorece el confinamiento de la región activa.

Para el caso de una heteroestructura, las capas que lo conforman poseen distintos índices de refracción que producen un perfil que favorece una propagación de la luz similar a la obtenida para el caso de fibra óptica.

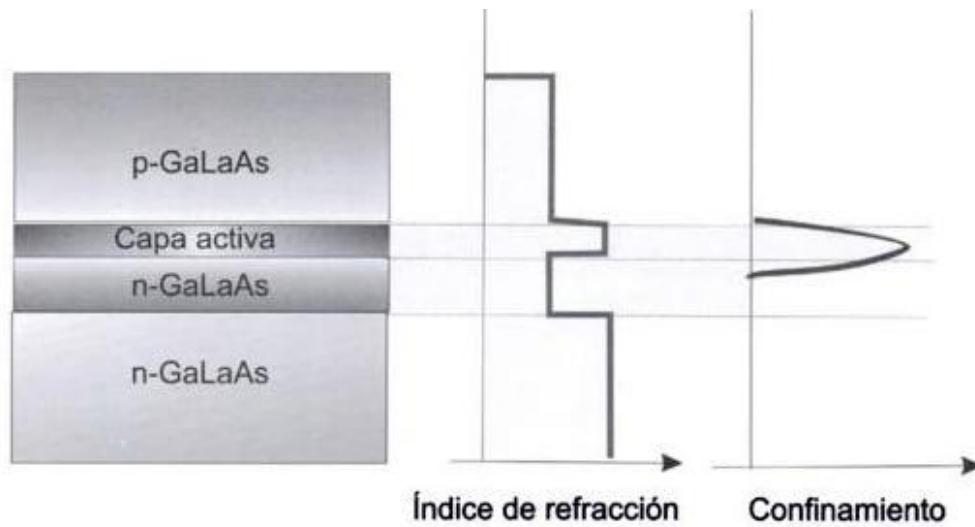


Figura 26. El perfil del índice de refracción mejora sustancialmente el confinamiento.

La siguiente figura muestra el diagrama de bandas de la heteroestructura doble del láser de GaAs. Los electrones inyectados desde el material tipo n ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) son confinados en una región (GaAs) rodeada con valores de gap entre la banda de valencia mayores-barreras de potencial-, restringiendo el volumen de confinamiento de los electrones. La recombinación electrón-hueco que genera los fotones requeridos se da para un gap de energía $E_g(\text{GaAs})$.

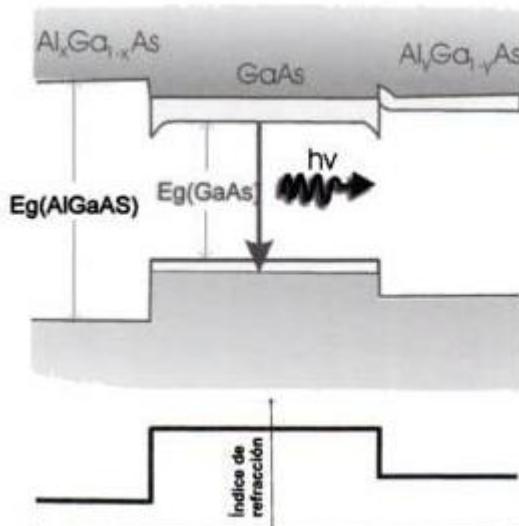


Figura 27. Banda de energía para un láser de heterounión de GaAs.

-Divergencia del haz del láser semiconductor

Para el láser semiconductor, la geometría de la zona activa con su reducida área de emisión ($\sim \mu\text{m}^2$) generan un haz que presenta una dispersión importante ($\sim 40^\circ$). Por lo tanto, se hace necesario el uso de sistemas ópticos apropiados para la focalización del haz.

3.3.3.- Láser de pozo cuántico

Una de las condiciones a satisfacer en los láseres semiconductores está relacionada con la consecución de reducidas dimensiones en la zona activa donde se producen las recombinaciones de portadores de carga y la correspondiente emisión estimulada.

Si se dispone de una capa activa extremadamente delgada, por debajo de la décima de micrómetro, la luz generada en esta capa experimentará fenómenos de difracción que producen como consecuencia fugas de luz de la zona, obligando al umbral de densidad de corriente a aumentar su valor, esto es problemático.

Por otra parte, una zona tan delgada trae ventajas, pues una reducción en la zona de confinamiento para los portadores de carga produce mejoras en la densidad de corriente, beneficiando la operación del dispositivo.



Para lograr reducir las dimensiones de la capa activa sin que se perjudique el dispositivo por pérdidas de radiación se fabrica una región activa delgada (10nm) para los portadores de carga, otra más gruesa (100nm) para la luz generada, permitiéndose un solapamiento entre las dos regiones para garantizar que la luz pueda cumplir su papel de interactuar para estimular las transiciones electrónicas. La región delgada de confinamiento para los electrones y huecos, que por su reducido espesor tiene un tratamiento cuántico, toma el nombre de pozo cuántico, mientras que la región para luz, la cual contiene en su parte central la región delgada, se denomina región de confinamiento separada. En el pozo cuántico se genera luz por la recombinación de electrones y huecos, mientras que en la región de confinamiento separada dicha luz es atrapada y guiada. A pesar de que la luz se genera en la capa fina donde existe recombinación, para luego quedar confinada en la capa separada, se garantiza que dicha capa fina, al estar localizada en el centro de la capa separada, se mantenga expuesta a la luz, condición necesaria para mantener la operación del láser, pues se requieren suficientes fotones para mantener la emisión estimulada.

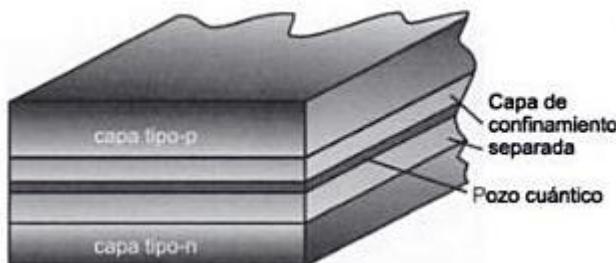


Figura 28.Esquema de una capa de confinamiento separada encargada de confinar la luz.

Para obtener un pozo cuántico, se requiere intercambiar una capa con un gap de energía de un ancho pequeño entre capas más gruesas con gaps mayores. Los electrones poseen energía suficiente para permanecer en la banda de conducción del material que conforma la capa delgada con gap de energía pequeño, pero no poseen la energía necesaria para poder ingresar en la capa de mayor gap, lo que garantiza su confinamiento.

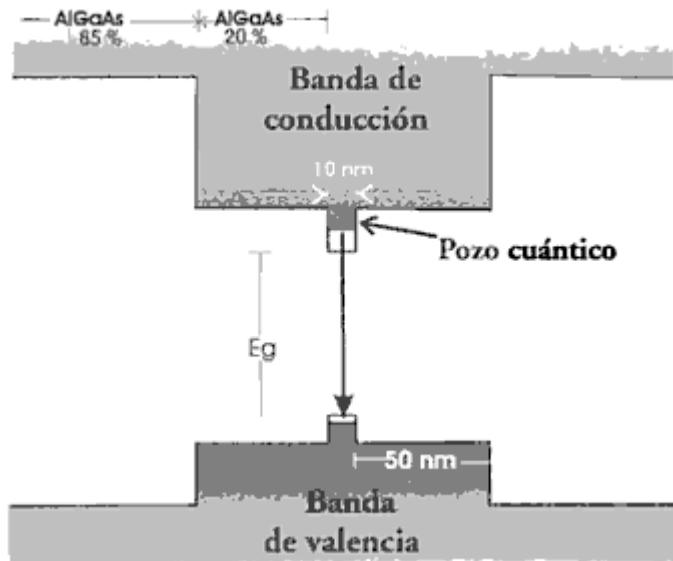


Figura 29. Formación de un pozo cuántico de 10 nm, el cual se consigue colocando una delgada capa de AlGa entre dos capas de AlGaAs al 20%, las cuales a la vez están entre dos capas de AlGaAs al 85%. El gap de energía del pozo cuántico es menor que el de las capas de AlGaAs al 20%, mientras que estas últimas poseen un gap menor de las capas de AlGaAs al 85%.

Al ser la zona activa una capa muy delgada, los electrones de dicha zona se encuentran en un confinamiento bidimensional, a diferencia del caso en el cual la zona no es tan delgada y permite un confinamiento tridimensional. La diferencia entre estos dos confinamientos puede ser apreciada si se analiza la forma como se distribuye la densidad de estados de energía para los electrones.

Los electrones que alcanzan la banda de conducción ocupan una serie de estados en la banda que se van llenando sucesivamente desde los valores más bajos permitidos. Algo similar ocurre para los huecos en la banda de valencia. Cuando la región de confinamiento es mucho mayor que la longitud de onda de de Broglie (2.5 picómetros), es posible tratar los estados de los portadores en términos de variables continuas. En estas condiciones, la densidad de estados es función de la energía tiene la forma:

$$\rho(E)dE = \frac{1}{2\pi^2} \sqrt{(2m^*/\hbar^2)^3} \sqrt{E} dE$$

con m^* : masa efectiva de cada portador.

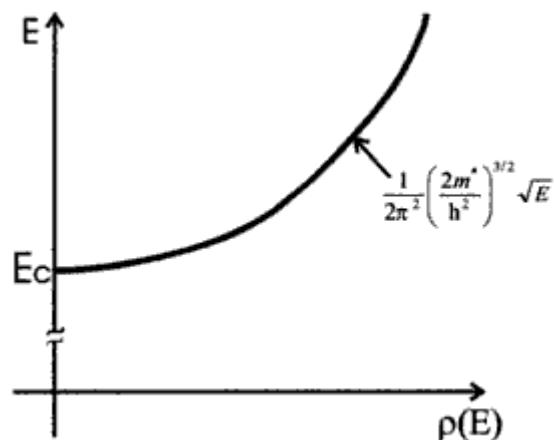


Figura 30. Densidad de estados para una región de confinamiento tridimensional.

Para el caso en que una de las dimensiones se hace lo suficientemente pequeña para que se pueda considerar bidimensional, caso del pozo cuántico, la densidad de estados en términos de energía cambia considerablemente, esto en respuesta a la cuantización que experimenta la cantidad de movimiento en la dirección en la cual la dimensión se ha hecho pequeña (perpendicular a la capa delgada, Z). La densidad de estados presenta un comportamiento escalonado, en donde inicialmente la energía se mantiene constante en un intervalo de $\rho(E)$ dado por

$$\frac{1}{2\pi^2} \frac{2m^* \pi}{\hbar^2} \frac{1}{Z}$$

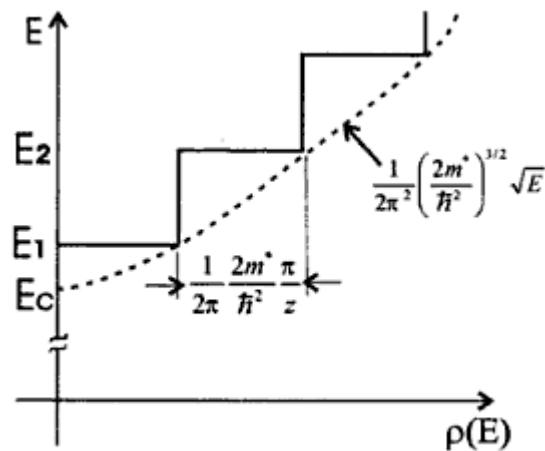


Figura 31. Densidad de estados para una región de confinamiento bidimensional

$$E_1 = \frac{(\frac{\hbar\pi}{z})^2}{2m^*} \quad E_2 = \frac{(\frac{2\hbar\pi}{z})^2}{2m^*}$$



Este comportamiento de transición discreta que presenta la energía para el pozo cuántico tiene sus beneficios. En una configuración de capa activa tridimensional (bulk), los estados de energía en la banda correspondiente se llenan desde los valores más bajos permitidos produciendo un rango de energía en los portadores que han sido excitados, los cuales luego de recombinarse producen la emisión de radiación. Como se cuenta con una amplia gama de energía para los portadores, no todos están en el rango adecuado para la emisión estimulada, pues el electrón excitado y el fotón incidente que estimula la transición deben estar en condiciones resonantes (la frecuencia del fotón emitido debe ser igual a la del fotón incidente).

En el proceso de inversión de población (creación de parejas electrón-hueco), solamente una porción de electrones puede aportar a un haz de emisión estimulada. Esta situación se puede ver ampliamente mejorada con el hecho de que en un pozo cuántico la densidad de estados no se incrementa gradualmente, esto permite un llenado de los electrones en rangos de energía mucho más reducidos. Esta transición discreta de niveles de energía depende además del espesor de la capa activa, lo que proporciona una valiosa herramienta de sintonización de la longitud de onda emitida por el dispositivo.

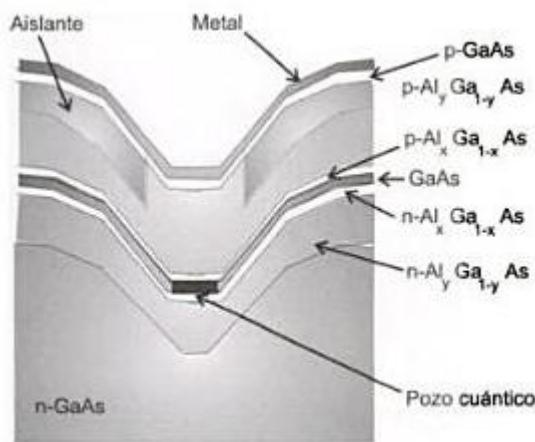


Figura 32. Esquema de fabricación de un pozo cuántico de GaAs.



3.3.4.- Láser de hilo cuántico

Si con la restricción de dos dimensiones de la zona activa se han conseguido beneficiosos resultados, por qué no reducir aún más dicha zona, disminuirla a una dimensión. Los confinamientos de esta naturaleza se conocen con el nombre de hilo cuántico. Así, se concibe el denominado láser de hilo cuántico que presenta similitudes con el de pozo cuántico, salvo que el espesor de la capa y su ancho se reducen a dimensiones del orden de 10 nm.

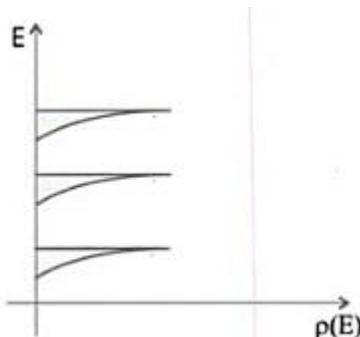


Figura 33. Densidad de estados para el caso de un confinamiento unidimensional

El problema que se presenta con las pérdidas de luz por refracción se resuelve, al igual que con el láser de pozo cuántico, con el uso de una región de confinamiento separada. A pesar de las dificultades para su fabricación, este tipo de láseres juega un papel muy importante en la emergente nanotecnología.

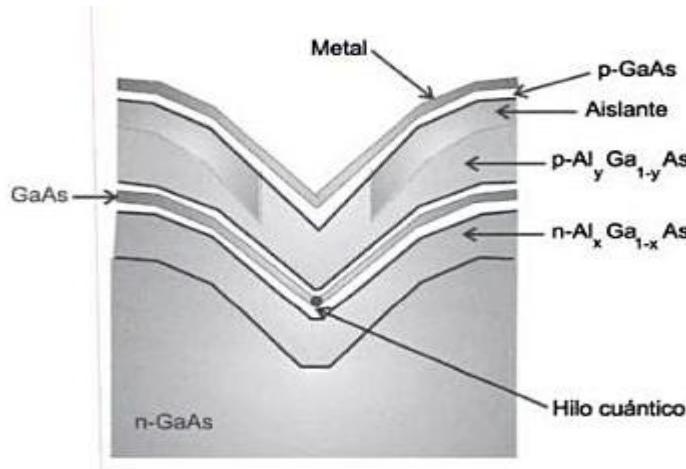


Figura 33. Esquema de la disposición de capas para la configuración de un láser de hilo cuántico.



3.3.5.- Láser de punto cuántico

Continuando con la reducción de dimensionalidad para la zona activa, el próximo paso conduce a considerar regiones de confinamiento de dimensión-cero. A comienzos de la década de los ochenta, Arakawa y Sakaki habían sugerido que los láseres de punto cuántico deberían presentar un rendimiento con menores problemas de dependencia con la temperatura y, en consecuencia, reducción de los umbrales de la densidad de corriente y baja degradación para altas temperaturas. El primer láser de punto cuántico con un alto umbral de densidad de corriente fue reportado por Ledentzov en 1994.

Estas estructuras, conectadas a los correspondientes elementos de entrada-salida, han tomado diversas denominaciones: gases de electrones cero-dimensionales, islas de Coulomb, átomos artificiales (un átomo es un caso de confinamiento en las tres dimensiones), transistores de un electrón, etc.

En un láser de punto cuántico, dado el incremento notable del confinamiento para los portadores de carga, la inversión de población asociada con la generación de pares electrón-hueco requerida para la emisión láser se hace más eficiente. Sin embargo, para que estas estructuras funcionen adecuadamente se necesita una gran uniformidad en sus dimensiones, aspecto fundamental para cristalizar las ventajas que ofrece un dispositivo de esta naturaleza. Una de las ventajas es la forma discreta que presenta la densidad de estados que, ante pérdidas en la uniformidad del punto, transita a un comportamiento similar a los obtenidos en estructuras tridimensionales. Con tecnologías como la litografía de haces de electrones se logra conformar arreglos 0-dimensionales que presentan desafortunadamente grandes problemas de eficiencia óptica, altas tasas de recombinación superficial, además de los daños que se producen durante la fabricación del dispositivo.

En el área de nanofabricación y materiales nanoestructurales, ha cobrado gran importancia el término auto-ensamblado, que puede ser considerado como un proceso en el cual la organización jerárquica supermolecular está establecida en un sistema complejo interconectado. Con la tecnología de auto-ensamblado se han logrado arreglos



de puntos cuánticos del orden de 20-30 nm de diámetro con una variación de longitud de $\pm 7\%$.

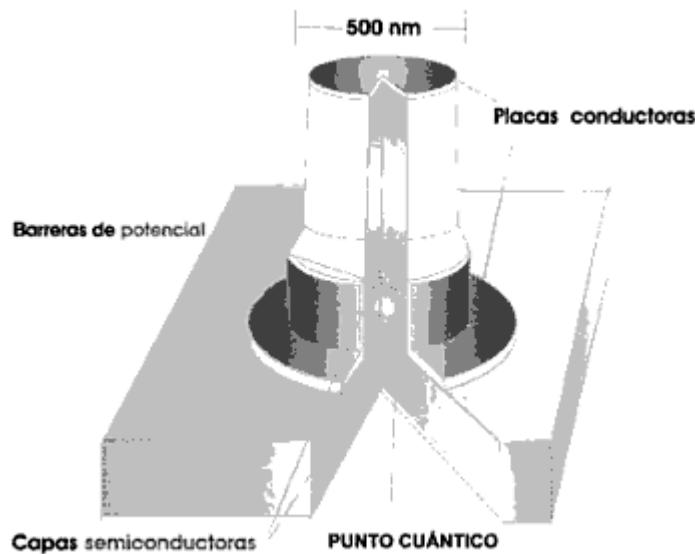


Figura 34. Estructura de punto cuántico en forma de columna.

El láser de punto cuántico presenta una estructura similar a la del pozo cuántico, salvo que la capa activa se dispone de un arreglo de puntos cuánticos de 20 a 30 nm, situado en el centro de una región separada de confinamiento para la luz.

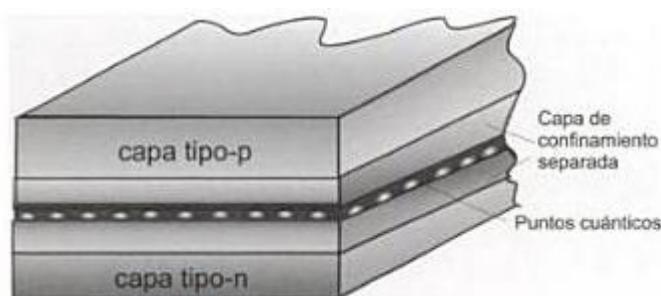


Figura 35. Esquema del láser de punto cuántico

3.3.6.- Diodo láser azul

Los diodos láser, como los presentados hasta ahora, son fabricados con materiales semiconductores capaces de producir radiaciones con longitudes de onda que corresponden al rojo e infrarrojo. Esta imposición se da porque los materiales, de acuerdo con su composición, aportan un gap de energía entre la banda de valencia y la de conducción para los portadores que realizan las transiciones láser, determinando, en consecuencia, el ancho de bandapectral emitido. Contar con láseres capaces de emitir



en longitudes de onda más corta (azul o violeta) abre una gran gama de posibilidades tecnológicas.

Un tipo de materiales que aporta las condiciones requeridas son los del grupo III-nitruros (nitruro de galio GaN), pues presenta un gap de energía entre la banda de valencia y la de conducción suficiente como para que las transiciones radiactivas produzcan frecuencias cercanas y superiores al del espectro óptico, hecho por el cual se les denomina como semiconductores de gap de energía ancha. El GaN a temperatura ambiente posee un gap de 3.4eV que impone para transiciones radiactivas una longitud de onda de 365 nm, longitud que corresponde al ultravioleta.

Los cristales de GaN son muy difíciles de fabricar ya que requieren altas presiones y temperaturas, similares a las necesarias para la producción de diamantes sintéticos, y el uso de gas nitrógeno a alta presión. Estos problemas técnicos parecían insuperables, así los investigadores desde la década de los 60 intentaron la fabricación de GaN sobre una base de zafiro, pero un desfase entre las estructura del nitruro de galio y el zafiro creaba demasiados defectos.

En la década de los 90, el instituto de Física de Alta Presión en la Academia de Ciencias de Varsovia (Polonia), bajó la dirección de Dr. Sylwester Porowski desarrolló una tecnología que permitía crear cristales de GaN con alta calidad estructural. En 1992, el ingeniero electrónico japonés Suji Nakamura inventó el primer LED azul eficiente, y cuatro años más tarde creó el láser azul.

3.3.7.- Otros láseres

- Láser de electrones libres

Se trata de un sistema productor de luz láser de gran versatilidad, fácil sintonía en un rango importante de longitud de onda (microondas hasta ultravioleta) y elevada potencia de salida. A diferencia de los sistemas que hacen uso del confinamiento atómico de los electrones, los cuales al transitar entre niveles permitidos de energía producen emisión de luz estimulada con una frecuencia definida, el láser de electrones libre, LEL, como su nombre indica, hace uso de un haz de electrones que pueden



moverse con libertad en el vacío. Así, el medio activo del láser no son átomos o moléculas, lo configura un chorro relativista de electrones.

Los electrones son acelerados a energías relativistas para posteriormente ser enviados a un sistema de imanes con polaridades alternadas que conforman el denominado vibrador. Cuando el haz de electrones atraviesa el campo magnético del vibrador (alternante), experimenta una serie de movimientos oscilatorios, y esto causa que se emitan fotones de una frecuencia determinada. La región de emisión se encuentra dentro de una cavidad resonante conformada por espejos, uno de ellos con una reflexión del 85%. Los fotones dentro de dicha cavidad estimulan a los electrones a producir una mayor cantidad de fotones de la misma frecuencia y fase, proceso que se repite hasta alcanzar una condición estacionaria. La longitud de onda del láser puede ser variada cambiando la potencia del haz de electrones o cambiando el espaciamiento entre los imanes del vibrador.

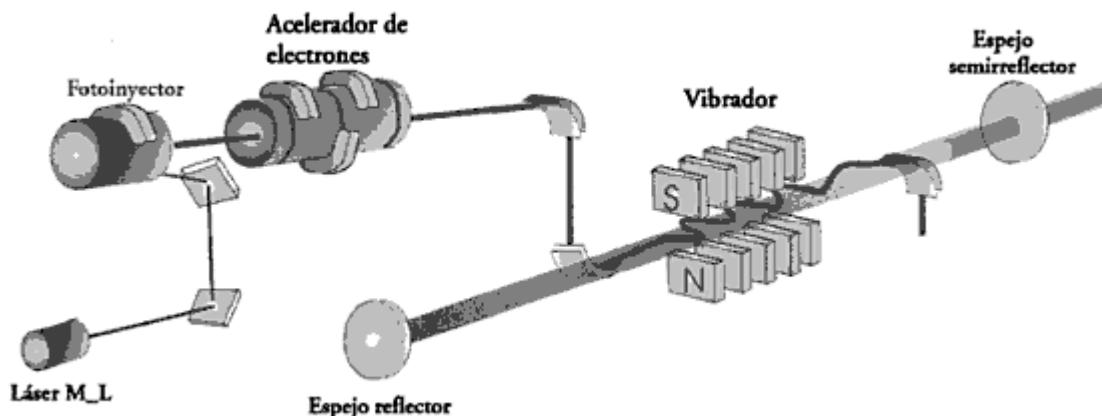


Figura 36. Esquema de un láser de electrones libres.

El láser de electrones libres puede llegar a ser muy grande, como el utilizado para la producción de rayos X, que tiene varios kilómetros de longitud, y también puede ser pequeño, como el MIRFEL que ocupa poco más de un metro.

- Láser monoatómico

El láser monoatómico se hace posible gracias a un comportamiento mecánico-cuántico que presenta un átomo cuando se encuentra en el interior de una cavidad resonante. En esta condición, el átomo emite más rápidamente que si se



encuentra fuera de esta cavidad. Si un átomo excitado en la cavidad resonante vuelve a su estado fundamental con la correspondiente emisión de un fotón, el fotón es nuevamente absorbido para luego volver a ser emitido configurándose un proceso de naturaleza oscilatoria que toma el nombre de oscilación de Rabi en el vacío. Por otra parte, si en la cavidad resonante existen fotones con una energía equivalente a la de transición del átomo, se producirá un proceso de absorción y emisión de fotones por parte del átomo con una mayor probabilidad que en caso anterior. La oscilación en presencia de un fotón o fotones en la cavidad se denomina como cuantizada de Rabi.

Si por una cavidad resonante se hace pasar una sucesión de átomos que han sido previamente excitados (usando un láser convencional), para el primero de ellos se producirán una oscilación en el vacío de Rabi, que coloca un fotón en la cavidad; para el siguiente átomo se producirá una oscilación cuantizada que aporta otro fotón con la misma fase y energía que el anterior, y así, sucesivamente, se va acumulando en la cavidad luz coherente que conforma un haz de luz láser.

- Microláseres

Un microláser como su nombre indica, corresponde a un dispositivo de tamaño micrómetro capaz de producir luz coherente con un diseño y rendimiento diferente al que se obtiene con los láseres de diodo común. Un cambio importante tiene que ver con la forma cilíndrica que presentan las capas semiconductoras, así como en la dirección perpendicular a las láminas semiconductoras en que se canaliza y emite la luz. Este tipo de geometría favorece un haz de luz de mayor circularidad.

El láser está conformado por una delgada capa semiconductora (del orden de una centésima de micrómetro) responsable del confinamiento de los portadores de carga en términos de los que se ha denominado pozo cuántico. Esta capa está emparedado con otras dos capas de un gap de energía mayor que permiten atrapar los portadores de carga responsables de la emisión láser. Al propagarse la luz perpendicularmente a esta capa y al ser tan delgada, se hace necesario que la luz responsable de estimular emisiones pase por la capa un gran número de veces, exigencia que recae sobre la calidad de reflectividad que posean los espejos de la cavidad. Esta condición se satisface al hacer uso de una serie de capas (espejos) alternantes de diferentes índices de refracción (GaAs



y AlAs) y espesor apropiado, que producen valores de reflectividad superiores al 99%. Con este tipo de configuración y refinamientos en su construcción, estos láseres han alcanzado un rendimiento del 50%, a diferencia del rendimiento típico en torno al 30% de los láseres de diodo común.



Figura 37. Geometría cilíndrica de un microláser.

- Nanoláseres

El tamaño de la cavidad resonante no puede hacerse tan pequeño como se quiera, pues existe una limitación impuesta por la longitud de onda de la luz comprometida en el proceso. Para que la luz pueda sostenerse en la cavidad, se requiere que las dimensiones mínimas correspondan con el primer modo normal de oscilación ($1/2$ longitud de onda). En este caso extremo, prácticamente todos los fotones estarían en el modo fundamental y, en consecuencia, se contaría con una eficiencia máxima en el aprovechamiento de la luz de la cavidad. El láser operaría sin umbral.

En laboratorios de investigación se han logrado condiciones que permiten la existencia de algunos de los primeros modos normales (aquellos que satisfacen la ecuación $L=N\lambda/2$, con L distancia de las superficies reflectantes), pero aún no se ha conseguido la operación sin umbral. Se han producido aproximaciones geométricas en forma de disco con umbrales de corriente del orden de los 100 microamperios o en forma de anillo con una dimensión que limita el número de modos a 10.



4.- Seguridad

4.1.- Efectos biológicos de la radiación láser

Los láseres abarcan las longitudes de onda UV, del visible y del IR. Los órganos que pueden resultar dañados en una exposición a radiación láser son los ojos y la piel. La gravedad de la lesión dependerá de la longitud de onda del láser y del nivel de exposición alcanzado, que es función de la potencia o energía del láser y del tiempo de exposición.

Tipos de efectos biológicos:

- Longitudes de onda corta: efectos fotoquímicos.
- Longitudes de onda largas: efectos térmicos.

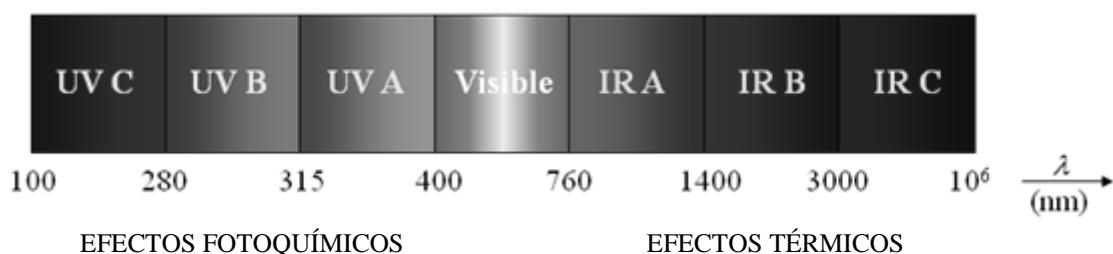


Figura 38.

Hasta hace poco se consideraba que el mecanismo de lesión de la retina debido a radiaciones de longitud de onda corta era esencialmente térmico, lo cual requiere elevaciones locales de temperatura en el rango 10-20 °C. Pero investigaciones recientes han puesto de manifiesto que el ascenso de temperatura de la retina en exposiciones cortas es de sólo 2-3 °C (para un diámetro de pupila de 2 mm). Esto implica un mecanismo fotoquímico en exposiciones cortas.

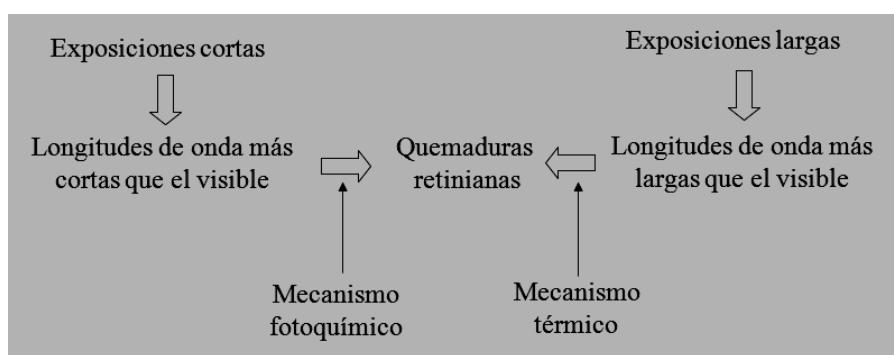


Figura 39.



▪ *Efectos sobre la retina*

Un láser con una longitud de onda dentro del espectro visible (400-760 nm) o del IR próximo (760-1400 nm) pueden atravesar córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo y alcanzar la retina. La córnea actúa como una lente convergente, si el ojo focaliza un haz láser, puede producirse una lesión en la fóvea o la mácula, lo cual deteriorará la función visual en forma a veces irreversible. Aunque el haz no sea focalizado, al alcanzar la retina aún puede producir lesiones retinianas periféricas.

La absorción de radiación no ionizante por el ojo depende de la longitud de onda incidente. Aunque la respuesta visual se ciñe aproximadamente al intervalo 400-700nm, el pigmento epitelial de la retina absorbe las longitudes de onda entre 400 y 1400nm. Aunque no podamos ver el láser, la retina puede resultar dañada.

▪ *Efectos sobre otras partes del ojo*

La radiación UV A (315-400 nm) es fuertemente absorbida por el cristalino, siendo la lesión predominante las cataratas. Las radiaciones UV C y UV B (hasta 315nm), IR B e IR C (1400nm - 1 mm) son absorbidas mayoritariamente por la córnea, y producen fotoqueratitis (UV) o quemaduras corneales (IR).

REGION DEL ESPECTRO (CIE)	ABSORCION DEL OJO	MAXIMA ABSORCION EN	LESION PRODUCIDA	EJEMPLO DE LASERES REPRESENTATIVOS
UV-C y UV-B 200 a 315 nm		Córnea	Fotoqueratitis	FAr excímero (193 nm) FKr excímero (248 nm)
UV-A 315 a 400 nm		Cristalino	Catarata fotoquímica	He-Cd (325 nm) FXe excímero (350 nm) N₂ (337.1 nm)
Visible 400 - 700 nm		Retina	Lesiones retinianas fotoquímicas y térmicas	He-Cd (441.6 nm) Ar²⁺ (varias líneas) Kr²⁺ (varias líneas) He-Ne (632.8 nm)
IR A 780 - 1400 nm		Retina	Lesión térmica en la retina	GaAs (850 nm) Nd: YAG (1064.5 nm)
IR B e IR C 1400 nm a 1 mm		Córnea	Catarata térmica y quemadura corneal	GaAs (850 nm) Nd: YAG (1064.5 nm)

Figura 40.



- **Efectos sobre la piel.**

La reacción a sobreexposiciones son quemaduras más o menos profundas según la intensidad y la longitud de onda incidente.

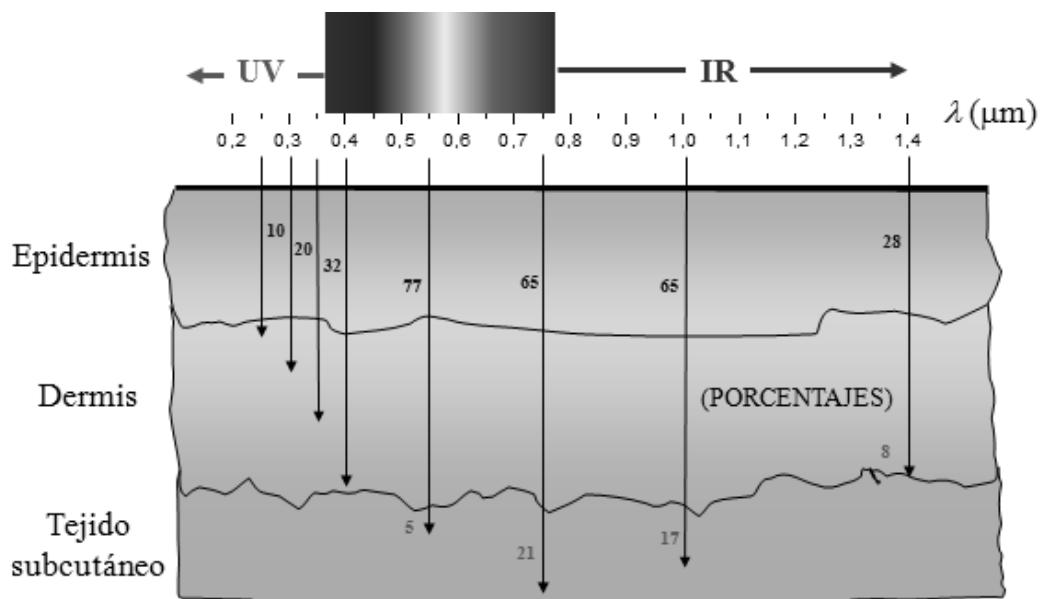


Figura 41. Penetración del láser en la piel.

Dependiendo del tipo de láser y de su longitud de onda se fijan unos límites de exposición.

4.2.- Efectos biológicos indirectos

Muchos sistemas láser usados en investigación y desarrollo y en la industria están asociados con ciertos sistemas auxiliares que constituyen fuentes potenciales de efectos biológicos adversos, tales como quemaduras químicas, pérdidas de audición, exposición a contaminantes que difunden en el aire, o riesgos eléctricos.

El blanco de un láser puede generar contaminantes susceptibles de difundirse por el aire durante el procesado de material; por ejemplo, en soldaduras al arco. Por tanto, estas aplicaciones requieren adecuadas medidas de aislamiento y ventilación.

Los fluidos criogénicos, tales como el nitrógeno líquido y otros empleados en la refrigeración de ciertos láseres pueden desplazar al aire respirable cuando se evaporan, y deben ser empleados en condiciones de ventilación adecuada.



Ciertos tintes y disolventes orgánicos son empleados como medios activos (por ejemplo, láseres de excímeros). Estos disolventes, que suelen constituir un 99% en peso de las disoluciones, son con frecuencia inflamables y tóxicos por inhalación o absorción cutánea. Por lo tanto deben adoptarse medidas de control para una adecuada ventilación y manejo de tales productos químicos.

Radiaciones ionizantes asociadas. Ciertos equipos de alto voltaje utilizados en la operación de láseres producen rayos X, por lo que deben instaurarse medidas de blindaje de equipos y control de estas radiaciones para evitar escapes.

Altos voltajes, incluso a niveles letales, son generados en el interior de muchos equipos láser. Es preciso adoptar las medidas para un buen aislamiento eléctrico de todas las partes potencialmente peligrosas.

Niveles de ruido. Ciertos equipos originan niveles de ruido que exceden los estándares aceptados, aunque la mayoría de los láseres operan silenciosamente. En los casos en que existe un nivel excesivo de ruido, esto suele ocurrir en las inmediaciones del láser o del blanco, donde no debe permitirse la presencia de personas. Es preciso adoptar en todo caso las medidas de control del ruido pertinentes.

4.3.- Clasificación de los láseres

Los láseres no forman un grupo homogéneo al cual se apliquen límites de seguridad comunes, ya que los riesgos que se derivan de su uso varían notablemente. Esto se debe a los amplios intervalos posibles para la longitud de onda, la potencia o energía y las características de emisión continua o emisión de pulsos de un haz láser.

El agrupamiento de los láseres usando como criterio su peligrosidad ha sido objeto de distintas clasificaciones (ANSI, American National Standard Institute; BRH, Bureau of Radiological Health; CEI, Comité Electrónico Internacional), todas ellas muy similares aunque no sean exactamente coincidentes.

La clase de un láser es un indicador directo del grado de peligrosidad que supone la utilización de un dispositivo de estas características.



Los tres factores que principalmente definen la clase de un láser son:

- Longitud de onda.
- Duración / tiempo de exposición.
- Potencia / energía del haz.

La clase de un sistema láser debe figurar en:

- Una etiqueta / señal, claramente visible y colocada en el mismo dispositivo, con las frases de advertencia para que el usuario conozca a qué riesgo está expuesto.
 - El manual de instrucciones / operaciones del dispositivo láser.
 - También debería estar colocada señalización de peligros reglamentaria en el lugar de trabajo donde esté emplazado el sistema.
- ***Riesgos derivables de la utilización de las diferentes clases de sistemas láser***

CLASE DE SISTEMA LÁSER	RIESGOS DERIVABLES
Clase I	No suponen daño alguno.
Clase II	Pueden causar daños oculares por observación directa del haz durante períodos superiores a 0,25seg. Podría resultar en un daño crónico para exposiciones iguales o superiores a 1.000seg. (unos 15 minutos).
Clase III a	Pueden causar daños oculares (concretamente, en la retina), siendo crónicos en caso de exposiciones iguales o superiores a 0,25seg.
Clase III b	Pueden causar daños oculares o cutáneos agudos si se entra en contacto directo con el haz láser.
Clase IV	Pueden causar daños oculares o cutáneos agudos si se entra en contacto directo, indirecto, o por reflexión, con el haz láser. Pueden originar incendios.



- ***Medidas de control recomendadas en función de las diferentes clases de sistemas láser***

“CLASE” DE SISTEMA LÁSER	MEDIDA DE CONTROL
Clase I	<ul style="list-style-type: none">• Señalización.• Información y formación del personal involucrado o expuesto.
Clase II	<ul style="list-style-type: none">• Ídem Clase I, y además:• Ingeniería.• Equipos de Protección Individual.
Clase III a	<ul style="list-style-type: none">• Ídem Clase II, y además:• Ingeniería.• Controles administrativos.
Clase III b	<ul style="list-style-type: none">• Ídem Clase II, y además:• Ingeniería.• Controles administrativos.
Clase IV	<ul style="list-style-type: none">• Ídem Clase II, y además:• Ingeniería.• Controles administrativos.

- ***Medidas de control: señalización***

La señalización relativa a un dispositivo láser, comprende:

- Una etiqueta / señal, claramente visible y colocada en el mismo dispositivo láser, con las frases de advertencia para que el usuario conozca a qué riesgo está expuesto.
- Toda puerta de acceso a locales donde se alberga dispositivos láser de CLASE IIIa; IIIb; y IV, deben ser señalizadas con el pictograma de peligro correspondiente, incluyendo además la CLASE del láser, la longitud de onda, y la potencia del mismo. Cuando un local alberga más de un láser de diferentes CLASES de las especificadas, se incluirá los datos de todos ellos.



- Sobre toda puerta de acceso a un local donde se albergue dispositivos láser de CLASE IIIa; IIIb; y IV, se recomienda la instalación de una luz intermitente que se active cuando el dispositivo esté en operación.
- Es deseable incluir la señalización de “ACCESO RESTRINGIDO EXCLUSIVAMENTE A PERSONAL AUTORIZADO”.
- La utilización de prendas de las prendas de protección individual (E.P.I.) que se estime preceptivas para las operaciones a llevar a cabo, también debe estar señalizada.

SEÑALIZACIÓN PRECEPTIVA				
 ¡ATENCIÓN! RADIACIONES LÁSER	 ALTO ACCESIBLE SOLO A PERSONAL AUTORIZADO	 ES OBLIGATORIO EL USO DE LAS GAFAS	 PROTECCIÓN OBLIGATORIA DEL CUERPO	 ES OBLIGATORIO EL USO DE LOS GUANTES
En todo lugar donde se encuentre un láser.	Para lugares donde se dé operación de láser IIIa; IIIb y IV.	Para lugares donde se dé operación de láser II, IIIa; IIIb y IV.	Para lugares donde se dé operación de láser IIIb y IV.	Para lugares donde se dé operación de láser IIIb y IV.

- ***Información y formación del personal involucrado o expuesto***

Toda persona que participe directamente en las operaciones, o que sin estar involucrada directamente en las mismas, pueda verse afectada por estos dispositivos, debe ser informada por los responsables de las actividades acerca de los riesgos a los que está expuesto, los medios con los que debe protegerse, cómo y cuándo utilizarlos, y especialmente, sobre el conjunto medidas preventivas y de normas internas o de Procedimientos de Trabajo Escritos (P.T.E.) con que se acostumbre operar.



- ***Medidas de control: ingeniería***

Medidas técnicas destinadas a minimizar el riesgo que puedan generar los dispositivos láser. Pueden citarse las siguientes:

- Confinamiento de láser: deseable para láser clase IIIb y IV, efectuándose en un habitáculo donde no se lleve a cabo ninguna otra operación no relacionada con este elemento. Es deseable que las puertas de acceso a estos habitáculos dispongan de cerradura, y que únicamente el personal autorizado a acceder a esta habitación disponga copia de las mismas. Sería deseable que las cerraduras de las puertas se bloqueasen cuando éste entrase en operación, pero pudiendo anularse el bloqueo y abrirse desde el interior, de manera similar a una puerta antipánico.
- Carcasas protectoras: todo láser clase IIIa, IIIb y IV, debiera disponer de una carcasa protectora incombustible, que contenga el haz emitido, y él la fuente de excitación.
- Enclavamiento: todo láser clase IIIa , IIIb y IV, debiera disponer de un dispositivo de enclavamiento de modo que cuando la carcasa protectora fuera movida o separada, desconectase el dispositivo láser y lo dejase fuera de funcionamiento.
- Llave de operación: todo láser clase IIIa, IIIb y IV, debiera disponer de una llave de accionamiento, de modo que sin la misma, este no pudiera entrar en funcionamiento y que únicamente el personal autorizado a operar con las mismas, según los P.T.E establecidos, disponga de acceso a las mismas.
- Indicador “ON” (en marcha): todo láser clase IIIa, IIIb y IV, debiera disponer de un indicador “ON / OFF” claramente visible a las personas operando con el dispositivo. Este indicador debe estar conectado al láser, no siendo su accionamiento independiente del equipo.
- Indicador “Potencia de operación”: todo láser clase IIIa, IIIb y IV, debiera disponer de un indicador de la potencia emitida en tiempo real, fácilmente visible a los operadores del dispositivo.



■ ***Medidas de control: controles administrativos***

Los controles administrativos comprenden exclusivamente los Procedimientos de Trabajo Escritos (P.T.E.).

Los P.T.E. deben ser generados por los responsables de las operaciones llevadas a cabo con los dispositivos láser, o por personal suficientemente cualificado y con la experiencia necesaria como para poder desarrollarlos.

El principio de los P.T.E. es dejar constancia escrita de aquellos aspectos críticos de las operaciones que puedan afectar al resultado de las mismas, que puedan afectar a la seguridad de los operadores, o en el deterioro de los equipos.

Los P.T.E. deben ser conocidos obligatoriamente por todo aquel personal que esté involucrado en las tareas, y debe entrenarse exhaustivamente sobre los mismos al personal de nuevo ingreso o que carezca de la experiencia suficiente. Todo P.T.E. debe ser aprobado y respaldado por la Dirección del Departamento o Entidad.

Recomendamos que, independientemente de la CLASE de láser con la que se esté operando, de desarrolle P.T.E. para los mismos. Consideramos imprescindible el disponer de P.T.E. para toda tarea en la que esté involucrado un láser de los tipos IIIa, IIIb y IV.

Especial mención requieren las tareas de alineación, ajuste del haz y reparaciones, actividades en las que se mayoritariamente se producen los daños personales.



5.- Tratamiento del haz

5.1.- Transformaciones de un haz láser

Antes de poder ser usado, un haz láser sufre generalmente alguna transformación. Las transformaciones más comunes son aquellas que ocurren cuando el haz se propaga a través del espacio o a través de un sistema óptico, el cambio se produce en la distribución de potencia o en la forma del haz, aunque se conserva la estructura de modos.

Otro tipo de transformaciones son las que actúan sobre el comportamiento temporal del haz, como las que se pueden producir con un dispositivo acústico-óptico, que puede desviar un porcentaje del haz en una dirección que dependerá de la frecuencia de la onda acústica.

- Propagación de un haz gaussiano

El haz del láser diverge y su tamaño va aumentando con la distancia, la fórmula que relaciona el tamaño del haz con la distancia recorrida es:

$$w^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right) \right]$$

donde $2w$ es el tamaño del haz, $2w_0$ es el waist o diámetro mínimo del haz (a la salida del láser) y z es la distancia recorrida desde el waist. Otra fórmula a tener en cuenta es la que relaciona el radio de curvatura del frente de onda del haz en función de la distancia recorrida:

$$R = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

donde R es el radio del frente de la onda.

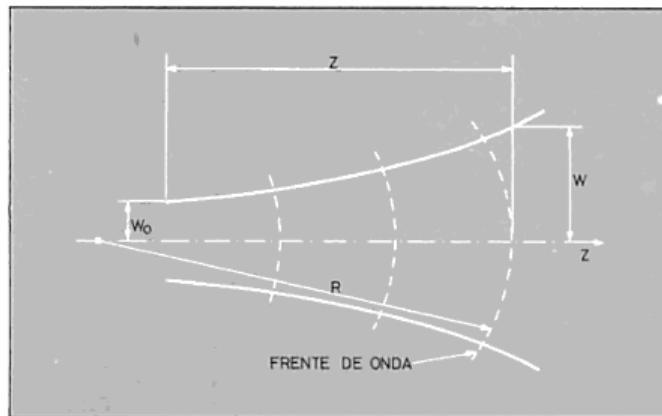
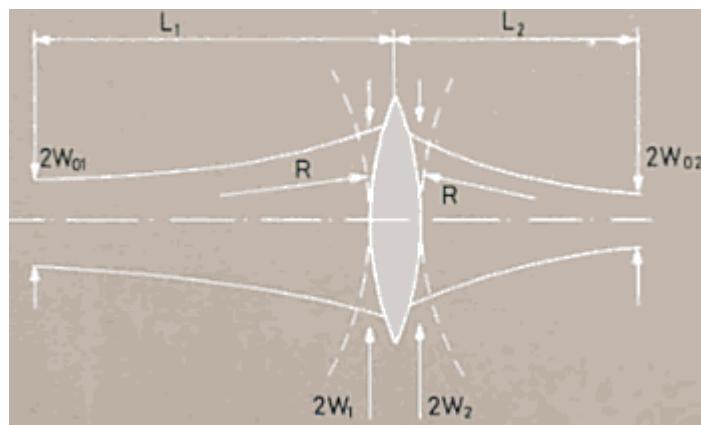


Figura 38. Evolución del haz en el espacio

- Transformación del haz al atravesar un sistema óptico de lentes

Figura 39. Transformación de un haz gaussiano al atravesar una lente focal f .

En la figura se ve la transformación del haz del láser al atravesar una lente focal f . Al llegar a la lente, el tamaño y en radio de la curvatura del haz son respectivamente $2w_1$ y R_1 obtenidos al aplicar las ecuaciones anteriores, sustituyendo z por L_1 . El tamaño del haz a la salida de la lente $2w_2$, es el mismo que tenía antes de entrar en ella.

Si interpretamos el comportamiento de la lente como la de un dispositivo que varía el radio del frente de onda que llega hasta él, podemos aplicar la misma transformación para el caso de un haz gaussiano que llega a la lente con un radio R_1 y emerge por la otra cara como un nuevo haz gaussiano con un radio de curvatura R_2 . El tamaño mínimo que puede tomar el haz al salir de la lente $2w_2$ y la distancia a la que alcanzará ese valor se pueden calcular aplicando las ecuaciones de los haces gaussianos. Haciendo las sustituciones oportunas llegamos al sistema de ecuaciones siguiente:



$$L_1 = f \pm \left(\frac{w_{01}}{w_{02}} \right) (f^2 - f_0^2)^{1/2}$$

$$L_2 = f \pm \left(\frac{w_{02}}{w_{01}} \right) (f^2 - f_0^2)^{1/2}$$

donde f_0 es igual a $\pi w_{01} w_{02} / \lambda$.

Una solución aproximada a estas ecuaciones es la que da como tamaño de un haz focalizado $2W_{02} \approx 2f\lambda/\pi W_{01}$. Por tanto, según se deduce de esta expresión, un haz gaussiano no puede enfocarse infinitamente, sino que el tamaño del mismo es función de la focal de la lente, de la longitud de onda y del waist del haz incidente.

Asimismo, la divergencia del haz y el tamaño del mismo están únicamente relacionados y no dependen de ningún otro factor que se pueda alterar. Siendo el ángulo de divergencia, 2θ , inversamente proporcional al waist, $\theta = \lambda / \pi w_0$. En otras palabras, cuanto más pequeño sea el tamaño del haz al ser enfocado, más rápidamente se abrirá a continuación y, por tanto, el margen de espacio en que el haz está enfocado es más pequeño.

Por el contrario, si lo que se desea es proyectar un haz sin que apenas diverja para recorrer una gran distancia, lo que se hace es expandirlo con un sistema de dos lentes en configuración telescopio. En estas condiciones el haz es capaz de recorrer grandes distancias con una divergencia mínima.

5.2.- Interacción del láser con los materiales

La acción del haz láser sobre los materiales en procesos industriales producen estos efectos térmicos. El proceso puede dividirse formalmente en dos partes:

- La incidencia del haz en el material y la transferencia de su energía.
- Los efectos que produce en el material el aporte de energía.

En lo que se refiere a la incidencia del haz y su transferencia de energía al material, sólo una parte de la energía incidente se transmite al interior, ya que parte de ella es reflejada por la superficie del material. La potencia que se transmite al material se relaciona con la potencia incidente mediante el coeficiente de acoplamiento C . En un



caso general, la potencia transmitida (P_t) se relaciona con la potencia incidente (P_i) mediante la expresión:

$$P_t = CP_i$$

En el caso en que la superficie del material sea pulida, se tiene para el coeficiente de acoplamiento C la expresión $C=1-R$, donde R es el coeficiente de reflexión del material para la longitud de onda de la radiación incidente. Para que el material pueda ser tratado mediante el haz láser es preciso que la potencia transmitida sea absorbida por el mismo, dando lugar a un gran aumento de la temperatura. Un parámetro importante. Un parámetro importante es el coeficiente de absorción de radiación del material, α_{abs} , que indica la porción de radiación que es absorbida por unidad de longitud.

Tanto el coeficiente de absorción como el de acoplamiento dependen del material y de la longitud de onda de la radiación. El coeficiente de absorción de los metales es muy elevado y crece con la longitud de onda de la radiación, mientras que el coeficiente de acoplamiento es pequeño y decrece con la longitud de onda de la radiación. El comportamiento de los dieléctricos es más irregular, en general, el coeficiente de absorción es mucho menor y aumenta con la longitud de onda de la radiación, pudiéndose encontrar zonas muy absorbentes según la naturaleza concreta del material. Su coeficiente de acoplamiento es elevado. Los semiconductores presentan una banda de absorción intensa en la zona visible e infrarrojo próximo con un comportamiento similar a los metales. Para longitudes de onda más largas el comportamiento es similar a los dieléctricos.

El coeficiente de acoplamiento depende de la temperatura, en los metales a temperaturas próximas a la de fusión se produce un aumento considerable de este coeficiente, con lo que resulta también un incremento en el rendimiento del proceso de absorción de energía por el material. Este coeficiente también depende del grado y de la dirección de polarización del haz cuando este incide sobre la superficie del material.



Una vez la energía ha sido absorbida por el material se produce un aumento de su temperatura. Este aumento no se limita a las zonas donde incide el haz sino que se difunde hacia las zonas adyacentes.

5.3.- Enfoque del haz

Una de las principales características del láser desde el punto de vista de su aplicación al tratamiento de materiales es la coherencia del haz. Gracias a ésta se puede enfocar toda la potencia emitida y concentrarla sobre zonas de dimensiones transversales del orden de la longitud de onda, consiguiendo así densidades de potencia muy elevadas. Para llevar a cabo la focalización del haz se utilizan lentes o espejos. Una relación práctica que nos permite calcular el diámetro del haz focalizado es:

$$D_f = \frac{4f\lambda}{\pi D_1}$$

donde D_f es el diámetro del haz focalizado, D_1 el diámetro del haz incidente, f la distancia focal de la lente y λ la longitud de onda. Otra ecuación que nos permite calcular fácilmente el diámetro del haz focalizado es $D_i=2\Theta*f$ donde 2Θ es la divergencia del haz incidente.

Otra característica importante del haz focalizado es la profundidad de foco, que representa la distancia a la cual se puede considerar el haz focalizado. La definición concreta de este parámetro depende de la variación del tamaño del haz que se considere tolerable. Si se define δ como el coeficiente entre el tamaño del haz tolerado y su tamaño mínimo ($\delta=1+\text{tanto por ciento considerado}$), la profundidad del foco d vendrá dado por la expresión:

$$d = \frac{8f^2}{\pi D_1^2} \lambda \sqrt{\delta^2 - 1}$$

Observando las expresiones que nos dan el diámetro del haz focalizado y la profundidad de foco en función de la focal, nos daremos cuenta de una dependencia lineal del primero y cuadrática del segundo. Eso es, para un valor doble de la focal se obtiene un valor doble de diámetro del haz focalizado mientras que la profundidad de foco aumenta con cuatro veces su valor.



5.4.- Estado superficial del material

Es evidente que desde el punto de vista de rendimiento energético de un proceso determinado, interesa que el coeficiente de acoplamiento sea lo mayor posible.

Tratamientos superficiales que aumentan la rugosidad de la superficie, tales como arenado o la aplicación de finas capas de sustancias absorbentes, pueden incrementar el valor de coeficiente de acoplamiento.



Figura 40. Coeficientes de acoplamiento para un metal con distintos acabados superficiales

5.5.- Régimen de funcionamiento del láser

Los efectos térmicos que la radiación produce en el material dependen de la evolución espacial y temporal de la temperatura en el interior del mismo. Así pues, la utilización de un láser en modo continuo o en modo pulsante influirá en los resultados obtenidos.

Por ejemplo, pulsos cortos y energéticos tienden a perforar mientras que la misma energía repartida sobre un tiempo más prolongado sería más adecuada para un proceso de corte.

5.6.- Aporte de gas

En la mayor parte de los procesos con láser se utilizan gases de aporte. Un flujo de uno o varios gases se proyecta sobre la zona a tratar, utilizando para ello dispositivos que permiten además el enfoque del haz mediante un sistema óptico colocado en su interior. Estos dispositivos reciben el nombre de boquillas.



Las razones fundamentales para utilizar gases de aporte son:

- *Proteger la óptica de focalización.*

Los gases desprendidos en el proceso, debidos a la evaporación del material tratado, son muy perjudiciales para la óptica utilizada. Los vapores y partículas procedentes del material pueden depositarse en la superficie de la lente aumentando la absorción de la misma y provocando un calentamiento excesivo de ésta que puede desembocar en un daño irreparable.

- *Reducir el efecto de absorción de energía incidente por parte del gas expulsado en la evaporación del material tratado.*

Los gases producidos en el tratamiento del material son, en la mayor parte de los casos, absorbentes de la radiación incidente, provocando un descenso en el rendimiento del proceso. Por ello, deben ser rápidamente apartados de la zona de trabajo.

- *Producir o evitar reacciones químicas.*

La elección del gas más conveniente requiere un estudio en profundidad de cada proceso en concreto. Los gases más frecuentemente utilizados son: nitrógeno, oxígeno, aire, argón y helio. Cualquiera de ellos puede servir para la protección de la lente. Los gases inertes inhiben las reacciones de oxidación. El argón y el helio son utilizados para evitar la formación de un plasma gaseoso sobre la superficie en tratamiento para que absorba la energía del láser. El oxígeno favorece reacciones de oxidación exotérmicas que incrementan el rendimiento del proceso produciendo un aumento de la temperatura en la zona que se une al efecto térmico del láser y aumentando además el coeficiente de acoplamiento.

- *Eliminación del material fundido.*

Un proceso complementario al aporte de gases es el de su extracción. La adecuada extracción de los gases aportados o producidos en el proceso no sólo mejora el rendimiento de éste, sino que evita efectos nocivos, tales como la acumulación de gases tóxicos o combustibles. Para llevar a cabo esta aspiración pueden utilizarse métodos



clásicos (aspiradores o extractores) colocados adecuadamente por debajo del material tratado o lateralmente al mismo. También puede utilizarse un método de aspiración localizado que puede integrarse en la misma boquilla.

La forma de las boquillas es muy variada y está en función del material y del proceso a realizar. En concreto, en el corte de metales suelen utilizarse boquillas posicionadas muy cerca del material, con un orificio de salida de gases pequeño para potenciar la salida del gas a gran velocidad y favorecer con ello el arrastre del material fundido.

En el corte de plásticos, como el metacrilato, el orificio de salida es mayor y alejado del material. El gas que sale por la boquilla forma así una atmósfera local que evita la combustión del material sin proyectar el vapor del mismo sobre su superficie, donde se solidificaría produciéndose un mal acabado.

Existen en el mercado algunos modelos de boquillas autofocalizables. Para ello incorporan un sensor de posición del material que gobierna un servomotor con el que la boquilla sube o baja a fin de mantener constante la posición respecto al material. Los sensores son los de contacto directo con el material y los capacitivos.

5.7.- Elementos ópticos

Para aprovechar a fondo las posibilidades que ofrece un haz láser, su dirigibilidad y enfoque, se utilizan diversos componentes ópticos. Entre los más utilizados encontraremos lentes, espejos y láminas semi-transparentes. Otros elementos tales como redes de difracción, polarizadores y dispositivos no lineales no suelen utilizarse en el tratamiento del haz a nivel industrial, aunque los resonadores puedan llevarlos incorporados.

La óptica de mult capas tiene una gran importancia para la industria del láser. Elementos ópticos con reflexiones del orden del 99%, lentes con alta transmisión, combinadores de haz o láminas de reflectividad ajustada sólo pueden conseguirse mediante esta tecnología. La base de esta tecnología consiste en la disposición de sucesivas capas delgadas, del orden de la longitud de onda, sobre los sustratos adecuados, mediante la tecnología del alto vacío.



- *Lentes y sistemas de lentes*

Las lentes son elementos capaces de concentrar o dispersar un haz aprovechando la refracción que sufre la luz al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción. Según su comportamiento las lentes se pueden clasificar en divergentes o convergentes. En las convergentes un haz que llega paralelo a la lente es focalizado al otro lado de la lente, la distancia comprendida entre la lente y el punto donde se cruzan posteriormente se denomina distancia focal de la lente. En el caso de una lente divergente la distancia focal es la distancia comprendida entre la lente y las prolongaciones de los rayos que emergen de la misma.

Este parámetro define el comportamiento de la lente y tradicionalmente se expresa en pulgadas. Para las lentes convergentes la focal tiene signo positivo y para las divergentes el signo es negativo.

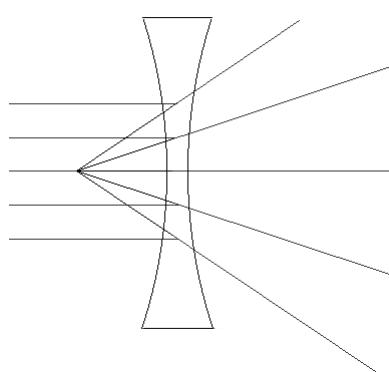


Figura 41. Lente divergente

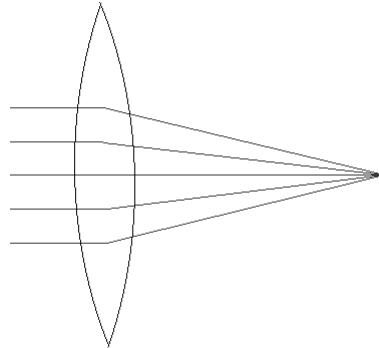


Figura 41. Lente convergente

A fin de obtener los mejores resultados es aconsejable la utilización de sistemas ópticos libres de aberraciones. Por causa de las aberraciones, los rayos que llegan paralelamente a la lente no convergen en un único punto, sino que sufren una dispersión alrededor del mismo. Los tipos de aberraciones que afectan a la focalización del haz son: esférica, coma, astigmatismo.

La aberración de coma y la de astigmatismo son propias de haces luminosos que no inciden de forma perpendicular a la lente. Este caso no suele producirse en el campo de aplicación industrial.



La aberración esférica es la de mayor importancia al considerar la focalización de un haz coaxial al eje óptico, por una lente o un sistema de lentes convergentes, operación frecuentemente realizada en la mayor parte de las aplicaciones industriales.

Este tipo de aberración es debida a la variación de la distancia focal a medida que nos alejamos de la lente, formándose un cono de focalización en lugar de un único punto focal. La consecuencia inmediata de este hecho es una disminución de la densidad de potencia en el punto focal, al aumentar la zona irradiada. Existen en el mercado sistemas ópticos compuestos por varias lentes que carecen de esta aberración.

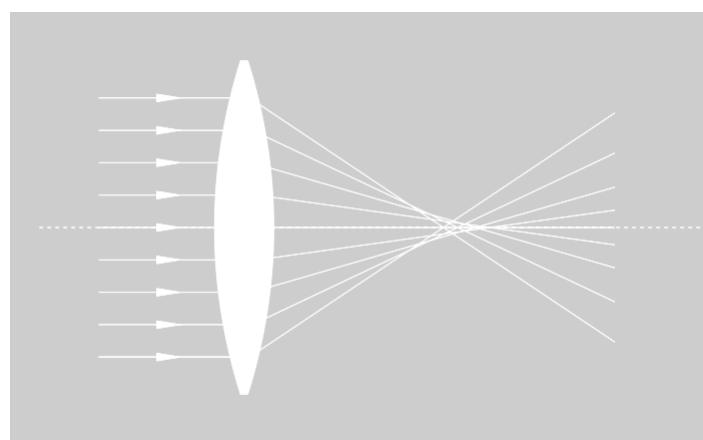


Figura 42. Trayectoria de los rayos en la aberración esférica.

En el caso de utilizarse una única lente para este fin, atendiendo a la curvatura de sus caras encontramos tres tipos de lentes: biconexas, planoconvexas y cóncavococonvexas o meniscos. El tipo de lente que ofrece menor aberración esférica es el menisco, seguido de las planoconvexas y las biconexas.

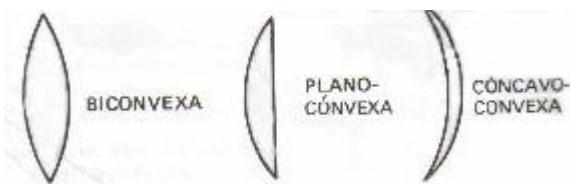


Figura 43.

Además de las lentes esféricas, existen lentes de tipo cilíndrico en las que el haz es focalizado en un segmento rectilíneo de la misma longitud que el diámetro del haz incidente.



Entre los sistemas de lentes más utilizados encontramos, además de los sistemas corregidos de aberraciones, los expansores de haz. Estos consisten esencialmente en una de las dos configuraciones de telescopio. Su finalidad es la de aumentar el diámetro del haz para disminuir su divergencia. Las ventajas de este proceso son dos: en primer lugar la de poder recorrer una distancia relativamente grande sin aumentar apenas su diámetro, en segundo lugar la consecución de un diámetro menor al ser focalizado posteriormente.

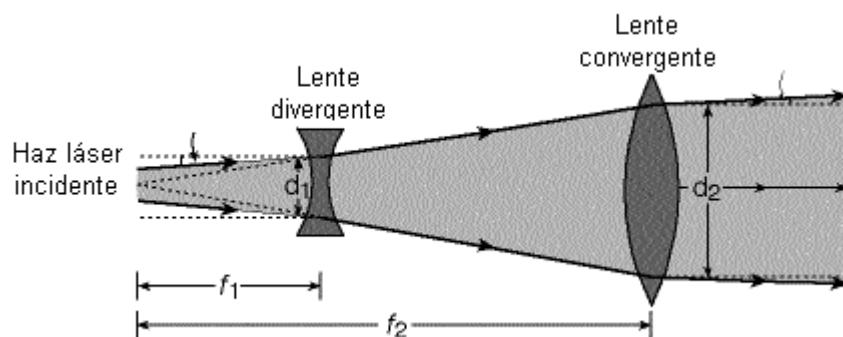


Figura 44. Expansor de haz basado en el Telescopio de Galileo

Un punto a tener en cuenta en cada tipo de láser es la utilización del tipo de lentes adecuadas, especialmente en lo que se refiere al material que las constituye. Éste debe permitir el paso del haz sin apenas absorción del mismo ya que esto, además de provocar una disminución en el rendimiento del proceso, dañaría la lente al calentarse. El coeficiente de absorción de los distintos materiales varía con la longitud de onda, por lo que a cada tipo de láser le corresponde una serie de materiales óptimos. Esto obliga a la utilización de lentes cuyos sustratos son característicos para cada tipo de láser.

- *Espejos*

Los dos tipos de espejos más utilizados son los planos y los convergentes o concavos. Los espejos planos se utilizan para deflectar el haz y llevarlo hasta la lente de localización. Los espejos convergentes sirven a la vez para deflectar y focalizar.

En la elección de los espejos al igual que en las lentes, hay que tener en cuenta el tipo de láser utilizado, puesto que tanto el sustrato utilizado como el tratamiento superficial de mult capas están diseñados para una estrecha banda de longitudes de onda.



- *Combinadores de haz.*

Estos elementos son láminas que están diseñadas para la combinación de dos haces de distinta longitud de onda. Una de las caras del dispositivo refleja totalmente el primero de los haces, deflectándolo 90°. El segundo haz incide por la otra cara siendo totalmente transmitido, de forma que se solapa con el primero.

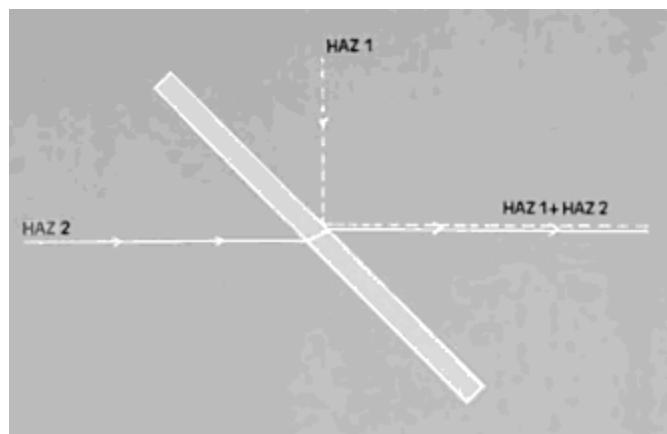


Figura 45. Combinador de haz

- *Partidor de haz o beamsplitter*

Este dispositivo consiste en una lámina diseñada para reflejar un determinado porcentaje del haz y trasmitir el resto. El porcentaje reflejado depende del recubrimiento utilizado en una de las caras de la lámina.

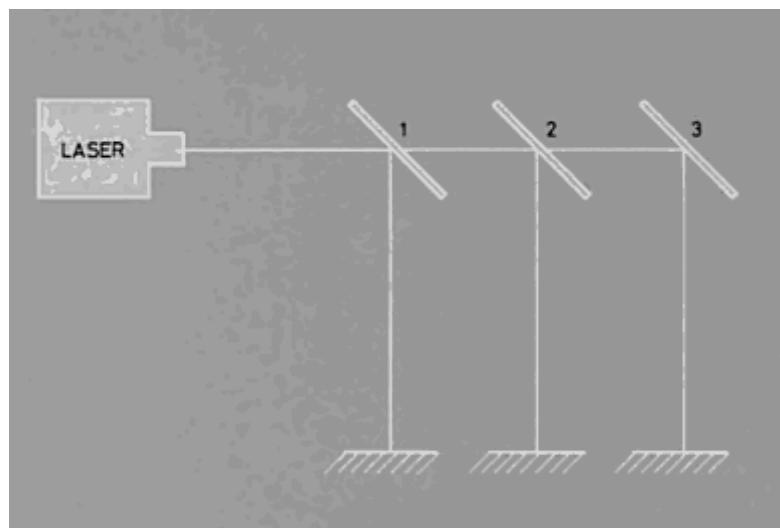


Figura 46. Obtención de tres zonas de trabajo con la utilización de dos beamsplitter y un espejo a partir de un único haz

La utilización de estos dispositivos permite la obtención de diversas zonas de trabajo a partir de una única fuente de láser.

**- Mantenimiento de los elementos ópticos.**

El tiempo de vida de un elemento óptico depende en gran parte del mantenimiento que reciba. La limpieza de los mismos es la parte más importante. Un elemento óptico sucio se convierte en absorbente de la radiación, lo cual lleva consigo un aumento de la temperatura que puede dar su superficie o incluso puede causarle la rotura.

La mayor parte de los elementos ópticos tiene una serie de capas depositadas sobre su superficie que optimizan su función. Un calentamiento excesivo o un inadecuado tratamiento pueden provocar un desprendimiento de las mismas. Un deterioro de estas capas lleva consigo una pérdida de las características del elemento y por consiguiente una disminución en el rendimiento del mismo.

Un mantenimiento de los elementos ópticos es de gran importancia y se debe realizar con el material adecuado utilizando líquidos disolventes y papeles especiales para la limpieza de ópticas. Los líquidos a utilizar pueden variar según el material del sustrato y de las capas del elemento a limpiar. En todos estos vasos el fabricante del material óptico aconseja el uso de unos u otros líquidos. Los más utilizados son acetona y metanol.



6.- Sistemas láser

Debido a la versatilidad, precisión y mayor rapidez que presenta frente a otros métodos convencionales de mecanización, los sistemas láser, se han incorporado a aplicaciones como corte, soldadura, perforado o tratamientos superficiales.

Los diferentes sistemas incorporan una fuente de haz láser y una mesa de coordenadas gobernadas por control numérico o bien un robot, para conseguir el movimiento relativo entre el haz y la pieza. Esto puede conseguirse de dos maneras:

- Moviendo la pieza y manteniendo el haz quieto.
- Moviendo el haz y manteniendo quieta la pieza.

Esta última opción presenta a su vez dos posibilidades. La primera consiste en mover todo el cabezal del láser por encima de la superficie a trabajar, lo que requiere un sistema sólido de soporte para el láser y se va convirtiendo paulatinamente a medida que aumenta la potencia del láser a utilizar y, como consecuencia, el peso del cabezal. La segunda opción consiste en mover un sistema óptico de entrega de haz hasta el punto de mecanización. Esta solución es válida para láseres de alta potencia, en los que el cabezal permanece en reposo y puede estar colocado fuera de la zona de trabajo. El sistema óptico consiste en un conjunto de espejos deflectores colocados a 45°, de modo que el haz reflejado por cada espejo forma un ángulo de 90° con el haz incidente. Con un sistema de tan solo dos espejos puede cubrirse cualquier punto de un plano.

- Mesa de coordenadas

Consiste en unos ejes de coordenadas móviles gobernados por control numérico, en los que se sujetan la pieza a mecanizar. Los más sencillos incorporan dos ejes X e Y, permitiendo desplazamientos en sentido positivo y negativo, con lo cual se puede describir cualquier movimiento en el plano. Así, desplazando la superficie bajo el haz, se pueden mecanizar piezas planas.

Algo más complejas son las mesas de tres ejes; X, Y, Z, que incorporan un eje vertical Z, con recorrido positivo y negativo, que permite la aproximación del plano de trabajo durante el funcionamiento de la máquina y su separación para facilitar



manipulaciones de carga y descarga del material. Otra posibilidad de utilización de este tipo de mesas consiste en aprovechar el eje vertical para seguir superficies no planas, manteniendo en todo momento la distancia focal adecuada para su correcto mecanizado.

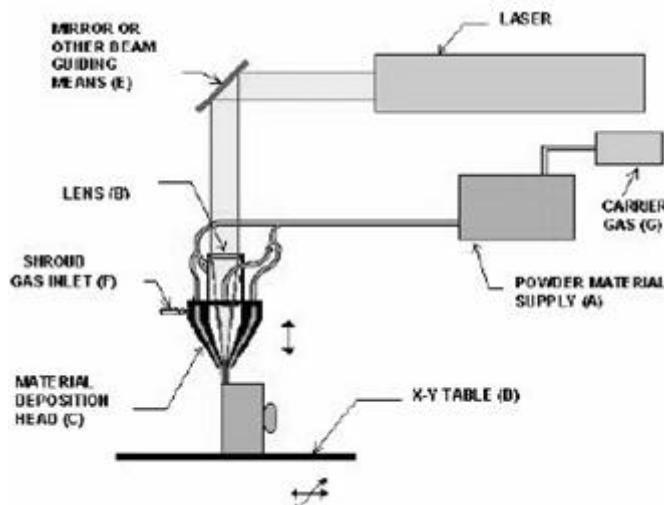


Figura 47. Mesa de dos coordenadas X-Y

Las mesas de cinco ejes incorporan además de los ejes de desplazamiento, X, Y, Z, otros dos ejes de giro A y B. Se utilizan para el mecanizado de piezas no planas. Aunque con tres ejes se puede describir cualquier volumen, es necesaria la incorporación de los ejes de giro para conseguir que el haz se mantenga perpendicular a la zona de trabajo. El eje A, permite una rotación de 180° en una dirección de eje. El eje B, permite un giro continuo sobre el plano. Así, en cualquier punto puede programarse la inclinación relativa de la pieza respecto al haz asegurando su ortogonalidad.

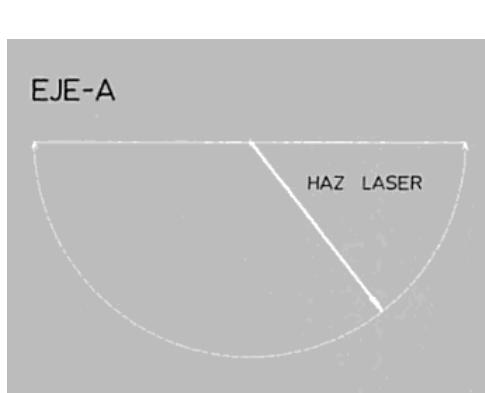


Figura 48.

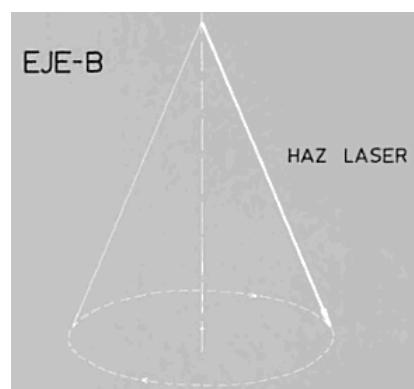


Figura 49.

Estas tres mesas anteriores corresponden al primer tipo de movimiento relativo (moviendo la pieza y manteniendo el haz quieto). Suelen emplearse para el mecanizado de piezas relativamente pequeñas, de poco peso, fáciles de manipular. Sin embargo,



cuando su tamaño o su peso aumenta, puede ser aconsejable la utilización de mesas pórtico, en las que se desplaza el haz sobre la superficie estática (segundo tipo de movimiento). En este tipo de mesas, los ejes móviles están situados formando un puente sobre una mesa donde se deposita el material a mecanizar. El pórtico puede soportar el cabezal de un láser, si éste es de baja potencia, o bien un sistema óptico de transmisión de haz, para láseres de alta potencia. De modo análogo, el desplazamiento de los ejes sigue las coordenadas X, Y, Z, describiendo los ejes X e Y el movimiento en el plano y reservando el eje Z para el posicionamiento del focalizador hasta la distancia de trabajo o retirada de éste a posición de reposo. También podrán llevar a cabo el mecanizado de piezas en volumen cuando presenten los dos ejes adicionales de giro.



Figura 49. Mesa pórtico

La programación de las mesas de coordenadas se realiza por control numérico, del mismo modo que muchos otros tipos de máquinas-herramienta. Los desplazamientos de los ejes se realizan indicando las coordenadas de la posición a alcanzar después de cada movimiento sencillo, tanto en línea recta como en curva, y la velocidad de avance hasta posición de origen y régimen de trabajo. El control numérico permite al mismo tiempo gobernar algunas de las funciones del láser como son el encendido y el apagado o el nivel de potencia.



- Robots

El acoplamiento de un láser a un robot industrial puede llevarse a cabo de tres maneras diferentes:

El primer sistema consiste en utilizar el robot para sujetar la pieza a mecanizar y moverla bajo el haz láser describiendo las trayectorias programadas. Al mismo tiempo, pueden asignársele funciones de carga y descarga de material, clasificación de piezas terminadas, selección y separación de piezas defectuosas o cualquier otra operación dentro de la cadena de producción. Para ello, el robot debe de estar dotado de un brazo articulado que le permita adoptar cualquier posición en el espacio, con una pinza en su extremo para sujetar las piezas y presentarlas frente al haz. El empleo de este tipo de robot resulta útil cuando las piezas son poco voluminosas.

La segunda opción se basa en el empleo de un robot con brazo articulado cuyo extremo disponga de una pinza para mover un sistema óptico o el cabezal láser. De esta manera el robot aproxima la boquilla hasta focalizar el haz sobre la superficie. En algunos casos se limita a realizar un acercamiento del sistema óptico, siendo éste último el que por medio de un motor de avance lento alcanza la posición focal correcta. En este caso, debe presentarse atención a la adecuada alineación de los espejos del sistema de suministro de haz, mientras que el robot puede ser del mismo tipo que los empleados en el caso anterior. Será el sistema de elección cuando el tamaño de las piezas no permita su manipulación o en el caso que se requieran estructuras excesivamente sólidas para manejarlas.

El sistema óptico presentará mayor o menor complejidad según el tipo de aplicación necesaria y la dificultad que entraña el posicionamiento hasta la zona de trabajo. Un sistema complejo presentará varias articulaciones, permitiendo de uno a seis grados de libertad para su manejo.

La tercera variante presenta una mayor complejidad ya que implica la utilización de un robot especialmente diseñado para esta aplicación. En éste el sistema óptico está integrado al brazo móvil con los espejos deflectores coincidiendo con las articulaciones del robot. Presenta la dificultad adicional de alineación de un número superior de



espejos, frente a la ventaja de poder operar con un solo sistema flexible. Éste método es el más aconsejable cuando la complejidad de la pieza a procesar dificulte el acceso a las zonas de trabajo.

La utilización de un brazo articulado con espejos puede en algunos casos sustituirse por un conjunto de piezas telescopicas extensibles, que reducen el número de espejos en función de la cantidad de posiciones que debe adquirir el focalizador.

En el caso de sistemas que incorporen un láser de Nd:YAG, existe la posibilidad del empleo de fibra óptica para la transmisión del haz desde el cabezal hasta el focalizador, con lo que se elimina la necesidad de los espejos deflectores, ganando flexibilidad, al mismo tiempo que disminuye la complejidad mecánica en el diseño del robot y las pérdidas de potencia por absorción o desalineación de los espejos.

Para programar un robot, el método más sencillo consiste en enseñarle directamente las configuraciones que deberá adoptar, moviéndolo manualmente. También se utiliza el método de descripción numérica de trayectorias, introduciendo los datos de forma directa, o una variante del control numérico, como si se tratase de una máquina-herramienta. Sistemas más complejos de CAD generan programas de trabajo por simulación gráfica sobre pantalla, que se transmiten a la unidad de control del robot sin necesidad de interrumpir el curso de su ejecución. El control del robot puede también regular la intensidad de salida del haz láser.



Figura 50. Robot para corte por láser. El haz llega al cabezal por fibra óptica.



-Scanners

El término scanner se corresponde en español a “exploración” o “barrido”, indicando que se cubre densamente una zona de superficie. Así, los scanners serán los elementos ópticos-mecánicos que permitirán a un haz láser efectuar un barrido de líneas colaterales hasta abarcar un área determinada.

La característica fundamental de estos sistemas es que pueden moverse con gran rapidez, pues al estar formados por piezas de pequeño tamaño y poca masa presenta muy poca inercia al movimiento. El sistema scanner más utilizado es el que utiliza espejos oscilantes. El haz láser se hace incidir sucesivamente en dos espejos que oscilan sobre ejes perpendiculares entre sí. A la salida del cabezal el haz láser es dirigido por medio de un espejo deflector a 45° hacia un espejo focalizador, que a su vez lo reflejará hacia el primer espejo móvil, el cual al oscilar moverá el haz a lo largo de una dirección. De modo análogo, con la oscilación del segundo espejo se regulará la posición del haz en la otra dirección del plano, perpendicular a la primera.

Hay que destacar que cada posición del haz sobre la superficie de trabajo viene fijada por una posición concreta de los dos espejos oscilantes.

Un sistema equivalente y muy utilizado es el que sustituye el conjunto formado por el espejo deflector más el espejo focalizador por una lente focalizadora a la salida del haz seguida de dos espejos oscilantes, con los dos motores que gobiernan su movimiento.

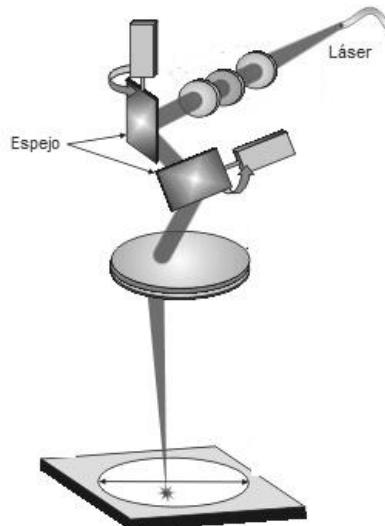


Figura 51. Scanner láser con dos espejos giratorios.

Un sistema diferente es el que emplea un conjunto poligonal de espejos deflectores en rotación. El haz láser, al incidir sobre una cara de espejo en movimiento, describirá un tramo de línea recta sobre la superficie cuya longitud vendrá delimitada por las dimensiones de dicho espejo. Al continuar la rotación, el haz pasará a incidir sobre el espejo contiguo, con lo que el haz volverá a la posición inicial describiendo nuevamente el fragmento de línea recta.

Al combinarse este movimiento con uno perpendicular de la pieza puede abarcarse también un área de trabajo de dos dimensiones.

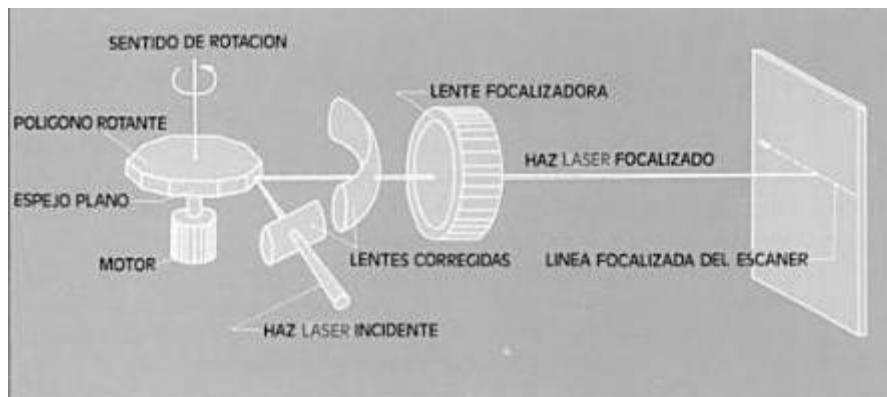


Figura 52. Sistema poligonal de espejos deflectores.



- CAD/CAM para equipos láser

El diseño asistido por ordenador (CAD), unido a la fabricación asistida por ordenador (CAM), constituyen una vía para incrementar la productividad y eficacia en la industria.

Un programa base para aplicaciones láser, como marcado, corte, soldadura o perforado, presenta cuatro componentes mayoritarios, todos con una referencia común. Los componentes (input, output, técnica de posicionamiento y láser) usan vectores de información.

El primer componente input genera una base de datos CAD a partir de la información exterior, utilizando para ello programas software. El desarrollo de paquetes de software de ayuda al diseño para PC ha convertido la obtención de piezas optimizadas para el procesado láser en una realidad asequible en tiempo y costes para cualquier industria.

El siguiente componente, output, actuará como nexo de unión entre los códigos generados por el programa CAD y el lenguaje de trabajo de la porción de programa CAM. La mayoría de configuraciones CAD usan plotters con coordenadas X-Y, para poder obtener dibujos físicos de la información generada. Generalmente, los datos para salida de plotters suelen estar organizados de forma estándar utilizando el mismo tipo de lenguaje para gráficos. Existe además una gran similitud entre los comandos necesarios para gobernar el lápiz de dibujo y el cabezal del láser. Ambos funcionan bajo órdenes simples, por ejemplo, lápiz arriba, lápiz abajo o enciende láser, apaga láser. La gran ventaja recae, sin embargo, en la posibilidad de generación de órdenes complejas por parte del sistema CAD, como son la operación de círculos, arcos de circunferencia, relaciones de escalas o velocidades de barrido o llenado de bloques gráficos.

La técnica de posicionamiento del haz láser es el tercer componente importante en la integración al programa CAM. La mayoría incluyen mesas de coordenadas, robots o sistemas galvanométricos de espejos deflectores X-Y (scanners). Todos ellos incluyen una estructura de comandos que puede utilizar vectores de información llegada de un postprocesador para coordinar y sincronizar los movimientos de la herramienta láser.



El propio láser constituye el cuarto componente, proporcionando flexibilidad, versatilidad y una vía de trabajo segura para la manufactura y fabricación. Al mismo tiempo, el programa vectorial dirige el ciclo de trabajo regulando con eficacia el uso de la potencia del láser.



7.- Aplicaciones

Debido a las propiedades particulares del haz de radiación luminosa con su gran potencia concentrada (el láser), hacen de él una herramienta ideal en muchas aplicaciones donde se precise de una fuente controlada y localizada de energía. Si a este factor diferenciador inicial se le suma la facilidad para su control automático y regulación, se observa cómo se amplía el campo de utilización a otros usos en los que la precisión, la minimización de daños colaterales y la menor modificación de la características del material circundante y de sus dimensiones son importantes. De ahí el amplísimo rango de aplicaciones.

En el mundo industrial se han producido avances sustanciales en el desarrollo e implantación de tecnologías láser en todo tipo de materiales. Dentro del procesado de materiales, el láser es utilizado como se había dicho en todas las ramas (corte, soldadura, marcado microscópico, etc.) al poder ser empleados en casi todos los materiales y tener una muy buena respuesta en el mecanizado. Se utiliza para:

- Realizar soldaduras.
- Cortar materiales.
- Perforar.
- Marcar.
- Tratamientos superficiales.
- Mediciones, etc.



7.1.- Soldadura de materiales

7.1.1.- Proceso de soldadura por láser

Para entender la posible aplicación del láser en el campo de la soldadura hay que partir de la idea de que soldar es unir dos materiales calentándolos hasta su punto de fusión y uniéndose al solidificarse. Bajo este punto de vista, el láser se utiliza como la fuente de calor capaz de fundir los materiales a unir.

El láser es una herramienta muy útil, tanto en la soldadura de elementos metálicos de hasta unos 20 mm de espesor como en la microsoldadura de elementos metálicos próximos a elementos altamente sensibles al calor, como por ejemplo se dan en la industria electrónica. Las industrias de automóvil, aeroespacial y naval han incorporado el láser en sus cadenas de montaje para soldar gran variedad de materiales. Entre estos están el plomo, metales y aleaciones preciosas, el cobre y sus aleaciones, el aluminio y sus aleaciones, el titanio y sus aleaciones, materiales refractarios, aceros inoxidables, aleaciones de níquel y hierro resistentes al calor.

Los materiales plásticos también se pueden soldar mediante el láser. El fundamento es el mismo: conseguir la fusión de los materiales para que al solidificarse se unan. Las limitaciones en este campo no vienen del láser sino de las características físicas de los plásticos, y hacen que su utilización sea mucho menor que el caso de los metales.

Los dos tipos de láseres más utilizados en la industria son el láser de Nd:YAG y el láser de CO₂, tanto en modo pulsado como continuo. Estos dos tipos de láser ofrecen la potencia necesaria para usos industriales (hasta 2 kW en láseres Nd-YAG, y hasta 15 kW en los de CO₂). Ambos son muy utilizados, pero el de CO₂ está más extendido por su mayor potencia y menor coste por unidad de potencia. El láser de Nd-YAG, en cambio, presenta la ventaja de poder ser transmitido por fibra óptica, lo cual aumenta la flexibilidad del sistema, permitiendo su uso en lugares de difícil accesibilidad, especialmente para soldadura 3D.

Los principales aspectos de la problemática de la utilización del láser en el campo de la soldadura son:



- Material: Propiedades ópticas de la superficie a la radiación; propiedades térmicas como conductividad, fusión, etc.; temperatura de fusión y ebullición; facilidad de soldadura.
- Geometría de la unión: Diseño; tolerancias; accesibilidad.
- Láser: Potencia, promedio y de pico; modo continuo o pulsante; modo (distribución espacial de la potencia); longitud de onda.
- Proceso: Velocidad de la soldadura; longitud focal utilizada; posición relativa del punto focal y la pieza; tipo de gas de aporte.

La soldadura por rayo láser es un proceso de soldadura por fusión que utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales a unir, obteniéndose la correspondiente unión entre los elementos involucrados. En la soldadura láser comúnmente no existe aportación de ningún material externo y la soldadura se realiza por el calentamiento de la zona a soldar, y la posterior aplicación de presión entre estos puntos.

La energía generada por el láser está dentro de la región óptica del espectro electromagnético, cuyas principales propiedades son que es una radiación:

- Intensa
- Monocromática: de una única longitud de onda.
- Coherente: los fotones están todos en fase.
- Unidireccional.

Mediante espejos se focaliza toda la energía del láser en una zona muy reducida del material. Cuando se llega a la temperatura de fusión, se produce la ionización de la mezcla entre el material vaporizado y el gas protector (formación de plasma). La capacidad de absorción energética del plasma es mayor incluso que la del material fundido, por lo que prácticamente toda la energía del láser se transmite directamente y sin pérdidas al material a soldar.

La alta presión y alta temperatura causadas por la absorción de energía del plasma, continúa mientras se produce el movimiento del cabezal arrastrando la "gota" de plasma rodeada con material fundido a lo largo de todo el cordón de soldadura.



De ésta manera se consigue un cordón homogéneo y dirigido a una pequeña área de la pieza a soldar, con lo que se reduce el calor aplicado a la soldadura reduciendo así las posibilidades de alterar propiedades químicas o físicas de los materiales soldados.

- Tipos de láseres utilizados en soldadura

En el mercado se encuentran cualquier tipo de láseres útiles para la soldadura; el láser de Nd:vidrio, el láser de rubí, el láser de Nd:YAG y el láser de CO₂. Los dos primeros solo pueden operar en modo pulsado ofreciendo además un rendimiento muy bajo, lo que hace que sólo se utilicen en caso en que sea importante la localización de la soldadura. Los más utilizados en la industria son el láser de Nd:YAG y el láser de CO₂. El primero emite radiación de 1.06μm de longitud de onda y el segundo de 10.6μm.

Para proporcionar la densidad de potencia necesaria para fundir el material el láser puede operar en modo continuo o en modo pulsado. El láser de Nd:YAG opera generalmente en modo pulsado, aunque puede hacerlo también en modo continuo, mientras el láser de CO₂ opera tanto en modo pulsado como continuo.

Para la soldadura con el láser de CO₂ se puede utilizar un modo de pulsación estándar en el cual se producen pulsos cuya potencia máxima es el doble del nivel de potencia en onda continua. Este pico de potencia elevada desciende al nivel de potencia continua y se mantiene en este nivel hasta el final del pulso. Si se emplea un modo de pulsación intensificado, el pico alcanza hasta unas cinco veces el nivel de potencia del láser en onda continua. Este pico desciende rápidamente a un nivel de potencia menor que el de la onda continua ya que el láser está operando en modo de saturación de corriente. Trabajando en modo de pulsación intensificada el láser es muy estable y muy útil para la técnica de soldadura en profundidad.

Otra de las ventajas de operar en modo pulsante es la menor formación de plasma, mejorando con ello el rendimiento del proceso. El plasma que se forma se sitúa justo en la zona de trabajo, donde incide el haz con el material absorbiendo gran cantidad de energía antes de que ésta llegue a la pieza.

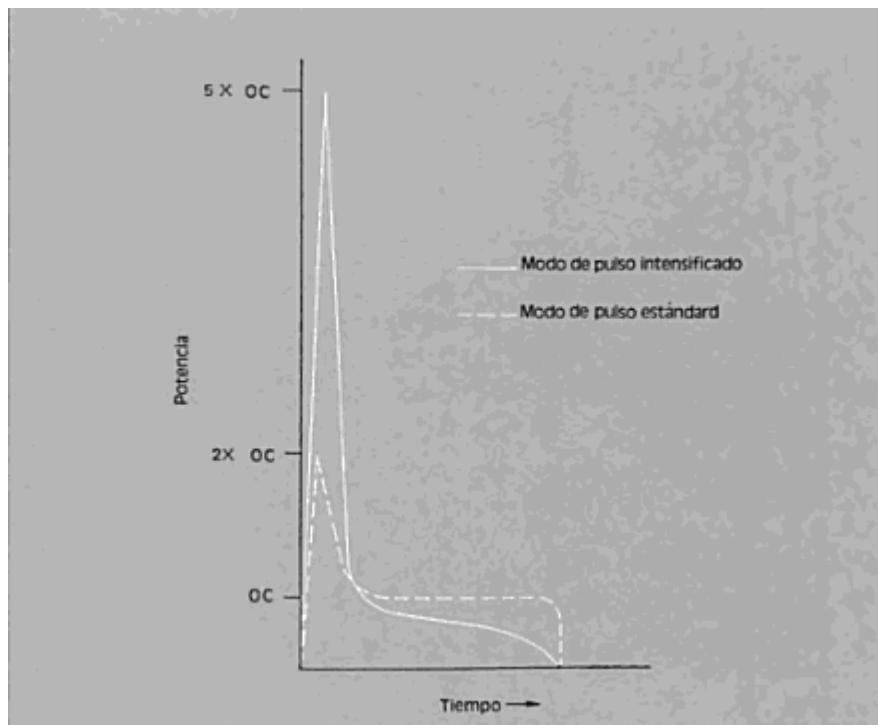


Figura 53. Picos de potencia al operar en modo pulsado

Para que se forme el plasma es necesario superar un umbral de ionización en la zona. La ionización creada por la interacción del haz láser con la atmósfera creada por la soldadura, compuesta por el gas de aporte y vapores procedentes de la misma, contribuye a alcanzar dicho umbral. Con la utilización del láser pulsado se reduce el tiempo de interacción, la ionización de la zona es menor y el plasma no llega a formarse.

Respecto de la distribución de energía de cada láser, el láser de Nd:YAG tiene una distribución de energía uniforme o de la forma multimodo con alta divergencia del haz. La forma de distribución de energía del láser de CO₂ es gaussiana con alta capacidad de concentración de la energía del haz debido a su baja divergencia.

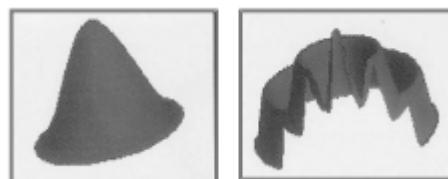


Figura 54. Modo gaussiano y modo multimodo

En la elección del tipo de láser a utilizar habrá que tener en cuenta el material a tratar, así como la potencia que requerirá el proceso. En cuanto al material, los láseres



de Nd:YAG no pueden cortar ni fundir materiales transparente tales como vidrios o plásticos, mientras que los láseres de CO₂ si lo permiten. Los láseres de CO₂ son de potencias mucho más altas y energéticamente más eficientes que los láseres de Nd:YAG.

El tercer tipo de láser utilizado en la soldadura es el láser de diodo. Estos láseres tienen una baja calidad del haz que limita sus aplicaciones en el campo de la soldadura de metales, aunque su principal ventaja es la reducción de los elementos necesarios para generarlos. Estos láseres de diodo pueden funcionar de dos formas diferentes:

- De forma directa: en este caso el haz, de forma rectangular, se enfoca directamente sobre la pieza a procesar. Se emplea para soldeo por conducción, recargues y tratamientos superficiales.
- Acoplado a fibra: en este caso el haz se enfoca para que entre en una fibra óptica de forma que a su salida tiene una forma cilíndrica del tipo gausiana. Se emplea fundamentalmente para soldeo por conducción y láser-“brazing”.

7.1.2.- Soldadura de metales

El principal problema que hay a la hora de soldar metales es el alto coeficiente de reflexión que éstos presenta a la radiación de los láseres tanto de CO₂ (10.6μm) como de Nd:YAG(1.06μm). Sin embargo, la absorción de la radiación es función de la temperatura del material. Se trata, por consiguiente, de calentar lo suficiente la superficie de material a fin de que la reflexión de la radiación disminuya y la energía quede absorbida. El punto umbral, a partir del cual aumenta la absorción, coincide con el punto de fusión del material. Además, a temperaturas bajas, la absorción de la radiación de 1.06μm es algo mayor que para la radiación de 10.6μm, pasando a coincidir a temperaturas algo más altas.

Eso hace que para la soldadura de metales con alta reflectividad, como el aluminio y las aleaciones de cobre, el láser de Nd:YAG, sea el más apropiado.

Para conseguir superar el valor umbral de potencia y fundir el material el haz láser se focaliza sobre la superficie, obteniéndose densidades de potencia comprendidas entre 0.5×10^6 y 5×10^7 W/cm². Se puede utilizar un láser en modo continuo de alta



potencia o bien un láser pulsante con una frecuencia de pulsos suficiente para permitir su solapamiento.

Métodos de soldeo

Se pueden distinguir dos procesos de soldado por láser en función de la densidad de potencia aplicada sobre la pieza:

1. Por conducción o modo con fusión.

Se utiliza densidad de potencia baja. Al iniciar la aplicación del rayo láser el metal refleja gran cantidad de la radiación y solo absorbe una pequeña parte, que calienta por conducción el metal en la zona de incidencia del haz y en sus alrededores. Una vez que el calor aportado es lo suficientemente elevado se funde la superficie del metal. Este metal en estado líquido absorbe mayor proporción de energía del láser con lo que se consigue un mayor aprovechamiento de la energía.

El metal funde hasta una cierta profundidad, que depende de las características térmicas del material base y de los parámetros de soldadura. La convección es el factor más importante que influencia la geometría y la homogeneidad de la composición del baño fundido. Es también responsable de la formación de defectos como una penetración irregular, porosidad o falta de fusión. La conducción térmica no es direccional y por lo tanto se obtienen valores bajos de la relación profundidad-anchura del cordón.

La profundidad de penetración alcanzable con la soldadura por conducción es inferior a 1÷2 mm, dependiendo de las propiedades térmicas del metal soldado.

En este tipo de soldadura se obtienen unas relaciones de profundidad/anchura de 1.5/1 lo que quiere decir que su profundidad puede ser sólo de una vez y media el valor de su anchura.

El rendimiento del proceso oscila entre el 8% y el 15%. Por otro lado el área de afectación térmica (región adyacente a la zona fundida que sufre transformaciones durante la soldadura debido al calor recibido) es bastante amplia.



La soldadura láser por conducción es utilizada en varias aplicaciones como el cierre hermético de componentes electrónicos y la unión de metales preciosos.

Si la intensidad del haz láser aumenta, se supera la temperatura de vaporización del material, tendremos tres fases simultáneas sobre el material (sólido, líquido y gaseoso).

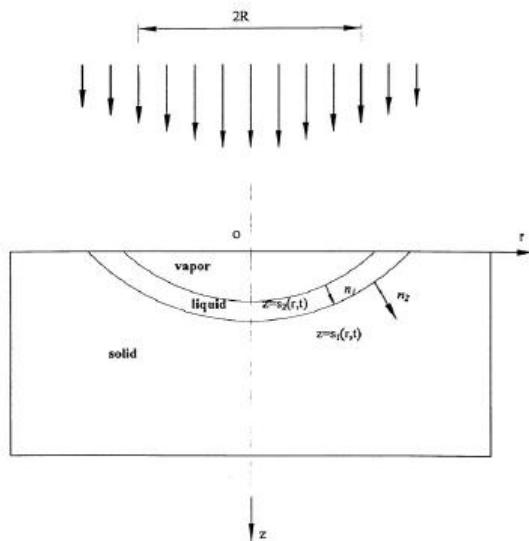


Figura 55.

Este aumento de intensidad del láser hace coexistir el líquido y el vapor, en este momento comienza la formación del keyhole y el sistema en superficie es inestable.

2. Por penetración o modo con keyhole.

En este procedimiento se emplean láseres de densidad de potencia alta ($>10^{10} \text{ W/m}^2$) que proporcionan un mayor aprovechamiento de la energía y una mayor penetración de la soldadura. Se trata de calentar la zona de la soldadura por encima del punto de fusión, formando un agujero o keyhole en el metal. El keyhole se forma cuando el haz de densidad de potencia elevada causa la vaporización del sustrato con formación de un hoyo. La presión producida por el vapor en el cráter provoca el desplazamiento hacia arriba del material fundido a lo largo de las paredes del hoyo.

El keyhole se forma solo si el haz tiene densidad de potencia suficiente ($>10^6 \text{ W/cm}^2$). Está llenado por gas o vapor creado por la continua vaporización del



material por el haz. La cavidad está rodeada por el líquido que a su vez está rodeado por el sustrato sólido. El flujo del líquido y la tensión superficial tienden a anular la cavidad, mientras el vapor, que se genera continuamente, tiende a mantenerla.

El keyhole puede alcanzar un estado estacionario (en el cual la cavidad y la zona fundida se mueven a la velocidad del haz mismo). Al aumentar la intensidad del haz, por encima de un cierto valor límite, la formación del keyhole se “debilita” y al mismo tiempo se observa una ampliación de la zona de fusión. Este fenómeno se debe a la absorción de la radiación láser por parte del plasma (que se ha formado por ionización de los vapores metálicos gracias al aumento de la intensidad del laser) que a su vez transmite la potencia absorbida a la pieza elaborada.

El efecto pantalla del plasma puede ser limitado con el uso de gases adecuados (ej. He) o reduciendo la presión ambiental. La protección aumenta de manera importante al aumentar la longitud de onda; por este motivo los láseres a Nd:YAG (con $\lambda=1.06\mu\text{m}$) son preferibles a aquellos a CO₂ (con $\lambda=10.6\mu\text{m}$) cada vez que se requieran altas intensidades. La focalización del haz es mejor en los sistemas con menor longitud de onda, porque resulta menor el tamaño del spot y por lo tanto mayor la intensidad.

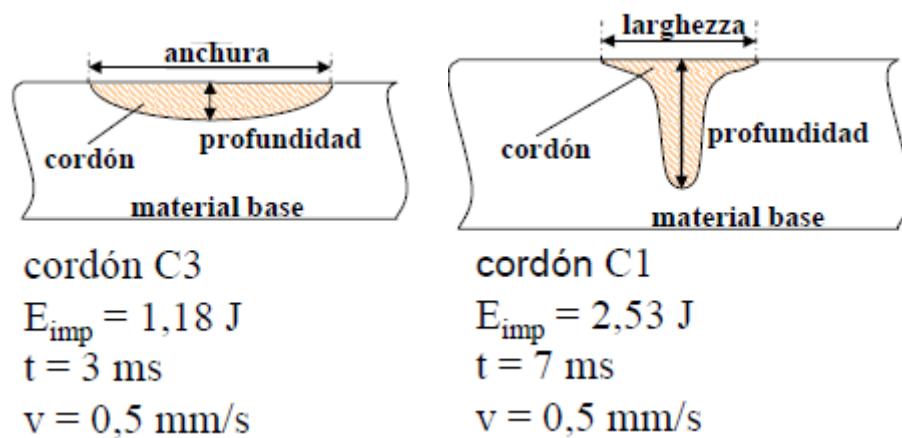


Figura 56. Comparativa soldadura por conducción y keyhole

Las dimensiones de la soldadura vienen dadas por la profundidad y la anchura de la zona de material fundido. En un corte transversal de la soldadura la zona de fusión presenta una forma de “pera invertida” con diferentes relaciones de



profundidad/anchura. La penetración de la soldadura es función de la velocidad del proceso, de la potencia del haz y de las características de su focalización.

La máxima penetración para una potencia y velocidad dadas se alcanza focalizando el haz láser ligeramente por debajo de la superficie, decreciendo cuando el haz se focaliza en la misma superficie o a más profundidad en la pieza de trabajo.

En este tipo de soldadura se obtienen unas elevadas relaciones de profundidad/anchura, entre 5/1 y 12/1, lo que permite la realización de buenas soldaduras.

La zona de afectación térmica es la región adyacente a la zona fundida que sufre transformaciones durante la soldadura debido al calor recibido. Es un parámetro importante en la valoración de la calidad de la soldadura.

De la misma manera que hablamos de una eficiencia en la absorción de la radiación incidente de los distintos materiales, podemos hablar de un rendimiento de la soldadura. Tomaremos este rendimiento como el coeficiente entre la energía necesaria para soldar el material y la energía total utilizada en el proceso. La diferencia entre estas dos energías es debida a las pérdidas por conducción dentro del material y por convección y radiación al ambiente. La determinación de la energía necesaria para soldar un material se realiza mediante cálculo, en el cual se tienen en cuenta el área de la zona tratada, la velocidad de la soldadura, la densidad y las propiedades térmicas del material. En este tipo de soldadura se alcanzan rendimientos de hasta el 70%.

- Composición y caudal del gas de protección (gases de aporte).

Los gases empleados en soldadura láser deben cumplir varias funciones:

- Proteger al metal fundido de la atmósfera.
- Controlar la formación de plasma.
- Proteger las ópticas del humo y de las salpicaduras.
- Controlar el afinado de las propiedades del material.



Estas funciones son las mismas tanto si se suelda con láser de CO₂ como con Nd:YAG, a excepción del control de la formación del plasma que solo se tiene en cuenta en el caso de los láseres de CO₂. Es importante elegir bien el gas para cada aplicación de soldadura, para lo que hay que tener en cuenta:

- Tendencia a la formación de plasma:

Durante la soldadura láser de alta potencia la zona de la unión se llena con metal en estado vapor, átomos ionizados y electrones, formando un plasma que facilita la transferencia de energía entre el haz láser y el material. Este plasma puede absorber mucha energía del haz e impedir la soldadura. Los gases de la soldadura y del ambiente pueden reducir o aumentar la formación de este plasma. En la tabla se muestran las propiedades de diferentes gases. El helio es un gas inerte, pero reduce la formación de plasma porque tiene una energía de ionización elevada y un peso molecular pequeño. En cambio el argón se ioniza con facilidad siendo propenso a la formación excesiva de plasma. La formación de plasma es propia de la soldadura láser de CO₂ de alta potencia ya que requiere una alta intensidad de energía.

- Afinado de las propiedades del material:

Para muchas aplicaciones, es conveniente utilizar gases inertes, como son el helio y el argón, porque no reaccionan con el metal soldado. En cambio, los gases activos como son el dióxido de carbono y el nitrógeno, pueden reaccionar con el metal base formando óxidos, carburos y nitruros, viéndose afectadas las propiedades mecánicas de las piezas. Sin embargo, estos gases pueden ser ventajosos en determinadas aplicaciones, como el uso del nitrógeno para proporcionar mayor resistencia a la corrosión y una menor variación microestructural de la soldadura en ciertos tipos de acero inoxidable.

Gas	Peso molecular (g/mol)	Conductividad térmica a 1bar (W/m.K)	Energía de ionización(eV)	Densidad relativa/aire
He	4	0,15363	24,6	0,14
Ar	40	0,17320	15,8	1,38
N ₂	28	0,02550	15,6	0,96
CO ₂	44	0,01616	13,8	1,52

Figura 57. Propiedades de los gases



- Tipos de materiales

Las propiedades físicas de los materiales son de gran importancia para el éxito de la utilización del láser en la soldadura. Las propiedades que más influyen son la difusión térmica, que da idea de la trasmisión de calor dentro del material, la reflexión de la radiación y los puntos de fusión y ebullición.

- Acero carbonado: Su principal constituyente, el hierro, presenta un valor medio de difusión térmica, altos puntos de fusión y ebullición y alta reflectividad a la radiación de $10,6\mu\text{m}$. A pesar de esta última característica se lleva a cabo la interacción de la radiación con el material.

Aquellos aceros que tienen azufre, fósforo o impurezas en cantidades elevadas sufren roturas al enfriarse rápidamente. El plomo provoca la aparición de porosidades debido a que vaporiza en la zona de fusión por las altas temperaturas alcanzadas.

Si el contenido del carbón supera el 0.25%, la soldadura resulta altamente quebradiza y aparecen roturas si se produce un rápido enfriamiento. En estos casos es aconsejable un calentamiento previo de la pieza a soldar, así como un lento enfriamiento después del proceso, se hacen necesarios para evitar dichas roturas.

- Acero inoxidable: Presenta una menor difusión térmica y coeficiente de difusión para el láser de CO_2 , así como un nivel de impurezas menor que el acero carbonado. Esto hace que sea un buen material para soldar, obteniendo mayor profundidad de soldadura, menor anchura de ZAT (zona de afección térmica) y soldaduras más limpias que para el acero carbonado.

- Aceros del tipo sintéticos (serie 300): Son buenos candidatos para la soldadura con láser. Se obtiene mejores resultados que con las técnicas tradicionales de soldadura debido a la mayor localización de la energía y a la vaporización de las impurezas.

- Aceros del tipo ferríticos y martensíticos (serie 400): Pueden también soldarse con láser. La única precaución que hay que tener es un precalentamiento de la pieza para evitar roturas durante el enfriamiento posterior a la soldadura.



- Aleaciones de aluminio: Tienen un coeficiente de difusión térmica muy alto y un coeficiente de reflexión alto, lo que hace que la interacción del láser con el material sea difícil. Por otra parte, el bajo punto de ebullición del zinc y del magnesio, típicos constituyentes de las aleaciones, favorecen niveles altos de porosidad en la soldadura. Esto deja a las aleaciones 2219, 3003 y al aluminio como los únicos materiales en los que se pueden obtener buenas soldaduras con láser.

- Aleaciones de cobre: Estas aleaciones presentan un coeficiente de reflexión y difusión térmica aún más altas que las de aluminio. Para poder tratar estos materiales con láser es necesario un tratamiento de la superficie, a fin de rebajar el coeficiente de reflexión. Una vez solucionado este problema se pueden realizar soldaduras con láser, aunque la potencia requerida es mayor que para el caso de aleaciones de aluminio. En el latón, por la alta proporción de zinc, las soldaduras presentan una gran porosidad.

- Aleaciones de níquel: Estas presentan una buena absorción de la radiación por lo que, al igual que las de acero, las aleaciones que pueden soldarse por métodos convencionales también pueden hacerse por láser. El níquel es muy sensible a la contaminación por aceite, grasa o suciedad, por lo que es necesario limpiar profundamente la superficie a soldar.

- Tántalo, titanio y zirconio: Estos materiales tienen un bajo coeficiente de difusión térmica y de reflexión, lo que permite llevar a cabo buenas soldaduras con láser. La principal dificultad es la gran facilidad que tiene para oxidarse, lo que obliga a realizar la soldadura en una atmósfera inerte.

- **Sistemas láser utilizados**

Una instalación láser dedicada al soldeo de materiales consta de las tres partes siguientes:

- Un generador láser: es la máquina encargada de transformar la energía eléctrica de red en luz coherente.

- Un camino óptico: sirve trasladar la luz láser desde el generador hasta el lugar de aplicación. Para ello se usan una serie de espejos que giran el rayo. Algunos tipos de



láser permiten realizar la conducción de luz por fibra óptica, lo que aporta una mayor flexibilidad a los procesos.

- Una cabina de protección: su función es proteger a las personas que se encuentran en esta zona y evitar la entrada de forma descontrolada. Sus características dependen del tipo de aplicaciones y de la tecnología empleada en el generador láser. Integran en su interior los siguientes elementos:

- Un cabezal de aplicación: es el encargado de recoger el láser al final del camino óptico y adecuarlo, mediante ópticas, para que sus características sean las adecuadas en el lugar de aplicación. Se le pueden añadir elementos supplementarios como cámaras, sensores, elementos de sujeción, conducciones de hilo de soldar,.. dependiendo de la aplicación.
- Un sistema de movimiento: Para poder efectuar la unión entre dos piezas es necesario que haya movimiento relativo entre el cabezal de soldadura y las piezas. Para lo que se puede emplear distintos tipos de instalaciones.
- Unos utilajes de posicionamiento: El posicionamiento de las chapas es un tema crítico pues su precisión se determina en décimas de milímetro. Destaca la precisión del ajuste del posicionamiento entre chapas y del posicionamiento del haz láser respecto a la junta a soldar.
- Un lugar de aplicación.

- Sistemas auxiliares: entre los que destaca el sistema de refrigeración, que pueden ser circuitos de agua o un flujo continuo de mezcla de gases, dependiendo de la tecnología constructiva empleada y del modo de excitación.

Debido a la gran variedad de características técnicas de las distintas fuentes de soldeo disponibles, existen diversos tipos de instalaciones que se pueden clasificar en función del tipo de sistema empleado para el desplazamiento relativo entre al haz y la pieza:



- *Sistema de desplazamiento 2D:* Son instalaciones que se emplean, por ejemplo, para la realización de formatos a medida (“tailored blanks”) en aplicaciones de automoción.
- *Sistema robotizado con brazo articulado:* Se trata de un sistema que transporta el láser de CO₂ desde la fuente hasta el cabezal de soldeo con la ayuda de un brazo articulado. Es un tipo de instalación no muy común en la actualidad pues es mucho menos versátil que una fibra óptica y además necesita un mayor mantenimiento.
- *Sistema robotizado con fibra óptica:* En este tipo de sistemas, el haz láser viaja desde la fuente hasta el cabezal de soldeo a través de una fibra óptica flexible. Son sistemas con un precio más bajo y además prácticamente no existe limitación en la movilidad del robot.
- *Sistema robotizado con fibra óptica y cabezal escáner:* Se trata de un tipo de instalación idéntica a la anterior pero en el que, mediante un movimiento sincronizado de varios espejos y lentes, el cabezal de soldeo es capaz de desplazar el haz láser en un campo de trabajo espacial. La ventaja de esta tecnología radica en que permite ahorrar tiempos de posicionamiento entre cordones minimizando de esta forma el tiempo de ciclo.
- *Sistema de soldadura remota:* Este sistema consiste en una fuente de láser CO₂ de alta calidad de haz colocada sobre un pórtico fijo. El haz, al salir de la fuente, se dirige hacia un sistema óptico formado por una lente de enfoque motorizada y un espejo con dos ejes de giro de forma que el campo de trabajo consiste en un área XY.
- *Láser montado sobre robot:* La fuente láser se puede colocar directamente sobre la muñeca de un robot cuando su peso no es demasiado elevado. Existen robots especialmente diseñados para montar láseres de CO₂ que reducen la longitud y la complejidad del camino óptico.



- *Máquina de control numérico 3D:* Existen sistemas CNC específicos para aplicaciones en tres dimensiones que necesiten una precisión de movimiento importante. En el caso de usar una fuente de CO₂, el sistema CNC incorpora el camino óptico a las estructuras del pórtico, mientras que si emplea una fuente de estado sólido acoplada por fibra óptica se diseñan carriles para asegurar el buen movimiento de la fuente.

7.1.3.- Geometría de soldadura

Un aspecto importante en la soldadura con láser es la ausencia de aporte de material exterior, es decir, toda la soldadura proviene de los materiales a unir. Esto hace que en la geometría de la soldadura la unión entre los cuerpos a soldar sea un punto crítico para evitar la formación de agujeros y consiguientemente de malas soldaduras.

Algunas de las geometrías utilizadas en la industria son las siguientes:

- *Soldadura de extremos:* se aplica el haz láser en la zona intermedia entre dos piezas de espesor entre 1 y 6mm, la zona de unión ofrecerá más resistencia a la tracción incluso que el material primitivo.

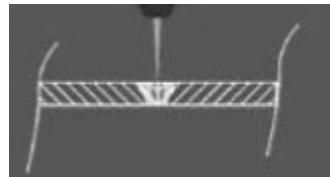


Figura 58. Soldadura de extremos.

- *Soldadura solapada:* el láser se aplica sobre la superficie superior de una de las piezas cuyo espesor no debe superar los 3mm. La soldadura debido a la penetración, alcanza la pieza inferior uniendo así las dos.

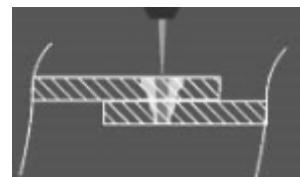


Figura 59. Soldadura solapada.

- *Soldadura en T:* el funcionamiento es similar al anterior método con la particularidad del posicionamiento de la pieza inferior.

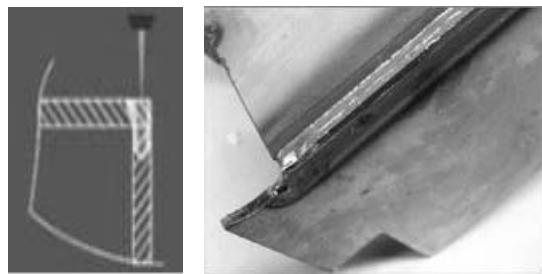


Figura 60. Soldadura en T.

- *Soldadura de filo.*



Figura 61

La tolerancia de separación entre las piezas oscila entre el 10 y el 15% del espesor total. En algunas ocasiones se usan pinzas u otros utensilios para hacer presión sobre los extremos de las piezas y conseguir así mayor unión entre ellas.

Para la realización de soldaduras del tipo soldadura a tope, soldadura en t y soldadura de filo, no tienen que biselarse los extremos del material. Los cortes con segueta son aceptables si son rectangulares y las piezas se sujetan fuertemente durante la operación.

Para soldar a solapa los bordes a escuadra no tienen gran importancia, pero el espacio entre las piezas limitará severamente la penetración como la velocidad de soldadura.

7.1.4.- Microsoldadura y soldadura de no metales

Un campo de aplicación muy importante de la soldadura por láser es la industria de la electrónica. En ella se aprovecha por un lado la posibilidad que ofrece la soldadura láser de extrema localización de la misma, y por otro la fiabilidad del proceso. Esto se aplica en la realización de soldaduras próximas a uniones vidrio-metal o a componentes deteriorados por el calor y en el sellado de componentes electrónicos de gran valor o baja producción que deben garantizar su funcionamiento incluso bajo severas condiciones ambientales. Este es el caso de elementos destinados a aplicaciones aeronáuticas, tanto civiles como militares.



La confiabilidad de un sistema microelectrónico complejo depende, en gran parte, de la confiabilidad de un gran número de conexiones realizadas por medio de varios procesos de unión. Una de las técnicas básicas de unión para estas conexiones es la soldadura por láser.

La virtud del rayo láser como fuente de calor en soldadura es la posibilidad de concentrar una energía grande en pequeñas superficies durante cortos intervalos de tiempo, es decir la posibilidad de un elevado proceso local de calentamiento. Gracias a ello se ofrece la posibilidad de efectuar la soldadura de piezas en el estado de termotratamiento, de soldar metales inmediatos a las soldaduras metalovitreas o metalocerámicas, de llevar a cabo la soldadura de diversos metales y aleaciones activos y poco fundibles con la mínima alteración de la estructura inicial del material en la zona de influencia térmica.

Debido a la velocidad de calentamiento de los materiales en la soldadura por radiación láser, la acción térmica en las zonas de influencia térmica se reduce al mínimo, con una duración de impulso pequeña la cantidad de metal evaporado del baño de soldadura puede resultar grande. El aumento del tiempo de radiación con energía constante facilita un calentamiento más suave y disminuye la masa de material evaporado. No obstante un aumento desmesurado del tiempo de radiación con energía constante conduce a una disminución de la profundidad de fusión. Para la mayoría de los metales utilizados en microelectrónica, y en la soldadura de placas con un grueso de hasta 0,2 mm, la duración óptima de la radiación láser está en la gama de 1 a 8mseg. En la soldadura el procedimiento más conveniente para controlar la intensidad del rayo láser es la variación de la energía en la mancha focal. La soldadura por láser encuentra su aplicación en el montaje de diversos elementos de la técnica de radio. Los conductores redondos y planos, cobre, níquel, oro, kovar, acero inoxidable y tántalo, con un grosor de 0,05 a 0,5 mm, se sueldan de plano, de punta, en forma de "T" o en forma de cruz.

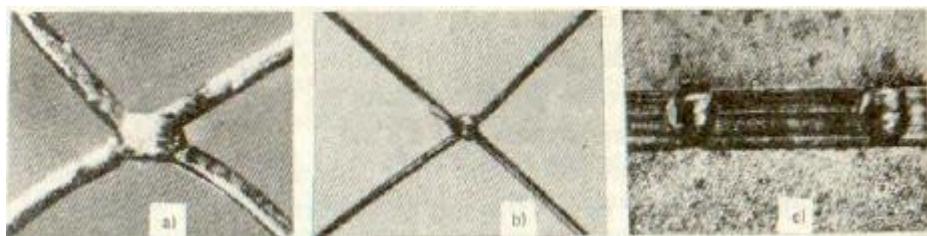


Figura 61. Aspecto externo de las Uniones Soldadas Láser
(a) Hilo de cobre de 150 μm de diámetro. (b) Hilo de Nicromo e hilo de Níquel de 50 μm de diámetro.
(c) Lámina de Níquel con sección de 50x300 μm con lámina de cobre de 100 μm de espesor.

En los conductores paralelos la repetida reflexión hace que la mayor parte de la radiación láser enfocada en el punto de contacto, sea absorbida por el metal lo que aumenta la eficacia del proceso. En los conductores planos terminales de los circuitos integrados con los conductores internos impresos, que también admite se den varios puntos de soldadura para elevar la seguridad de la soldadura. Debido a las dificultades que ofrece mantener a nivel de ebullición la temperatura de la zona central del baño, en la soldadura láser de uniones de plano y en particular en el montaje de cápsulas planas sobre circuitos impresos tienen gran aceptación las uniones tubulares. En ellas la parte central del rayo luminoso se hace pasar por un agujero previamente practicado a través de terminal y placa, mientras que las zonas periféricas del chorro funden los materiales siguiendo el perímetro del agujero.

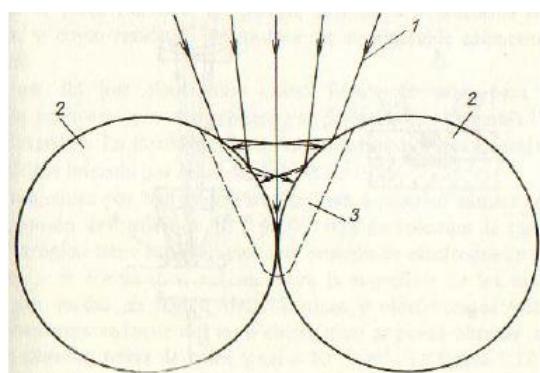


Figura 63. Esquema de soldadura por radiación láser de conductores colocados paralelamente.
1- Radiación Láser. 2- Hilos a soldar. 3- Zona de fusión.

Otra aplicación importante de la microsoldadura láser la encontramos en la joyería.

El mecanismo de soldadura con láser de materiales no metálicos es el mismo que para cualquier otro tipo de material. Mediante el aporte de energía se crea una zona de material fundido el cual, al solidificarse, une los materiales.



En el caso de los plásticos encontramos que sus características físicas los hacen excelentes candidatos para el corte por láser pero limitan severamente su soldadura con esta técnica.

Su bajo coeficiente de conductividad térmica no permite una gran profundidad de zona fundida dentro del material. Para incrementar esta profundidad el láser debe moverse muy lentamente. Sin embargo, existe un límite inferior para esta velocidad, ya que si el láser se mueve demasiado despacio se produce un exceso de absorción de la energía incidente y con ello la vaporización del material. Por otra parte, algunos plásticos presentan cambios en su estructura química si la temperatura del material fundido es demasiado elevada. Debido a estas circunstancias, el rango de temperaturas de trabajo se reduce a unos pocos grados centígrados, aspecto que dificulta enormemente la operación.

Dadas estas consideraciones, queda claro que la soldadura de plásticos con láser podrá ser realizada en plásticos delgados y con características térmicas y de absorción peculiares. El polietileno y el polipropileno son los mejores candidatos para la soldadura con láser de CO₂. Estos plásticos son semitransparentes el haz, lo que permite una mayor profundidad de la zona fundida, y además son químicamente estables a alta temperatura.

En la soldadura de plásticos mediante láser se distingue entre los métodos a tope y de radiación penetrante. En ambos casos, el punto donde se ejecuta la soldadura se calienta por absorción en el foco del haz luminoso, con plena exactitud geométrica y térmica. Para ello, es imprescindible y, a la vez, una limitación que al menos uno de los dos materiales que se pretende soldar absorba bien la luz del haz de láser con su longitud de onda específica, a fin de que se funda en la zona del haz incidente y se una así al otro material.

En el caso de la llamada soldadura a tope mediante láser, ambos componentes son de material absorbente. En cambio, en el de la soldadura por radiación penetrante solo una de las piezas a soldar es absorbente, mientras que la otra es transparente. El haz de láser atraviesa el material transparente y es absorbido en la superficie de contacto de la otra pieza. En esa zona, el primer plástico se funde y, por efecto del calor transmitido



en ella, se funde asimismo el material transparente, siempre que se aplique la presión conveniente y el intersticio entre ambas piezas sea suficientemente pequeño.

Aparte de tales diferencias fundamentales entre los procedimientos, se distingue además entre la soldadura de contorno y la soldadura simultánea como método estratégico. Mientras que en el caso de la soldadura de contorno o por bandas el haz de láser se concentra en un punto y se conduce por la línea de empalme mediante un control programado, en el de la soldadura simultánea se aplican varias fuentes de láser contiguas. Entre el haz de láser y la pieza no hay movimiento relativo, a diferencia del primer método, o sea, la soldadura de contorno.

Algunos vidrios y cuarzos amorfos también pueden ser soldados con láser obteniendo excelentes resultados. Estos materiales presentan un punto de fusión alto, una baja conductividad térmica, son muy estables a alta temperatura y la tendencia a la vaporización de la superficie es mucho menos pronunciada que en los plásticos.

7.1.5.- Ejemplos de aplicación

- Industria de la automoción
 - *Soldadura de componentes*

En general, se trata de componentes de pequeño tamaño y unidos con bastante precisión. Pueden ser desde circuitos electrónicos y alternadores hasta inyectores de gasolina, componentes de aire acondicionado o elementos del sistema de transmisión como la palanca de cambios. Se utilizan láseres de Nd-YAG y de CO₂ y, en algunos casos, también de Nd-crystal. Como caso especial, se puede mencionar la soldadura -solder o braze- de los contactos eléctricos mediante diodos láser de alta potencia.

La principal ventaja que presenta el uso del láser recae en su mayor facilidad para acceder a regiones más estrechas, con lo cual se permite la producción de nuevos diseños de componentes más ligeros y estrechos que con otros sistemas de soldadura. Aunque algunos de los sistemas láser utilizados son de hasta 14 kW, lo más habitual es encontrarse en el rango de 5 a 10 kW. Suelen utilizarse sistemas con óptica fija y



movimiento de pieza. Generalmente, estos sistemas tienen como máximo 3 ejes, siendo frecuente el uso de ejes rotatorios para componentes de simetría cilíndrica.

- *Soldadura de chapas de carrocería*

La introducción del láser en este campo, iniciada desde mediados de los 70, no ha sido sencilla y aun queda mucho por hacer en este área. Este tipo de soldaduras requieren láseres de alta potencia y estaciones de soldadura con sistemas de posicionamiento robotizados considerablemente complejos y de gran tamaño (robots pótico de cinco ejes, robots de seis ejes que manipulan brazos articulados extensibles para la transmisión del haz láser, o robots articulados con transmisión interna del haz). Requieren, por tanto, una infraestructura para el manejo de las piezas que añade coste y complejidad al sistema.

Sin embargo, la gran cantidad de ventajas que presenta el láser frente a las clásicas instalaciones de soldadura por puntos mediante resistencia eléctrica, hacen que el esfuerzo valga la pena. Entre esas ventajas se encuentran las siguientes: Consistencia e integridad de la soldadura, acceso por un único lado, reducción de la masa y anchura de pestañas, menor extensión de zona afectada por el calor, menor distorsión térmica, aumento de la fuerza estructural y alta velocidad y flexibilidad de diseño. La geometría de unión más utilizada es la de solape.

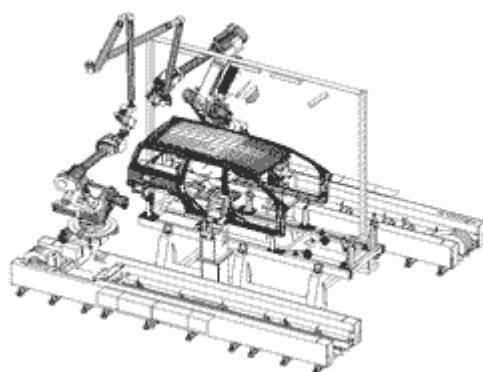


Figura 64. Sistema de soldadura láser de CO₂ para techos de automóviles

En General Motors, por ejemplo, existen ya muchas estaciones de soldadura láser para soldar techos, marcos de ventanillas, etc. Una de sus últimas instalaciones en la planta de Mansfield consiste en una estación con dos láseres robotizados de CO₂ de 5 kW, capaces de soldar los cuartos de panel interior izquierdo y derecho para varios



modelos distintos de coche, disminuyendo a la cuarta parte el espacio ocupado por la anterior instalación de soldadura por resistencia eléctrica, y minimizando el tiempo de cambio. Sin embargo, la proporción de estaciones de soldadura láser sigue siendo pequeña frente a las de resistencia eléctrica en este tipo de aplicaciones. Actualmente, la mayor parte de las instalaciones de soldadura láser para este tipo de aplicaciones son de Nd:YAG.

Otro caso especial de este tipo de aplicación es la unión de distintos materiales usados en carrocería (acero chapado en cinc, aluminio y otros compuestos) mediante la preactivación por calentamiento láser de los adhesivos. Este proceso puede sustituir al pre-fixturing por soldadura por puntos con resistencia, evitando sus inconvenientes.

- *Tailored blank welding*

Esta última aplicación consiste en la soldadura de chapas planas de diferente composición y/o espesor previamente al proceso de embutición y corte (Tailored blank welding). Su utilidad reside en la posibilidad de reutilizar los restos que sobran del corte o estampación de otras chapas, así como en unir en una sola pieza secciones de chapa de distintos materiales, usando el más caro solo donde realmente es necesario. Por ejemplo, se pueden unir restos sobrantes del corte de otras piezas para formar una barra de refuerzo lateral en puertas de automóvil: esto requiere una pieza de una cierta longitud y resistencia, pero sin requerimientos estéticos puesto que va en el interior de la puerta y no se va a ver, de manera que se puede aplicar este tipo de chapa soldada con un considerable ahorro de costes.

El uso de chapas constituidas por diferentes partes de distintas características también supone un ahorro importante en peso y coste de material. Las distintas partes a unir pueden tener desde una distinta composición hasta un diferente grosor o recubrimiento de distintos materiales. Por ejemplo, en ciertos modelos de Cadillac, el cinturón de seguridad va anclado en su parte superior a un pilar central, que debe tener suficiente resistencia. En vez de utilizar un refuerzo soldado en la parte superior de un pilar formado por una única chapa de iguales características en toda su longitud, se puede diseñar un nuevo pilar formado por dos trozos de chapa soldada, siendo el de la parte superior de un mayor grosor para tener más resistencia. Esto redunda en la



eliminación del refuerzo, disminución del metal utilizado, un menor utillaje de ensamblaje, etc.

Aunque estas aplicaciones (típicamente, soldaduras de unos 0.8 mm. de espesor) se pueden efectuar con láseres de 1 kW, se usan también láseres de CO₂ de alta potencia, de 6 e incluso hasta 14 kW, con el fin de aumentar la velocidad y asegurar una penetración suficiente. Por otra parte, la posibilidad de transmisión del haz por fibra óptica en láseres de Nd-YAG simplifica el diseño de la máquina y permite el uso de robots convencionales para realizar la aplicación. Generalmente, las soluciones que emplean este tipo de tecnología son de un coste inferior a las basadas en el láser de CO₂ transmitido por espejos. Este tipo de aplicaciones se realiza con sistemas de dos-tres ejes y óptica móvil. La geometría de unión es a tope, lo que requiere una buena preparación y ajuste de los bordes de soldadura. La calidad y eficacia de los utillajes de sujeción es determinante debido a la geometría de unión utilizada.

- Reparación de moldes: Soldadura de deposición con rayo láser

Hay muchos motivos por los que los moldes de inyección deben ser reparados o re-trabajados. Los fallos pueden suceder durante la propia fabricación de los moldes o de los electrodos. Los bordes muy agudos o las partes delicadas del molde pueden sufrir daños durante su uso, manipulación o transporte. Las partes sometidas bajo fuerte presión están sujetas a desgaste y deben ser re-trabajadas si los valores de tolerancia se desplazan fuera de sus límites. Por supuesto, las piezas también se deben reemplazar de cuando en cuando.

En la soldadura por deposición con láser, el área de la pieza rota o dañada se rellena usando varilla de aportación. El alambre es guiado sobre el componente de manera que el haz láser provoca la fusión conjunta y simultánea del alambre y la superficie del material base, en el orden de un milisegundo. Dependiendo del diámetro de la varilla empleada, la altura total de la unión se alcanza con la adición repetida de capas de alambre. El contorno geométrico final se obtiene a continuación mediante técnicas de mecanizado –corte- o electro erosión.



- Soldadura laser de ferrocarril (paneles laterales de vagón)

Las excelentes cualidades de la soldadura laser para soldar chapas de espesores finos sin crear apenas distorsiones y con un cordón de soldadura muy fino, lo hace ideal para diversos sectores , tales como el ferrocarril o cualquier otra industria que requiera soldar chapas finas de acero común o inoxidable. En este tipo de industria existen diversas aplicaciones de la soldadura láser, como puede ser la soldadura de costados o la soldadura de perfiles a los costados (omegas).

Ventajas principales: El poco aporte de calor y por lo tanto la casi nula deformación del material, unido a la excelente cosmética del cordón, minimizan al máximo los procesos posteriores habituales a la soldadura, como enderezado, pulido etc.

- Soldadura láser en envases

En el año 2005, la empresa alemana Rasseltein GmbH, productor de hojalata, presentó un nuevo embase, el CosmoCan®, un innovador concepto tanto en materia de diseño como de ingeniería.

El sistema de soldadura láser ha sido usado por primera vez con éxito en este caso, a escala masiva para el formado del envase CosmoCan®. La tapa, el cuerpo y el fondo han sido soldados por sistema láser, lo que se ha traducido en un acabado suave en las uniones. Este nuevo concepto de manufactura ofrece la oportunidad para otros desarrollos especiales, y además ha significado un ahorro en material y costos porque se ha pasado de calibres de 0.17mm a solo 0.12mm en el nuevo CosmoCan®.



Figura 65. Envase CosmoCan®.

La nueva tecnología de soldadura para envases con láser facilitará también la producción de envases de tan solo 10mm lo cual abre completamente las posibilidades a nuevos procesos de manufactura. Y otra gran ventaja e innovación adicional en las características del nuevo envase CosmoCan®, es que el acero constituyente del material del envase, ha sido recubierto por ambas caras con PET; y esta película polimérica puede imprimirse en la cara interna para lograr una excelente apariencia gráfica.



- Piezas aeronáuticas en aluminio, titanio, superaleaciones base níquel



Figura 66.

- Industria de alimentación (soldadura de máquinas de procesado y embalaje de alimentos, cuchillas de corte)

7.1.6.- Comparativa con otros métodos de soldadura

Las principales ventajas de la soldadura con láser en comparación con otras técnicas de soldeo son las siguientes:

- El láser, al ser luz, no tiene inercia, favoreciendo arranques y paradas rápidas.
- Alta localización de la energía y bajo aporte térmico.
- Mínima zona afectada por el calor (ZAT).
- La deformación de las piezas es menor.
- Alta velocidad de soldadura y buena penetración.
- Se consiguen cordones de alta calidad con altas resistencias de tracción y fatiga.
- Requiere menos preparación de juntas.
- No es necesario el uso de electrodos y el material de aporte es opcional.
- Con la soldadura por “heyhole” pueden alcanzarse profundidades de penetración mayores que con otras técnicas.
- Permite la soldadura de varias capas de material con una sola pasada debido al alcance de la profundidad de penetración.
- Permite la localización exacta de la soldadura sobre la junta, presentando éstas grandes resistencias a tracción y a fatiga.



- Posibilidad de recuperación de cantos dañados.
- Altas tasas de producción.
- Se puede acceder a zonas difíciles de alcanzar con otras técnicas.
- Puede usarse en el soldeo de materiales difíciles, como por ejemplo el titanio. .
- Fácil automatización del proceso.
- Permite alcanzar mayores velocidades, mayor penetración y calidad de la soldadura, y permite soldar juntas que, debido a sus características, resultan difíciles de soldar mediante otras técnicas.
- La precisión del procedimiento es la mayor existente.

Por otro lado, el principal inconveniente de la soldadura con láser es el precio, aproximadamente 10 veces superior al coste de la soldadura a arco. Un aspecto técnico crítico en la soldadura por láser son los parámetros de impulso, hay que controlarlos para evitar la vaporización de la superficie.



7.2.- Corte de materiales

7.2.1.- Proceso de corte por láser

El corte con láser es un proceso inducido térmicamente, en el cual la energía del haz de luz focalizado es absorbida por el material, que se vaporiza formando así el corte. Los factores que determinan la posible aplicación del láser en el corte de materiales son, en su mayoría, propiedades ópticas, térmicas, eléctricas y mecánicas del propio material. La absorción de la radiación incidente es uno de los más importantes. No sólo depende de las características del material, sino también en gran medida de la longitud de onda de la radiación.

Para los materiales aislantes, la absorción aumenta rápidamente llegando a valores próximos al 100% a partir de una longitud de onda de $2\mu\text{m}$. En el caso de los metales la absorción disminuye exponencialmente con la longitud de onda.

Para la longitud de onda de $10.6\mu\text{m}$, típica del láser de CO_2 , la interacción entre los electrones libres del material y la radiación es la causa de la alta reflectividad y baja absorción que presenta los materiales de elevada conductividad eléctrica como el oro y la plata. Para el hierro y materiales de conductividad eléctrica media, la reflectividad y la absorción tienen valores intermedios.

Del mismo modo que la reflexión de la radiación disminuye con la temperatura de material, la absorción aumenta con la temperatura, pudiendo experimentar un incremento de hasta el 30%. La combinación de estos dos fenómenos permite la utilización de láseres de CO_2 para corte de materiales.

Por otra parte, los metales presentan mayor absorción para la radiación de $1.06\mu\text{m}$, características de los láseres de Nd:YAG. Esta menor longitud de onda permite la focalización del haz a un diámetro más pequeño, con lo cual la densidad de potencia alcanzada es muy grande, haciendo que el láser de Nd:YAG sea en muchos casos el elegido para la mecanización de sustratos metálicos. Eso sí, las potencias promedio que se alcanzan con los láseres de Nd:YAG son muy inferiores a las desarrolladas por los láseres de CO_2 , hecho que explica la mayor utilización del láser de CO_2 en la industria.



Otro factor a tener en cuenta es la conductividad térmica, ya que para que la radiación absorbida consiga elevar la temperatura hasta el punto de fusión y posterior vaporización es necesario que el calor suministrado permanezca concentrado en la zona de trabajo. Si el calor se difunde rápidamente (Oro, plata, cobre), el corte se ve dificultado.

En la técnica de corte por láser la extracción del material se realiza por evaporación del mismo a lo largo de la zona de corte. El calor necesario para conseguir esta evaporación viene proporcionado por un sistema constituido por la fuente del haz láser y la boquilla, que incorpora la óptica de focalización y permite el flujo de gas de aporte, acoplando todo ello a un conjunto mecánico que permita el movimiento relativo entre el haz láser y la pieza a cortar.

La transmisión de calor al material se realiza mediante la focalización del haz sobre la superficie, elevando su temperatura hasta el punto de ebullición y con la consiguiente evaporación. La temperatura de la zona adyacente es algo inferior con lo que sólo se produce fusión del material.

La longitud focal de la lente a utilizar depende del espesor del material. Para planchas gruesas es necesaria una mayor profundidad de campo, lo que se consigue con lentes de focal larga.

Además del haz incidente se utiliza un flujo coaxial de gas de aporte el cual realiza varias funciones: contribuye a la expulsión de material al incidir sobre la superficie de corte a presión, potencia el corte por oxidación de los metales o evita la combustión al crear una atmósfera inerte en el caso de los no metales, y protege la óptica de la incidencia de partículas procedentes de la zona de corte.

El haz focalizado y la corriente de gas de aporte inciden sobre la cara superior de la superficie a cortar. Parte del haz es reflejado y parte es absorbido. Esta fracción de energía absorbida provoca un aumento de la temperatura, evaporando una zona del material e iniciando así el corte. A partir de este momento, el calor se propaga preferentemente en profundidad hasta atravesar la totalidad del material. El cilindro de material evaporado constituye el llamado frente de erosión. Concéntricamente a este



frente se forma una fina capa de material fundido separando la zona de corte del bloque sólido. Este frente avanza siguiendo el movimiento, trazando la línea de corte.

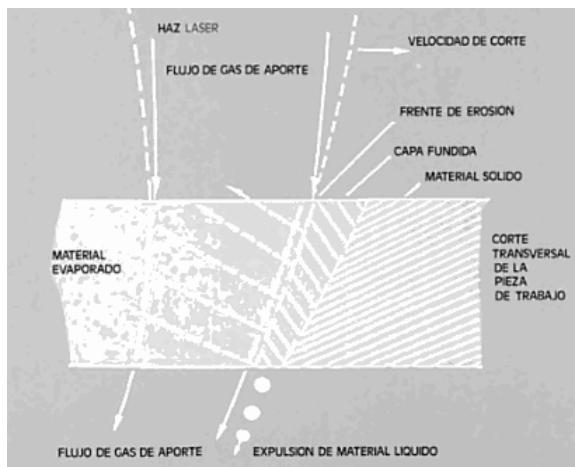


Figura 67. Geometría del proceso de corte

En el caso de utilizar un gas de aporte no inerte se produce una reacción exotérmica que contribuye a calentar esta zona de material fundido alcanzando temperaturas superiores al punto de ebullición. Este fenómeno provoca una fuerte evaporación en la superficie de la capa fundida con gran eliminación de material. Además, una fracción de la zona fundida es arrastrada fuera de la pieza debido a la presión del gas.

- Distintos procesos de corte láser

En el proceso de corte láser podemos distinguir tres situaciones distintas:

- *Corte por sublimación láser:* La alta intensidad del haz láser vaporiza el material directamente en el punto de trabajo. Luego, por lo general se usa un gas inerte para cortar, o sea, para expulsar el material y generar la ranura de corte. Esta situación la encontramos principalmente restringida al corte de sustancias no metálicas, como ser madera, papel, cerámica o plástico.
- *Corte por fusión láser:* Aquí, el material fundido o derretido por el haz láser es expulsado por medio de nitrógeno, generando la ranura de corte. El nitrógeno es inyectado en la boquilla a alta presión (hasta 20bar) y al salir de ella por una pequeña perforación de la punta, se convierte en un



chorro de alta energía cinética. La fusión láser es particularmente utilizada en el corte de aceros cromo-níquel o aluminio libre de óxido, produciendo superficies de corte metalúrgicamente limpias.

- *Corte por quemado láser:* El haz de láser calienta el material hasta su temperatura de encendido. Aquí se usa oxígeno como gas de corte. Después de alcanzada la temperatura de encendido, el material “se quema” con un chorro de oxígeno, generando una reacción exotérmica. La escoria producida es expulsada por medio del gas de corte generando la ranura de corte. Este proceso es particularmente utilizado para el corte de aceros dulces y en menor escala para cortes de acero inoxidable.

- Gas de aporte

Es conveniente recordar que el sistema de corte laser es un proceso de corte térmico, al igual que el corte por plasma y el oxicorte. En el sistema de corte laser se combina la energía de un “haz enfocado” con un gas de asistencia, el cual es introducido a través de una boquilla coaxial al haz enfocado.

La alta velocidad de este chorro de gas de asistencia sirve para:

- Ayudar a remover el material quemado, fundido o vaporizado, por la parte inferior de la pieza que se está cortando.
- Proteger las lentes de la escoria eyectada desde la zona de corte, especialmente durante la perforación.
- En algunas combinaciones de material/gas, para aumentar las velocidades y la calidad de corte.

Normalmente se utilizan como gas de asistencia, dos tipos distintos; una posibilidad es utilizar un gas reactivo (oxígeno) y la otra es cortar utilizando un gas inerte (nitrógeno).

Cuando se requieren bordes de corte libres de óxido entonces debe utilizarse un gas inerte. Igualmente en los casos donde el material reacciona fuertemente con el oxígeno, como por ejemplo el titanio.



7.2.2.- Sistemas de corte

Puede utilizarse cualquiera de los sistemas descritos en el punto 6 (Sistemas láser), tanto para la realización de cortes en piezas planas como en volumen.

En las actuales máquinas de corte por láser, la mayoría de las funciones están automatizadas. El punto focal varía de acuerdo con los parámetros preprogramados de corte. El cambio de gas de corte y las presiones son ajustadas automáticamente. Los parámetros estándar de corte han sido ajustados de manera que el operario sólo tenga que ejercer funciones simples, como el cambio o ajuste de boquillas o lentes.

Las potencias de 2.500 W o más han contribuido también al avance de la tecnología. Estas altas potencias son capaces de cortar sin dificultad grandes espesores, aunque las mayores ventajas se obtienen en chapa fina. Las velocidades de corte se han incrementado de manera espectacular con la utilización de gases inertes.

Las máquinas de corte por láser ultra rápidas, introducidas a finales de los años 90, y sus combinaciones integradas con punzonado no han dejado de ganar terreno en el sector de la chapa metálica. Los sistemas de corte por láser ultra rápidos, que usan la tecnología de motores lineales, ofrecen un rápido proceso de fabricación en combinación con una gran precisión y reducción de los tiempos de ajuste. La integración de gran cantidad de opciones en la unidad de punzonado posibilita la producción de una gran variedad de piezas con un bajo coste.

Como resultado de las duras condiciones económicas de los últimos años, las necesidades de grandes volúmenes de producción de una misma pieza han desaparecido. Los fabricantes actuales intentan integrar equipos de corte por láser y sistemas combinados de producción que les permitan dar una respuesta flexible a un cada vez más exigente mercado. La rápida producción de series cortas garantiza una fidelización del cliente.

Sin embargo, es importante conocer cómo las prestaciones de la actual tecnología darán paso al futuro. Evaluar cuáles se tornarán obsoletas es el desafío real.



- Máquinas combinadas Punzonado- Láser

Las máquinas combinadas punzonadora-láser se vienen usando desde la década de los 80. Estas máquinas permiten una gran variedad de operaciones de punzonado y corte por láser de CO₂ de más de 3.500 W en un solo sistema.



Figura 68. Máquina combinada punzonado-láser.

El punzonado puede ser generado tanto por un sistema hidráulico como por un mecanismo servo controlado, que combina la tecnología servo-eléctrica con la transmisión mecánica. Otra opción es la recientemente introducida tecnología de motores lineales, que permite a la punzonadora-láser trabajar tan rápido como un láser de alta velocidad.

Estos equipamientos combinados permiten operaciones de punzonado, nibbling, conformado, marcado, contorneado, plegado y roscado. Habitualmente el láser se utiliza para el corte de contornos exteriores y los interiores con geometrías especiales, para evitar las marcas de nibbling y las peligrosas rebabas, así como para reducir el número de operaciones y la necesidad de herramientas especiales.

Las extensiones modulares del sistema incluyen equipamiento de carga y descarga y extractores de piezas y robots de apilado multi-ejes. Las piezas cortadas por láser son guiadas fuera del área de trabajo a través de trampillas y sistemas de extracción. Desde este punto, o desde la misma posición de corte, el robot de extracción y apilado puede dirigir cada pieza a la dirección preprogramada de almacenamiento.



- Sistemas de corte por láser de alta velocidad

Las máquinas de corte por láser de alta velocidad pueden procesar piezas de diferentes contornos, espesores y materiales. Son capaces de cortar acero al carbono de 1 mm de espesor a 25 metros por minuto o más, y con potencia de 4.000 W más de 20 mm de acero al carbono. Al conseguir estas velocidades, los sistemas de corte por láser de alta velocidad han reducido drásticamente los consumos de gas y los tiempos de producción, pero nunca la calidad de las piezas.

La aceleración ha sido incrementada recientemente con la introducción de la tecnología de motores lineales. Se han tenido que desarrollar nuevas máquinas más rígidas para poder soportar las velocidades de posicionamiento de más de 300 metros por minuto y aceleraciones de más de 20 metros por segundo al cuadrado ($2g$), manteniendo la precisión de movimientos.



Figura 69

Con el desarrollo de estas velocidades, así como la inclusión nuevos periféricos para manipulación, como unidades de carga y descarga, el tiempo de procesamiento de un nesting completo se ha reducido significativamente.

- Automatización del proceso de corte por láser

La tendencia del corte por láser en los últimos 10 años ha sido incidir en la automatización. Algunas compañías han justificado la adquisición de automatismos en láser aduciendo la reducción de trabajo manual; sin embargo este no es el único elemento a considerar. El fin último de una célula automática, especialmente si se trata de un láser de corte, es ofrecer flexibilidad al fabricante de piezas.



Con la automatización, el tiempo de reacción a las necesidades del cliente es mínimo. Si la pieza puede ser dibujada también puede ser procesada e introducida en una cola de trabajo sin necesidad de manipulaciones de materia prima que puedan ralentizar el tiempo de respuesta.

Cada día más compañías están implementando estrategias de producción tendentes a minimizar los movimientos inútiles de materiales y la sobreproducción de piezas, de cara a reducir los stocks. Una célula automatizada de corte por láser puede ayudar a las empresas a conseguir esos objetivos.

- Corte 3D

Existen principalmente dos configuraciones de sistemas robotizados adaptadas al corte 3D por láser, los sistemas tipo pórtico (gantry) con varios ejes lineales de desplazamiento, y los robots antropomórficos, con ejes de tipo rotatorio. Los primeros emplean habitualmente láser de CO₂ con direccionamiento interno del haz, mientras que los robots (antropomórficos) utilizan láser de Nd:YAG con guiado por fibra óptica. Cada una de las dos configuraciones presenta aspectos complementarios.

Estas dos configuraciones presentan algunas diferencias en cuanto a precisión y repetitividad de trayectoria, velocidad de proceso, accesibilidad y volumen de trabajo. En general, los robots de menor robustez mecánica, se caracterizan por una menor precisión de posicionamiento y por un comportamiento menos uniforme en todo el volumen de trabajo. Los pórticos tienen mayor precisión, mayor alcance de la herramienta de corte y además, su flexibilidad inherente permite un comportamiento dinámico que depende de la configuración instantánea de los ejes.

Hablando específicamente de los sistemas pórticos, éstos cuentan con cinco ejes, el X, el Y, el Z, y los ejes rotatorios C y A. Adicionalmente a estos ejes, las máquinas cuentan con un eje B el cual controla la distancia entre el material y la boquilla del cabezal láser. Éste último permite que la máquina siempre tenga una distancia exacta entre la boquilla y el material así, si el material no es plano es posible sensarlo y que la boquilla se acerque o aleje del material.



Es importante anotar que lo único que no pueden hacer estas máquinas es cortar desde la superficie interna hacia la externa de la pieza. Por razones de seguridad del operario.

7.2.3.- Corte de metal

El corte por láser de los metales tiene el problema de alta reflexión que las superficies metálicas ofrecen a la radiación de los láseres de CO₂. Para resolverlos se requiere el empleo de altas densidades de potencia en la zona de trabajo. Esto repercute en el rendimiento del proceso, obteniéndose peores resultados que en el caso de materiales no metálicos.

Es característica la aparición de un estriado en toda la superficie del corte. La irregularidad de estas estrías aumenta con el espesor del material, obteniéndose las mejores calidades de corte para láminas delgadas. La aparición de estas estrías se debe a la variación de la temperatura o de las reacciones generadas por la interacción de la radiación.

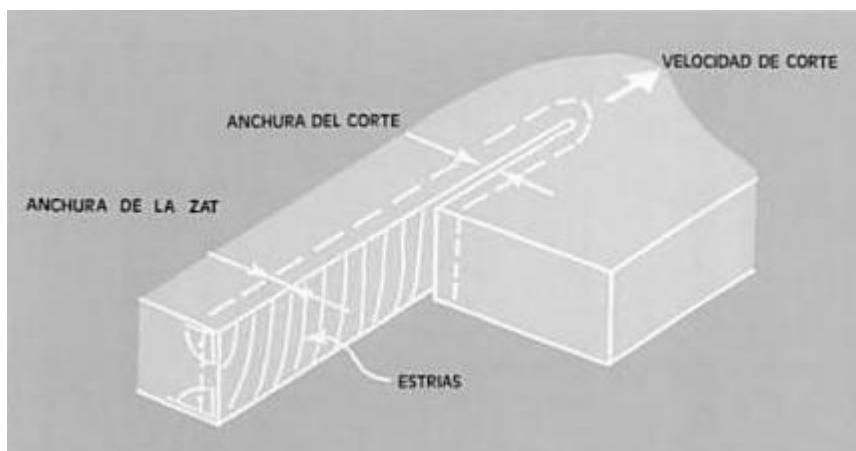


Figura 70. Aspecto del avance del corte

En el proceso de corte de materiales que incorporan hierro en su composición, se utiliza el oxígeno como gas de aporte. La zona de corte es calentada por el haz hasta temperaturas en las cuales se combina con el oxígeno. Se produce entonces una reacción exotérmica, liberando gran cantidad de energía. Esta energía se propaga radialmente a una velocidad superior a la de corte. El frente de oxidación avanza hasta ser alcanzado de nuevo por el haz. Este proceso se repite a lo largo de todo el corte, pudiéndose el responsable del estriado.



Atendiendo al efecto de avance de la capa de material fundido, las periódicas oscilaciones de temperatura que sufre pueden ser también las causantes de dicho estriado.

La amplitud y frecuencia de estas estrías es aleatoria cuando se trabaja en modo continuo, pero son controlables al operar con láser pulsante, mejorando la calidad del corte.

La asistencia gaseosa puede ser con oxígeno (O_2) para provocar una reacción exotérmica que acelere el proceso o con un gas inerte como el nitrógeno (N_2), que produce superficies de corte brillante sin oxidación. Al utilizar el nitrógeno, la velocidad de corte se reduce en un 50%, pero se protege de oxidación el borde de la zona cortada.

La conductividad térmica y la reflectancia del material juegan un papel muy importante. Si el calor se difunde rápidamente (Oro, plata, cobre), el corte se ve dificultado. Lo mismo sucede con materiales muy reflectantes (Aluminio), que requieren el empleo de elevadas potencias.

El fácil control del calor aplicado a la pieza permite minimizar la zona de afectación térmica, lo cual también mantiene la propiedad de resistencia de oxidación cuando se trabajan aceros inoxidables.

7.2.4.- Corte de plásticos

Los plásticos constituyen uno de los campos de mayor aplicación del corte de materiales no metálicos por láser. Absorben la radiación procedente de un láser de CO_2 en un porcentaje muy elevado, cercano al 100%.

El alto nivel de absorción permite por un lado trabajar con láser de potencias bajas, a partir de 30W, y por otro alcanzar altas velocidades de corte cuando se utilizan láseres con potencias superiores a 1kW.

La calidad del corte depende fundamentalmente del tipo de plástico ya que cada uno se comporta de modo distinto frente a la radiación. Los que presentan mejores resultados son aquellos cuyo punto de fusión es preciso y elevado, no presentan



descomposición con el aumento de la temperatura y los vapores formados no tienen coloración.

Independientemente del tipo de plástico, un factor importante para conseguir cortes de calidad es la distancia existente entre el punto focal y la superficie del material. Variaciones de posición relativa entre el foco y superficie afectan a la anchura del corte y a la forma del mismo.

Focalizando el haz a una cierta distancia por encima de la superficie, se obtienen cortes anchos con las paredes del corte rectas y paralelas. Cuando se focaliza en el interior del material, la anchura del corte en la parte superior es mayor que en el inferior, describiendo las paredes una forma cónica. En conjunto el corte es más estrecho, consiguiéndose los mínimos valores cuando se sitúa el punto focal a 1/3 del espesor total del material.

Si el punto focal coincide con la superficie, la anchura y forma del corte son intermedios de los casos anteriores.

En el corte de metacrilato el gas de aporte desempeña un papel muy importante,. La determinación del flujo adecuado para la consecución de resultados óptimos, además de la elección del tipo de gas, requiere un estudio para cada tipo de proceso en los que intervenga este material. De este modo, el empleo de gas inerte, como nitrógeno o argón, proporciona una mayor protección frente a la posible combustión o inflamación de los vapores formados que la suministrada por un flujo de aire. Sin embargo, el aire puede constituir un buen gas de aporte económico si se emplea un sistema potente de aspiración de vapores. El gas de aporte contribuye al mismo tiempo al enfriamiento de la zona de trabajo.

Si la presión del gas es excesiva los vapores formados se depositan de nuevo en el ángulo superior del corte. Debido a que aún está ligeramente caliente se adhieren con facilidad y forman una línea de rugosidad; en caso contrario la superficie del corte aparece lisa y brillante.



7.2.5.- Corte de madera

La madera absorbe la radiación láser casi en su totalidad. Las temperaturas que se alcanzan en la zona de corte son superiores a los 4700°C. La energía absorbida rompe los enlaces orgánicos del material produciendo los residuos típicos de la combustión de madera en ausencia de oxígeno, como son la carbonilla, alquitranes y algunos hidrocarburos gaseosos, los cuales pueden ser fácilmente extraíbles con un aspirador convencional.

La cantidad de residuo formado en el corte depende en gran medida del tipo de madera. Así, al cortar maderas nobles, se observa un ligero oscurecimiento de la zona cortada debido a la combustión producida. Cuando se trata de tablero, formado por capas sucesivas de madera encolada, el corte aparece mucho más oscuro, en especial en la zona de la cola, observándose bandas más claras, correspondientes a las propias capas de madera. Si la pieza a cortar está compuesto por aglomerado, en el que la madera se forma de pequeñas astillas y serrín prensado con cola, el resultado es un corte uniforme y muy oscuro de carbonilla.

La velocidad del corte depende entre otros factores del espesor del material. La anchura del corte es controlada por la potencia del láser, la velocidad del proceso y la distancia entre el punto focal y la superficie del material.

El gas de aporte desempeña un papel importante en el acabado del corte. Si se emplea un gas inerte como el nitrógeno se crea una atmósfera local exenta de oxígeno, minimizando las posibilidades de combustión. Para aquellas aplicaciones en las que el oscurecimiento del corte sea admitido puede emplearse como gas de aporte un flujo de aire.

Una de las grandes ventajas de la utilización del láser en el corte de la madera es la ausencia de contacto con la pieza. Gracias a ello se eliminan todos los inconvenientes causados por el clásico desgaste de las hojas de sierra. Por otra parte se evitan posibles deformaciones o fracturas en la pieza permitiendo el corte de maderas frágiles como las utilizadas en marquetería.



La gran versatilidad proporcionada por los sistemas actuales de corte por láser ofrece la ventaja de diseño de prototipos con facilidad. Esto hace que la producción de series cortas sea rentable.



Figura 71. Contrachapado cortado con láser.

7.2.6.- Corte de otros materiales

A pesar de que las aplicaciones industriales recaen mayoritariamente en el corte de metales, plásticos y madera, existe una gran diversidad de materiales que también pueden tratarse con láser. Entre estos encontramos piel, tela, cartón, papel, vidrio, cerámica, etc.

La capacidad de seguir la complicada forma de las piezas en la fabricación de ropa y de obtener cortes limpios con objeto de evitar el posterior deshilachado hacen del láser una herramienta idónea en la industria de la confección.

El procesamiento clásico de materiales cerámicos reviste gran dificultad debido a su gran dureza y extrema fragilidad. La gran importancia de estos materiales en la industria de la electrónica ha hecho que se investiguen nuevos procesos de mecanizado. El láser ha resultado ser de gran eficacia en este tipo de operaciones. El láser utilizado en este tipo de materiales sería de CO₂ trabajando en modo pulsado con el fin de disminuir al máximo la concentración de calor que podría causar microfisuras o llevar a rotura de la pieza.



El uso del láser para sistemas industriales de grabado y corte de papel hace posible reproducir grandes volúmenes de papel troquelado con detalles de mucha calidad. A diferencia del troquelado convencional, el láser de corte no necesita herramientas físicas que toquen el papel. Un haz de energía de luz pura vaporiza literalmente las fibras. Es como una extensión del proceso fotográfico, o como una luz proyectada que quita cada papel que le es expuesto.

Combinándolo con impresiones o con otro efecto embellecedor, el efecto puede ser impresionante. Este acabado relativamente nuevo crea una característica espectacular y efectiva en las piezas que tienen una aplicación publicitaria impresa, postales, tarjetas comerciales, invitaciones personalizadas, identidad corporativa y una amplia gama de diferentes medios de comunicación.

7.2.7.- Ejemplos de aplicación

El sistema láser de corte de materiales tiene, entre otras, estas aplicaciones:

- Corte de chapas

Una de las aplicaciones más extendidas del corte por láser es el corte de chapas metálicas. Muchas empresas se dedican a dar éste servicio a otras empresas que debido al precio de la maquinaria no pueden instalar una máquina de corte láser en su negocio.

Mediante láser se pueden cortar todo tipo de materiales metálicos, además se puede alcanzar cualquier orientación de corte dentro de la zona de trabajo pudiendo hacer cortes con cualquier trayectoria.



Figura 72. Detalle de corte en chapa.



- Industria automoción

Entre las aplicaciones industriales del láser para procesado de materiales se calcula que en torno al 60% de la actividad está dedicada al corte. Una de las industrias que mayormente absorbe esta actividad es la industria del automóvil y la industria auxiliar del automóvil.

Algunas de las causas que justifican el uso del corte láser de chapa tridimensional en el sector del automóvil son:

- Herramienta necesaria en corte de preseries en el proceso de fabricación de troqueles cortantes.
- Alternativa de coste aceptable al uso de troqueles cortantes. Se debe considerar esta aplicación únicamente en casos de series limitadas.
- Corte rápido de paneles de carrocería para el automóvil.
- Reduce el stock en series especiales posibilitando cortar opcionalmente. Es posible que el sector auxiliar suministre un tipo de pieza, que dependiendo de opciones de venta del vehículo podrá ser cortada o no en la cadena de producción de una manera opcional, por ejemplo justo en la etapa anterior al proceso de pintado.
- Las células de corte son flexibles y reducidas y si incluyen un robot, adquieren todas las posibilidades de reprogramación y reutilización que introduce éste último.



Figura 73. Corte por láser en fábrica de Seat-Martorell



- Fabricación de troqueles

Una de las aplicaciones de corte de madera por láser con mayor tradición es la fabricación de troqueles para la industria de embalajes de cartón. Desde hace aproximadamente 35 años en el Reino Unido se emplean sistemas láser que incorporan una fuente de CO₂ de 300W de potencia operando en modo continuo. Mientras la fuente permanece estática las piezas se desplazan debajo del haz por medio de unos ejes de coordenadas móviles gobernados por control numérico.

Utilizando nitrógeno de gas de aporte coaxial se consiguen ranuras limpias de cartón en el corte de madera de arce laminada y contraplacada.



Figura 74

- Otras aplicaciones

Hoy en día, el corte por láser es utilizado en multitud de empresas muy diferentes. Algunas de estas aplicaciones son:

- *Corte por láser en la personalización de objetos:* Agendas, plumas, llaveros, lentes, calculadoras, teléfonos móviles, equipos de radiocomunicación.
- *Corte por láser en serialización:* Etiquetas plásticas o metálicas para producción en serie.



- *Corte láser en manualidades y maquetas.*
- *Corte láser en la industria textil y calzado.*
- *Corte láser en publicidad:* Tazas, vasos y ceniceros grabados con logos; letreros...

7.2.8.- Comparativa con otros métodos de corte.

Las técnicas que compiten con el láser en el corte de materiales son la prensa, la sierra, el oxicorte, el corte por plasma y cortes por erosión (agua y agua con abrasivos).

Frente a los procesos mecánicos la principal ventaja del láser reside en la ausencia de contacto con la pieza y una mayor rapidez de la operación. El coste de la inversión inicial se compensa con los gastos que originan el desgaste de las sierras y troqueles. Además, gracias a la utilización de sistemas automatizados, el láser ofrece mayor versatilidad.

El corte por agua comparte con el láser la propiedad de no establecer contacto con la pieza. Además no origina ninguna afectación térmica y puede cortar espesores mayores. Sin embargo las velocidades de corte son inferiores con un coste de funcionamiento mayor. Por otra parte, la instalación es más voluminosa.

El proceso de oxicorte tiene un coste de inversión y de mantenimiento bajo, además es capaz de cortar grandes espesores y es un buen método cuando haya operaciones secundarias, como mecanizado posterior o fresado. Los inconvenientes de este método son la baja velocidad de corte, la necesidad de un tiempo de precalentamiento y la gran zona de afectación térmica, mucho mayor que en el láser. Además tiene problemas con el corte de inoxidables y aleaciones de aluminio.

Las principales ventajas del láser comparándolo con los otros procesos de corte son:

- Más rápido que plasma de alta definición
- Corta perfiles de forma compleja
- Elevada precisión y calidad de piezas cortadas (sobre todo en espesores pequeños y medianos)



- Kerf reducido
- Zona Afectada Térmicamente muy reducida
- Variedad de materiales a cortar
- Algunos inconvenientes de este proceso son:
- No puede cortar materiales reflectantes (Al, Cu, etc.)
- Velocidad reducida para espesores < 3 mm
- Inversión inicial elevada (en comparación con oxicorte, plasma o agua)
- Inversión alta / Coste elevado de consumibles (boquillas, electrodos)

La elección del proceso de corte más apropiado dependerá de nuestras necesidades:

- Tipo de material a cortar
- Espesores de corte
- Velocidad de corte
- Acabado pieza cortada
- Precisión
- Zona afectada térmicamente
- Necesidad de operaciones secundarias
- Complejidad de la pieza a cortar
- Costes de operación
- Inversión necesaria.



7.3.- Perforado de materiales

Poco después de la invención del láser en la década de los sesenta, se empleaba la primera máquina industrial que incorporaba un láser de rubí para perforar troqueles de diamante para trefilar alambres (estirar hilos para reducir su diámetro). Ésta fue declarada como la primera aplicación industrial conocida del láser a nivel de producción.

El perforado láser continuó desarrollándose en Estados Unidos a lo largo de los años setenta, empleándose para taladrar agujeros en componentes de motores en la industria aérea. Por entonces se utilizaban los láseres de rubí y Nd:vidrio, adoptándose con posterioridad el uso del láser de neodimio:YAG.

Este método ha demostrado ser un proceso seguro y efectivo durante más de 30 años, y actualmente es conocido suficientemente bien como para ser considerado una de las herramientas imprescindibles para la obtención de un perforado de precisión y calidad.

7.3.1.- Proceso de perforado por láser

Dependiendo del material, el perforado con láser se consigue por vaporización, fusión, o por una combinación de ambos fenómenos físicos. Así, en los metales se produce eliminación del material en estado líquido y vapor, formándose pequeñas gotas de metal que deben expulsarse del agujero. Esto ocurre gracias a la simultánea formación de vapor que al extenderse crea un aumento de presión que empuja al metal fundido, pero suele ayudarse por el empleo de un flujo coaxial de gas de aportación que lo impele a través del orificio de salida.

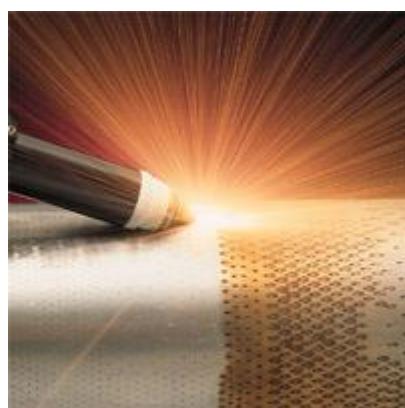




Figura 75

Una fracción del material resolidifica formando una fina capa que recubre el interior de las paredes del agujero, conociéndose por el nombre de refundido. Dicha capa suele ser de unas milésimas de espesor, dependiendo en cualquier caso del material, del número de pulsos, su longitud y energía, así como de los parámetros concernientes al gas de aportación. La proporción de líquido obtenida frente a la de vapor depende de la duración del pulso. Cuanto mayor es la amplitud del pulso mayor es la fracción líquida formada, con lo que aumenta la eficacia, pero presenta al mismo tiempo el inconveniente de causar un incremento en el espesor de refundido.

- Técnicas de perforado

La obtención de agujeros por láser puede realizarse por dos métodos diferentes:

- Perforado centrado o por percusión
- Perforado en círculo o trepanado

El perforado centrado presenta dos variantes: utilización de un único pulso por agujero, sistema válido en el procesado de materiales de poco espesor (microtaladros) o empleo de multipulsos, que constituye el método de percusión propiamente dicho, para materiales de mayor espesor. En éste tanto la pieza como el haz láser permanecen estacionarios durante el proceso. La perforación tiene lugar por una serie de pulsos que inciden sobre el sustrato hasta conseguir la total vaporización o fusión del material. El tamaño del agujero está directamente relacionado con el diámetro del haz focalizado, que en aproximación se corresponde con el producto obtenido al multiplicar el valor de la divergencia (expresado en miliradianes) por la longitud focal de la lente empleada, según la ecuación:

$$d_0 \approx \Theta \times f$$

donde:

d_0 = diámetro del haz focalizado

Θ = ángulo sólido de divergencia

f = longitud focal de la lente



Se puede variar ligeramente el tamaño del agujero obtenido por variación de la distancia del plano de trabajo al punto focal teórico proporcionado por la lente. Al alejarnos de dicho punto el diámetro del haz aumenta y lo hará también el del agujero. Sin embargo, esta técnica sólo es válida para pequeñas oscilaciones en las dimensiones puesto que a medida que aumenta el tamaño del haz por desfocalización disminuye la densidad de potencia, lo que puede conducir a la pérdida de la capacidad de perforación.

Por este motivo es más aconsejable el uso de lentes con longitud focal mayor o menor , obteniéndose haces focalizados de mayor o menor diámetro de modo que se asegure la máxima densidad de potencia.

Otro sistema de variación de tamaño al perforar consiste en modificar ligeramente la potencia incidente. Una vez alcanzando el nivel de potencia mínimo requerido para la perforación, un exceso de energía conduciría a la fusión o vaporización de mayor cantidad de material y, por tanto, a un incremento de las dimensiones del agujero.

Una variante de la perforación por percusión es el *drill-on-the-fly* (perforación al vuelo), en la cual la pieza gira y el láser está quieto. La posición de los orificios depende de la velocidad de rotación y de la frecuencia de los impulsos de láser. Si hacen falta varios impulsos se utiliza *Fire-On-The-Fly*, un programa que sincroniza el movimiento de la pieza con los impulsos de láser, asegurando que los impulsos múltiples se transmitan exactamente al punto deseado. El software Fire-On-The-Fly también puede cambiar la forma del impulso durante el proceso para mejorar la geometría del orificio.



Figura76



El método de trepanación es el indicado en la perforación de agujeros de tamaño del orden de 0.5 milímetros y superiores, donde los anteriores sistemas descritos pierden su utilidad. Consiste en la eliminación del material siguiendo la trayectoria de una espiral iniciada en el interior que se expande hasta alcanzar el diámetro deseado. De este modo se consiguen agujeros perfectamente circulares.

En esta técnica se puede realizar en modo continuo o en modo pulsado, con una frecuencia tal que los pulsos se solapan para conseguir un corte de material continuo.

El sistema mecánico utilizado para este método de perforación puede consistir en un mesa de coordenadas controlada por control numérico, ya sea moviendo la pieza o el focalizador. Sin embargo, suele emplearse un dispositivo óptico de rotación en el que la lente focalizadora gira en un plano horizontal de modo excéntrico al eje de salida del haz, provocando así el giro del haz sobre la pieza. El tamaño del agujero vendrá delimitado en este caso por las dimensiones de la lente empleada.

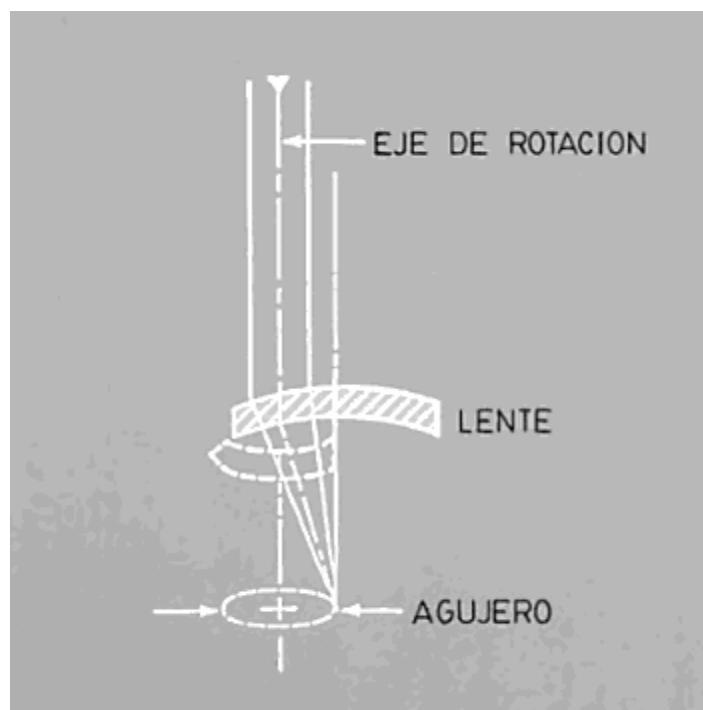


Figura 77. Perforado por trazado de círculos por rotación del haz láser

Cuando se quiera obtener tamaños aún mayores, del orden de una pulgada o superiores, será preferible utilizar un sistema de rotación en el que por medio de un espejo deflector a 45° , situado en el eje del haz, se desvíe horizontalmente hasta la distancia requerida, donde por medio de un segundo espejo, también a 45° , se dirigirá



hacia la pieza a través de la lente focalizadora. La rotación la efectuará en este caso el conjunto formado por el segundo deflector más la lente, abarcando un radio de giro y, por tanto, un diámetro de perforación considerablemente superiores.

La aparición de sistemas de posicionamiento láser extremadamente precisos y repetibles permite realizar figuras con tolerancias muy estrechas. La perforación con formas (shaped hole drilling) es una variante del trepanado que se usa cada vez con más frecuencia, porque concede mayor flexibilidad y libertad para el diseño de componentes.

En los dos métodos de perforado, centrado o trepanado, es necesaria la protección de la lente contra el material fundido o vaporizado que es expulsado del agujero, para evitar que se deposite al enfriarse por contacto con la superficie de la lente. Para este fin se incorporan boquillas de gas de aportación. Dicho gas, además de proteger la óptica del sistema, contribuye al perforado arrastrando fuera el material fundido y despejando el agujero limpio.

En el perforado de no metales, un flujo de gas inerte a la combustión como argón o nitrógeno, se emplea para minimizar los posibles efectos de oxidación o carbonización.

Dependiendo del material a mecanizar, puede ser necesario su protección antes de proceder al perforado (recubrimiento con ceras) o limpieza de las cavidades internas después de la perforación, teniendo en cuenta para la elección del método que la perforación centrada por pulsos suele expulsar el material fundido hacia la parte superior de la pieza, mientras que el trepanado lo hace hacia la inferior.

- Tipos de láseres utilizados en perforado

Los láseres más utilizados en la industria para la perforación son: el láser de Rubí, el láser de neodimio:Vidrio, el láser de Nd:YAG y el láser de CO₂. A excepción del de CO₂, que es de gas, los otros tres son de estado sólido. La elección del láser más apropiado para cada aplicación viene siempre supeditada al tipo de material a perforar, diámetro y profundidad del agujero, requerimientos finales de superficie y acabados, así como velocidad de producción y coste del equipo.



Los láseres de rubí y Nd:vidrio se usan en el perforado directo o método de percusión con frecuencias de pulso muy bajas, en general siempre por debajo de 10Hz, y elevados picos de energía por pulso, del orden de los 50-100J.

Los de Nd:YAG y CO₂ operan tanto en perforado centrado como en trepanado, lo que los hace más versátiles, siendo con diferencia los más empleados de los cuatro tipos.

Para el perforado de agujeros profundos y pequeños en materiales metálicos, suele emplearse el láser de Nd:YAG frente al de CO₂, debido a que el de Nd:YAG puede focalizarse a un diámetro de haz más pequeño, obteniéndose por percusión agujeros con una relación profundidad/diámetro muy elevada, y al hecho de que los metales suelen presentar mayor absorción a la longitud de onda de los láser de Nd:YAG que a la de 10.6μm del láser de CO₂.

Sin embargo, cuando se trata de agujeros mayores, el uso del láser de CO₂ se impone totalmente a los de estado sólido debido a que puede alcanzar potencias muy superiores. El diámetro máximo para el láser de CO₂ en el método de trepanado viene limitado únicamente por el área de trabajo definida por el sistema mecánico.

7.3.2.- Geometría del taladro

Cuando se trata de mecanización clásica, el diámetro y la forma del agujero vienen determinados por las características de la herramienta empleada. Del mismo modo, en el perforado con láser influirá el tipo de láser, la distribución de la energía, el nivel de potencia, el sistema óptico y la técnica utilizada, así como el material a taladrar.

El diámetro del agujero se puede controlar variando la cantidad de energía suministrada por el haz y también por la longitud focal y el grado de desfocalización de la lente. El diámetro mínimo vendrá determinado además por la longitud de onda del láser. Un Láser de CO₂ producirá agujeros con diámetro mínimo de 0.003 pulgadas (0.07 milímetros) en materiales de poco espesor, mientras que un láser de Nd:YAG taladrará agujeros de 0.0002 pulgadas (0.005 milímetros) en chapas delgadas.



En condiciones favorables pueden obtenerse agujeros perfectamente cilíndricos, con un diámetro del orden de 0.1 milímetros y con una relación profundidad/diámetro de 20. Esto es válido también para materiales muy duros que presenten dificultad para ser agujereados normalmente, como cerámica, diamante o materiales refractarios.

Las ventajas de taladrar en una aplicación particular pueden ser la obtención de agujeros limpios, con poco material refundido, estrechos y profundos, además de la característica común a todos los procesos láser de no ofrecer contacto con la superficie ni emplear herramientas adicionales, con lo que las fuerzas de mecanización son prácticamente nulas. Presenta además la posibilidad de actuar en lugares de difícil acceso o en ángulos estrecho respecto a la superficie, perforando agujeros de pequeñas dimensiones, donde las herramientas comunes suelen ser susceptibles de ruptura.

Suele utilizarse en modo pulsado ya que presenta dos efectos beneficiosos. El primero consiste en que la cantidad de energía transmitida al material puede regularse por el tiempo de duración del pulso. El segundo en que la primera parte del pulso puede presentar un pico de potencia varias veces superior a la potencia media obtenida cuando el láser opera en modo continuo.

La profundidad de penetración de cada pulso depende del material, tamaño del haz focalizado, longitud, frecuencia y energía del pulso y pico de potencia del láser.

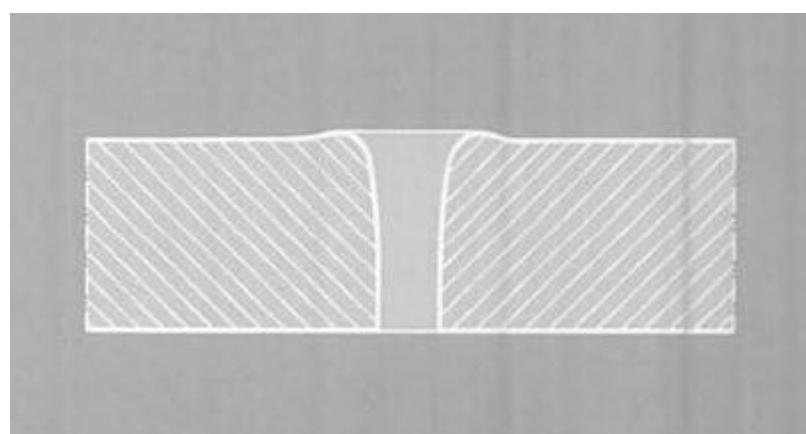


Figura 78. Aspecto cónico de un agujero perforado con láser

La naturaleza del perforado láser conduce a agujeros ligeramente cónicos, siendo el diámetro de entrada algo superior que el de salida. Esto depende en gran medida de si se emplea un único pulso energético para la penetración completa o bien varios de



menor energía. Para taladros de profundidades inferiores a 0.3 milímetros, el efecto cónico es pequeño, pudiéndose utilizar el método de un solo pulso. Para agujeros más profundos, se conseguirá menor distorsión utilizando varios pulsos de corta duración. Como en el corte y soldadura láser, el perfil del procesado dependerá de la posición relativa entre el plano focal y la superficie de la pieza y de la profundidad del campo. Esta última dependerá a su vez de la longitud focal de la lente. Alrededor del punto focal, el diámetro del haz es mínimo, constituyendo la profundidad de foco.

7.3.3.- Ejemplos de aplicación

Alguna de las aplicaciones del sistema láser para perforado de materiales son las siguientes:

- Optimización del embalaje:

En las industrias de bienes de consumo, el embalaje se considera un factor crucial basado en la familiarización del consumidor con el producto. Las dificultades para abrir embalajes desde cacahuuetes hasta salsas son sorprendentemente comunes, provocando derramamientos y accidentes de poca importancia. El proceso de apertura a menudo requiere demasiada fuerza inicial y es difícil de controlar por la falta de líneas de apertura o la creación de éstas mediante procesos mecánicos. Los sistemas láser ofrecen una solución más avanzada puesto que pueden seleccionar capas individuales de film para corte. Esto permite una fácil apertura al mismo tiempo que deja las otras capas intactas para proteger el producto de la luz y la humedad. Donde es necesario perforar el embalaje, las sencillas funciones de ventilación creadas con la tecnología láser marcan la diferencia: aumentan la duración de los productos perecederos como ensaladas y otros productos frescos, o controlan el intercambio de presión en los hornos microondas. Las líneas de perforación con láser pueden incluso crear aplicaciones de rasgado fácil. A diferencia de las herramientas mecánicas como cuchillas giratorias o punzones de tambor giratorio, el láser funciona sin contacto, sufre un desgaste mínimo y ofrece una integridad de proceso excelente.

En el embalaje de productos perecederos, la calidad y la conservación dependen del equilibrio entre la circulación del aire y de la preservación de la humedad. Para una perforación adecuada del embalaje, los láseres ofrecen ventajas significativas respecto a



los procesos convencionales, como agujas o llamas, empleando láser de CO₂ con altas intensidades de impulsos para perforar todas las capas del material de embalaje. El borde microfundido de cada agujero evita las microfisuras que podrían dañar la integridad del embalaje. Dependiendo del volumen de producción y de la tarea correspondiente, se ofrecen sistemas con divisores de haz y hasta cuatro vías de focalización para la perforación del film, u óptica de espejos poligonales que proporcionan hasta 16 líneas de perforación y que pueden soportar velocidades de film muy altas. Se puede lograr una gestión de temperatura óptima a través de orificios que varían de 60 a 300μm en diámetro, dispuestos en patrones o grupos regulares e incluso sincronizados con la impresión en el embalaje. Las distancias entre los orificios pueden ajustarse de 4 a 500mm incluso dentro de la misma línea. La perforación también es adecuada para la función de intercambio de presión, como en embalajes de alimentos para microondas. Mediante materiales de embalaje sólidos como combinaciones de PE/PE, la perforación por láser puede crear incluso líneas de perforación de 5 a 50 orificios/cm para aplicaciones de rasgado fácil.



Figura 79. Embalajes tratados con láser.

- Seguridad en los documentos:

El consejo de la UE de seguridad en los documentos destaca la utilización del láser para asegurar la seguridad.

En el glosario creado por la UE sobre la seguridad se desarrollan varios puntos que utilizando el perforado láser aseguran esta seguridad en documentos de identidad:

- Perforado del número de serie: El número de serie del documento de identidad se perfora en el material de soporte, lo que produce unas marcas características:

- Marcas de quemado alrededor de los bordes de los agujeros



- La parte posterior de los bordes de los agujeros en el material de soporte (papel) no aparece levantada
- El tamaño de los agujeros perforados en el cuadernillo va decreciendo de forma cónica cuando se observa de delante hacia atrás.

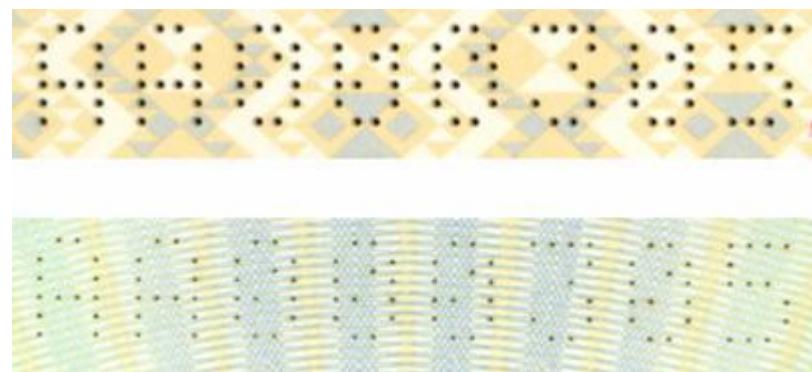


Figura 80. Número de serie perforado por láser.

- Estructuras y dibujos finos perforados por láser (inclusiones de seguridad)



Figura 81. Detalle pasaporte Países Bajos

- Fotografía secundaria (fantasma) perforada por láser Perforación que configura una fotografía secundaria del titular del documento visible bajo luz transmitida.
Ejemplos: ImagePerf®, pasaportes de los Países Bajos y de Bélgica.



- Efecto de inclinación. Cada una de las letras de la imagen TLI ® (Tilted Laser Image, imagen láser inclinada) se perfora con un ángulo distinto. La imagen que se observa bajo luz transmitida varía en función del ángulo de visión.



Figura 82.

- Perforado del papel de cigarrillos

El papel de cigarrillos se perfora principalmente para reducir el contenido de alquitrán y nicotina de los cigarrillos light en todo el mundo. La perforación láser asegura el cumplimiento de los umbrales solicitados.

- Orificios de enfriamiento en piezas aeroespaciales

Los componentes de motores de turbinas requieren muchos orificios de enfriamiento de formas variadas. Estos se obtienen fácilmente teniendo en cuenta la flexibilidad y el "mecanizado suave", características de un sistema de mecanizado láser multi-axial. Los orificios pueden ser producidos en un amplio rango de formas (incluso formas distintas a las circulares son producidas fácilmente), profundidades y ángulos.

Aunque esta clase de orificios pueden ser realizados a través de electroerosionado, es necesario mecanizar y monitorear un electrodo con la forma del agujero para retirar material. El mecanizado por láser evita los costos causados por el mantenimiento de la máquina y de la herramienta en el proceso de electroerosinado.



Además, el mecanizado por láser es considerablemente más rápido que el EDM y las velocidades del láser son medidas en orificios por minuto y no en minutos por orificio, como en el caso del electroerosionado.

7.3.4.- Comparación con otros métodos de perforado

El perforado por láser es una solución alternativa a otros procesos mecánicos de perforado que ofrece en muchos casos ventajas significativas: rapidez en el taladrado de agujeros, excelentes calidades geométricas y metalúrgicas, junto con una disminución de los costes de producción, han demostrado la flexibilidad y potencial de esta técnica.

En alguna aplicación concreta se presenta como la única alternativa posible de mecanizado, como es el caso del corte y perforado de sustratos cerámicos para electrónica donde otros métodos fracasaban al intentar obtener agujeros pequeños en láminas de poco espesor, produciéndose microfracturas y fisuras en las piezas mecanizadas.

Sin embargo, algunos materiales como oro, plata o cobre son difícilmente mecanizables por láser debido a la alta reflectividad y conductividad térmica que presentan. En el caso de materiales no metálicos, como algunos plásticos de bajo punto de fusión, pueden disminuir la calidad del taladro debido al elevado porcentaje de fundido respecto al vaporizado, agrandando el diámetro del agujero o formando gotas de difícil eliminación.

Desde el punto de vista energético el perforado por láser es un proceso costoso debido al hecho de que el material debe ser fundido y posteriormente vaporizado. Cabe destacar también que el vapor generado resulta extremadamente propenso a la ionización por el haz láser, siendo la energía de ionización unas 100 veces mayor que la asociada a la fusión. El vapor ionizado se combinan con los gases de alrededor formando una zona de plasma, es decir, de gas ionizado. Este tiende a absorber y al mismo tiempo a reflejar el haz láser, impidiéndole alcanzar la superficie a mecanizar. Este efecto puede minimizarse con el empleo del láser en modo pulsado, alcanzando altas densidades de energía y con la ayuda de gas de aporte que creará una atmósfera inerte no ionizable tan fácilmente.



Los principales competidores del perforado por láser son el perforado mecánico y el perforado por descarga eléctrica (E.D.M.), aunque se utilizan también con cierta frecuencia los sistemas de haz de electrones o el mecanizado electroquímico (E.C.M.).

Mientras el perforado por métodos mecánicos compite con ventaja en el bajo coste de inversión del equipo, presenta el inconveniente del coste de mantenimiento generado por el desgaste y rotura de brocas.

El láser una vez realizada la inversión inicial, resulta competitivo ya que los costes por consumibles son mínimos. Los taladros son de calidad superior y sin rebabas pero vienen limitados por el espesor máximo de la plancha a perforar.

Comparando con sistema E.D.M. la principal ventaja del equipo láser es su alta flexibilidad y el menor coste por operación. El perforado por descarga eléctrica necesita el empleo de electrodos. La velocidad global del proceso es lenta, aunque la calidad de los agujeros obtenidos es superior y no presenta forma cónica.

	LÁSER	PERFORADO MECÁNICO	E.D.M.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">-Sin uso de herramienta.-Tamaño pequeño del agujero.-No existen rebabas-Velocidad.-Bajo coste de operación.-Flexibilidad.-Proceso de la mayoría de metales.-Perfora superficies curvadas.	<ul style="list-style-type: none">-Agujeros profundos.-Agujeros rectos.-Bajo coste del equipo.	<ul style="list-style-type: none">-Calidad de superficie.-Bajo coste del equipo.-Tamaño de agujero constante.-Pequeña zona de afectación térmica.-Calidad del agujero.-Agujero no cónico.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none">-Agujero cónico.-Poco espesor.-Alto coste del equipo.-Zona de afectación térmica.	<ul style="list-style-type: none">-Menor calidad del agujero.-Tamaño mayor del agujero.-Desgaste de herramienta.-Rebabas.	<ul style="list-style-type: none">-Baja velocidad del proceso.-Utilización de electrodos.-Poca flexibilidad.



7.4.- Marcaje de materiales.

El marcaje por láser empezó en los años sesenta, con el desarrollo del procesado de materiales por láser, como una más de las distintas posibilidades de aquella nueva tecnología. Desde entonces este sistema de marcaje se ha ido desarrollando durante estos cincuenta años, creciendo en importancia hasta configurar un sector independiente en la industria.

Este proceso de marcaje por láser compite con otras muchas tecnologías alternativas de marcado, erigiéndose como el preferido y, en ocasiones, como el único sistema de marcaje utilizable en determinada aplicaciones. De este modo ha ido aumentando considerablemente su incorporación en la industria. A pesar de que su precio es más elevado en venta que el de los tradicionales métodos, el bajo coste que representa su mantenimiento y el de sus consumibles hace rentable su inversión en un corto plazo.

7.4.1.- Proceso de marcaje por láser

La definición del marcaje por láser cae en algún lugar entre la imprenta y el procesado de materiales. A pesar de que estos sistemas láser pueden emplearse para generar líneas de texto sobre papel u otro tipo de sustrato imprimible, no pueden competir con la alta velocidad que adquieren otros sistemas más sofisticados como, por ejemplo, las impresoras láser. Por otro lado, pueden ser utilizados también en otras aplicaciones industriales, como corte o perforado, aunque es recomendable el empleo de otros sistemas láser ya optimizados para ello.

Los sistemas de marcaje láser permiten marcar mensajes de corta o media longitud o imágenes directamente en productos ya terminados. Estas marcas son típicamente permanentes, aplicadas sin contacto directo con la pieza, sin utilizar herramientas, no requieren ningún otro tipo de proceso posterior de fijado y no introducen ningún material adicional. Cualquiera de estas características, además de la alta velocidad y flexibilidad, pueden ser suficientes como para seleccionar este sistema frente a los otros.



Por medio de elementos ópticos convencionales, tales como espejos y lentes, se puede dirigir el haz láser sobre la superficie del sustrato de un modo coordinado, para producir la marca deseada. El efecto del haz sobre dicho material puede ser de tres tipos: fusión, vaporización o reacción fotoquímica. Cada uno de estos efectos puede conseguir una marca permanente con contraste visible y fácilmente interpretable.

En el proceso de marcaje por fusión se eleva la temperatura de la superficie del material justo hasta al punto de fusión. Después de un ligero desplazamiento de la zona fundida el material resolidifica produciendo una zona ondulada. El contraste visual viene proporcionado por la diferencia de reflexión de la luz entre la zona ondulada y la lisa, originando zonas de sombra. La principal ventaja de esta técnica reside en que no hay eliminación de material ni genera desperdicios, y en la mínima afectación térmica generada en el material.

La vaporización produce contraste visual por eliminación de material de la superficie, haciendo visible el de la capa inmediatamente inferior o alternándolo. El contraste es el resultado de diferencias de color, reflectancia o textura o producción de sombras. El oscurecimiento por carbonización es también un efecto usual para muchos materiales, por ejemplo, cuando se trabaja con corcho el haz produce la combustión superficial en los puntos de incidencia, haciendo visible el marcado por contraste.



Figura 83. Tapón de corcho para una botella de vino marcado por láser.



La exposición a la luz láser puede generar también efectos fotoquímicos, especialmente en plásticos y otros materiales orgánicos. Así, las altas temperaturas generadas por la absorción de la radiación por el material pueden causar el cambio de color de pigmentos de fase del material, sumándose a los efectos mecánicos.

El tipo de efecto es función del material a tratar, del tipo de láser utilizado y de la técnica de marcaje o tipo de marca seleccionado.

- Sistemas de marcaje

La obtención de marcas por sistemas láser se consigue de dos modos diferentes: por máscara y por haz focalizado. El sistema de máscara es similar a la de un proyector de diapositivas. Una fuente intensa de luz, en este caso el láser, ilumina una platilla metálica, la cual es proyectada con una lente sobre la superficie que va a ser marcada. La máscara es iluminada por un pulso de elevada intensidad, en el que el diámetro del haz láser es lo suficientemente ancho para cubrir todo el área de la máscara. Para cubrir áreas mayores o mensajes largos se necesita una sucesión de pulsos, cubriendo cada uno de ellos una porción de la plantilla. Es necesario que la plantilla no esté en contacto con la superficie a marcar. Esto permite trabajar a distancias de hasta treinta centímetros entre la fuente de haz láser y la superficie.

La principal ventaja de este sistema de trabajo es que pueden realizarse fácilmente marcas sobre superficies en movimiento, ya que el pulso necesario para la impresión tiene una duración inferior a un microsegundo. Esto permite alcanzar altas velocidades de proceso sin que se observe ningún tipo de distorsión en la producción de la imagen.

Empleando el sistema de haz focalizado las marcas se obtienen por desplazamiento de dicho haz sobre la pieza. Esto puede conseguirse trazando perfiles o contornos directamente o bien realizando un barrido de líneas superpuestas hasta configurar la totalidad de la imagen. Cada carácter suele estar formado por una serie de pulsos relativamente numerosa.

El sistema mecánico empleado para mover el haz puede ser cualquier conjunto mecánico óptico incorporado a unos ejes de coordenadas X-Y, gobernado por control



numérico, o bien, por medio de espejos controlados galvanométricamente, como en el caso de un scanner.

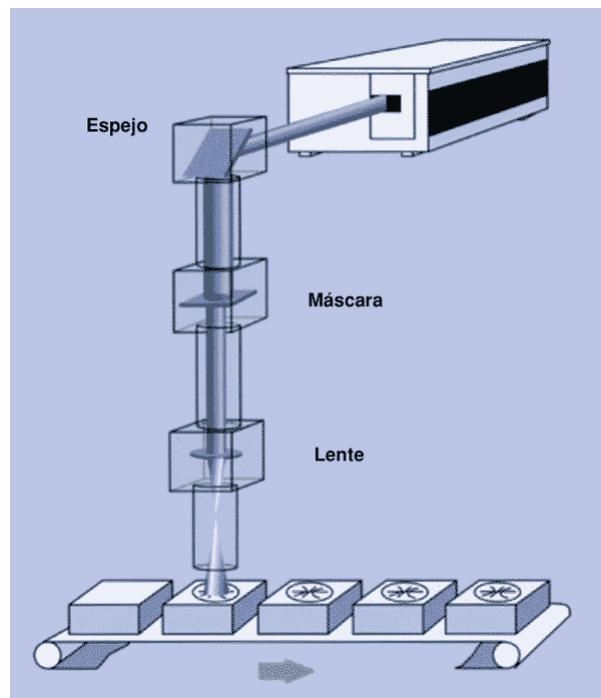


Figura 84. Marcaje por láser con una máscara

En resumen, el marcaje por máscara es perfecto para altas velocidades de producción, mientras que en las aplicaciones que requieren una flexibilidad en la producción y una alta calidad de imagen, el marcaje a través de los espejos galvánicos es la técnica preferida.

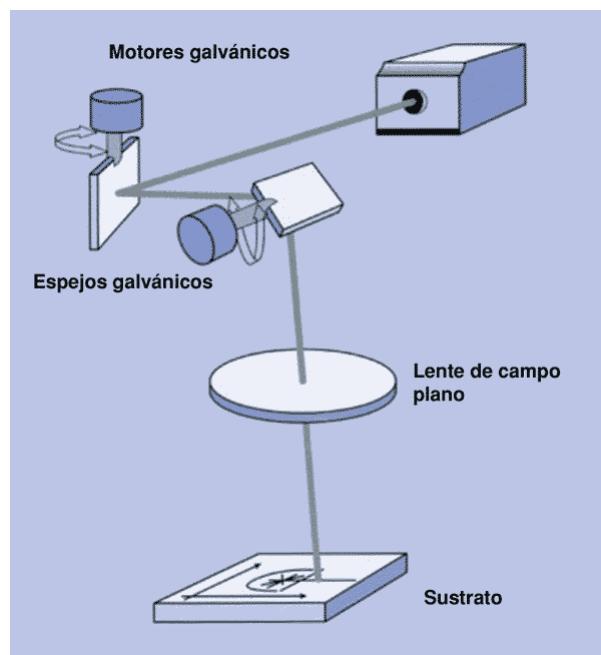




Figura 85. Marcaje por láser con espejos galvánicos.

- Marcaje de materiales metálicos

Dependiendo de las exigencias existen tres tipos diferentes de marcaje de metales por láser.

- El proceso de marcado láser por recocido se utiliza con todos los metales que muestran un cambio de color cuando se expone al calor y al oxígeno. El láser calienta selectivamente pequeñas partes de la superficie de la pieza hasta que aparecen los colores de recocido. El recocido deja la superficie del material en muy buen estado, produciendo aún un alto contraste, haciendo claramente legibles las marcas.



Figura 86.

- Grabado láser: Por lo general, el marcador láser graba la superficie del material hasta unas 10 micras de profundidad. Estas marcas son excepcionalmente duraderas y sólo puede ser borradas mediante un proceso de pulido. Por lo tanto el grabado láser se utiliza productos a prueba de falsificación.
- La ablación selectiva de capas o capas de anodizado muestra un material de diferente color por debajo y produce las marcas de color

- Marcaje de plásticos

El marcaje por láser no implica ningún contacto directo con el plástico que no sea a través del haz de láser. Es la manera más flexible de marcar los plásticos y produce imágenes legibles, nítidas e indelebles. Los láseres pueden marcar productos



con distintas geometrías en un proceso totalmente informatizado con una alta reproducibilidad y fiabilidad. Debido a que las tasas de rechazo se encuentran muy por debajo del 0,01 por ciento, el marcaje por láser se puede integrar al final de una línea de montaje o utilizar como un proceso independiente. Esto supone una flexibilidad en el marcaje y la logística y puede conllevar reducciones en los costes.

La interacción entre la luz láser y los materiales polímeros depende de la formulación del material, la longitud de onda láser y los parámetros del láser. La absorción de la energía láser cambia las características ópticas.

Espumación: Una reacción de pirolisis en la muestra libera pequeñas cantidades de gas, lo que puede provocar una estructura de superficie con espumación. Una estructura irregular con espumación dispersa la luz, haciendo que la zona aparezca más clara.

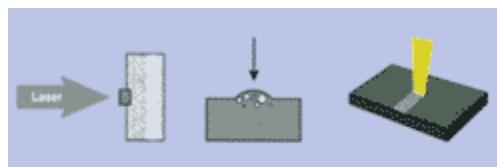


Figura 87. Espumación.

Carbonización: En esta técnica, la superficie del plástico se descompone al absorber la luz láser debido a la alta intensidad del pulso láser. Esto resulta en la formación de carboncillo en el plástico, lo que crea una marca de color oscuro.

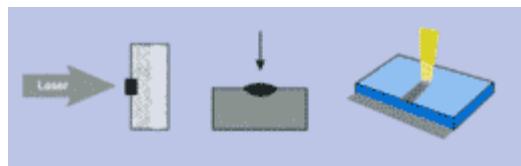


Figura 88. Carbonización.

Fotorreducción (marcaje en frío): Los marcas oscuros también se pueden obtener a través de la reducción de TiO₂. Esto produce una marca láser "debajo de la piel" del plástico pero sin afectar a la superficie. La técnica es apropiada para los plásticos de colores claros donde se incluye TiO₂ (dióxido de titanio, un pigmento blanco fuerte) en el paquete de pigmentos.

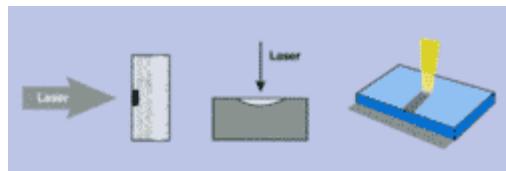


Figura 89. Fotorreducción.

Grabado: El grabado de la superficie se obtiene cuando el plástico absorbe una cantidad de luz láser muy alta, lo que un corte relativamente profundo en el plástico. Los daños en la superficie siempre son evidentes y el contraste es generalmente pobre. El grabado se suele utilizar cuando se requiere el marcaje indeleble para la identificación, información técnica o etiquetado. Esta técnica no es apropiada en el marcaje decorativo y se utiliza principalmente en los metales.

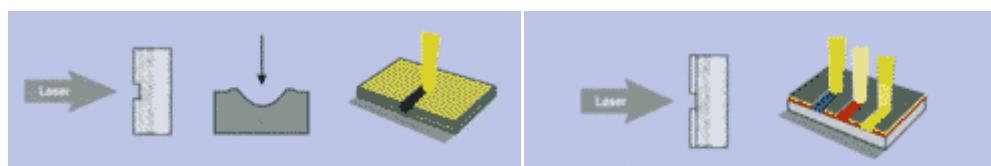


Figura 90. Grabado.

Figura 91. Ablación.

Ablación: La ablación implica la eliminación selectiva de una capa o lámina o esmalte con la luz láser. Utilizando esta técnica, se pueden obtener marcas por láser multicolores. La desventaja de esta técnica es el paso añadido en la producción con la aplicación del esmalte o la lámina en el objeto que se va a marcar.

- Marcaje láser en semiconductores

Los procesos de fabricación de semiconductores exigen soluciones de marcado rápidas y de un control preciso. Se necesita una velocidad de marcado de más de 1000 caracteres por segundo y una profundidad de penetración en el material inferior a 25 micras/1mm.

El marcado láser de obleas de silicio facilita la trazabilidad del proceso de fabricación para el análisis de fallos de los dispositivos semiconductores. El sistema láser diseñado para el marcado de estas obleas de silicio deberá cumplir los requisitos más exigentes. El marcado debe ser legible por máquina, no debe tener influencia negativa en las fases de fabricación y se tiene que identificar claramente al final de la cadena de fabricación.



Figura 92. Oblea de silicio marcada por láser.

7.4.2.- Tipos de marcaje

7.4.2.1 Marcaje con láser de CO₂-TEA

El láser de CO₂-TEA ha sido de uso general en la industria para el marcaje desde finales de la década de los 60. El láser de CO₂-TEA ha sido utilizado en muchas industrias (electrónica, farmacéutica, cosmética, alimentación...) y en diferentes tipos de productos.

Los láseres de CO₂ de tipo TEA generan un pulso de elevada potencia, del orden de uno a diez megavatios, que vaporiza la superficie de la mayoría de los materiales no metálicos, propiedad que se aprovecha para el proceso de marcado. La corta duración de este tipo de pulso, típicamente inferior a un microsegundo, permite que no se produzca emborronamiento de la marca.

La generación de la marca se realiza utilizando el método de la máscara. Este sistema se utiliza en diversas industrias para marcar códigos de fabricación, fechas de caducidad o cualquier otro tipo de información.

Para cambiar la marca es necesario cambiar la máscara a utilizar. Al principio el cambio de máscara se realizaba manualmente hasta que aparecieron cambiadores de máscara automáticos o relojes registradores. En general, el uso de láser de CO₂-TEA está limitado a usos donde la máscara se cambie en contadas ocasiones.

El haz transmitido a través de la máscara es focalizado por un lente simple sobre la superficie de la pieza. Para que el haz incidente pueda cubrir con un solo pulso toda la superficie de la máscara es necesario introducir una lente que provoque la expansión del haz antes de que éste llegue a la plantilla.



Variando la distancia entre la máscara, la lente y la superficie del objeto a marcar, puede modificarse a voluntad el tamaño de la imagen y, por tanto, el de la marca, siempre que se mantenga la relación:

$$\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} = \frac{1}{F}$$

y también:

$$D = \frac{X_2}{X_1}$$

donde X_1 y X_2 son las distancias entre la máscara y la lente y entre la lente y el objeto a marcar, respectivamente; F es la longitud focal de la lente y D el aumento de tamaño de la imagen en el objeto respecto de la máscara.

Siempre que la densidad de potencia emitida por el láser sea suficiente y que el objeto presente la absorción adecuada a la radiación incidente, la imagen de la máscara quedará impresa en la superficie.

La profundidad de foco es un parámetro que conviene optimizar para conseguir una mayor tolerancia en la distancia a la que se sitúa el objeto sin que se desenfoque la imagen, o para permitir una cierta flexibilidad para marcar objetos no planos. Cuanto mayor sea la distancia focal de la lente empleada mayor profundidad de foco se conseguirá. Sin embargo, la densidad de energía disminuye con el cuadrado de la distancia, pudiendo llegar a la situación en que la energía que incide en el plano no sea suficiente para realizar la marca.

Es importante destacar que la energía que no se transmite a través de la máscara, como incide sobre una superficie metálica es reflejada hacia atrás, pudiendo llegar a cualquier punto del sistema óptico o del cabezal del láser y dañar algún componente. Por tanto, es conveniente proteger esa zona. Una forma simple de protección consiste en colocar la máscara inclinada de modo que los reflejos se devíen lateralmente.

Una de las principales ventajas del empleo de un láser de CO₂ de tipo TEA es que se puede realizar el marcado de las piezas a una velocidad muy alta, siendo un



proceso dinámico. Gracias a la corta duración del pulso, siempre muy inferior a la velocidad mecánica de desplazamiento de cualquier tipo de cadena de fabricación, el movimiento de los objetos aparece “congelado”, es decir, durante el marcado se comportan como si estuvieran quietos respecto al haz. Esto hace que la calidad obtenida sea excelente, sin que se observe ningún tipo de distorsión o estelas acompañando la marca.

Al mismo tiempo, el láser puede repetir su pulso a una frecuencia muy superior al desplazamiento de la cadena, pudiendo acoplarse a cualquier velocidad de producción. Los láseres de CO₂ de tipo TEA son capaces de marcar hasta 90.000 piezas por hora. Generalmente en las aplicaciones de marcaje con láser de CO₂-TEA la refrigeración utilizada es por aire, pero en las operaciones de alta velocidad se utiliza el agua para refrigerar.

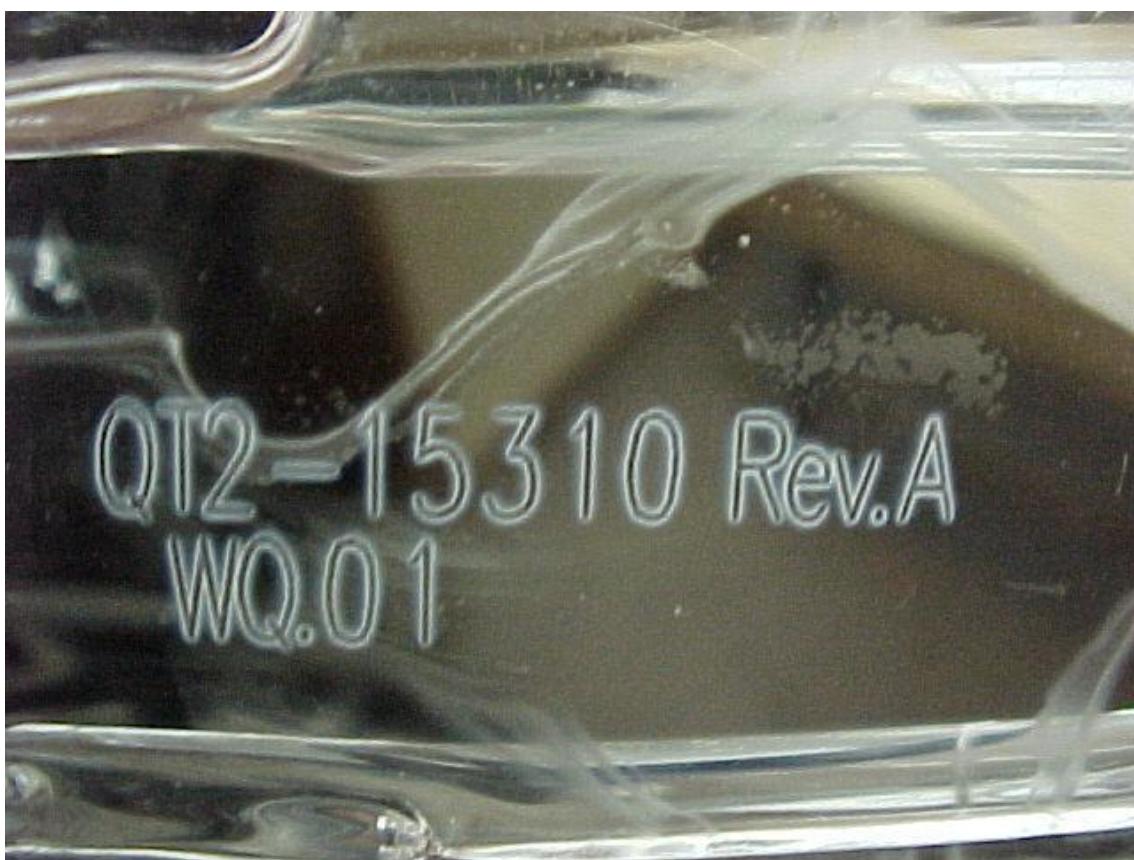


Figura 93. Marcaje en plástico con láser de CO₂-TEA

El marcaje con láser de CO₂-TEA ha sido ampliamente utilizado para componentes electrónicos. Los láseres TEA producen una marca hecha con láser blanco o azul que aparece en el componente cuando el haz interactúa con un “friendly-láser” de



tinta en la superficie del componente. En muchas aplicaciones se combina el láser de CO₂-TEA con un probador de componentes. Si el componente pasa la prueba se marcará, si no pasa la prueba, la pieza es rechazada por parte de la línea de fabricación.

Una ventaja importante del láser de CO₂ TEA es que la longitud de onda de luz láser se puede cambiar, pasando de 10,6 a 9,4 micrómetros. Esto se logra con el cambio de la capa óptica de la fuente. El uso del láser de 9,4 micrómetros es muy importante para el marcado de algunos plásticos como el PET o PETE y la producción de marcas legibles cambiado de color láser de CO₂.

El aspecto de la marca vendrá determinado por el tipo de acabado del material. Cuando se trate de sustratos sin recubrimiento, la marca responderá a alguno de estos tres efectos: fusión, vaporización o reacción, Por el contrario, la eliminación del recubrimiento puede dar lugar a marcas por contraste al hacerse visible la capa inmediatamente inferior, como ocurre en las superficies tratadas con una película de tinta o pintura.

7.4.2.2.- Marcaje con láser de CO₂ continuo

Este método realiza el marcado por desplazamiento del haz láser focalizado sobre la pieza. La fuente láser, que emite un haz de forma continua, se incorpora a un conjunto de espejos deflectores controlados electrónicamente por un sistema de baja inercia (scanner). Esto permite posicionar el haz con elevada precisión y velocidad, permitiendo abarcar zonas efectivas de marcaje entre 180mm², en el caso de emplear dos ejes, y 3200mm², en el caso de emplear tres ejes.

El haz se deflecta a través de dos espejos pivotantes que le dan el movimiento en dos ejes, X e Y. Este sistema de reflexión permite marcar tanto objetos en movimiento como estáticos.

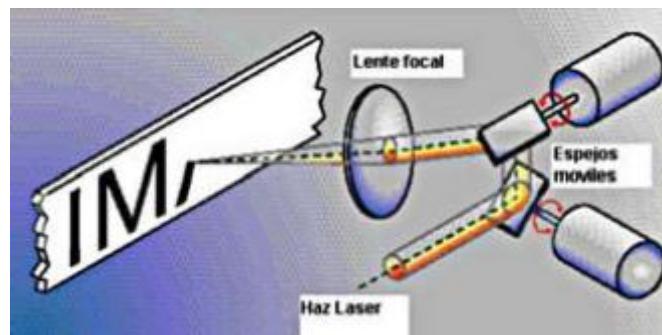


Figura 94. Codificación vectorial.

La principal característica de este método reside en el bajo coste del equipo, pues incorpora un láser de baja potencia. Son suficientes entre 5 y 30W para conseguir una marca.

A ello se suma el bajo coste de mantenimiento y de consumibles. Un coste típico de marcaje en papel o plástico se cifra en menos de una décima de céntimo de euro de consumible por dígito marcado.

Dentro de estos sistemas se diferencia dos modelos: estáticos y dinámicos, en función de la velocidad relativa que presente la superficie a marcar respecto al conjunto óptico de deflexión.

El sistema denominado estático se caracteriza por que la pieza aparece quieta durante la impresión de la marca con relación al movimiento del haz. Esto permite grabar entre 20 y 40 caracteres por segundo, valor que depende del material y de la calidad de la marca.

En el dinámico se permite que durante el marcaje el producto se desplace con respecto a la óptica con una velocidad constante no superior a los 35 metros por minuto.

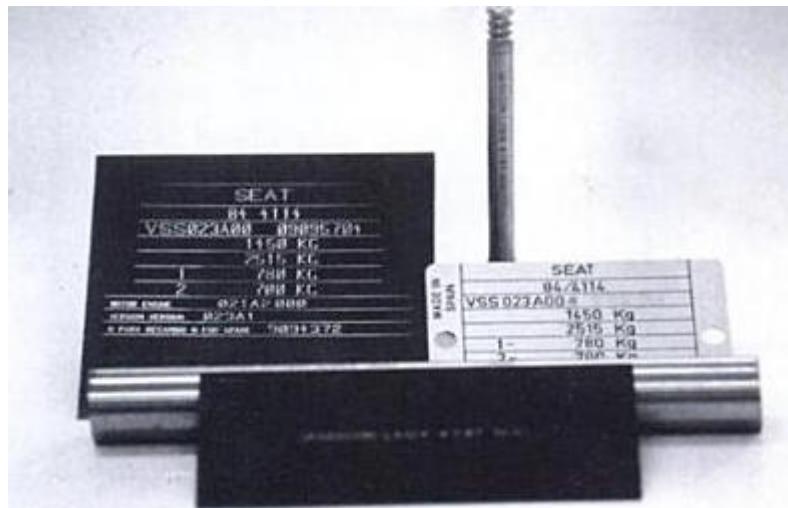


Figura 95. Placas metálicas marcadas con láser de CO₂. El haz láser elimina el tratamiento superficial; al dejar al descubierto el aluminio metálico se hacen visibles los caracteres por contraste.

Materiales tales como papel, cartón, vidrio, piel, madera, corcho, etc., además de una amplia gama de plásticos, son susceptibles de ser marcados por este sistema. Como es lógico, serán los mismos que en el caso de emplear máscara, es decir, todos aquellos que presenten la adecuada absorción de radiación de la longitud de onda característica del láser de CO₂.

Las grabaciones obtenidas son imborrables, permaneciendo la marca inalterable, sea cual sea el proceso que se realice después, siempre que no se destruya el producto o el lugar donde se halla dicha marca.

Además, las superficies a grabar no precisan estar limpias, sin que influya en la calidad.

El tratamiento de diferentes superficies ofrece muchas más posibilidades que el marcado de códigos o informaciones. Por ejemplo, el marcado con láser de CO₂ sobre piel puede lograr un ligero repujado.

7.4.2.3.- Marcaje con láser de Nd:YAG

El empleo de un láser de Nd:YAG permite el marcado de superficies metálicas, trabajando con potencias del orden de 60W en continuo, debido al mayor coeficiente de absorción que presentan este tipo de materiales a la radiación de 1.06μm generada por el láser de estado sólido. Si se quisiera marcar metales con un láser de CO₂, serían



necesarias potencias mucho más elevadas, por presentar una menor absorción frente a la radiación de $10.6\mu\text{m}$.

En el proceso de marcado, al igual que en los casos anteriores, se necesita el movimiento relativo entre el haz y la pieza. Unos ejes de coordenadas pueden mover la pieza bajo el haz estático o desplazar el haz sobre la superficie a grabar.

El manipulado del haz se suele realizar también por medio de espejos deflectores, controlados galvanométricamente, que lo dirigen una vez focalizado sobre una pieza estacionaria. El haz es reflectado en el sentido del eje X por un espejo y luego en el sentido del eje Y por el otro.

Los láseres de Nd:YAG pueden trabajar en modo continuo o pulsado, según su diseño, siendo los pulsados los más utilizados industrialmente con una duración de pulso de 10^{-6} segundos.

Las marcas se producen de modo análogo a las originadas por un láser de CO₂: la absorción de la radiación causa un incremento de la temperatura de la zona durante un intervalo de tiempo inferior a un microsegundo. Esto no permite que el calor se transmita por debajo del punto focal, limitando a dicho punto la zona de afectación térmica. La marca aparecerá por eliminación de material, lo que se corresponde con un verdadero grabado, o por la aparición de un color de contraste. Por ejemplo, al marcar un material con un recubrimiento, como puede ser una placa metálica con una capa de pintura, el haz incidente produce la eliminación de dicha capa, dejando al descubierto el material base.

Una técnica usual de marcaje es la que se realiza por matriz de puntos. Esta emplea un láser de Nd:YAG pulsado unido a un sistema scanner que realiza un barrido de líneas horizontales consecutivas. La velocidad de pulso es bastante lenta, del orden de cien pulsos por segundo. Se realiza así un marcado de líneas punteadas, originadas por las zonas de material evaporadas por cada pulso.

La generación de un código o una secuencia alfanumérica no es por marcado de un carácter después de otro, sino que el total del mensaje se va marcando en líneas



sucesivas, respondiendo la calidad obtenida al número de puntos por línea y carácter que se utilice.

Puede marcarse también por el sistemas de líneas continuas, carácter tras carácter. En este caso se utilizan láseres de Nd:YAG del tipo Q-switch, que en contraposición a los anteriores trabajan a una velocidad del orden de 10000 pulsos por segundo. Esto provoca que a pesar de este operando en modo pulsado el efecto sea una línea continua, ya que dichos pulsos se solapan al ser mucho más rápidos que el movimiento de desplazamiento.

7.4.2.4.- Comparación entre los tipos de marcaje

- Láser de Nd:YAG

El marcaje con láser de Nd:YAG (neodimio: itrio aluminio granate) con espejos deflectores puede marcar en una amplia gama de materiales y proporciona una gran versatilidad en la generación de imagen.

El láser de Nd:YAG amplifican la luz en el infrarrojo cercano a 1,06 mm. Los materiales metálicos absorben un porcentaje relativamente elevado de la luz en esta región del espectro. Sin embargo, los materiales no metálicos que normalmente se asocian con la longitud de onda de infrarrojo lejano del láser de CO₂ suelen ser muy reflexivo a la radiación del láser de Nd:YAG.

En modo pulsado, el láser de Nd:YAG produce picos de potencia considerablemente mayor que la producción normal de onda continua. Trabajando en modo pulsado a 1kHz, emitirá un tren de pulsos con potencias de pico de 110KW. Así, el láser de Nd:YAG vaporizará metales de hasta 0,005 pulgadas de profundidad en un solo pulso. Además, la alta densidad de energía en modo pulsado del Nd:YAG puede superar la reflectividad de los materiales no metálicos

Trabajando con espejos galvanométricos puede duplicarse la imagen de cualquier vector de gráficos incluyendo anchos de línea variable y las imágenes tan pequeñas como 0,010 pulgadas o menos. Además, el ordenador al instante puede



cambiar cualquier elemento gráfico o la totalidad del programa de marcado antes de que una nueva pieza se posicione para ser marcada.

El láser de Nd:YAG ofrece una mayor gama de variables de proceso ajustable para lograr una modificación de material específico, pero a un precio de compra en consecuencia, mayor que el láser de CO₂.

Las aplicaciones típicas incluyen el marcado pistones, cojinetes, válvulas, engranajes, y una multitud de otros componentes en la industria automotriz, los marcapasos, las prótesis de cadera, y las herramientas quirúrgicas en la industria médica; chasis del ordenador, discos duros y circuitos integrados en el sistema electrónico la industria, los titulares de la herramienta, brocas, herramientas de corte y en la industria de la herramienta, y plumas por escrito, placas de identificación, y los apretones de palos de golf.

- Láser de CO₂ combinado con espejos deflectores

El láser de CO₂ de onda continua se puede combinar con un sistema de espejos deflectores. El láser de CO₂ emite una banda estrecha de luz en el infrarrojo lejano de 10,6 mm. Esta longitud de onda es la más adecuada para los materiales orgánicos tales como el papel y otros productos como madera. Muchos plásticos se marcan con este sistema quitando capas delgadas de tinta.

Las aplicaciones típicas incluyen la serigrafía de productos cerámicos y de plástico que requieren gráficos de alta calidad, tales como logotipos de empresa y/o cantidades significativas de texto alfanumérico adicional. El marcador de CO₂ no prevé la facultad de "grabar" sustratos, pero debido a la relativa sencillez de diseño, se pueden adquirir a un costo más bajo que los marcadores de Nd:YAG.

- Marcado con láser CO₂ y máscara

Aunque el CO₂ máscara no ofrece las capacidades de imagen y diseño de los espejos deflectores, es muy superior en velocidad. Debido a que un solo pulso del láser crea toda la imagen, el rendimiento suele ser limitado sólo por la frecuencia del pulso del láser y la velocidad de transferencia del sistema de manipulación de piezas. Mientras



que la pieza a de estar parada al marcar con los sistemas del haz direccional, las piezas están en movimiento con los sistemas de mascarillas. La profundidad de penetración es menor que el haz dirigido de CO₂.

El láser de CO₂ con máscara es a menudo el marcador elegido para la secuencia de codificación, codificación de lote, fecha de codificación abierta o cerrada, y en tiempo real de codificación de papel o cartón, tinta o pintura revestimientos, vidrio, plásticos, materiales de recubrimientos y materiales cerámicos.

El desarrollo de una aplicación exitosa de marcado requiere una cuidadosa consideración de las características del láser de la producción, el diseño de la entrega del haz y el sistema de generación de imágenes, las propiedades del material objetivo, y la estética y las propiedades físicas de la marca deseada. La industria del láser proporciona sistemas a los usuarios potenciales con varios diseños entre los que elegir para que coincida con el rendimiento óptimo.

7.4.3.- Ejemplos de aplicación

El láser, que ya ofrecía ventajas como la flexibilidad, rapidez y permanencia frente a otros métodos convencionales, goza en la actualidad de una cualidad más: su bajo coste. Estos atributos hacen del láser un sistema cada vez más integrado en los procesos industriales contemporáneos.

Algunas de las aplicaciones que más han evolucionado en la industria del láser para crear formas laboriosas como logotipos y textos alfanuméricos, han sido el grabado, el marcado y texturado, técnicas más complejas que la soldadura, el perforado y el corte, con programaciones mucho más simples. Son métodos en los que el material se mueve por una mesa de coordenadas XY bajo un cabezal láser estacionario, o mediante la aplicación de fibras ópticas que permiten el acceso a zonas de difícil localización.

El problema de la complejidad ha sido resuelto por una joven tecnología, desarrollada desde 1968, el galvanómetro de escaneado. Los conocidos como "galvos" son motores precisos con altos rangos de aceleración- deceleración. El tandem motor/espejo puede girar y mover el haz láser tan rápido que el ojo humano no puede



seguir su movimiento. Los sistemas modernos tienen velocidades de 10 metros/segundo.

La posibilidad de integrar el sistema con un ordenador ha permitido la introducción de este láser en la fabricación de elementos que en algunos casos, permite superar los cinco millones de piezas anuales.

La técnica láser en grabado/marcado tiene aplicaciones en los siguientes sectores industriales:

- La industria del automóvil emplea láser para marcar los números de identificación de vehículos (NIV), la decoración de teclados y los paneles de instrumentación, así como los conocidos day&night. La técnica es rápida, económica e indeleble.



Figura 96. Panel de instrumentación de un coche.



Figura 97. Códigos de barras para automoción.

- Productos médico-quirúrgicos marcados con láser: implantes como marcapasos, rótulas, enders, uniones artificiales, vástagos, cabezas femorales, instrumental, etc. (las marcas realizadas con láser permanecen sin contaminación al contrario que algunas tintas y productos químicos). En instrumentos de diagnóstico, el láser es una herramienta precisa para eliminar errores, graduaciones y marcas significativas, y en instrumentos quirúrgicos, es además económico y permanente, siendo posible realizar marcas sin profundidades ni rebabas en los aceros empleados.



Figura 98. Marcapasos con grabado realizado con láser.



Figura 99. Marcado sobre componentes quirúrgicos



- Productos electrónicos, en particular encapsulados de epoxy, circuitos híbridos, wafers y moldes de inyección.



Figura 100. Componentes eléctricos y electrónicos

- Teclados/ conectores/ embalajes, tienen un largo historial en el mercado por láser (los wafers pueden ser marcados después de la fotolitografía sin riesgo de contaminar o ensuciar la superficie).
- Herramientas y materiales endurecidos se marcan mejor con láser que con técnicas convencionales, realizando una marca más uniforme, efectiva y libre de agentes contaminantes.
- La industria de la publicidad también ha apostado por utilizar el grabado láser con motivos decorativos, ya que ofrece una gran flexibilidad para marcar pequeñas cantidades y de forma económica.
- Cualquier producto que requiera una secuencia numérica, desde las etiquetas identificativas (crótales) del ganado hasta los cds o dvds son marcados por láser. Los sistemas automatizados permiten numerar, incrementar y decrecer números, códigos, y marcar códigos de barras.
- Marcado de cable por láser. No se produce abrasión, destrucción significativa de material ni alteración de las propiedades mecánicas o eléctricas del cable. El marcado directo mediante láser UV, que sustituye a la colocación de manguitos, presenta la ventaja innegable de reducir el peso del cableado. Al provocar una repercusión sobre el peso de los aparatos equipados, la eliminación de los manguitos y otras etiquetas ha generado una reducción considerable del peso de los satélites y de los vehículos de competición y de rally. El aumento del coste



energético convierte este criterio en extremadamente importante para fabricantes y usuarios.



Figura 101. Marcado de cable por láser.

- Otra de las industrias en las que la utilización del marcado láser es en la de las bebidas. El marcado láser se utiliza como solución a los problemas de codificación y marcaje. La tecnología láser elimina el riesgo de quemar el sustrato y perforarlo. Con ello se consiguen códigos más contrastados, que permiten una lectura más fácil (incluso tras un lavado) y marcas para aplicaciones de alta velocidad.



Figura 102. Marcado láser en botella de PET.



7.4.4.- Comparativa con otros métodos de marcaje

Como en todas las aplicaciones industriales la elección del método vendrá condicionada por las prestaciones y resultados deseados en el producto acabado.

El láser ofrece una solución alternativa, competitiva con las técnicas clásicas. Sus principales características son las de realizar un marcaje a alta velocidad, con caracteres imborrables y de alta calidad, obteniéndose marcas muy claras aún en tamaños realmente pequeños.

El coste de mantenimiento es barato y no necesita aporte de material, lo que lleva a la reducción del precio global por marca.

La ausencia de contacto del láser con la superficie, junto con el hecho de que no se realiza un proceso destructivo durante el marcaje, hace posible trabajar con sustratos frágiles sin tener que tomar precauciones adicionales.

A pesar de que ofrece gran versatilidad dentro de una gama de materiales, no todos pueden ser tratados por el mismo equipo láser, constituyendo una limitación en el caso de que una industria opere con materiales muy distintos debido al elevado coste del equipo.

En comparación con el sistema láser, el marcaje por tinta es mucho más barato en cuanto al equipo, pero requiere el empleo de tintas de precios muy elevados, Además, la velocidad de trabajo se ve claramente disminuida y las marcas son de inferior calidad. Un inconveniente adicional es que las superficies a tratar deben estar completamente limpias.

La estampación por calor es un proceso destructivo, de caro mantenimiento y que produce marcas de calidad inferior a las obtenibles por láser. Cabe decir aquí que las marcas por láser pueden ser automatizadas y la profundidad del grabado es controlable.

El grabado mecánico es una técnica de marcaje muy extendida para el marcaje en pequeñas cantidades. Esta técnica consiste en la excavación de la materia con un torno (acero, cobre...) para grabar en ésta sus logos, textos, pictogramas... en hueco o



relieve. Las marcas que realiza este sistema son indelebles e inalterables, tiene un coste bajo para el grabado en pequeñas cantidades, posibilidad de colorear las marcas y produce efecto hueco o relieve. Se suele utilizar en materiales como metal, plexiglás, acero inoxidable, cobre o latón.

El grabado químico generado por baños ácidos o alcalinos permite el marcaje inalterable en hueco o relieve con una profundidad entre 0,05 y 0,2mm. Sus ventajas son: inalterable, posibilidad de colorear, efecto hueco o relieve. Los materiales tratables con este sistema son el aluminio, el acero inoxidable o el latón.

La anodización es una técnica de marcaje basada sobre el principio de la electrólisis (desde 10 μ hasta 15 μ). Después de la protección por serigrafía de las zonas a conservar en relieve, la materia es atacada químicamente por el principio de electrólisis. Las marcas de esta técnica ofrecen al soporte resistencia al desgaste, a la corrosión y al calor, además, da un buen realismo al color. El material más utilizado con esta técnica es el aluminio.

El almohadillado es una técnica de marcaje que permite la puesta en relieve de textos, logos, por deformación en frío de la materia.

El recorte permite el corte de materias de grosor pequeño o grande sin deformación ni tinta corrida. Ventajas: corta grosores diferentes, no hay deformación ni tinta corrida, posibilidad de realización de formas complejas y da bastante precisión.

La serigrafía es una técnica de impresión que podríamos comparar con el principio del estarcido. Consiste en la creación del negativo de un motivo sobre un tamiz y después situar este motivo sobre un soporte llano. El motivo impreso se cubre enseguida por un barniz protector. Esta técnica no conviene para impresiones muy precisas. Las ventajas: calidad y conservación de los colores en el tiempo, económica para impresiones en grandes cantidades, conviene para numerosos soportes. Los soportes pueden ser metal, plástico, madera, papel, cartón, papel, vidrio o material textil.



Figura 103. Materiales serigrafiados.

La impresión digital es una técnica que permite la impresión sobre una gran diversidad de soportes en calidad fotográfica. Las ventajas de esta técnica son: impresión en el interior y en el exterior, calidad fotográfica y la gran variedad de formatos.

Volviendo al láser sus principales ventajas son las siguientes:

- Durabilidad y calidad constantes.
- Precisión muy alta de los trazados.
- Marcaje de datos fijos o variables.
- Marcaje sin contacto con el objeto.
- Alta velocidad del proceso.
- No se añaden ni tintes ni disolventes.

Cuando el sistema de elección sea un equipo láser, la pregunta será si es mejor el empleo del método de marcaje por máscara o bien por scanner (espejos galvanométricos). Cada tipo de marcaje tiene sus ventajas y sus inconvenientes. En algunas aplicaciones, los dos métodos ofrecen soluciones viables. En otras, uno de ellos puede presentar claras ventajas frente al otro. Las consideraciones en la elección del método suelen ser tres: material, flexibilidad y velocidad.



Los sistemas de máscara normalmente los que mayor velocidad alcanzan. Con un pulso por mensaje y láseres capaces de trabajar a más de 50 pulsos por segundo pueden marcar miles de piezas por minuto.

El cambio de mensaje es sencillo, sólo requiere el intercambio de máscaras ya prefabricadas, lo que puede realizarse manualmente o de forma automatizada.

Grandes áreas de marcado o largos mensajes requieren la utilización de múltiples pulsos, lo cual reduce la velocidad de producción.

Los sistemas de espejos galvanométricos con el haz focalizado son mucho más flexibles. Como estos espejos son controlados por computadora los mensajes pueden ser cambiados entre marca y marca sin que esto afecte a la velocidad de proceso global. Además, pueden combinarse fácilmente tamaños, orientaciones y rotaciones incluyendo diferentes gráficos en un mismo trabajo.

Los campos de trabajo suelen ser cuadrado de 100 milímetros de lado. La velocidad alcanzable por estos sistemas es inferior al de la máscara, del orden de una pieza por segundo. Sin embargo, la longitud del mensaje puede ser mayor.

Atendiendo al tipo de material, cuando se trate de sustratos orgánicos podrá elegirse cualquiera de los dos modelos, pero en el marcaje de superficies metálicas no puede emplearse el sistema de máscara. Del mismo modo, los sistemas scanner que incorporen un láser de Nd:YAG serán aconsejables para el tratamiento de metales mejor que para plásticos o materiales orgánicos.



7.5.- Tratamiento superficial

El comportamiento en servicio de cualquier componente o estructura está supeditado a sus interacciones con el ambiente, las condiciones de trabajo y las propiedades del componente o estructura en cuestión (material, proceso de fabricación, estado superficial,...). Estudios de evaluación llevados a cabo por expertos fijan unas pérdidas económicas anuales debidas a la actuación de mecanismos de degradación superficial en torno a un 4% del producto interior bruto en los países industrializados y en vías de desarrollo.

La ingeniería de superficies, rama multidisciplinar de la ingeniería, optimiza las superficies expuestas a interacción mediante tratamientos y procesos superficiales, con el objeto de mejorar las prestaciones del propio material y prolongar significativamente su duración en servicio, contribuyendo al ahorro en los costes anteriormente señalados. La deposición de recubrimientos y capas delgadas, la difusión superficial de especies atómicas y moleculares, o el acondicionamiento y funcionalización de superficies mediante calentamiento por plasma, radiación láser o implantación iónica son algunos tratamientos superficiales aplicables. Además, la ingeniería de superficies no es ajena a la revolución tecnológica y científica de la última década relativa al desarrollo de la nanotecnología y la nanociencia.

7.5.1.- Proceso de tratamiento superficial por láser

El objetivo del tratamiento superficial es conseguir dotar a la superficie de las propiedades necesarias para resistir la operación continuada bajo ciertas condiciones, tales como cargas mecánicas elevadas, altas temperaturas y entornos químicamente agresivos.

Los métodos de tratamientos superficiales utilizan el láser básicamente como fuente de calor. Las mismas propiedades de flexibilidad, precisión, control y ausencia de distorsión que caracterizan el corte, la soldadura, el perforado y el marcaje, pueden conseguirse en el tratamiento térmico con láser.



A diferencia de los procesos anteriores, es más importante la distribución de la energía incidente que su concentración. En el tratamiento de grandes superficies con láseres de alta potencia se trabaja con el haz no focalizado.

7.5.2.- Endurecimiento térmico o temple

El temple es un tratamiento térmico en el que el acero es calentado hasta temperaturas de austenización y posteriormente es enfriado rápidamente, con el fin de obtener una transformación que proporcione una estructura martensítica dura y resistente. El temple superficial se utiliza generalmente para componentes que necesiten una superficie dura y un sustrato que sea tenaz.

El tratamiento térmico de endurecimiento superficial (temple) por láser es un proceso en el cual se utiliza la energía de un haz láser para producir un rápido calentamiento de la zona a tratar.

El endurecimiento térmico consiste en proporcionar al material la suficiente energía para conseguir niveles de temperatura capaces de provocar cambios en sus propiedades metalúrgicas, sin llegar a la fusión o evaporización del material.

Por lo general, el endurecimiento por láser da una dureza máxima a la mayoría de los metales, siendo hierros fundidos y aceros los elementos más tratados.

Para poder calentar la superficie del material hasta obtener la estructura austenítica es necesaria una cantidad importante de energía durante un período de tiempo relativamente prolongado, lo que hace que el láser de CO₂ sea el más apropiado. En aquellos casos en los que el material a tratar está recubierto por una película transparente se utiliza un láser de Nd:YAG, ya que si no ésta se destruiría. En este sentido, la consecución de láseres de 1.06μm de alta potencia puede impulsar la utilización de esta técnica.

El láser permite realizar este ciclo de endurecimiento a gran velocidad con lo que, unido a la bien delimitada zona de trabajo, se consigue una mínima distorsión de la pieza.



Por otra parte, esta localización permite, además que el enfriamiento de la zona se realice por el resto de la masa de la pieza, acelerando mucho el proceso y obteniendo excelentes resultados. Podemos hablar de un autotemplado.

Si la masa de material no es suficiente para realizar este autotemplado, como es el caso de chapas delgadas, o no interesa que el calor se propague hacia el interior del material, para evitar distorsiones se puede utilizar medios externos para enfriar la superficie. En el uso de gases, líquidos o sólidos para este fin ha de tenerse en cuenta la absorción de energía que puedan provocar.



Figura 104. Engranaje templado con láser

Una de las ventajas del tratamiento con láser es la posibilidad de tratar únicamente cierta área deseada, debido a la dirigibilidad del haz y a su pequeño diámetro. Así es usual la distribución periódica a lo largo de un eje de zonas “duras” y “blandas”. Con ello las zonas blandas absorben el desgaste mecánico en tanto que en las zonas duras la superficie de apoyo permanece sin modificación. Otro ejemplo típico es el endurecimiento de los dientes de sierra circulares en las que, para conservar la



integridad estructural, la pieza completa no puede ser tan dura como el filo. Estas propiedades permiten además el tratamiento de zonas de difícil acceso.

Con el temple por láser se reducen los procesos de remecanizado sobre material duro y ajuste final, además se minimizan las deformaciones y la posibilidad de aparición de grietas de temple y se consigue que no haya corrosión en la pieza.

Otra ventaja interesante del templado con láser es la posibilidad de templado de las aristas de la pieza sometidas a desgastes (en troqueles o moldes).

Su implantación en la industria ha ido ligada al desarrollo de láseres de Nd:YAG de más de 1kW de potencia y de láseres de CO₂ de alta potencia.

Campos de aplicación

- Temple superficial de grandes piezas unitarias o zonas concretas de las mismas.
- Temple superficial de elementos desmontables de las anteriores (p.e.: insertos)
- Temple superficial de grandes series de piezas de tamaño mediano o pequeño que requieren endurecimiento en alguna parte de las mismas o en su totalidad.
- Es posible el temple de la gran mayoría de los aceros y fundiciones férricas.

- Endurecimiento superficial por deformación

Se trata de un proceso de carácter atérmino. El láser incide sobre la superficie del material a modo de pulsos cortos y con la suficiente densidad de energía, como para inducir la aparición de tensiones de tipo compresivo que aumentan la dureza superficial del elemento y, por tanto, sus propiedades mecánicas superficiales.

7.5.3.- Fusión superficial

- Fusión superficial sin aporte de material

En este caso, la temperatura alcanzada al incidir la radiación láser sobre la superficie del material es superior a la de fusión. Este proceso térmico se realiza bajo atmósfera controlada, generalmente utilizando un gas inerte, que envuelve la zona fundida. Entre otros, las fundiciones férrreas y determinados tipos de aceros son



materiales aptos para este proceso, obteniéndose capas superficiales de espesor variable donde las microestructuras obtenidas son más homogéneas y presentan valores de dureza mucho más elevados que los del material base.

Las fundiciones férreas nodulares son muy utilizadas como elementos de maquinaria, ya que estos materiales pueden ser endurecidos superficialmente mejorando, de este modo, su resistencia frente al desgaste.

Otra posibilidad reside en la reconstrucción de piezas dañadas o desgastadas mediante la adición del mismo material en el que esté construida la pieza. Asimismo, puede procederse al sellado de capas de deposición realizadas mediante la aplicación de plasma, confiriéndoles mayor adherencia al substrato y un grado de compacidad superior al obtenido mediante la técnica original. Otras aplicaciones son la ablación o eliminación de materiales adheridos a substratos y la realización de vitrificados estructurales, donde se consiguen profundidades máximas de 50 mm. Otro tipo de actuaciones a destacar por su componente innovador son los recubrimientos y los tratamientos superficiales de diferentes componentes metálicos. Un ejemplo es la fusión superficial de titanio en atmósfera de N₂ para conseguir capas de nitruro de titanio.

- Fusión superficial con aporte de material

Este tratamiento, que también es de carácter térmico, se diferencia del anterior por el aporte de un material diferente sobre la superficie. Si la dilución del material de aporte con el material base es reducida, entonces se trata de un proceso de plaqueado. Mediante la interacción de un láser de alta potencia con un polvo metálico o no metálico pueden crearse capas de espesor controlado sobre las superficies metálicas. Los recubrimientos superficiales se pueden realizar con materiales antidesgaste, anticorrosión, de características especiales, etc. Confiriendo las características superficiales requeridas a la superficie tratada.

Si la dilución es considerable, el proceso es de aleado. La adición de un nuevo material ofrece la posibilidad de modificar las propiedades superficiales en función de las necesidades y requisitos de la aplicación.



7.5.4.- Aleación superficial

Este proceso 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 gran intensidad se genera la alta temperatura y el gradiente térmico que exige la aleación. A través de ellos e material añadido se funde, se agita vigorosamente y se difunde por las capas adyacentes del material base, consiguiendo unas velocidades de difusión altísimas. El enfriamiento brusco determina la microestructura fina de las capas aleadas. Por selección apropiada de las condiciones de aplicación láser se puede incluso ajustarse con precisión la distribución en profundidad de los elementos que forman la aleación.

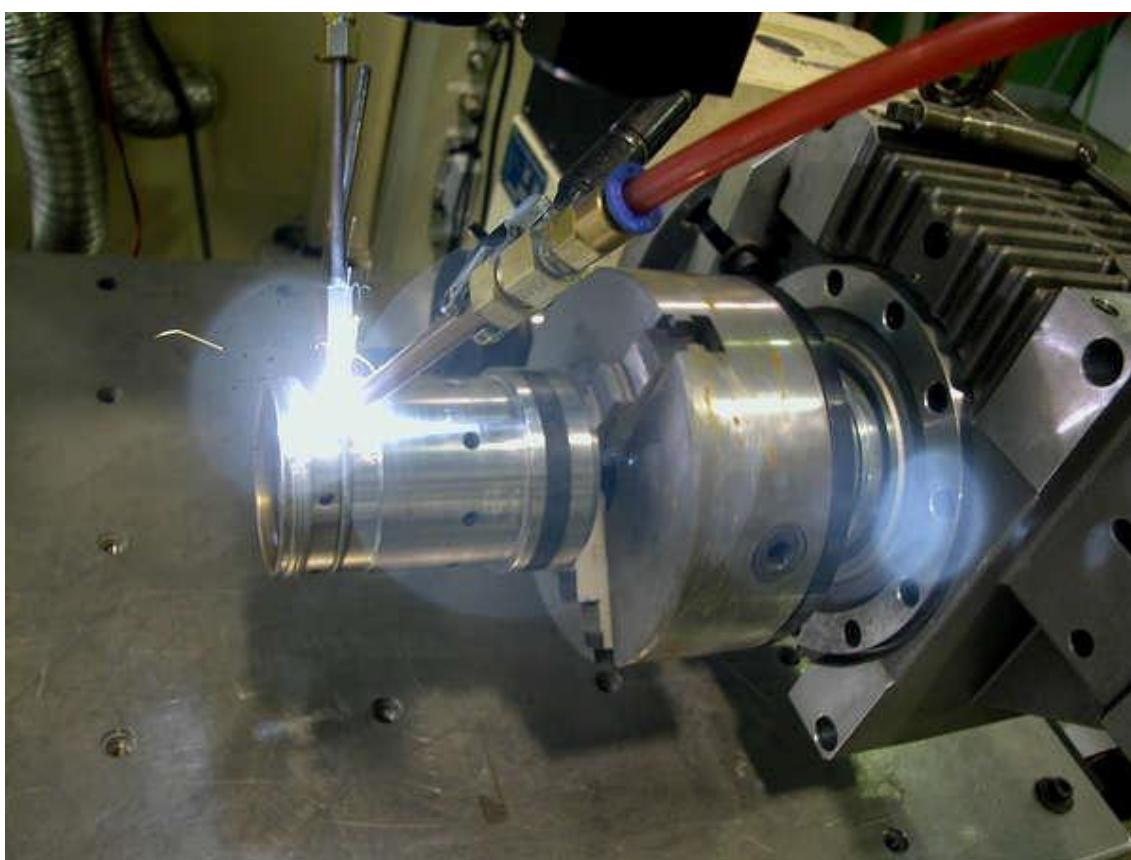


Figura 105. Pieza tratada con aleación superficial.

El interés de la aleación superficial por láser reside en la notable calidad de las piezas, dotadas de propiedades no comunes. A ello hay que añadir el beneficio económico que supone la reducción de la cantidad necesaria de materiales costosos, ya que es mínima la cantidad de material desaprovechado.



Campos de aplicación:

- Reparación de piezas de alto valor añadido (errores en cotas de fabricación, desperfectos producidos en servicio, cambios de plano en prototipos, etc.).
- Aumento de vida en servicio de piezas mediante recubrimiento de materiales de altas prestaciones (resistentes a desgaste, corrosión, temperatura etc.).
- Posibilidad de utilización de materiales más baratos reforzados superficialmente (utilajes de acero de baja aleación reforzados superficialmente con aceros de herramientas o aceros rápidos).

7.5.5.- Limpieza y pulido

Numerosos procesos de limpieza y activación son necesarios para la fabricación y el montaje final de dispositivos electrónicos. Además la tendencia a la miniaturización requiere a menudo procesos de la limpieza de alta precisión.

Las lacas soldables, las contaminaciones, los residuos de polímeros y las capas del óxido tienen que ser eliminados de la superficie, especialmente en los procesos subsecuentes como el ensamblaje y el recubrimiento, que requieren una superficie limpia.

Hasta el momento, las técnicas convencionales de limpieza se han basado en procesos químicos o mecánicos, unos métodos que resultan bastante costosos en comparación con el tratamiento de láser. Para evitar estas desventajas, se aconseja utilizar las técnicas de radiación de láser.

Debido a la alta intensidad y a la corta interacción temporal, las capas de recubrimiento se evaporan mientras que la superficie metálica del sustrato no se ve afectada.

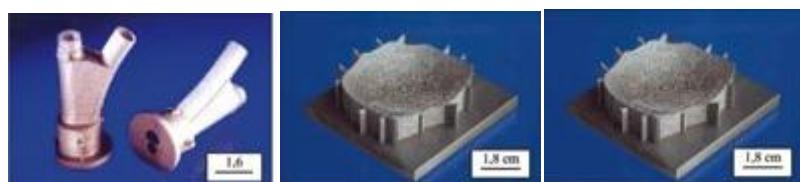


Figura 106. Piezas pulidas por láser.



7.5.6.- Ejemplos de aplicación

- Endurecimiento térmico o temple

- Matrices y troqueles para conformado de chapa.



Figura 107.

- Matrices de forja. El temple laser de matrices y troqueles para conformado de chapa es una autentica revolución para el sector ya que con ello se consiguen capas superficiales de gran dureza de hasta un milímetro y con mínimas deformaciones. Ello implica que se templen los radios de la matriz que sufren en la estampación sin realizar distorsiones dimensionales en la matriz y sin necesidad de un mecanizado posterior, evitando así los costes de producción de las matrices.
- Moldes de inyección de plástico, aluminio, otros metales, vidrio, cerámica, calzado etc. Este tipo de piezas que requieran un endurecimiento superficial que haga que el molde aguante mejor los esfuerzos de desgaste debidos al rozamiento del material inyectado contra el molde, son idóneos para ser tratados por láser. La ventaja principal del temple por laser de este tipo de piezas es que al aportar menos calor que otro tipo de técnicas y al ser este calor localizado, se evitan al máximo las distorsiones y las deformaciones del molde. Después de un temple láser, puede ser suficiente un finísimo rectificado para dejar la pieza a cota final.



- Guías, amarres de sujeción y correderas. Como todo elemento que trabaja a desgaste las guías o bandas de maquinaria necesitan una dureza extra que les dé durabilidad.



Figura 108

- Bancadas de maquinaria.
- Cigüeñales, arboles de levas y transmisiones.
- Árboles de levas. Transmisiones.
- Engranajes y cremalleras.
- Muelles.
- Punzones, casquillos, bulones, tornillos.
- Husillos. Rodillos de laminación.
- Ejes de rotación, obturadores para estos ejes.
- Cuchillas y útiles de corte.
- Utilaje de plegadoras.
- Gradas y moldes para materiales aeronáuticos.
- Herramientas de corte, conformado etc.



- Raíles de guías lineales.
- Geometrías complejas con radios, cantos, bordes, superficies interiores de agujeros etc.
- Alojamientos de cojinetes.
- Piezas mecanizadas y de gran precisión en general.

- Aleación superficial

- Matrices de forja.
- Matrices y troqueles para conformado de chapa.



Figura 109.

- Cigüeñales.
- Ejes.
- Árboles de levas.
- Moldes de inyección para todo tipo de materiales, tales como plástico, aluminio, otros metales, vidrio, cerámica, calzado etc.
- Guías, amarres de sujeción. Bridas.
- Sinfines para extrusión.
- Contenedores.
- Ruedas portadoras.



- Bloques de motor, culatas, pistones, asientos de válvulas.

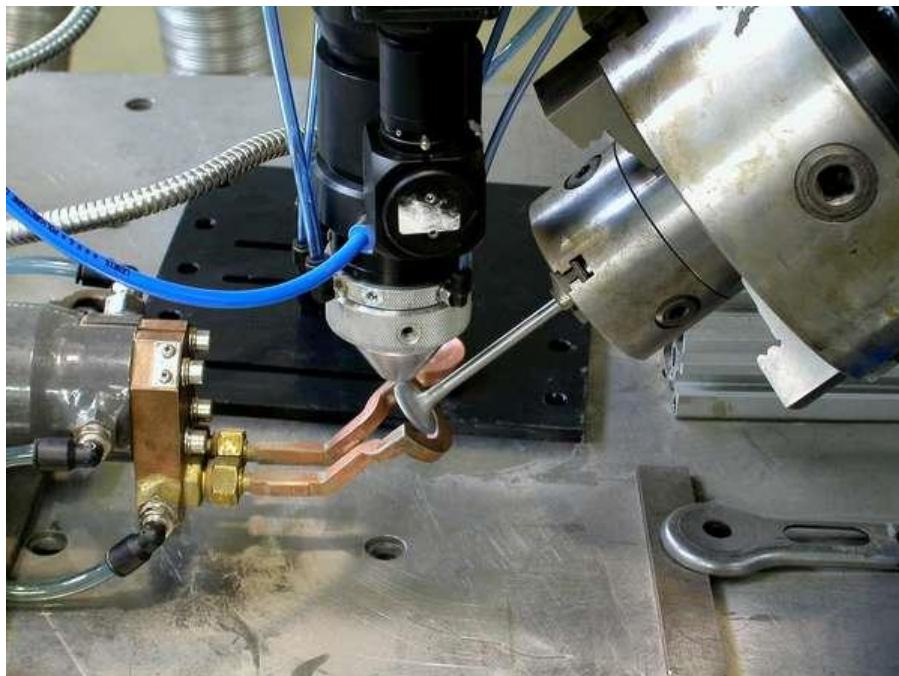


Figura 110.

- Engranajes y cremalleras.
- Alabes de turbinas.
- Ejes de rotación, obturadores para estos ejes.
- Cuchillas y útiles de corte. Una de aplicaciones interesantes del recubrimiento puede ser el recargue de las cuchillas, bien con criterios preventivos o bien con criterios reparadores. Este tipo de piezas son piezas que sufren un gran esfuerzo y por ello, a menudo es preciso que tengan una zona con unas características concretas.

El cladding mediante aporte de polvo metálico da la posibilidad de recargar la zona sufridera con un material con mejores características mecánicas que el material base, aportando gran valor a la pieza. Por otro lado, esta misma técnica posibilita reparar o recuperar las cuchillas desgastadas debido al uso; pudiendo hacer este recargue, bien con el material base, o bien con otro material que le aporte mejores características mecánicas.

- Gradas y moldes para materiales aeronáuticos
- Aleaciones base Níquel o Titánio
- Perforadoras.
- Hileras de extusión.



- Herramientas de corte, conformado etc. Una de las aplicaciones interesantes del recubrimiento o cladding se encuentra en la industria de las herramientas de corte y conformado. Este tipo de piezas son piezas que sufren un gran esfuerzo y por ello, a menudo es preciso que tengan una zona con unas características concretas.

El cladding mediante aporte de polvo metálico da la posibilidad de recargar la zona sufridera con un material con mejores características mecánicas que el material base, aportando gran valor a la pieza.

Por otro lado, esta misma técnica posibilita reparar o recuperar las herramientas de corte o conformado desgastadas debido al uso; pudiendo hacer este recargue, bien con el material base, o bien con otro material que le aporte mejores características mecánicas.



Figura 110

- Recargue de piezas desmontables o insertos. El cladding o recargue por laser con polvo de aporte es un proceso indicado para la recuperación de piezas de alto valor como pueden ser piezas que tienen muchas horas de mecanizado, moldes, troqueles, piezas desgastadas por el uso, etc. Es posible reparar tanto piezas desgastadas como piezas que han sufrido algún desperfecto a la hora de ser mecanizadas.



- Recubrimiento de Nitrucción.



Figura 111

- Varios. El cladding o recargue por laser con polvo de aporte es un proceso indicado para la recuperación de piezas de alto valor como pueden ser piezas que tienen muchas horas de mecanizado, moldes, troqueles, piezas desgastadas por el uso, etc. Es posible reparar tanto piezas desgastadas como piezas que han sufrido algún desperfecto a la hora de ser mecanizadas.
Ventajas: este tipo de aporte es el menos agresivo con la pieza original debido a su poca aportación de calor. Además existe la posibilidad de mejorar las características de la pieza, recargándola con un material compatible pero con diferentes propiedades, como por ejemplo, recargar una pieza de F-114 con acero de herramientas 1.2344 o un inoxidable martensítico (rondará los 60HRC) o recargar un acero de herramientas como el 1.2344 con un inoxidable martensítico, aprovechando sus características inoxidables y su gran dureza.



- Limpieza y pulido

La limpieza por láser resulta muy útil en trabajos delicados, ya que elimina una capa seleccionada del material sin dañar el sustrato. Una de las aplicaciones es la restauración y conservación del patrimonio artístico y cultural.

La limpieza láser es eficaz en una gran variedad de materiales como piedra, madera, cuero, vidrio, etc. Obras como la fachada de la sede central del Banco de España (Madrid), la fachada de la Casa Palacio de Provincia (Vitoria), el Palacio de Santa Cruz (Valladolid) y la catedral de Burgos han sido restauradas con la ayuda de este láser.



Figura 111. Fachada del Banco de España en Madrid.



7.6.- Otras aplicaciones

7.6.1.- Medición tridimensional con láser

Un escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o el ambiente físico para reunir los datos de su forma y ocasionalmente su color. Los datos completos entonces se pueden usar para construir modelos digitales tridimensionales que se usan en una amplia variedad de aplicaciones. Estos dispositivos son usados extensamente por la industria en la producción de películas y videojuegos. Otras aplicaciones incluyen el diseño y prototipos industriales, análisis estructural por computadora y la documentación de patrimonio cultural.

El propósito de un escáner 3D es, generalmente, el de crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto. Estos puntos se pueden usar entonces para extrapolar la forma del objeto (un proceso llamado reedificación o reconstrucción). Si la información de color se reúne en cada uno de los puntos, entonces los colores en la superficie del objeto se pueden determinar también.

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras. Al igual que éstas, tienen un campo de visión en forma de cono, pero pueden reunir información acerca de superficies sin iluminación. Mientras una cámara reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, los escáneres 3D reúnen información acerca de superficies. El retrato producido por un escáner 3D describe la distancia a una superficie en cada uno de los puntos en el retrato.

Si se define un sistema esférico de coordenadas en el cual se define que el escáner es el origen y el vector fuera de la frente del escáner son $\phi = 0$ y $\theta = 0$, entonces cada punto en el retrato se asocia con un ϕ y θ Junto con una distancia, que corresponde al componente r , estas coordenadas esféricas describen completamente la posición tridimensional de cada punto en el retrato, en un sistema de coordenadas local el cual es relativo al escáner.

Para la mayoría de las situaciones, un solo escaneo no producirá un modelo completo del objeto. Generalmente se requieren múltiples escaneos, incluso centenares, desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del



objeto. Estos escaneos tienen que ser introducidos a un sistema común de referencia, un proceso que se llama generalmente alineación, y entonces son unidos para crear un modelo completo. Este proceso entero, yendo del mapeo de la distancia al modelo entero, se conoce generalmente como el escaneo 3D pipeline.

Los dos tipos de escáneres 3D son el de contacto y sin contacto. Los escáneres de contacto 3D se pueden dividir además en dos categorías principales, escáneres activos y escáneres pasivos. Hay una variedad de tecnologías que caen bajo cada una de estas categorías.

- *Contacto*

Los escáneres 3D examinan el objeto por medio del toque físico. Un CMM (Maquina de medición por coordenadas) es un ejemplo de un escáner del contacto 3D. Se usa en su mayoría en la fabricación y puede ser muy preciso. La desventaja de los CMMs, es que requiere el contacto con el objeto para ser escaneado. Así, el acto de escanear el objeto quizás lo modifique o lo dañe por este contacto que se realiza. Este hecho es muy significativo cuando se escanean objetos delicados o valiosos tales como los artefactos históricos. La otra desventaja de CMMs es que son relativamente lentos comparado con los otros métodos que se pueden utilizar para escanear. El movimiento físico del brazo donde se monta el escáner puede ser muy lento y el CMMs más rápido puede sólo operar en unos pocos cientos de hercios. Por contraste, un sistema óptico semejante al de un sistema de escáner de láser puede operar de 10 a de 500kHz.

Otros ejemplos son los escáneres que se usan para digitalizar los modelos (objetos y personas) en la industria de la animación de la computadora.

- *Activos*

Los escáneres activos emiten alguna clase de radiación y disciernen su reflejo para tentar un objeto o el ambiente. Los tipos posibles de la radiación usada son luz, ultrasonido o radiografía.



Figura 112. Escáner láser.

El escáner láser 3D de tiempo de vuelo es un escáner activo que usa la luz del láser para examinar el objeto. En el corazón de este tipo de escáner existe un examinador de distancias del láser de tiempo de vuelo. El examinador de la distancia del láser encuentra la distancia de una superficie cronometrando el tiempo del viaje de ida y vuelta de un pulso de luz. Un láser se usa para emitir un pulso de luz y se cronometra el tiempo que pasa hasta que la luz reflejada es vista por un detector. Como la velocidad de la luz C es conocida, el tiempo del viaje de ida y vuelta determina la distancia del viaje de la luz, que es dos veces la distancia entre el escáner y la superficie. Si T es el tiempo del viaje completo, entonces la distancia es igual a $(C * T) / 2$. Claramente la certeza de un escáner láser de tiempo de vuelo 3D depende de la precisión con la que se puede medir el tiempo T: 3,3 picosegundos (aprox.) es el tiempo requerido para que la luz viaje 1 milímetro.

- *Tiempo de vuelo*

El examinador de la distancia del láser sólo discierne la distancia de un punto en su dirección del panorama. Así, el escáner escanea su campo entero del panorama escaneando un punto cada vez y cambiando la dirección del examinador de distancia para escanear puntos diferentes. La dirección del panorama del examinador de distancia del láser puede ser cambiada al girar al examinador de la distancia mismo, o usando un sistema de giratorio de espejos. El método de espejos giratorios se usa comúnmente porque estos son mucho más ligeros y así pueden ser girados mucho más rápido y con



una precisión más grande. Escáneres láser de tiempo de vuelo típicos pueden medir la distancia de 10.000 ~ 100.000 puntos cada segundo.

- *Triangulación*

El escáner láser de triangulación 3D es también un escáner activo que usa la luz del láser para examinar el entorno. Con el respeto para cronometrar de escáner de láser de vuelo 3D el láser de triangulación brilla un láser en el objeto y usa una cámara para buscar la ubicación del punto del láser. Dependiendo de qué tan lejos el láser golpee una superficie, el punto del láser aparece en lugares diferentes en el sensor de la cámara. Esta técnica se llama triangulación porque el punto de láser, la cámara y el emisor del láser forman un triángulo. La longitud de un lado del triángulo, la distancia entre la cámara y el emisor del láser se sabe. El ángulo del vértice del emisor de láser se sabe también. El ángulo del vértice de la cámara puede ser determinado mirando la ubicación del punto del láser en la cámara. Estos tres pedazos de información determinan completamente la forma y el tamaño del triángulo y dan la ubicación del tercer vértice del triángulo. En la mayoría de los casos una raya de láser, en vez de un solo punto del láser, se barre a través del objeto para acelerar el proceso de adquisición. El Concilio Nacional de Investigación de Canadá estaba entre los primeros institutos en desarrollar la tecnología basada de examinación por triangulación en 1978.

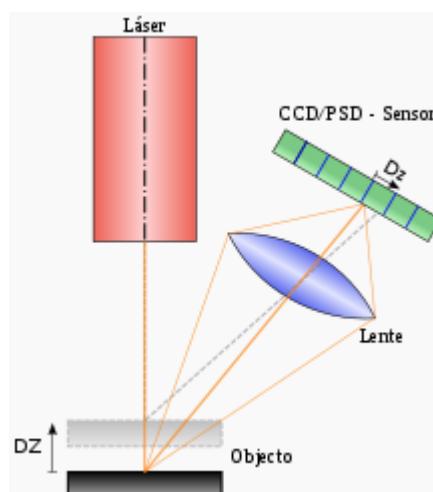


Figura 112. Principio de un sensor láser de triangulación

*- Diferencia de fase*

Este tercer tipo de escáner mide la diferencia de fase entre la luz emitida y la recibida, y utiliza dicha medida para estimar el tiempo de vuelo y, por lo tanto, la distancia al objeto. El haz láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de moderada potencia. El rango y la precisión de este tipo de escáner es intermedio, situándose como una solución entre el largo alcance de los dispositivos TOF y la alta precisión de los escáneres por triangulación. Su alcance ronda los 100 m en condiciones de poco ruido (baja iluminación ambiente), y su error característico ronda los 2mm por cada 25 m. El alcance está limitado precisamente por su modo de funcionamiento, ya que al tratarse el láser de una señal periódica, existe ambigüedad en dicha señal a partir de una cierta distancia, en función de la frecuencia utilizada. La precisión de la medida también depende de la frecuencia utilizada, pero de manera inversa a como lo hace el alcance, por lo cual estos conceptos son complementarios, y se debe encontrar un punto de compromiso entre ambos, o bien utilizar dos frecuencias distintas (multi-frequency-ranging). El tiempo de adquisición es también intermedio, consiguiendo los modelos actuales velocidades de escaneo que oscilan entre los 100.000 y 1 millón de puntos por segundo, en función de la precisión requerida.

- La holografía conoscópica

Es una técnica interferométrica por la que un haz reflejado en una superficie atraviesa un cristal birrefringente, esto es un cristal que posee dos índices de refracción, uno ordinario y fijo y otro extraordinario que es función del ángulo de incidencia del rayo en la superficie del cristal.

Como resultado de atravesar el cristal obtienen dos rayos paralelos que se hacen interferir utilizando para ello una lente cilíndrica, esta interferencia es capturada por el sensor de una cámara convencional obteniendo un patrón de franjas. La frecuencia de esta interferencia determina la distancia del objeto en el que se proyectó el haz. Esta técnica permite la medición de orificios en su configuración colineal, alcanzando precisiones mejores que una micra. La ventaja de esta técnica es que permite utilizar luz no coherente, esto quiere decir que la fuente de iluminación no tiene porqué ser un láser, la única condición es que sea monocromática.



Las aplicaciones de esta técnica son muy variadas, desde la ingeniería inversa hasta la inspección de defectos superficiales en la industria del acero a altas temperaturas. La Holografía Conoscópica fue descubierta por Gabriel Sirat y Demetri Psaltis en el año 1985.

- *La luz estructurada*

Los escáneres 3D de luz estructurada proyectan un modelo de la luz en el objeto y miran la deformación del modelo en el sujeto. El modelo puede ser unidimensional o de dos dimensiones. Un ejemplo de un modelo dimensional es una línea. La línea se proyecta en el objeto que se usa o un proyector de LCD o un láser general. Una cámara, desviada levemente del proyector de modelo, mira la forma de la línea y usa una técnica semejante a la triangulación para calcular la distancia de cada punto en la línea. En el caso del modelo de una sola línea, la línea se barre a través del campo del panorama para reunir información de distancia una tira a la vez.

Un ejemplo de un modelo bidimensional es una cuadrícula o un modelo de raya de línea. Una cámara se usa para mirar la deformación del modelo y un algoritmo bastante complejo se usa para calcular la distancia en cada punto en el modelo. Una razón para la complejidad es la ambigüedad. Considere una serie de rayas verticales paralelas de láser que barren horizontalmente a través de un blanco. En el caso más sencillo, uno podría analizar una imagen y asumir que la secuencia izquierda-derecha de rayas refleja la sucesión de los láseres en la serie, así de esta manera la raya de extremo izquierdo de la imagen sea el primer láser, el próximo es el segundo láser, etcétera. En objetivos no triviales que contienen cambio de patrón, hoyos, occlusiones, y de la profundidad, sin embargo, esta secuencia se descompone como rayas que a veces se esconden o pueden aparecer incluso con el orden cambiado, teniendo como resultado la ambigüedad de raya de láser. Este problema particular fue resuelto recientemente por una tecnología de ruptura llamada Multistripe Laser Triangulation (MLT). El escaneo estructurado de luz todavía es un área muy activa de investigación con muchas investigaciones publicadas cada año.

La ventaja de los escáneres 3D de luz estructurada es la velocidad. En vez de escanear un punto a la vez, escanean múltiples puntos o el campo entero del panorama



inmediatamente. Esto reduce o elimina el problema de la deformación del movimiento. Algunos sistemas existentes son capaces de escanear objetos en movimiento en tiempo real.

- Reconstrucción y modelado

Las nubes de puntos producidas por los escáneres 3D pueden ser utilizadas directamente para la medición y la visualización en el mundo de la arquitectura y la construcción. No obstante, la mayoría de las aplicaciones, utilizan modelos 3D poligonales, modelos de superficies NURBS, o modelos CAD basados en las características (modelos sólidos).

- Modelos de malla de polígonos

En una representación poligonal de una forma, una superficie curva es modelada como muchas pequeñas superficies planas (al igual que una esfera es modelada como una bola de discoteca). El proceso de convertir una nube de puntos en un modelo poligonal 3D se llama reconstrucción. La reconstrucción de modelos poligonales implica encontrar y conectar los puntos adyacentes mediante líneas rectas con el fin de crear una superficie continua.

Los modelos poligonales, también llamados modelos de malla, son útiles para la visualización o para algunas aplicaciones CAM, pero son, en general, "pesados" (archivos de datos muy grandes), y son relativamente difíciles de editar en este formato.

- Modelos de superficies

El siguiente nivel de sofisticación en la modelización implica el uso de un conjunto de pequeñas superficies curvas que unidas entre sí modelan nuestra forma. Estas superficies pueden ser NURBS, T-Splines u otras representaciones de curvas. Utilizando NURBS, nuestra esfera es una esfera matemática verdadera.

Estas superficies tienen la ventaja de ser más ligeras y más fácilmente manipulables cuando se exportan a CAD. Los modelos de superficie son algo más modificables, pero sólo en un sentido escultórico de empujar y tirar para deformar la



superficie. Esta representación se presta bien al modelado de formas orgánicas o artísticas.

- Modelos sólidos CAD

Desde el punto de vista de la ingeniería y la fabricación, la representación fundamental de una forma digitalizada es el modelo CAD, totalmente editable. Después de todo, el CAD es el "lenguaje común" de la industria para describir, editar y producir la forma de los bienes de una empresa. En CAD, nuestra esfera está descrita por parámetros que son fácilmente editables mediante el cambio de un valor (por ejemplo, el centro de la esfera o su radio).

Estos modelos CAD no describen simplemente el envoltorio o la forma del objeto, sino que también incorporan la "intención del diseño" (es decir, las características fundamentales y su relación con otras funciones). Un ejemplo de la intención del diseño más allá de la forma por sí sola podrían ser los tornillos de un freno de tambor, que deben ser concéntricos con el agujero en el centro del tambor. Este conocimiento podría guiar la secuencia y el método de creación del modelo CAD: Un diseñador con el conocimiento de esta relación, no diseñaría los tornillos referenciados al diámetro exterior, sino que lo haría depender del centro del tambor. Por tanto, un diseñador creando un modelo CAD, incluirá tanto la forma como la finalidad del diseño en el modelo CAD completo.

- Aplicaciones

- Procesamiento de la materia y la producción

El escaneo de láser describe un método donde una superficie se prueba o es escudriñado usando la tecnología del láser. Varias áreas de la aplicación existen eso difiere principalmente en el poder de los láseres que se usan, y en los resultados del proceso que escanea. Los láseres con el poder bajo se usan cuando la superficie escaneada no influye, por ejemplo cuando se tiene que digitalizar. Escaneo de Confocal o 3D láser son los métodos para obtener información acerca de la superficie escaneada.



Dependiendo de la potencia del láser, su influencia en un pedazo de trabajo difiere: los valores más bajos de potencia se usan para el grabado del láser, donde la materia es quitada parcialmente por el láser. Con potencias más altas, la materia llega a ser líquida y el láser se puede utilizar para soldar, o si el poder alto deberá quitar bastante la materia completamente, entonces el corte con láser puede ser realizado.

También para prototipo rápido un procedimiento de escaneo de láser se usa. Por ejemplo un prototipo es generado por sintetizar una resina por medio del láser.

El principio que se usa para todo estas aplicaciones son el mismo: software que corre en una PC o un sistema empotrado y eso controlan el proceso completo se conecta con una tarjeta de escáner. Esa tarjeta convierte los datos recibidos de vector a la información del movimiento que es mandada al la cabeza del escáner. Este cabezal se compone de dos espejos que son capaces de desviar el rayo del láser en un nivel (coordenadas X y Y). La tercera dimensión es - si necesario - lograda por un dispositivo óptico que es capaz de mover el punto focal del láser en la dirección de la profundidad (eje Z).

La tercera dimensión se necesita para algunas aplicaciones especiales como el prototipo rápido donde un objeto es construido capa por capa o para enmarcar de vidrio donde el láser tiene que influir en la materia en posiciones específicas dentro de él. Para estos casos es importante que el láser tenga un punto focal lo más pequeño posible.

Para aplicaciones más complejas de escaneo de láser y/o rendimiento material alto durante la producción, sistemas que escanean con más de un cabezal son utilizados. Aquí el software tiene que controlar lo que se hace exactamente dentro de TAL aplicación de multicabezal: es posible que todas cabezas disponibles tengan que marcar el mismo punto para acabar de procesamiento más rápido o que las cabezas marcan un solo trabajo de forma paralela donde cada cabezal realiza una parte del trabajo en caso de áreas de trabajo grandes.

*- Documentación*

Para una documentación completa de la información de un monumento histórico (arqueológico, arquitectónico, etc.) es necesario realizar un levantamiento preciso y en detalle de los distintos elementos que constituyen el objeto de estudio para obtener unos resultados fiables y ajustados a la realidad, así como identificar las distintas patologías que puedan afectar al objeto, como problemas estructurales, deformaciones, etc. Pero la documentación del patrimonio cultural no consiste únicamente en el levantamiento de campo de los datos necesarios para su registro en detalle, sino que también requiere procedimientos necesarios para procesar esta información, su presentación posterior y el archivo de los datos imprescindibles para representar la forma, volumen y tamaño del elemento documentado en un determinado momento de la vida del mismo. Como es cada vez más habitual la exigencia en la rapidez y precisión en la documentación de los elementos patrimoniales, la tendencia actual es usar como herramientas más avanzadas de documentación geométrica los métodos topográficos y la fotogrametría. Cada vez se hace más necesario obtener un registro en 3D y con ello, un modelo tridimensional que represente gráficamente tanto la geometría del edificio como el aspecto en que se encuentra.

En este sentido ha avanzado en las últimas décadas la aplicación del escáner láser 3D en el campo del patrimonio cultural, que suple huecos de otras técnicas, presentándose como una alternativa eficiente para la documentación de elementos históricos. Así como en la fotogrametría, el escáner láser puede ser utilizado en suelo o aerotransportado. En un mundo donde la información se almacena fundamentalmente en formatos digitales, se hace cada vez más necesario generar sistemas en los que ésta quede archivada en formatos que permitan su conservación en el futuro; un formato que sea además compatible con otro tipo de información digital sobre los sitios analizados (bien sea ésta descriptiva, gráfica, histórica, etc.), con la cual se pueda también relacionar.

*- Arquitectura*

La ejecución de planos “as build” en arquitectura y restauración encuentra una de las aplicaciones más comunes de los sistemas LMS. La información adicional que proporciona la cámara CCD incorporada permite una documentación completa de los elementos a intervenir, facilitando la redacción de proyectos.

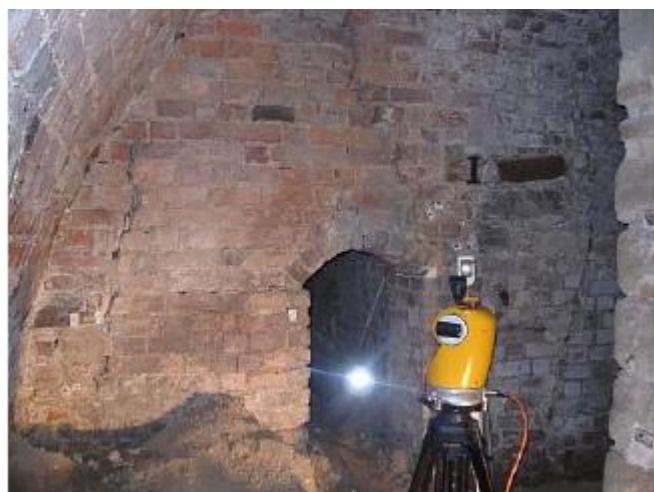


Figura 113. Levantamiento en sótano con daños estructurales

- Obra subterránea

El levantamiento de galerías y túneles siempre es una labor lenta y difícil, incluso con las estaciones totales robotizadas actuales. El sistema de medición tridimensional láser ofrece la gran ventaja de la rapidez y seguridad. No hace falta estar junto al equipo durante el trabajo, y se obtienen unos rendimientos de unos 40 m. de túnel por cada puesta (unos 15 min.). Se puede levantar la zona del frente de ataque sin interferir con los procesos de producción. El software de proceso 3D extractor permite exportar los datos obtenidos bien como una sucesión de perfiles, o como una nube de puntos que se puede procesar para obtener un modelo digital.



7.6.2.- Medición de velocidad para aplicaciones industriales

Uno de los parámetros más importantes en determinadas aplicaciones industriales como es el conocimiento de la velocidad de diferentes tipos de blancos, sólidos, líquidos y gases, durante las últimas tres décadas del siglo XX hasta nuestros días, aparecieron y continúan apareciendo diferentes sistemas de medida, todos basados en la detección a distancia mediante luz coherente, que las podemos enmarcar en lo que se denomina genéricamente Velocimetría Láser.

La velocimetría láser es una técnica óptica utilizada principalmente para la detección de la velocidad de líquidos, gases y en procesos de combustión, en el marco de la mecánica de fluidos, campo de elevado interés por sus múltiples aplicaciones en la industria.

El conocimiento de la velocidad de un fluido siempre que éste sea transparente a los haces láser y accesible desde el exterior, permite obtener un mejor conocimiento del comportamiento de éstos, y determinar la estructura y propiedades de las turbulencias en determinadas condiciones hidrodinámicas y aerodinámicas.

Hasta ese momento los científicos disponían de sensores mecánicos, de presión o magnéticos, aunque con una serie de inconvenientes y limitaciones muy importantes: poca precisión en las medidas, no aplicables en entornos de alta temperatura, aparatos que han de ser introducidos físicamente y generan distorsión en el propio fluido, poca resolución espacial y temporal, e imposibilidad de monitorizar cualquier fenómeno turbulento, con el añadido de la necesaria calibración de este tipo de sensores. Por tanto con la llegada de las técnicas ópticas, los científicos disponen de una nueva herramienta de medida que permite múltiples aplicaciones en la industria, abriendo un abanico de nuevas posibilidades.

Las diferentes técnicas de medida de velocidad mediante sistemas láser, pueden clasificarse globalmente en dos categorías, atendiendo a que si la dispersión de la energía se debe a las propias moléculas del fluido a partículas trazadoras de sembrado. Por lo que respecta a los métodos más relevantes, se basan en tres principios, derivados en última instancia en la ecuación simple que nos relaciona la velocidad, el espacio y el



tiempo: la medida del tiempo de vuelo, del espacio recorrido por el blanco, o la determinación de la velocidad a partir del efecto Doppler clásico.

Por los que respecta a las técnicas de medida en función del tipo de blanco detectado, las podemos clasificar en dos:

- Los sistemas basados sobre la medida de energía dispersada directamente por las moléculas que forman el propio fluido. Muy poco utilizados debido esencialmente a su falta de precisión y su pobre potencia dispersa, y por tanto se limitan a su uso para fluidos reactivos y sólo velocidades muy elevadas.
- Los sistemas de medida basados en la detección de la dispersión de partículas de sembrado son los más utilizados. Esta solución aportó una mejora no solo en la precisión de las medidas, sino el incremento espectacular de la energía dispersa y, por tanto, recibida por el fotodetector, lo que permite utilizar láseres de menor potencia. La única preocupación a tener en cuenta es la elección del sembrado. Los efectos de inercia de las partículas, problema importante puesto que puede degradar la calidad de las medidas y el grado de confianza en el caso de fluidos turbulentos, limitan la resolución temporal sino se cumple con una serie de requisitos en función del tamaño del sembrado y de la velocidad del fluido.

La denominación de los sistemas de medida que utilizan fuentes láser depende del campo de aplicación. Generalmente, cuando se utiliza para aplicaciones atmosféricas para obtener información de diferentes parámetros, como la presencia de partículas en suspensión (aerosoles), humedad, temperatura, velocidad del viento, obtenida remotamente a partir de la radiación producida por fuentes ópticas de gran potencia (sistemas de onda continua) o energía (sistemas pulsados), a partir de la retrodispersión producida por la atmósfera, se les denomina Lidar.

Por lo que respecta a la detección de la velocidad de un blanco en el entorno de la ingeniería de la mecánica de fluidos, sea un líquido o un gas, usualmente se le llama



anemómetros láser Doppler o sistemas LDA o velocímetros láser Doppler o sistemas DLV.

A pesar de todo, en los últimos años casi todos los investigadores utilizan la denominación LDA para cualquier tipo de blanco y aplicación, que no sea atmosférica.

La velocidad de un blanco es un vector que está determinado por sus tres componentes. Existen diferentes dispositivos y configuraciones, que en función de las componentes detectadas, se clasifican de la siguiente manera:

- 1D-LDA: Dispositivo que mide una solo componente de velocidad.
- 2D-LDA: Dispositivo de medida que permite obtener simultáneamente dos de las tres componentes de velocidad, definidas en un plano.
- 3D-LDA: Dispositivo que permite medir simultáneamente las tres componentes de la velocidad (el vector de velocidad instantánea), lo que posibilita obtener una caracterización completa de cualquier turbulencia que pueda aparecer en el fluido.

Los diferentes tipos de velocímetros láser pueden ser clasificados en tres categorías:

1. Medida del tiempo (tiempo de vuelo).

Si conocemos el tamaño de la zona iluminada sobre el fluido y por ella atraviesa una partícula del sembrado, midiendo el tiempo que tarda en cruzar la zona de dispersión podemos obtener la velocidad del fluido. Su principal inconveniente es una pobre precisión y la dificultad de obtener una buena caracterización de las turbulencias del fluido.

2. Medida del espacio.

Si conocemos el tiempo que transcurre entre dos posiciones diferentes de una partícula en movimiento, a partir de la iluminación del blanco por un láser pulsado y registrado en dos fotografías o imágenes consecutivas en esos dos instantes de tiempo, y midiendo la distancia entre imágenes de la partícula, podemos conocer su velocidad



instantánea, no solo en un punto del fluido sino en un plano, obteniendo una muy buena visualización de la estructura y evolución del fluido, mediante procesado de imagen. En el caso que se necesite la tercera componente de la velocidad, que debido a la geometría utilizada es totalmente indetectable, puede ser obtenida a partir de dos cámaras en configuración esteroescópica.

3. Medida del desplazamiento Doppler

Si tenemos un objeto (partícula) moviéndose cruzando la zona de medida o iluminación, el efecto Doppler aparece como un desplazamiento frecuencial en la energía dispersada por el blanco respecto a la frecuencia incidente, en el receptor. Midiendo esta desviación en la frecuencia podemos obtener la velocidad del blanco fácilmente. Aunque parezca que esta forma de estimar la velocidad sea diferente a las dos anteriores, realmente se basa en los mismos principios. Si conocemos el tamaño de la zona de iluminación y la dividimos en pequeñas zonas o franjas de luz iguales y adyacentes, el paso de la partícula genera una variación periódica caracterizada por su frecuencia, proporcional a la velocidad del blanco. De esta manera convertimos el problema de estimar un tiempo o una distancia, en la detección del espectro, con la suposición de que la partícula mantiene la velocidad constante en toda la zona de iluminación. Si no es así, existen diferentes métodos de estimación que permiten extraer esa aceleración del fluido.

Los métodos de estimación de frecuencia de la señal dispersada por el blanco han ido evolucionando a lo largo de la historia. En los primeros experimentos se utilizaban analizadores de espectros analógicos, muy ineficientes pero capaces de visualizar evoluciones temporales de la velocidad. A partir de 1971 se utiliza los circuitos PLL (Phase Locked Loop), mejorando la detección para pobres SNR, en fluidos que generan gran cantidad de datos (líquidos). A partir de los años 80 y 90 aparecen diferentes soluciones: Utilización de contadores temporales (cruces por cero) que permiten un mayor ancho de banda aunque requieren altos valores de SNR, o, actualmente, mediante estimadores espectrales en tiempo real (a partir de la densidad espectral de potencia utilizando el algoritmo de la transformación rápida de Fourier), óptimo para SNR muy bajas, o mediante métodos similares a partir de técnica de



correlación o covarianza de los datos y últimamente con estimadores paramétricos, como lo más innovador.

En función del proceso de estimación utilizado para hallar la frecuencia Doppler, aparecen diferentes técnicas:

- a) Medir directamente la frecuencia mediante dispositivos ópticos (velocimetría por espectrometría óptica). Utilizada solo en fluidos transitorios de alta velocidad.
- b) Obtener la frecuencia mediante la mezcla de la señal desplazada con una muestra de la señal incidente o de referencia (velocimetría de haz de referencia). Utilizado en la detección de blancos sólidos)
- c) Utilizando dos haces incidentes de luz, y mezclando sus señales dispersadas en diferentes direcciones (velocimetría de franjas o diferencia Doppler). Este es el sistema más utilizado por diferentes motivos: es independiente de la dirección de observación y obtiene la mejor SNR, es decir óptimo en el caso de gases y líquidos.

- Técnica láser Doppler

Los sistemas láser Doppler para la medida de la velocidad de diferentes blancos se basa en el principio básico del efecto Doppler, descubierto en 1842 por el físico austriaco C. Doppler y por H.L. Fizeau para ondas luminosas, denominado como efecto Doppler-Fizeau. Si una fuente de ondas electromagnéticas (láser) de una frecuencia f_{TX} y longitud de onda λ_{TX} , incide sobre un blanco o partículas en movimiento a una velocidad V_p , la frecuencia detectada o recibida por un observador f_{RX} será:

$$f_{RX} = \frac{c - V_p \cos \alpha}{c - V_p \cos(\alpha + \theta)}$$

donde c es la velocidad de la luz en el medio de propagación, α el ángulo que forman la línea que une el emisor y el punto de medida con la velocidad de la partícula, y θ el ángulo entre el mismo vector velocidad y la línea desde el punto de medida de receptor.



Una forma más genérica de expresar el desplazamiento frecuencial debido al efecto Doppler, en función de dos vectores unitarios que definen las direcciones de la fuente de luz e_{TX} y del observador o receptor e_{RX} , en función del vector velocidad de la partícula moviéndose en una dirección arbitraria en el espacio, definido por sus tres componentes $\mathbf{V}_p = [V_{px}, V_{py}, V_{pz}]$, es:

$$f_{RX} = f_{TX} \frac{1 - \frac{e_{TX} \cdot V_p}{c}}{1 - \frac{e_{RX} \cdot V_p}{c}}$$

Si consideramos a nivel práctico que la velocidad de la luz en el medio de propagación será mucho mayor que el módulo de la velocidad de la partícula la ecuación queda:

$$f_{RX} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX})}{\lambda_{TX}}$$

donde el desplazamiento frecuencial respecto a la frecuencia incidente, conocida como frecuencia Doppler f_D es proporcional a una de las componentes de velocidad de la partícula y por tanto del fluido, definida como:

$$f_D = \frac{V_p (e_{RX} - e_{TX})}{\lambda_{TX}}$$

- Detección directa

La detección directa de la señal refleja no nos permite obtener la frecuencia óptica desplazada. Al menos no con un fotodetector convencional. Por otra parte, aunque tal cosa fuera posible, nos encontraríamos ante la dificultad de resolver espectralmente un pequeño desplazamiento. Para las velocidades de fluidos típicas, los desplazamientos Doppler a detectar están en un margen desde los Hz hasta las decenas de MHz y la frecuencia de la luz incidente está sobre los 10^{14} Hz (láser de HeNe 632.8nm, $f_{TX}=4.7 \cdot 10^{14}$).

Utilizando un análisis espectral directo de la señal recibida por el receptor, mediante un interferómetro Fabry-Perot es posible la detección directa, aunque es una solución muy cara.



A finales de los años 90 aparece otra forma de detección directa, a partir de las propiedades de absorción de yodo, que transforma el desplazamiento Doppler en variaciones de intensidad de señal, denominado Doppler Global Velocimetry o algunas veces llamado Planar Doppler Velocimetry.

- Haz de referencia

Existen dos variantes en función del camino de la señal de referencia. Cada una de ellas tendrá sus ventajas e inconvenientes.

- Haz de referencia de 1 haz. En este caso, el haz pasa externamente al blanco, y se mezcla con la señal dispersada (para cualquier tipo de blanco, fluidos y superficies rugosas).

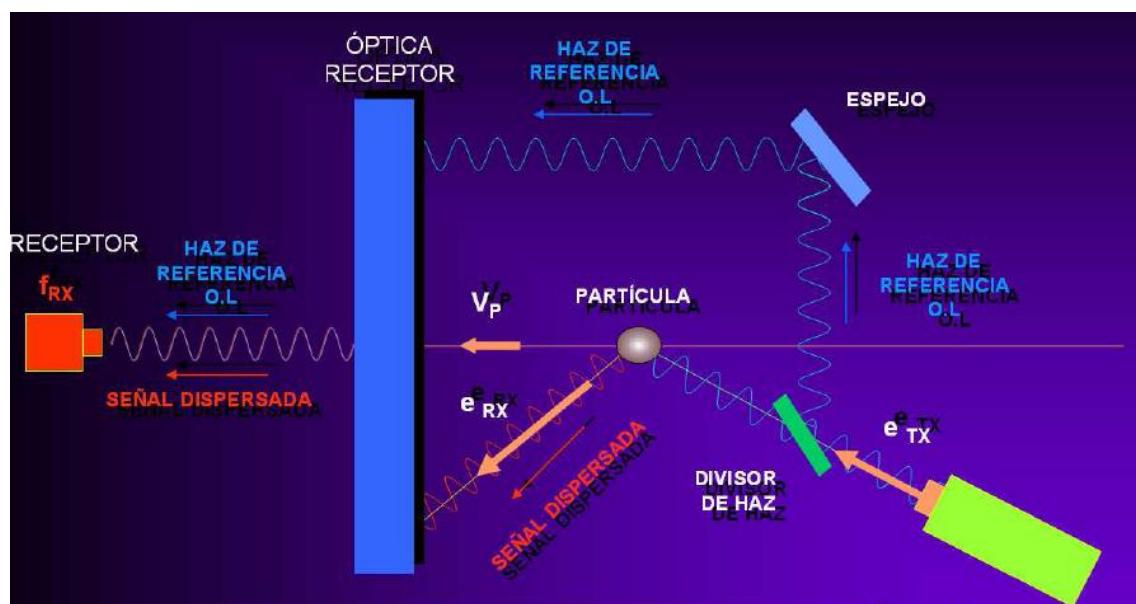


Figura 114. Sistema LDA, con la configuración haz de referencia de un haz.

Observando la figura, sobre el área del fotodetector tendremos dos señales. La primera f_{RX1} , proviene de la señal dispersada por el blanco, mientras que la otra señal f_{RX2} tendremos una fracción del haz original, haz de referencia u oscilador local.

$$f_{RX} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX})}{\lambda_{TX}}$$

$$f_{RX2} = f_{TX}$$



A la salida del receptor tendremos una señal heterodina o señal de batido, donde debido al comportamiento no lineal del fotodetector generará a su salida la suma y diferencias de señales. Si a la salida sólo consideramos la diferencia tendremos que la señal Doppler será:

$$f_D = f_{RX} = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p(e_{TX} - e_{RX})}{\lambda_{TX}}$$

La velocidad del blanco no sólo va a depender de la dirección de la fuente láser, sino que también dependerá de la posición del receptor. Eso significa, que como los haces focalizados sobre el blanco, del cual queremos detectar la velocidad, no van a ser infinitamente pequeños, las aperturas receptoras tendrán que limitarse en tamaño para limitar el volumen de medida, y como consecuencia la relación señal a ruido será pobre.

En función de la óptica utilizada y de la topología escogida para conseguir que la energía dispersada y la señal de referencia impacten sobre el receptor, aparecen diferentes geometrías ópticas.

- Haz de referencia de 2 haces. El haz ilumina directamente al receptor, pero atravesando el fluido. (sólo para líquidos y gases).

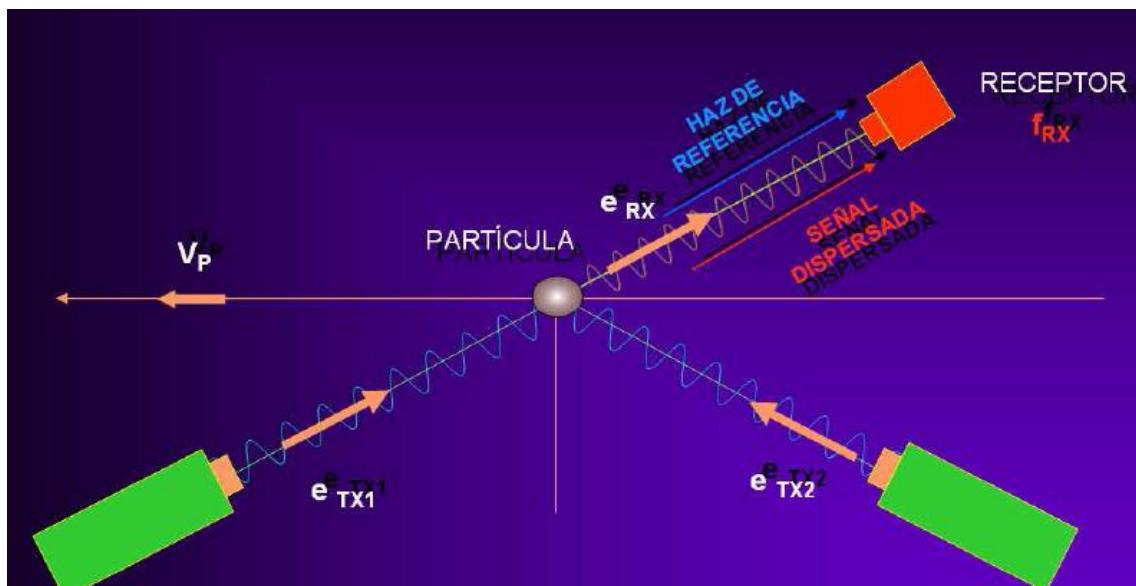


Figura 115. Sistema LDA con la configuración haz de referencia de dos haces.

Este caso se cumple que la dirección del haz de referencia coincide con la dirección de recepción $e_{TX1}=e_{RX}$, si bien no es esencial al método, si decisivo.



$$f_{RX1} = f_{RX}$$

$$f_{RX2} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}}$$

y por tanto la frecuencia Doppler recibida por el detector será:

$$f_D = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p (e_{TX1} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}}$$

Esta topología tiene la gran ventaja de que la frecuencia Doppler de la señal a la salida del detector dependerá exclusivamente de las direcciones de los haces 1 y 2 incidentes, independientemente de la posición del detector. Eso supone, que el ancho espectral de la señal será mucho más pequeño que en el caso de haz de referencia de un haz y, por tanto, obtendremos una mejor resolución en la medida de la velocidad. Además, los caminos ópticos de los dos haces, el dispersado y la referencia, recorrerán exactamente la misma distancia, cosa que va a minimizar todo aquellos batidos interferentes que puedan aparecer si la fuente láser utilizada no es realmente monocromática. El problema está en el haz de referencia, por el hecho de cruzar el fluido, cada vez que atraviesen las partículas el volumen de medida aparecerán fluctuaciones en la intensidad dispersada, generando a la salida del receptor batidos espurios indeseados pudiéndose confundir con el batido principal. Además, para el caso de fluidos muy absorbentes, no será una configuración muy útil.

- Diferencial Doppler

A partir de una única fuente láser, se divide en dos de igual potencia con un divisor de haz y se focalizan los dos haces mediante una lente sobre el blanco a medir. El receptor podrá estar colocando delante o detrás del blanco.

La mejora más importante consiste en que la frecuencia Doppler de la señal de salida del detector, no depende de la posición del receptor. Eso va a generar señales con poco ancho de banda y, por consiguiente, mejor resolución frecuencial, lo que implica un error menor en la medida de la velocidad del blanco. Asimismo no aparecerán problemas de coherencia longitudinal o temporal, ya que los caminos recorridos por los dos haces son iguales y por tanto el batido entre ellos podrá ser maximizado.



En las aplicaciones de medida de velocidad de blancos sólidos las configuraciones diferencial y de haz de referencia permiten obtener relaciones señal a ruido similares, pero en caso de detección de líquidos y/o gases, la SNR del diferencial Doppler va ha ser mucho mejor que para el de haz de referencia, en el caso que en la zona de medida o volumen de dispersión formado por la interferencia de los dos haces, solo haya una partícula capaz de producir dispersión de la luz incidente. Esto es motivado por que las dos señales dispersadas también provienen de una misma fuente dispersora o partícula de sembrado, y por eso la coherencia transversal o espacial está básicamente asegurada en esta configuración. Eso va a provocar que en el tamaño del detector o de la apertura receptora no existan límites por perdidas de coherencia, justamente al contrario de lo que sucede para el caso de la configuración haz de referencia. Asimismo un mayor volumen de dispersión para el caso de diferencial Doppler, no a influir negativamente, en principio, en la calidad de la señal recibida.

Otra característica importante, que hace de esta configuración la mejor de todas para su utilización en fluidos poco densos, es la posibilidad de con algunas pequeñas modificaciones permite detectar más de una componente de la velocidad del blanco, como son los sistemas de dos componentes (2D-LDA) y de tres componentes (3D-LDA).

Resumiendo, en el caso que tengamos que detectar la velocidad de líquidos o gases, la mejor opción es ésta, la diferencial Doppler, y cuando tengamos que detectar superficies rugosas o diferentes tipos de blanco, cualquiera de las dos es buena en principio.

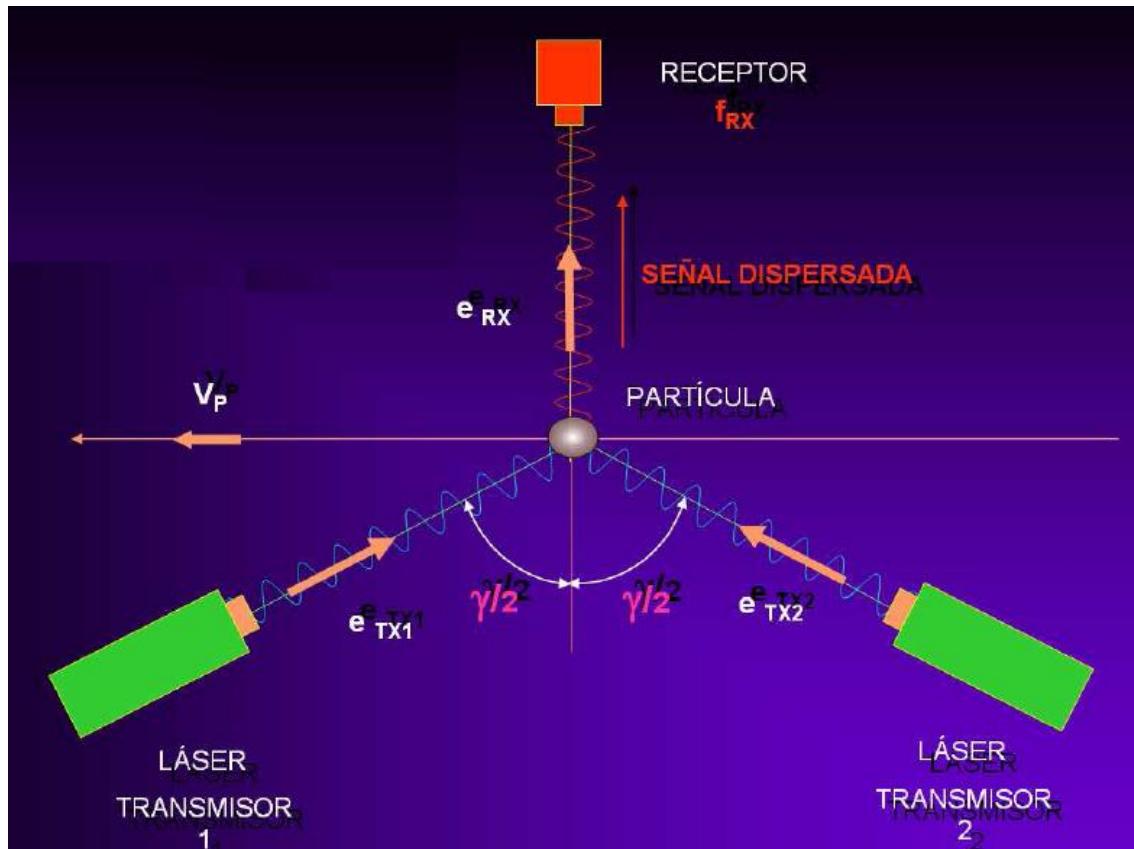


Figura 116. Sistema LDA, con la configuración diferencial Doppler de dos haces.

$$f_{RX1} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX1})}{\lambda_{TX}}$$

$$f_{RX2} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}}$$

$$f_D = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p (e_{TX1} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}}$$

De la misma manera que ocurría en la configuración haz de referencia, para el caso de la configuración diferencial existe una alternativa, utilizando un solo haz transmisor, y recibiendo dos señales dispersadas por el blanco en dos direcciones distintas, conocida como configuración simétrica.

Esta configuración tendrá las mismas características que las presentadas para el caso de la diferencial Doppler pero con una diferencia: el ancho de banda espectral de la señal Doppler será mucho mayor, ya que la señal Doppler es función de la dirección de los dos haces recibidos, de manera parecida a la del haz de referencia de un haz.



- Aplicaciones

La medida de la velocidad de líquidos y gases mediante un sistema LDA en sus diferentes configuraciones, permite múltiples aplicaciones en diferentes entornos de la industria. Las principales son:

- *Verificación de modelos teóricos en fluidos*

El conocimiento de la velocidad y turbulencias de un fluido, actualmente se puede modelar teóricamente a partir de eficientes códigos de computacionales de simulación. Un sistema LDA permite a los científicos validar y comprobar estos códigos de una manera sencilla, debido al amplio rango de velocidades detectadas, por su alta resolución temporal y espacial, y por su gran precisión en la medida de la velocidad.

- *Velocidad y vibraciones de superficies rugosas*

Permite controlar y monitorizar de una manera eficaz procesos industriales que incluyan el desplazamiento lineal, rotación de piezas y vibraciones.

- *Aplicaciones en biomedicina*

Estudio de sangre en arterias, venas y capilares en diferente órganos humanos o animales, y la detección de plasma o células rojas.

- *Experimentos aerodinámicos*

En la industria muchos experimentos aerodinámicos permiten optimizar el diseño, fabricación y construcción de automóviles o helicópteros, para reducir su resistencia al viento, minimizar el consumo de energía o hasta aumentar la eficiencia de sistemas de calefacción en los compartimentos de los pasajeros.

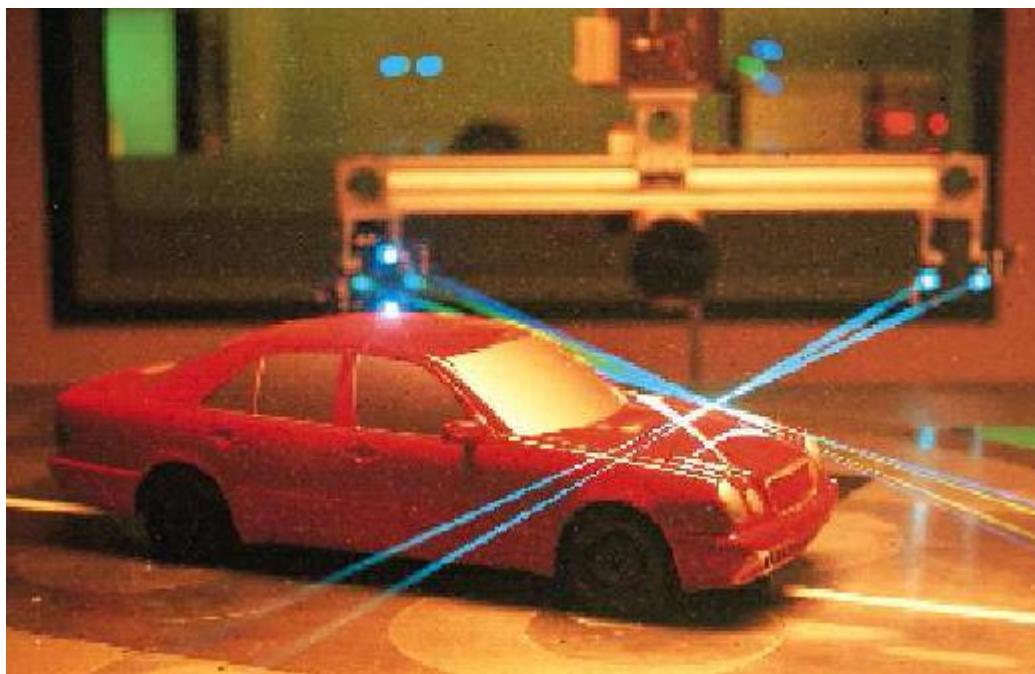


Figura 114. Caracterización del perfil de un automóvil a escala en un túnel de viento.

- *Experimentos hidromecánicos*

Permiten a la industria optimizar la construcción y diseño de cualquier mecanismo inmerso en un fluido: en canales de experimentación es posible el conocimiento del proceso de transporte de sedimentos, la caracterización de fenómenos de mezcla, diseño del casco de buques, eficiencia de propulsión y reducción de contaminación de motores, modelización de oleajes en ríos, mares o canales artificiales, o funcionamiento de bombas.

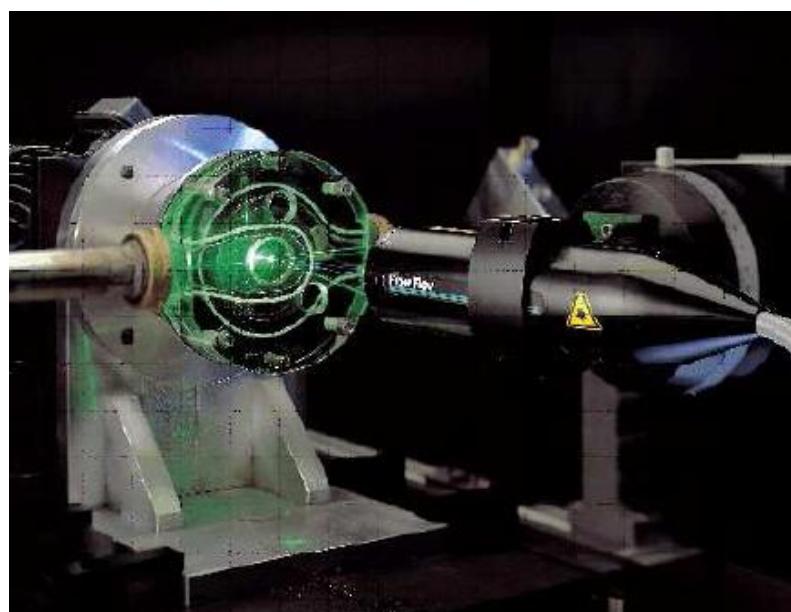


Figura 115. Fotografía de la caracterización de una bomba de agua.



- Procesos de combustión

Los sistemas LDA permiten medir en entornos de alta temperatura o altamente peligrosos. En procesos de combustión se utiliza para reducir las emisiones de gases nocivos, eficiencia de hornos o calderas, quemadores y estufas.

7.6.3.- Sistemas de conteo

Denominamos sensor a un dispositivo que es capaz de convertir una magnitud física (presión, temperatura, caudal) en una señal eléctrica.

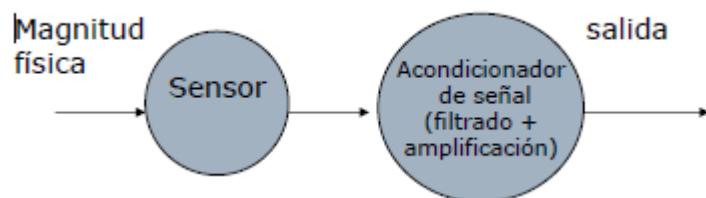


Figura 116. Esquema básico de un sensor

El sensor convierte la magnitud a una señal eléctrica. Esta señal eléctrica se debe acondicionar (amplificar, eliminar ruido, linealizar) para adaptarla a las necesidades del equipo que debe leer la señal (autómata).

- Sensores ópticos (fotoeléctricos)

Su medida se basa en la transmisión de un rayo de luz y su posterior recepción. Existen dos tecnologías diferentes:

- LED, infrarrojo
- Láser

Configuraciones:

- **Emisor y receptor separados:** En el funcionamiento normal, el emisor emite luz y el receptor la recibe. La detección se efectúa por corte del haz. La instalación puede ser complicada si la distancia es grande, ya que emisor y receptor se deben alinear. Presencia de objetos, puertas de garaje (25m, láser 60m).



- **Emisor y receptor juntos (retro-reflectivos):** Similar al anterior, pero necesitan de la instalación de un espejo para conseguir reflejar el rayo. Detección por corte del haz. Instalación más sencilla. (12m, laser 30m, mitad de la distancia aprox. comparado con los anteriores).
- **Difusos:** La detección se obtiene por la reflexión del haz sobre el objeto en todas direcciones. Cuando no hay objeto, el sensor no recibe luz. Cuando la luz reflejada es suficiente, el receptor se activa y se detecta el objeto (depende de las propiedades del material. Por ejemplo, un objeto negro mate absorbe toda la energía y no es detectado) (0-400mm, según modelos).
- **Emisores-captadores de luz por reflexión con borrado de fondo.** Pueden detectar objetos hasta una distancia de reflexión determinada. Todo lo que queda de fondo se borra. El nivel del foco se puede modificar.

Una de las aplicaciones de estos sensores láser es el conteo de objetos. En las siguientes imágenes se ven algunas configuraciones de los sensores para este fin.

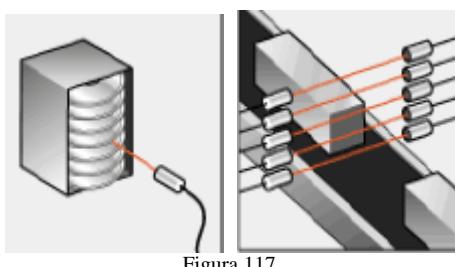


Figura 117.

- Contador de partículas láser

Una de las aplicaciones de conteo con láser más importante es el conteo de partículas. Existen dos tecnologías diferentes para este fin:

- Bloqueo de luz

Este es el fenómeno óptico más sencillo utilizado para analizar el tamaño de las partículas. En los equipos que funcionan basados en este procedimiento, un rayo de luz láser se focaliza, usando unas lentes cilíndricas, en uno de los lados de la célula capilar, la partícula circula individualmente a velocidad conocida a través de la misma y al



interponerse en el camino del rayo reduce momentáneamente la cantidad de luz que alcanza la célula fotovoltaica colocada al otro extremo.

El líquido o gas de transporte que debe de tener un índice de refracción distinto que el de las partículas a medir pasa a través del capilar de la celda de medida, aproximadamente de unas dimensiones internas de 0,5 a 1 mm.

El voltaje que proporciona el fotodiodo al ser obturado el rayo láser por una partícula, es directamente proporcional al voltaje que genera en ausencia de partículas y a la sección transversal de la partícula e inversamente proporcional a la sección transversal del sensor en la dirección del rayo incidente. La señal del fotodiodo se amplifica y convierte en una señal digital que a su vez se transforma en el tamaño de partícula mediante un microprocesador.

El tamaño inferior de las partículas a detectar depende en este caso del ruido electrónico del equipo y de la capacidad del sensor. Se considera que estos equipos miden partículas de tamaño inferior a $0,1\mu\text{m}$, estando el límite superior definido por el tamaño del orificio por el que pasan las partículas y es necesario consultar con los fabricantes de los equipos para conocer mejor sus características.

- Dispersión de luz

Los equipos que se basan en el fenómeno de dispersión de luz pueden trabajar como sistemas estáticos o de flujo.

En los equipos estáticos las partículas permanecen inmóviles y un rayo de luz de láser barre parte de la suspensión. La luz dispersada se recoge en una célula fotovoltaica y la respuesta resultante de todas las partículas barridas se lleva a un algoritmo matemático que proporciona la distribución de tamaños.

Para los equipos de flujo, el camino de la luz incidente, en la zona de medida de la célula, es bloqueado por una partícula, trasladada por el fluido portador, y la luz dispersada hacia unos ciertos ángulos prefijados se recoge y mide. El tamaño de la partícula se determina a partir de la intensidad de la luz y del ángulo de dispersión basándose en los principios de Frankhoffer o Mie.



Para partículas grandes, de diámetro mucho mayor que la longitud de onda de la luz incidente, se puede aplicar la teoría de la difracción de Fraunhofer, que indica que la intensidad de la luz dispersada es proporcional al tamaño de la partícula y que el ángulo de dispersión es inversamente proporcional al tamaño de la misma.

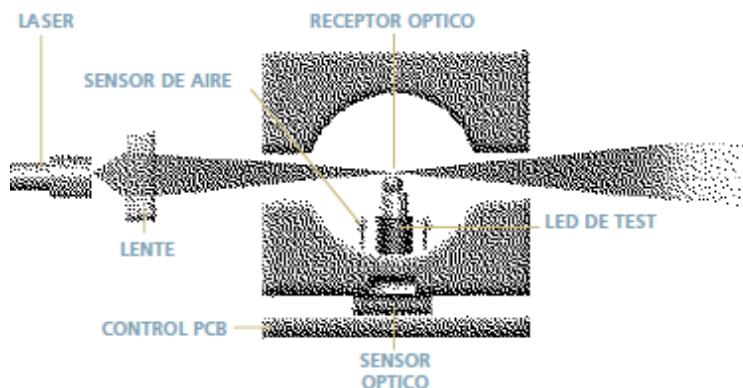


Figura 118. Esquema de un contador de partículas láser

En el caso de partículas pequeñas, de diámetro comprendido entre 1/10 y 10 veces la longitud de onda de la radiación incidente se aplica la teoría de la dispersión de Mie. La luz dispersada por las distintas partes de una partícula no está en fase y se producen interferencias que modifican la intensidad. El efecto final es una distribución angular de la luz dispersada, dependiendo del índice de refracción y del tamaño de la partícula, que permite calcular el tamaño de la misma.

El límite superior del tamaño de las partículas a medir, en los equipos de flujo, está dado por el tamaño del orificio por el que están obligadas a pasar y los tamaños inferiores que pueden ser determinados con estos equipos dependen del ruido electrónico y de la capacidad del sensor, como en el caso anterior, es conveniente consultar con los fabricantes para conocer las características de estos equipos.

Los puntos esenciales de la aplicación son:

- Mediciones concernientes a la técnica de los filtros.
- Mediciones del aire de recinto y del medio ambiente.
- Analítica de aguas.
- Medida de contaminación.
- Seguimiento del desgaste en un aceite lubricante.
- Detección de incendios.



7.6.4.- Nivelación de terrenos agrícolas

La técnica de nivelación precisa de parcelas agrícolas mediante la utilización del rayo láser comenzó a generalizarse en los años 70 al sur-oeste de los Estados Unidos, con una aceptación muy alta por parte de los agricultores y de las empresas dedicadas a la nivelación.

La nivelación con rayo láser permite obtener parcelas perfectamente niveladas, ya sea con pendiente cero o con pendientes de hasta un 9%, de manera que pueden conseguirse aumentos excepcionales en uniformidad de aplicación de riegos, así como importantes descensos en los consumos de agua de riego.

En las parcelas con pendiente cero niveladas con la técnica del rayo láser se ha visto que más del 80% de la superficie se encuentra a cotas comprendidas entre la cota media de la parcela $\pm 15\text{mm}$, y que los desniveles extremos entre las cotas máxima y mínima no superan los 60mm.

Sin embargo, en el mismo tipo de parcelas niveladas convencionalmente, solamente el 50% de la superficie se encontraba en cotas comprendidas entre la cota media de la parcela $\pm 15\text{mm}$, y además era fácil encontrar desniveles entre las cotas más altas y más bajas de hasta 150mm.

Estos resultados indican claramente que la nivelación con rayo láser es más precisa que la tradicional y desde luego es más aconsejable para ser utilizado en regadíos como los aragoneses.

El equipo de rayo láser para nivelación comprende fundamentalmente tres partes:

- El trasmisor de rayo láser.
- El receptor.
- La consola de control.

El trasmisor va montado sobre el trípode alto que se sitúa en el lugar de trabajo. Genera un rayo láser muy fino que gira rápidamente formando un plano de luz sobre la zona que se va a nivelar. Este plano puede ser perfectamente horizontal o con una



pendiente de hasta un 9%. El trasmisor funciona con una batería de 12 voltios y tiene un alcance máximo de unos 300m, el cual es menor en condiciones de viento y polvo.

El receptor consiste en una caja metálica con fotocélulas de silicona que son sensibles al rayo láser. Va montado sobre un mástil hidráulico en la traílla o niveladora y sirve para controlar la posición de la cuchilla del apero, utilizando como referencia el plano de luz emitido por el trasmisor láser.

La consola de control va montada en la cabina del tractor de modo que su conductor puede manejarla fácilmente desde su puesto de conducción. La consola sirve para controlar el funcionamiento del sistema transmitiendo las señales correctoras de la posición de la cuchilla del apero.

- Funcionamiento

Normalmente la operación de nivelación con rayo láser se realiza en dos fases. En la primera se recoge la información topográfica del terreno, para la cual se sitúa el sistema en modo de inspección topográfica. En la segunda fase se realiza la nivelación propiamente dicha, situando el sistema en modo de operación automática.

Inicialmente, el operario utiliza el modo inspección topográfica para obtener las cotas de la parcela a nivelar mediante un recorrido preestablecido. La cuchilla de la traílla o niveladora se va adaptando a la superficie del terreno, con lo cual el mástil donde se encuentra el receptor sube o baja, mientras que el receptor se mantiene siempre en el mismo plano de luz emitido por el trasmisor. El valor de la cota del terreno es transmitido continuamente a la consola de control en la cabina del tractor, donde se anota periódicamente las lecturas que aparecen en la pantalla. Normalmente las lecturas se anotan a intervalos de 30m.

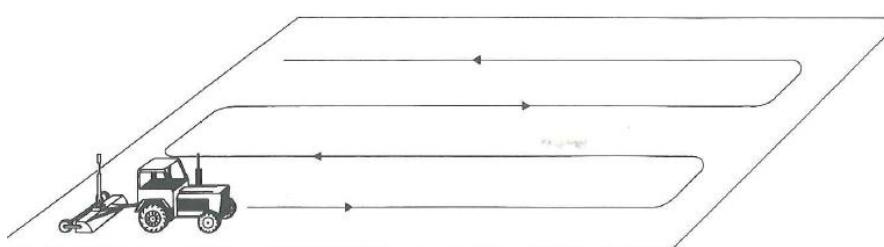


Figura 119. Recorrido del tractor durante la fase de inspección topográfica



Después de realizada la inspección topográfica del terreno, se calcula el valor medio de la elevación del terreno a partir de las cotas anotadas en el recorrido de la parcela.

La operación de nivelación se realiza simplemente conduciendo el tractor con su apero a lo largo y ancho de la parcela y con el sistema conectado en modo automático. La cuchilla del apero desmonta el terreno de las partes altas y lo trasporta y lo deposita en las partes bajas. En este modo de operación el mástil hidráulico del receptor permanece fijo, manteniendo constante la distancia entre el plano de luz y la cuchilla del apero.

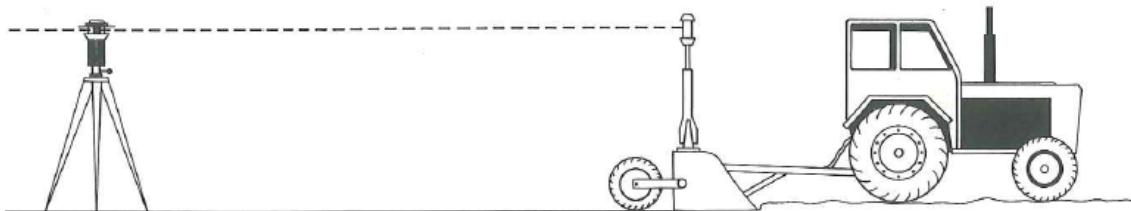


Figura 120. Esquema de funcionamiento del equipo láser.

- Ventajas

Las ventajas más importantes son:

1. Mejora evidente de la uniformidad y eficiencia de aplicación de riego.
2. Mejora de la nascencia de los cultivos debido a una mayor uniformidad en la siembra.
3. Ahorro de agua de riego y consiguiente ahorro energético.
4. Mejora de los rendimientos.



8.- Perspectivas de futuro de las aplicaciones del láser

Algunas de las aplicaciones en las que se está trabajando para el futuro son:

- Soldadura láser híbrida

El procesamiento de chapa de las pequeñas y medianas empresas (pymes) se considera un excelente campo de aplicación de la soldadura láser híbrida ya que combina, en gran medida, las ventajas del láser y del arco voltaico. Además de los beneficios técnicos que aporta esta combinación, su bajo coste permite integrar este sistema en las pymes, una técnica que siempre ha sido exclusiva de las grandes industrias, entre otras razones, por su elevado coste.

Este tipo de láser se dirige también a la industria de la alimentación, de la calefacción, de la sanidad y a las áreas hidráulica, neumática y aeronáutica, ya que en sus procesos de producción se requieren componentes de chapa tales como filtros, productos de grifería o depósitos de presión. En este sentido, la instalación láser híbrida permite combinaciones personalizadas de láser y arco voltaico de cero hasta cien.

Desde la soldadura de arco voltaico puro o la soldadura láser el procedimiento ofrece una gran flexibilidad tanto en los materiales a procesar como en las posibilidades de aplicación.

- Industria de la automoción

Existen pocas herramientas con una gama de aplicaciones tan amplia como el láser. Además de su empleo en procesos industriales de la automoción, el futuro del láser se dirige hacia una implantación en otros sectores industriales gracias a las ventajas que aportan tanto el corte como la soldadura.

Las ventajas del mecanizado con láser son la alta flexibilidad con respecto a los materiales, la alta productividad, la capacidad de automatizar los procesos y el poco calor que aplica al material; lo que garantiza menos modificaciones metalográficas en la zona afectada y una distorsión menor que con otros sistemas.



La principal ventaja de la soldadura con haz láser son, por un lado, la alta intensidad de energía que se aplica a la pieza mecanizada, lo que implica una penetración profunda de dicha energía.

En este contexto, algunas de las rutinas de láser en la industria de la automoción, son la soldadura del láser de techo, del tubo de escape, la perforación, la soldadura de los cilindros de freno o el corte de texturas de la bolsa de aire. Sin embargo, cada vez son más las aplicaciones que se emplean en éste y en otros sectores.

En los últimos años el peso medio de los vehículos de clase media se ha incrementado a causa de la demanda de mayor confort y seguridad por parte de los usuarios. Paralelamente, han aumentado las investigaciones para reducir el peso de los coches usando nuevos conceptos de construcción y el uso de materiales más ligeros, más allá de los constantes estudios que se realizan en torno al automóvil de competición.

Los materiales más utilizados para reducir el peso de los automóviles son el aluminio, el magnesio, el titanio, los polímeros de fibra reforzada y las espumas de metal. Estas últimas son entre el 25 y el 90% menos densas en comparación con los respectivos materiales masivos.

Desarrollar una construcción orientada hacia la reducción de peso implica una combinación de materiales tomando en cuenta las ventajas óptimas de las propiedades del material requerido al peso mínimo: fuerza mecánica, absorción de energía, y amortiguación de vibraciones. Tal enfoque también incluye los materiales inteligentes que adaptan sus características a los impactos exteriores. Por lo tanto, los usos futuros del láser tienen que centrarse en las técnicas de proceso para estos materiales y combinaciones de materiales. Los procesos que permiten conservar las propiedades específicas de la espuma son importantes.

El objetivo de los fabricantes de automóviles es utilizar la positiva relación rigidez-masa integrando estructuras de espuma en la parte posterior o en la parte inferior de la carrocería, lo que permite una mejora significativa de la rigidez torsional de la



misma. El empleo de las estructuras de espuma como sustituto para las placas inferiores convencionales ya se presentó en unos primeros estudios.

Las investigaciones sobre la soldadura de láser de las espumas de aluminio han demostrado que pueden surgir problemas al procesar este material. Al utilizar el láser durante el ensamblaje, la espuma se colapsa durante la transición de sólido a líquido. Después, en el proceso de fabricación de espuma, el elemento espumante está principalmente presente en forma de residuos metálicos y no se puede asegurar que el metal fundido por el láser vuelva a espumar.

- Soldadura de acero

Al soldar el acero con los métodos tradicionales se experimenta una pérdida de resistencia en la zona afectada por el calor. Esta situación se podría evitar aplicando el láser, ya que produce afectación térmica mucho menor.

Una forma de minimizar los errores al posicionar el haz y de reducir la demanda de pequeña tolerancia a los componentes es usar procesos híbridos en los que se combinan láser con soldadura de arco.

Otra técnica que puede mejorar la calidad del ensamblaje y aumentar la velocidad del proceso, así como la profundidad de la soldadura es el uso de técnicas de doble foco, que combinan dos haces láser. Por ejemplo una combinación de un diodo con un Nd:YAG hace posible disfrutar de las ventajas de ambos.

Además de las construcciones ligeras, otro reto de la ingeniería de producción y que ha dado lugar a nuevas tecnologías es el cambio de las líneas de diseño exterior del coche. Las piezas de la carrocería de gran tamaño y complejidad no pueden ser fabricadas como piezas únicas sin usar técnicas de corte. Ello implica la existencia de uniones, que son visibles puesto que son exteriores. Se requiere pues de técnicas de ensamblaje que satisfagan los más altos estándares de calidad respecto a apariencia, resistencia mecánica y a la corrosión, etc.

Una nueva tecnología que aumenta la productividad es la aplicación de sistemas de soldadura láser remotas, proceso en el que el haz es guiado con espejos de escaneo y



alcanza la pieza por un lado. La velocidad de soldadura no se incrementa, pero el tiempo de post-procesamiento se puede reducir debido a que la velocidad del haz es de más de 100 m/min. Esto requiere un láser de CO₂ de alta calidad, o un láser de disco bombeado por diodos.

Los haces láser siempre son guiados por sistemas automáticos con la excepción de las aplicaciones médicas. Otra tecnología que actualmente se desarrolla son los sistemas que permiten guiar el láser de modo manual para ser aplicados en procesos de soldadura de pequeñas series, con el objetivo de ahorrar los costes de programación de los sistemas automáticos.

Además de la manufactura de la carrocería en la automoción los láseres también se emplean en la industria auxiliar. En otras aplicaciones tales como la soldadura de plásticos, por ejemplo, el sellado de las carcasa de componentes electrónicos usando termoplásticos presenta ventajas frente a métodos tradicionales ya que ofrecen una alta flexibilidad, unas cargas térmicas y mecánicas extremadamente bajas y unos tiempos de procesamiento más cortos.

Para los componentes pequeños, como boquillas de inyección o elementos sensores, y siguiendo la tendencia de continua miniaturización de los componentes, se necesitan nuevos métodos de micro-mecanizado. Desde hace tiempo existen procesos de tal tipo basados en la tecnología láser. Sin embargo, los sistemas láser convencionales están limitados en relación a su capacidad de mecanizar estructuras en escalas micrométricas. Los láseres de femtosegundo ofrecen un gran potencial para la ablación de cualquier tipo de materiales con un daño mínimo. Metales, e incluso materiales transparentes o materiales muy sensibles a la temperatura se pueden mecanizar con precisión con unos efectos secundarios despreciables. Una de las aplicaciones más prometedoras es el perforado de boquillas de inyección de combustible. Las especificaciones actuales (diámetros de agujero de 250µm en materiales de 1 mm de espesor, sin rebabas y con gran reproducibilidad) para las boquillas se pueden conseguir por medio de electroerosión o microperforación. Sin embargo, los diseños del futuro exigirán diámetros significativamente menores de 100µm y ángulos de incidencia no rectángulos, con el fin de proporcionar un menor consumo de combustible y una mayor potencia. Estas especificaciones superan las



posibilidades de los métodos convencionales. Sin embargo, los láseres de pulsos ultracortos parecen cumplirlas.

La industria del automóvil se ha tomado como ejemplo para mostrar las posibles tendencias para futuras aplicaciones láser. Las mismas jugarán un papel significativo tanto en la industria del automóvil como en otros sectores industriales. Además, se incrementará el número de aplicaciones existentes. Las tendencias en las aplicaciones láser se moverán en consonancia con las tendencias hacia la reducción de consumo energético, las construcciones ligeras y la continua miniaturización de los componentes.

- Industria militar

El programa de desarrollo de un láser antimisiles aerotransportado (Airborne Laser, ABL) es uno de los proyectos más ambiciosos de la Agencia para la Defensa Antimisiles estadounidense. Washington inició las primeras investigaciones en este ámbito ya en los años 70, tras la construcción del aparato NKC-135ALL, versión modernizada del avión cisterna KC-135. Este aparato fue dotado de un láser CO₂, de 10 toneladas de peso y de unos 0,4-0,5 megavatios de potencia, fabricado por United Technologies.

Varios ensayos de este avión, realizados en EEUU en el filo de los años 70 y 80 del siglo pasado, mostraron que, en teoría, es posible desarrollar un sistema similar. El alcance operativo de aquel láser era solamente de unos kilómetros, lo que excluía cualquier posibilidad de uso militar.

Durante unas pruebas de superficie realizadas en 1985, un cañón láser llegó a calentar hasta una temperatura crítica y a destruir un tanque de combustible del misil Titán-1 que simulaba un misil balístico intercontinental de la URSS ubicado a distancia de un kilómetro.

Estos ensayos, al igual que los anteriores de los años 70 y comienzos de los 80, dejaban claro que todavía resultaba técnicamente imposible desarrollar un láser aéreo antimisiles eficaz.



La Unión Soviética también estuvo desarrollando un proyecto parecido a bordo del avión A-60, cuyo prototipo fue el avión de transporte militar Il-76. Casi todas las investigaciones se cancelaron con el colapso de la URSS. Sin embargo, según fuentes dignas de crédito, hace unos años el programa A-60 volvió a ser retomado.

Washington reanudó el desarrollo del láser aéreo durante la segunda mitad de los años 90, cuando se planteó la necesidad de crear un sistema DAM. En una primera etapa, se preveía la construcción de dos nuevos prototipos y la adaptación de cinco aviones de serie hacia 2012. El proyecto se reveló excesivamente caro por lo que, en 2009, Washington renunció al segundo aparato y se concentró en un único prototipo, el YAL-1, cuyo desarrollo ya se había iniciado en el 2000.

No han trascendido todos los detalles sobre los ensayos realizados el pasado 11 de febrero de 2010, ni tampoco sobre la capacidad real de esta nueva arma, pero la información disponible permite llegar a varias conclusiones.

El avión YAL-1 está dotado de dispositivos láser: el primero – TILL (Track Illuminator Laser), está destinado para la detección y el seguimiento de objetivos, y también para realizar las correcciones necesarias en el sistema óptico del láser para realizar el disparo. El segundo – BILL (Beacon Illuminator Laser) está destinado para compensar las perturbaciones atmosféricas en el momento del disparo. Y el tercero, el láser HEL de seis módulos, es el arma en sí.

YAL-1 es capaz de abatir misiles balísticos en la fase inicial de su trayectoria a una distancia de hasta 200-250 kilómetros. El radio de acción aún está limitado por la potencia del sistema y por la dispersión de la energía del rayo en la atmósfera, motivada fundamentalmente por perturbaciones y turbulencias que impiden tanto afinar en la captación de los objetivos, como en su destrucción por pérdida de intensidad. El fenómeno de la descarga o “ruptura” eléctrica del gas inducida por la intensidad de la energía emitida por el láser y que, hasta el momento, ha sido imposible evitar, restringe la potencia del mismo. Igual como el propio diseño del avión, ya que cuando el sistema funciona, el fuselaje se recalienta, lo que desestabiliza la nave y puede provocar un accidente.



El láser DAM aéreo en su estado actual, con las características anunciadas y baja cadencia de tiro, solamente puede interceptar algunos misiles a una relativa corta distancia.

Con estos sistemas es imposible defenderse de un ataque nuclear masivo, ni hoy, ni en un futuro cercano (dentro de 20 ó 30 años). En caso de un hipotético conflicto entre Rusia y EEUU, los cazas interceptores estadounidenses tendrían que controlar el espacio aéreo de Rusia para abatir los misiles lanzados desde allí, durante la denominada fase activa de su trayectoria, que comprende los primeros tres ó cinco minutos tras el despegue, antes de que la ojiva llegue a una altura orbital y se dirija hacia su objetivo. Pero es evidente que en caso de conflicto no es una opción factible la presencia regular de aparatos estadounidenses en el espacio aéreo de Rusia, ni aún teniendo en cuenta los actuales problemas de la defensa antiaérea rusa.

Estos sistemas aéreos sí que pueden representar una mayor amenaza para las fuerzas nucleares estratégicas navales. Los submarinos están de servicio operativo mucho más cerca de las aguas territoriales y, a veces, incluso dentro de estas aguas. Sin embargo, solamente son visibles en el momento del lanzamiento, por lo que el caza equipado con el sistema láser interceptor puede encontrarse lejos del lugar de los hechos.

Hoy por hoy, este proyecto representa una amenaza real sólo para países como Irán y, sobre todo, para Corea del Norte, cuyos territorios no permiten emplazar sus bases de misiles a una distancia suficiente de sus fronteras como para neutralizar el alcance máximo del láser.

Este tipo de armamento tiene un futuro mucho más activo y ofensivo, dentro de unas decenas de años, cuando se consiga aumentar su potencia e instalarlo en misiles supersónicos suborbitales capaces de alcanzar las capas altas de la atmósfera, donde el efecto atmósfera sea irrelevante.

Por otra parte, su instalación en naves espaciales es inviable hasta que no se resuelva el problema del aumento sustancial de la carga a transportar a órbita o se



reduzca el volumen total del arma, ya que un láser de una potencia para uso militar tiene un peso muy importante.

No hay métodos para luchar contra el desarrollo de armas láser. Según la experiencia, las restricciones jurídicas al progreso técnico, en su mayoría, resultan ineficaces. Por eso, hay que prepararse a una nueva espiral en la carrera armamentística.

Rusia está desarrollando en la actualidad misiles balísticos destinados a romper el escudo antimisiles, incluyendo al sistema láser, para equipararse al avance estadounidense. Una de las medidas que podrían asegurar el salto tecnológico necesario sería la reducción de la fase activa de la trayectoria para los nuevos misiles, un aumento en la capacidad de maniobra en esta fase hace más difícil enganchar el objetivo, etc. Según los expertos, hay también otras medidas que pueden proteger misiles contra los rayos láser.

Rusia, en cualquier caso, deberá realizar sus propias investigaciones en este ámbito para crear armamento láser aéreo y también para saber cómo contrarrestarlo.

Así las cosas, las noticias sobre la reanimación del programa de desarrollo de A-60 ruso, homólogo de ABL estadounidense, son muy esperanzadoras.

Por otra parte, el departamento de Justicia de Estados Unidos está trabajando en dos armas no letales basadas en rayos láser y microondas.

Los dos dispositivos están siendo desarrollados por el National Institute of Justice, construidos tras el controvertido Active Denial System (ADS), presentado en 2007, que usa los rayos microondas para sobrecalentar la piel de las personas y provoca gran dolor.

Al igual que el ADS, una de las nuevas armas también recalientaría la piel pero la potencia de los rayos sería mucho menor y se busca la manera de atenuar aún más los efectos sobre el cuerpo humano. El propio ADS puede llegar a causar quemaduras hasta de segundo grado.



El otro dispositivo que desarrolla el National Institute of Justice es el PHaSR, un rifle de aspecto engorroso. Creado en 2005 por las fuerzas aéreas de Estados Unidos para deslumbrar a los enemigos y quemar la piel con un láser infrarrojo.

- Electrónica de consumo y tecnologías de la información

- *Microprocesadores*

Científicos de la Universidad de California han descubierto “nanopilares” capaces de producir luz láser por infrarrojos a temperatura ambiente. Este descubrimiento acabaría sustituyendo a los electrones para las comunicaciones de los chips.

A decir verdad, la tecnología láser no es uno de los componentes que se le vienen a uno a la cabeza cuando piensa en procesadores, pero un nuevo descubrimiento anunciado por la Universidad de California (Berkeley), podría cambiar esta idea. Los ingenieros destacan haber ideado una manera de hacer crecer nanoláser sobre una pieza de silicio, un desarrollo que dicen podría abrir la puerta a una nueva generación de procesadores.

La transmisión de datos utilizando la luz es vista como una manera de acelerar los procesadores, reduciendo los denominados cuellos de botella que suelen formarse en las diferentes transmisiones realizadas. Ya anteriormente, los científicos habían tratado de crear chips de silicio y los llamados “III-V” (tres y cinco) de los materiales semiconductores, pero éste método tiene sus propios problemas derivados.

Los investigadores han creado estructuras de la nanotecnología que han denominado “nanopilares”, producidos de materiales de arseniuro de galio indio procedentes del silicio. Los investigadores utilizaron deposición de vapor químico-orgánico de metal para hacer crecer los nanopilares del silicio. Estos nanopilares son capaces de producir luz láser por infrarrojos a la temperatura ambiente.

Además de en los procesadores, los investigadores destacan que la tecnología podría ser utilizada también en sensores bioquímicos.



Intel lleva años explorando formas de utilizar la luz como medio para transferir los datos, con la ventaja de obtener mayores velocidades. Además, Intel continúa trabajando en la utilización de rayos de luz como sustitutos de electrones para las comunicaciones de sus chips. Los grupos de trabajo dedicados a este tipo de investigación son múltiples, con prototipos en los que ha conseguido establecer las primeras conexiones ópticas de datos basadas en silicio con láser integrado.

- *Blu-Ray Disc*

Blu-ray, también conocido como Blu-ray Disc o BD, es un formato de disco óptico de nueva generación de 12 cm de diámetro (igual que el CD y el DVD) para vídeo de gran definición y almacenamiento de datos de alta densidad. Su capacidad de almacenamiento llega a 25 GB por capa, aunque Sony y Panasonic han desarrollado un nuevo índice de evaluación (i-MLSE) que permitiría ampliar un 33% la cantidad de datos almacenados, desde 25 a 33,4 GB por capa. Aunque otros apuntan que el sucesor del DVD no será un disco óptico, sino la tarjeta de memoria. No obstante, se está trabajando en el HVD o Disco holográfico versátil con 3,9 TB. El límite de capacidad en las tarjetas de formato SD/MMC está ya en 128 GB, teniendo la ventaja de ser regrabables al menos durante 5 años

En febrero de 2008, después de la caída de muchos apoyos al HD DVD, Toshiba decidió abandonar la fabricación de reproductores y las investigaciones para mejorar su formato.

Existe un tercer formato, el HD-VMD, que también debe ser nombrado, ya que también está enfocado a ofrecer alta definición. Su principal desventaja es que no cuenta con el apoyo de las grandes compañías y es desconocido por gran parte del público. Por eso su principal apuesta es ofrecer lo mismo que las otras tecnologías a un precio más asequible, por ello parte de la tecnología del DVD (láser rojo). En un futuro, cuando la tecnología sobre el láser azul sea fiable y barata, tienen previsto adaptarse a ella.

El disco Blu-ray hace uso de un rayo láser de color azul con una longitud de onda de 405 nanómetros, a diferencia del láser rojo utilizado en lectores de DVD, que tiene una longitud de onda de 650 nanómetros. Esto, junto con otros avances



tecnológicos, permite almacenar sustancialmente más información que el DVD en un disco de las mismas dimensiones y aspecto externo.

El tamaño del punto mínimo en el que un láser puede ser enfocado está limitado por la difracción, y depende de la longitud de onda del haz de luz y de la apertura numérica de la lente utilizada para enfocarlo. En el caso del láser azul-violeta utilizado en los discos Blu-ray, la longitud de onda es menor con respecto a tecnologías anteriores, aumentando por lo tanto la apertura numérica (0,85, comparado con 0,6 para DVD). Con ello, y gracias a un sistema de lentes duales y a una cubierta protectora más delgada, el rayo láser puede enfocar de forma mucho más precisa en la superficie del disco. Dicho de otra forma, los puntos de información legibles en el disco son mucho más pequeños y, por tanto, el mismo espacio puede contener mucha más información. Por último, además de las mejoras en la tecnología óptica, estos discos incorporan un sistema mejorado de codificación de datos que permite empaquetar aún más información.

El DVD tenía dos problemas que se intentaron resolver con la tecnología Blu-Ray, por ello la estructura es distinta. En primer lugar, para la lectura en el DVD el láser debe atravesar la capa de policarbonato de 0,6 mm en la que el láser se puede difractar en dos haces de luz. Si esta difracción es alta, por ejemplo si estuviera rayado, impide la lectura del disco. Pero dicho disco, al tener una capa de sólo 0,1mm se evita este problema, ya que tiene menos recorrido hasta la capa de datos; además, esta capa es resistente a rayaduras. En segundo lugar, si el disco estuviera inclinado, en el caso del DVD, por igual motivo que el anterior problema, la distorsión del rayo láser haría que leyese en una posición equivocada, dando lugar a errores. Gracias a la cercanía de la lente y la rápida convergencia del láser la distorsión es inferior, pudiéndose evitar posibles errores de lectura.

Otra característica importante de los discos Blu-ray es su resistencia a las rayaduras y la suciedad. La delgada separación entre la capa de lectura y la superficie del disco hacía estos discos más propensos a las rayaduras y suciedad que un DVD normal. Es por ello que se pensó primero en comercializarlos en una especie de carcasa o *Caddy*. La idea fue desechada gracias a la elaboración por parte de TDK de un sustrato protector llamado Durabis, que no solo compensa la fragilidad, sino que le



otorga una protección extra contra las rayaduras a dicho disco. Existen también discos DVD con esta protección, pero no es tan necesaria debido al mayor espesor de la capa que separa los datos de la superficie del disco, 0,6mm.

Además de estas aplicaciones, se están desarrollando mucha más aplicaciones del láser. Algunas de ellas son:

- Televisión láser.
- Discos duros láser.
- Electrodomésticos. Electrolux ha presentado su futura cocina láser.
- Medicina: aplicaciones en medicina estética, tratamiento de algunos cánceres, odontología...

Por otro lado, además de nuevas aplicaciones, el futuro de la tecnología láser pasa por desarrollar las ya existentes e implantarse en un número superior de empresas. Uno de los aspectos a desarrollar es su precio, ya que los elevados precios de los equipos hacen que muchas empresas (especialmente las pequeñas y medias) no puedan acceder a esta tecnología.



9.- Normativa

Producto láser es cualquier sistema o conjunto de componentes que constituyen, incorpora o está concebido para incorporar un láser o sistema láser.

La radiación láser es la radiación electromagnética emitida por un producto láser en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 180nm y 1mm, que es radiada como resultado de la emisión estimulada de luz.

El intervalo de longitudes de onda comprendidas entre 180nm y 1mm, engloba a la radiación ultravioleta, la radiación visible y la radiación infrarroja en la secuencia siguiente:

- 180 - 400nm - ultravioleta
- 400 - 700nm - visible
- 700nm - 1mm - infrarrojo

Los punteros láser, obviamente, debido a su función emiten siempre en el rango visible.

Un haz láser estará perfectamente definido si conocemos su:

- Longitud de onda de emisión
- Duración de la emisión
- Potencia o energía del haz
- Diámetro del haz
- Divergencia

La capacidad de un láser para producir un riesgo vendrá determinada principalmente por los tres primeros factores: longitud de onda, duración o tiempo de exposición y potencia o energía del haz.

El nivel de radiación láser al que las personas pueden estar expuestas en circunstancias normales, sin sufrir efectos adversos, se denomina exposición máxima permisible (EMP). Los niveles de EMP representan el nivel máximo al cual el ojo o la piel pueden resultar expuestos sin sufrir los daños derivados de la exposición ni



inmediatamente ni después de un período largo de tiempo, estando tales niveles relacionados con la longitud de onda de la radiación, la duración del impulso o el tiempo de exposición, el tejido expuesto al riesgo y el tamaño de la imagen sobre la retina.

En cualquier caso, la exposición a radiación láser debería ser siempre la mínima posible.

Los productos láser se utilizan típicamente para la demostración de fenómenos físicos y ópticos, procesado de materiales, almacenamiento y lectura de datos, transmisión y visualización de información, etc. Estos sistemas han encontrado aplicación en la industria, el comercio, el espectáculo, la investigación, la educación y la medicina.

- Clasificación

Según la norma UNE-EN 60825-1/A-11, los productos láser, teniendo en cuenta la longitud de onda, el contenido energético y las características del impulso de un haz de láser, se clasifican en las siguientes clases:

- Clase 1: son los productos láser seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles.
- Clase 2: son los productos láser que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda entre 400nm y 700nm, la protección ocular se consigue normalmente apartando el ojo incluido el reflejo parpebral, no obstante, se deben tomar precauciones para evitar la visión continua directa del haz.
- Clase 3A: Productos láser que son seguros para la visión con el ojo desnudo. Para la emisión láser en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400nm y 700nm, la protección ocular se consigue por las respuestas consistentes en apartar los ojos, incluido el reflejo parpebral. Para otras longitudes de onda el riesgo para el ojo desnudo no es mayor que para los productos láser de clase 1. La visión directa en el haz para productos láser de clase 3A con ayuda de instrumentos ópticos (por ejemplo, prismáticos binoculares, telescopios, microscopios) puede ser peligrosa.



- Clase 3B: Productos láser cuya visión directa en el haz es siempre peligrosa. La visión de reflexiones difusas es normalmente segura.
- Clase 4: Son productos láser de gran potencia susceptibles de producir reflexiones difusas peligrosas, la visión directa siempre es peligrosa. Pueden causar daños sobre la piel y pueden constituir, también, un peligro de incendio. Su utilización precisa extrema precaución.

- Precauciones de seguridad y aspectos a tener en cuenta en el empleo de productos láser

La norma recoge una serie de precauciones de seguridad y medidas de control a tener en cuenta por el usuario de un producto láser, según su clasificación de riesgo, entre las que se encuentran:

La utilización de los sistemas láser de la clase 3A, 3B y 4 pueden representar un riesgo no solamente para el usuario, sino para otras personas situadas a una distancia considerable.

Debido a este peligro potencial, solamente aquellas personas que hayan recibido formación hasta un nivel apropiado deberían recibir autorización para ejercer el control de tales sistemas.

Cada producto láser para demostración utilizado para propósitos educacionales en colegios, etc., deberá cumplir todos los requisitos aplicables a los productos láser de clase 1 ó 2 y no deberá permitir el acceso humano a la radiación láser que sobrepase los límites de emisión accesible para los productos de clase 1 ó 2 según el que sea aplicable.

En las exhibiciones láser o la utilización de láseres con fines de entretenimiento en áreas sin supervisión, la norma recomienda utilizar únicamente láseres clase 1 y clase 2, no permitiendo la exposición de los espectadores a niveles superiores. El uso de láseres de clase superior requeriría el control de un operador experimentado y con la formación adecuada.

Para aplicaciones topográficas, de alineación y nivelación deberían utilizarse preferentemente productos láser de la clase 1 ó 2 siempre que sea posible.



De forma genérica en cuanto a niveles de exposición máxima admisible, la norma comenta que en cualquier caso, la exposición a la radiación láser deberá ser tan baja como sea posible.

Algunos tejidos biológicos tales como la piel, el cristalino del ojo y, en particular la retina pueden manifestar cambios irreversibles provocados por la exposición prolongada a niveles moderados de luz láser.

Si un haz intenso se enfoca sobre la retina, la energía absorbida provoca un calentamiento local y esta quemadura o lesión puede tener como consecuencia una pérdida de visión que, dependiendo de la magnitud de la exposición, puede ser o no permanente.

En términos generales, la piel puede tolerar mucho mejor que el ojo la exposición a la energía de un haz de láser aunque puede producirse eritema, pigmentación, ulceración y carbonización de la piel.

- Legislación

La legislación aplicable a los punteros láser es la siguiente:

- Real Decreto 44/1996, de 19 de enero, por el que se adoptan medidas para garantizar la seguridad general de los productos puestos a disposición del consumidor.
- Norma UNE-EN 60825-1/1994, Seguridad de los productos láser modificada por la EN 60825-1/A-11
- Real Decreto 1468/1988, de 2 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de etiquetado, presentación y publicidad de los productos industriales destinados a su venta directa a los consumidores y usuarios.

Según el Real Decreto 44/1996, los productores están obligados a comercializar productos seguros y a tomar medidas apropiadas para mantener informados a los consumidores de los riesgos que los productos que comercializan podrían presentar.



En el artículo 4 se definen, en ausencia de disposición específica, los criterios que permiten evaluar la seguridad del producto, en este caso y en cumplimiento de este artículo, la norma UNE citada sería de aplicación a los productos láser.

Dicha norma establece los requisitos que deben reunir estos productos con el fin de asegurar un nivel de seguridad razonablemente previsible, así como el etiquetado, instrucciones y advertencias de seguridad que indican al usuario el modo de empleo correcto.

En materia de información al consumidor el Real Decreto 1468/1988 señala los datos que deben figurar en el etiquetado de los productos que llegan al consumidor a fin de asegurarle una información suficiente.

- Etiquetado de los punteros láser

Cada producto láser deberá estar provisto de unas etiquetas permanentemente fijas, ser legibles y claramente visibles y estar situadas de tal forma que puedan leerse sin necesidad de exposición humana a radiación láser que sobrepase el nivel máximo accesible de clase 1.

Los márgenes del texto de la etiqueta explicativa y el símbolo de peligro deberán ser de color negro sobre un fondo amarillo, excepto para los productos de clase 1 donde esta combinación de color no es necesaria.

Si el tamaño o el diseño del producto hacen impracticable el etiquetado, la etiqueta deberá incluirse en la información al usuario o dentro del embalaje.

Según la clase del producto láser el etiquetado específico será el siguiente:

Clase 1: Los productos de clase 1 en la etiqueta o en su lugar, a discreción del fabricante, en la información al usuario deberá indicar la siguiente frase:

PRODUCTO LÁSER CLASE 1



Clase 2: Los productos de clase 2 deberán llevar una etiqueta de advertencia con el símbolo de peligro de radiación láser, en los colores y medidas que se recogen en el anexo I.

Igualmente llevará una etiqueta explicativa con los colores y medidas que establece el anexo II, con los siguientes datos:

- las leyendas: RADIACIÓN LÁSER o LUZ LÁSER NO MIRAR FIJAMENTE AL HAZ PRODUCTO LÁSER CLASE 2
- la potencia máxima de la radiación láser emitida
- la duración del impulso (si ha lugar)
- la longitud de onda emitida
- el nombre y la fecha de publicación de la norma en la que se basa la clasificación del producto (que podrá figurar en el envase o folleto)

Dichos datos deben ir acompañados de la palabra PRECAUCIÓN.

Clase 3A: Los productos de la clase 3A deben llevar una etiqueta de advertencia con el símbolo de peligro de radiación láser, en los colores y medidas que se recogen en el anexo I.

Además llevará una etiqueta explicativa con los colores y medidas que establece el anexo II, con los siguientes datos:

- las leyendas: RADIACIÓN LÁSER o LUZ LÁSER NO MIRAR FIJAMENTE AL HAZ PRODUCTO LÁSER CLASE 3^a
- la potencia máxima de la radiación láser emitida
- la duración del impulso (si ha lugar)
- la longitud de onda emitida
- el nombre y la fecha de publicación de la norma en la que se basa la clasificación del producto (que puede figurar en el envase o folleto)

Dichos datos deben ir acompañados de la palabra PRECAUCIÓN.



Si estos productos tuvieran paneles de acceso y/o sistemas de bloqueo de seguridad, además llevarán la siguiente información:

Asimismo los paneles de acceso deberán llevar fijada una etiqueta con el texto siguiente:

PRECAUCIÓN / RADIACIÓN LÁSER PRESENTE AL ABRIR NO MIRAR FIJAMENTE AL HAZ CON LOS OJOS DESCUBIERTOS NI DIRECTAMENTE CON INSTRUMENTOS ÓPTICOS

También los paneles dotados de bloqueos de seguridad deberán llevar una etiqueta en cada bloqueo de seguridad que sea visible antes de la neutralización del bloqueo y durante la misma y estar próximamente situada a la abertura creada al retirar la cubierta protectora con el texto siguiente

PRECAUCIÓN / RADIACIÓN LÁSER PRESENTE AL ABRIR Y CUANDO ESTÁN NEUTRALIZADOS LOS BLOQUEOS DE SEGURIDAD NO MIRAR FIJAMENTE AL HAZ CON LOS OJOS DESCUBIERTOS NI DIRECTAMENTE CON INSTRUMENTOS ÓPTICOS

Clase 3B: Los productos de clase 3B deben llevar una etiqueta de advertencia con el símbolo de peligro de radiación láser, en los colores y medidas que se recogen en el anexo I.

Además llevará una etiqueta explicativa con los colores y medidas establecidos en el anexo II, con los siguientes datos:

- las leyendas: RADIACIÓN LÁSER o LUZ LÁSER LA EXPOSICIÓN AL HAZ ES PELIGROSA PRODUCTO LÁSER CLASE 3 B
- la potencia máxima de la radiación láser emitida
- la duración del impulso (si ha lugar)
- la longitud de onda emitida
- el nombre y la fecha de publicación de la norma en la que se basa la clasificación



Además cada producto láser debe llevar fijada una etiqueta cerca de la abertura a través de la cual se emite la radicación láser con las siguientes leyendas:

**ABERTURA LÁSER EXPOSICIÓN PELIGROSA / POR ESTA ABERTURA
SE EMITE RADIACIÓN LÁSER**

En los paneles de acceso llevarán fijada una etiqueta con el texto siguiente:

**PRECAUCIÓN / RADIACIÓN LÁSER PRESENTE AL ABRIR LA
EXPOSICIÓN AL HAZ ES PELIGROSA**

Los paneles dotados de bloqueo de seguridad llevarán una etiqueta visible antes de la neutralización del bloqueo y durante la misma y estará próximamente situada a la abertura creada al retirar la cubierta protectora con el texto siguiente:

**PRECAUCIÓN / RADIACIÓN LÁSER PRESENTE AL ABRIR Y CUANDO
ESTÁN NEUTRALIZADOS LOS BLOQUEOS DE SEGURIDAD LA EXPOSICIÓN
AL HAZ ES PELIGROSA**

Clase 4: Los productos de clase 4 deberán llevar fijada una etiqueta de advertencia con el símbolo de peligro de radiación láser, con las dimensiones y colores contemplados en el anexo I

Además llevará una etiqueta explicativa en los colores y dimensiones recogidos en el anexo II, con los siguientes datos:

- las leyendas: RADIACIÓN LÁSER o LUZ LÁSER LA EXPOSICIÓN DE LOS OJOS O LA PIEL A LA RADIACIÓN DIRECTA O DIFUSA DEL HAZ ES PELIGROSA PRODUCTO LÁSER CLASE 4
- la potencia máxima de la radiación láser emitida
- la duración del impulso (si ha lugar)
- la longitud de onda emitida
- el nombre y la fecha de publicación de la norma en la que se basa la clasificación



Asimismo cada producto láser deberá llevar fijada una etiqueta cerca de la abertura a través de la cual se emite la radiación láser con las siguientes leyendas:

**ABERTURA LÁSER EXPOSICIÓN PELIGROSA / POR ESTA ABERTURA
SE EMITE RADIACIÓN LÁSER**

En los paneles de acceso llevará fijada una etiqueta con el texto siguiente:

**PRECAUCIÓN / RADIACIÓN LÁSER PRESENTE AL ABRIR LA
EXPOSICIÓN DE LOS OJOS O LA PIEL A LA RADIACIÓN DIRECTA O DIFUSA
DEL HAZ ES PELIGROSA**

Los paneles dotados de bloqueo de seguridad llevarán una etiqueta visible antes de la neutralización del bloqueo y durante la misma y estará situada próxima a la abertura creada al retirar la cubierta protectora con el texto siguiente:

**PRECAUCIÓN / RADIACIÓN LÁSER PRESENTE AL ABRIR Y CUANDO
ESTÁN NEUTRALIZADOS LOS BLOQUEOS DE SEGURIDAD LA EXPOSICIÓN
DE LOS OJOS O LA PIEL A LA RADIACIÓN DIRECTA O DIFUSA DEL HAZ ES
PELIGROSA**

- Otros requisitos informativos

En todo caso, los fabricantes de punteros láser deben proporcionar la siguiente información al usuario en el envase del producto y si por razones de espacio resulta difícil, en un folleto que acompañe al producto en el interior de su envase:

- a. Las instrucciones adecuadas para el correcto montaje, mantenimiento y utilización segura del producto láser, incluyendo advertencias claras relativas a las precauciones, para evitar la posible exposición a la radiación láser peligrosa.
- b. Una indicación en unidades apropiadas de la divergencia del haz para hacer colimados de duración del impulso y de la potencia máxima de emisión.
- c. Reproducciones legibles (el color es opcional) de todas las etiquetas y advertencias de peligro que es preciso fijar al producto láser o proporcionar con el producto láser. Deberá indicarse la posición correspondiente de cada etiqueta



fijada al producto, o si se suministran no fijadas sobre éste, deberá proporcionarse una indicación de que tales etiquetas no pudieron ser fijadas sobre el producto pero fueron suministradas con el mismo, y precisando la forma y la manera en que fueron suministradas.

- d. Una indicación clara en el manual de la localización de todos los orificios láser.
- e. Una enumeración de los dispositivos de control, ajustes y procedimientos de funcionamiento y mantenimiento, incluyendo la advertencia “Precaución - La utilización de dispositivos de control o ajustes o parámetros de funcionamiento que no sean los especificados en este manual, puede ser causa de exposición a la radiación peligrosa”.
- f. La clasificación inherente a la seguridad que deberá indicarse en todos los catálogos, hojas de especificaciones y folletos descriptivos.

Por último en aplicación del Real Decreto 1468/88, en el etiquetado de estos productos si se venden sin envase o bien en su envase deberá figurar

- identificación del responsable, fabricante o vendedor establecido en la UE, con su domicilio completo
- lote de fabricación
- características del producto
- leyenda que advierta que no debe dirigirse el haz directamente a los ojos

Todos los datos a los que se ha hecho referencia deberán figurar, al menos, en castellano, lengua española oficial del Estado, con caracteres claros, bien visibles, indelebles y perfectamente legibles por el consumidor.

- Conclusiones

Dada la precaución que hay que tener en la utilización de los productos láser, que la exposición a radiaciones láseres debería ser siempre la mínima posible y necesitar los de clase 3 y superior el control de un operador experimentado con la formación adecuada, se considera que:

1. Los productos láser no se pueden utilizar con fines de juego, por lo que su presentación no debe ser la de un juguete o tener apariencia de juguete ni incitar



al juego (que realice representaciones de estrellas, ositos, I love you...)

Asimismo, debe evitarse su exposición conjunta con productos infantiles.

2. Los punteros láser, en cualquiera de sus formas de presentación, de clase igual o superior a 3 no se pueden comercializar ni distribuir de forma gratuita, excepto aquellos concebidos para usos profesionales específicos, en los que debe figurar claramente indicado, en su etiquetado, la aplicación específica. No se considera uso profesional los utilizados para ayuda en conferencias.
3. Los punteros láser deben llevar la información necesaria y suficiente al menos en la lengua oficial del Estado, en caracteres claros, bien visibles, indelebles y fácilmente legibles por el consumidor.



10.- Bibliografía

- Libros utilizados:

- *Aplicaciones industriales del láser*, L. Bachs, J. Cuesta, N. Carles, 1988
- *Láser, tecnología y aplicaciones*, Samuel L. Marshall, 1972
- *El láser: principios básicos*, Édgar González, 2003

- Páginas web:

- <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/>
- <http://www.wikipedia.org>
- http://docencia.itz.uam.mx/mfg/laseres1/material_adicional/material.htm
- <http://www.interempresas.net>
- <http://www.df.uba.ar/~acha/Lab5/Lasersemicond.pdf>
- <http://www.gnclaser.es>
- <http://www.envapack.com/883/>
- <http://www.obtesol.es>
- <http://www.argimetal.com>
- <http://www.scribd.com/doc/43471225/Soldadura-Por-Laser>
- <http://www.uslascercorp.com/envoy/welding.html>
- <http://www.robotiker.com/es>
- <http://www.ifer.es/opencms/opencms/ifer/es/tecnologia/soldadura/>
- http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Laser_cutting
- <http://ing-instalar.com.ar/procesos/laser.html>
- <http://www.lcs-laser.com>
- <http://www.trotec.net>
- <http://www.corte-laser.com>
- <http://www.rofin.es>
- <http://www.aimen.es>
- http://www.consilium.europa.eu/prado/es/glossaryPopup.html#_147_1
- <http://www.scribd.com/doc/35833497/TecnicasModernasdeConformadoPlasticoCorteyElectroerosionParteI>



- <http://www.compute-rs.com/es/>
- <http://soldadura.org.ar/>
- <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=3&su=32&co=1292226788>
- <http://www.wearcheckiberica.es/boletinmensual/pdfs/contaje.pdf>
- <http://www.consumo-inc.es/Seguridad/informacion/informes/laser.htm>

- Artículos y documentos.

- *Introducción a las aplicaciones del láser: interacción luz-materiales y su explotación industrial*, Prof. Paolo Villoresi. ICS- UNIDO Training Course on Laser technologies for the industrial sector. 7-9 noviembre de 2007 - Guatemala City, Guatemala
- *Instalación y puesta en marcha de una celda robotizada de soldadura láser*, Centro tecnológico AIMEN. 9 de noviembre de 2009.
- *Corte por láser en 3D, la imaginación no tiene límites*, Ana Mará Rojas Gutiérrez. Revista metalactual.com
- *Bebidas, soluciones de codificación y marcaje*, domino-printing.com
- *Marcado láser en la industria*, Rofin-Baasel España.
- *Tratamiento superficial por láser*, Rofin-Sinar Technologies.
- *Temple por láser*, GNC láser.
- *Tendencias en las técnicas analíticas de las aguas*, Francisco Armijo Castro. II Jornadas sobre aguas minerales y minero-medicinales.
- *Empleo de la nivelación con rayo láser para la mejora del riego por inundación*, Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes de la Diputación General de Aragón. Informaciones técnicas. 1987
- *Sistema láser de medida de velocidad por efecto doppler de bajo coste para aplicaciones industriales e hidrodinámicas*, David García Vizcaíno. 2005