

6 2ej



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

REGISTRADO EN
EL INSTITUTO FEDERAL DE PROTECCIÓN DE DERECHOS

INTRODUCCION AL LASER



V N A M

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

P R E S E N T A

MIGUEL ANGEL BERNAL AGUILERA

Director de Tesis: Ing. Luis B. Sol González

CUAUTITLAN, MEX.

1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INTRODUCCION AL LASER.

Introducción.

1. Teoría básica del LASER. /
 - 1.1. Historia del LASER.
 - 1.2. Principio general del LASER.
 - 1.3. Requisitos fundamentales de la emisión LASER.
 - 1.4. La inversión de la población en el LASER CO₂.
 - 1.5. Secuencia de la emisión LASER.
 - 1.6. Modos de haz.
 - 1.7. Propiedades de la luz.
 - 1.8. Ejemplo esquemático de un sistema LASER de gas CO₂ real (ERCELAS 80).
 - 1.9. Seguridad.
 - 1.9.1. Alto voltaje.
 - 1.9.2. Seguridad con el LASER.
 - 1.9.3. Manejo de gases.
 - 1.9.4. Protección para rayos LASER.

2. Sistemas LASER. 30
 - 2.1. Clasificación de los laser por su medio activo.
 - 2.2. Características de operación.
 - 2.3. Diversos tipos de laser.
 - 2.3.1. Laser CO₂ de flujo axial.
 - 2.3.2. Laser CO₂ de tubo sellado.
 - 2.3.3. Laser atmosférico excitado transversalmente (TEA).
 - 2.3.4. Laser de transporte de gas (GTL).
 - 2.3.5. Laser's de estado sólido.
 - 2.3.6. Laser de conmutación Q.
 - 2.3.7. Laser de color (Dye laser).
 - 2.3.8. Laser infrarrojo lejano.
 - 2.3.9. Laser Helio-Neón.
 - 2.3.10. Laser HF/DF (químico).
 - 2.3.11. Laser Ión.
 - 2.3.12. Laser Helio-Cadmio.
 - 2.3.13. Laser nitrógeno.
 - 2.3.14. Laser de vapor metálico.
 - 2.3.15. Laser Excímero.
 - 2.4. Sistemas laser industriales de CO₂.

- 2.4.1. Laser CO2 EVERLASE.
- 2.4.2. Pulsación del haz laser.
- 2.4.3. Ráfaga de pulsos.
- 2.4.4. Configuración de potencia.
- 2.5. Manejo óptico del laser.
 - 2.5.1. Características del haz.
 - 2.5.2. Propiedades de los elementos ópticos.
 - 2.5.3. Sistemas ópticos en las salidas del haz.
 - 2.5.4. División del haz.
- 2.6. Movimiento de la pieza de trabajo.
- 2.7. Movimiento del haz.
- 2.8. Modificación del Haz.
- 2.9. Combinación del movimiento del haz y de la pieza a tratar.
- 2.10. Manejo del laser con fibra óptica.

3. Análisis de una aplicación práctica de el laser. 94

- 3.1. Revisión de diseño.
 - 3.1.1. Errores en la dirección de el haz.
 - 3.1.2. Tolerancias de las costuras.
 - 3.1.3. Prueba de aceptación.
- 3.2. Instalación.
 - 3.2.1. Prueba de instalación.
 - 3.2.2. Servicio.
 - 3.2.3. Manuales de operación y mantenimiento.
- 3.3. Medidas de seguridad.
 - 3.3.1. Requisitos de la BRH.
 - 3.3.2. Alto voltaje.
 - 3.3.3. Seguridad del sistema.
 - 3.3.4. Sentido común.
- 3.4. Elementos del sistema laser.
- 3.5. Mención de algunos accesorios.
- 3.6. Economía del laser.

4. Aplicaciones del laser. ///

- 4.1. Uso en plásticos y no metales-no plásticos.
 - 4.1.1. Tratamiento térmico en plásticos.
 - 4.1.2. tratamiento térmico en no metales-no plásticos (hules).
- 4.2. Uso en cerámica.
- 4.3. Uso en papel y madera.
- 4.4. Uso en metales.
 - 4.4.1. Soldadura de metales.
 - 4.4.2. Corte de metales.
 - 4.4.3. Tratamiento térmico de metales.
- 4.5. Usos médicos.
 - 4.5.1. Laser oftalmológico CILAS 201.
 - 4.5.2. CILAS CM25 CO2.
 - 4.5.3. Laser fluorimétrico para mediciones

//

médicas del metabolismo de tejidos.
4.6.Otros usos del laser.

5.Propagación atmosférica del laser. 142

- 5.1.El emisor y el receptor.
- 5.2.La atenuación atmosférica
- 5.3.Absorción molecular.
- 5.4.Dispersión molecular.
- 5.5.Absorción por aerosoles.
- 5.6.Atenuación total.
- 5.7.Refracción de la luz.
- 5.8.Efectos de las turbulencias.
- 5.9.Efectos no lineales.
- 5.10.Radiación de fondo.

APENDICE A. Panorama comercial de los distintos tipos de laser. 174

APENDICE B. Panorama de las diversas empresas dedicadas a producir equipos laser. 186

GLOSARIO. 190

Introducción.

Aún cuando el uso de los equipos laser es muy limitado en México, es necesario conocer en forma básica su funcionamiento para con ello preveer su llegada comercial masiva.

Hace no mucho tiempo, los equipos laser eran de muy grandes dimensiones, los cuales se llegaban a encontrar principalmente para usos médicos y en una menor proporción en uso industrial. Pero es un hecho que se esta introduciendo con mayor fuerza a nivel domestico como es el caso del "Compact Disc" basado en un rayo laser de muy baja potencia, el cual lee información binaria de un disco metalizado, por ejemplo.

La información sobre los sistemas laser es muy restringida, debido a ello lo que se ha logrado condensar en esta tesis trata de abarcar lo mayor posible para con ello dar una idea del laser.

Se inicia el trabajo con la descripción de los principios del laser, esto es, cómo es que se genera el haz luminoso, de un gas o de un elemento de estado solido, y la forma en la cual se logra tal efecto. Se describe en forma simple un sistema de manera generalizada, mencionando las partes que la componen y sus elementos, así como también se mencionan algunos de los peligros en su manejo.

Después se realiza una pequeña descripción de los diversos tipos de los sistemas laser, pues aún cuando el principio básico es el mismo, existen variaciones en los diseños de equipos así como en el elemento activo empleado para la generación de el haz laser, por lo cual cada equipo tiene sus características propias.

En el siguiente capítulo, se realiza una panorámica de las características de los laser industriales, esto es, la manera en que es utilizado el principio laser en la industria y que incluye desde la forma en que se maneja el laser, esto es: pulsaciones, ráfagas, onda continua, etc; Las características de estos: como por ejemplo la potencia que proporcionan; hasta llegar al manejo del haz tanto de manera mecánica como por fibras ópticas, incluyendo la mención de la manera en que se trabaja una pieza.

El tercer capítulo es más que nada una pequeña muestra de la forma en la que se puede implementar un sistema laser, observándose detalles de diseño, ventajas y demás, que permiten la implantación del laser al sector productivo.

A continuación, en el capítulo cuarto se trata de formar un panorama muy general de la aplicación del laser en la industria, esto es, en los diversos materiales tales como el plástico, la cerámica, el papel, la madera, los metales, su uso médico y se mencionan algunas aplicaciones directas de los sistemas laser en diversas áreas del quehacer humano.

El quinto de los capítulos trata de que se aprecie la forma en la que se comporta el laser al ser usado en la atmósfera, este caso se da cuando el haz laser es utilizado como un canal de transmisión por ejemplo a través de un satélite espacial que una informáticamente a los continentes, o una sonda espacial con la estación en tierra.

Se incluye también dos apéndices del cual el primero nos da un panorama de la industria laser mundial en la cual lo que se intenta es que se observe lo amplio que es el ramo industrial en la materia y el segundo apéndice da a conocer algunas de las empresas dedicadas a este ramo.

Se finaliza este trabajo con un glosario que le permita al lector en caso de no comprender alguna palabra de los capítulos antecedentes verificar su significado, pues el lenguaje para sistemas laser varía un poco del modo común ya que es una traducción del inglés.

1. TEORIA BASICA DEL LASER.

1.1. Historia del laser.

Albert Einstein en 1917 propuso que las partículas de luz con energía de una frecuencia específica podrían estimular a los electrones del átomo para emitir energía radiante, como luz de la misma frecuencia. En este fenómeno se basa el funcionamiento del laser. La palabra laser esta formada por las iniciales de la frase LIGHT AMPLIFICATION BY ESTIMULATED EMISSION OF RADIATION (En español se puede traducir como amplificación de luz estimulada por radiación).

C.H. Townes y A.L. Shawlow propusieron en 1958 que los principios en que se basa la amplificación de micro-ondas por emisión estimulada, que produce el MASER, podrían aplicarse a la amplificación de la luz y no fue sino hasta años más tarde, en 1960, que T.H. Maiman desarrolló el primer laser operante, el cual estaba formado por una barra de rubí con extremos reflejantes y rodeada por una lámpara helicoidal de destellos. Un tiempo después se desarrolló el sistema basado en el gas Helio-Neón (He-Ne), y pronto encontro que muchas otras sustancias podían funcionar como medios activos para la emisión laser.

Se desarrolló en 1963 el laser basado en el gas bióxido de carbono (CO₂) como medio activo y se acredita su aparición a C.K.N. Patel quien realizó sus trabajos en los laboratorios americanos Bell. Para 1966 se construyó el primer laser CO₂ industrial, desarrollado por ingenieros en Coherents Radiation Laboratories (laboratorios de radiación coherente).

1.2. Principio general del laser.

Desde que el principio del laser fué descubierto en 1960, las investigaciones dieron como resultado un alto desarrollo de los sistemas, con una gran variedad de características. Estas últimas clasifican a los sistemas como sigue:

- a). La parte activa usada.
 1. Sólido.
 2. Líquido.
 3. Gaseoso.

- b). El tipo de bombeo.
 - 1. Óptico.
 - 2. Eléctrico.
 - 3. Químico.
- c). El modo de operación.
 - 1. Relajado.
 - 2. O. conmutado.
 - 3. Continuo.
- d). La longitud de onda de la emisión obtenida.
- e). La potencia del rayo.

En todos los casos, sin embargo, el efecto laser hace uso de la propiedad fundamental de una partícula excitada situada en un nivel E_2 (nivel de energía elevada) que pasa a un nivel de energía mucho más bajo llamado E_1 ($E_1 < E_2$).

Este fenómeno es resultado de la emisión de un fotón inducido de energía $E_2 - E_1 = h\nu$ dependiendo de la parte activa. Después de la excitación del medio activo, esta emisión puede ser obtenida de 2 formas:

--Espontáneamente: La partícula excitada se da sobre esta energía en algún tiempo indeterminado.

(Ver figura 1.1.)

--Por estimulación: En la emisión por estimulación, el fotón inducido es expuesto a una partícula excitada que al variar de E_2 a E_1 provoca mayor emisión de fotones.

(Ver figura 1.2.)

La segunda forma, es decir la emisión por estimulación es lo básico para la emisión laser y comparado con la emisión espontánea, esta tiene la ventaja de generar dos emisiones idénticas, de una misma frecuencia y fase, por lo cual son aditivas.

La emisión estimulada lleva a una amplificación real de la radiación, la cual tiene propiedades muy atractivas tales como la esencia monocromática y elevadísima direccionalidad.

El proceso de emisión laser se puede expresar como lo "opuesto a la absorción" dado que los fotones tienen la capacidad de estimular la emisión de otros fotones.

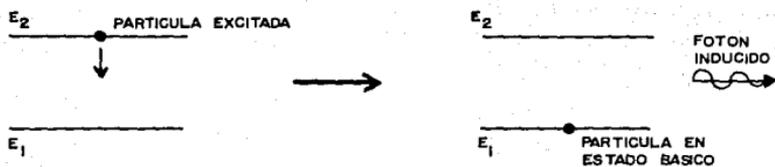


FIG. 1.1. EMISION ESPONTANEA.

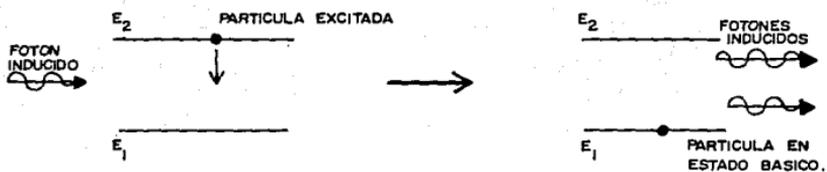


FIG. 1.2. EMISION POR ESTIMULACION.

Las frecuencias de radiación y los intervalos entre los niveles de energía son característicos del átomo y por tanto difieren de elemento en elemento.

En condiciones normales, la mayoría de los átomos o moléculas permanecen en su nivel más bajo de energía o estado básico. La excitación de estas partículas puede ser por un destello de luz, por una descarga eléctrica o por otros medios; y pasan a un nivel de energía superior. Al regresar de nuevo al estado básico, emiten luz incoherente (este fenómeno ocurre en las lámparas fluorescentes y algunos tipos de lámparas de alumbrado público). En una cavidad laser, tales fotones emitidos quedan atrapados entre espejos paralelos y altamente pulidos forzándolos a reflejarse hacia adelante y hacia atrás, dentro de la cavidad. Siempre que un fotón pase cerca de otra partícula excitada (emisión por estimulación) con la misma energía esta segunda partícula será estimulada para que emita un fotón que como se ha dicho, sea de igual longitud de onda y coherencia espacial del primero. Ambos fotones estimulan más fotones semejantes a ellos y estos estimularán en forma creciente más fotones entre los espejos (cavidad laser). La emisión laser empieza cuando hay suficientes fotones dentro de la cavidad. Si uno de los espejos es parcialmente transparente, se emite un haz de luz coherente, intenso y altamente ordenado. (ver figura 1.3)

1.3. Requisitos fundamentales para la emisión laser.

Como se mencionó anteriormente, todos los equipos laser constan de tres elementos básicos:

- a) La sustancia emisora o parte activa. Proporciona átomos, iones o moléculas que producen la amplificación de la luz.
- b) Fuente de energía o sistema de bombeo. Proporciona la energía necesaria para excitar el medio activo y producir el fenómeno de emisión laser ante la presencia de niveles de energía distintos.
- c) Resonador óptico o cavidad laser. Proporciona la recirculación de fotones entre los espejos es decir, facilita la retroalimentación de la luz que se amplifica.

No todas las sustancias pueden ser medios emisores laser, puesto que esta debe ser suficientemente excitable

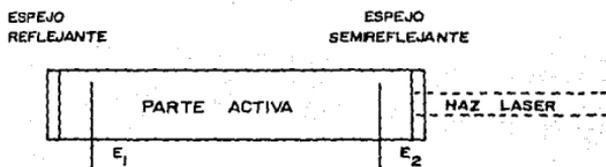


FIG. 1.3. PROCESO DE EMISION LASER (RESONADOR).

para alcanzar el estado que se conoce como "inversión de la población". En esta condición, existe una ganancia neta de la luz que genera. Es decir, el medio excitado produce más fotones de los que absorbe.

En la figura 1.4., la excitación comienza a la derecha con moléculas de nitrógeno (N_2) y se transfieren las moléculas de CO_2 a la parte superior izquierda. De los niveles elevados de energía, las moléculas de CO_2 descienden luego emitiendo energía de 10.6 y 9.6 Micrómetros de longitud de onda. Existe una inversión de la población puesto que hay ahora más partículas en niveles de energía elevados (marcados con 100 y 020) que los que se presentan en niveles inferiores. Esta proporción es importante porque únicamente las partículas que están en los niveles inferiores son capaces de absorber energía luminosa: solo las partículas que se encuentran en los niveles superiores contribuyen con fotones de energía luminosa.

Algunos materiales (sólidos, líquidos o gaseosos) son capaces de mantener la amplificación de la luz en la forma descrita.

1.4. La inversión de la población en el laser CO_2 .

Para comprender mejor el concepto de la inversión de la población, describiremos dicho fenómeno en el laser de bióxido de carbono. Se eligió este laser ya que es el de mayor uso.

Existen varios niveles de energía superiores del estado fundamental que las moléculas de bióxido de carbono pueden ocupar temporalmente, como se observa en la figura 1.4.

Cuando una molécula de bióxido de carbono que desde el nivel de energía que se muestra como 001 cae a un estado intermedio, tal como 100 o 020, la energía liberada por la transición tiene una longitud de onda de 10.6 y 9.6 micros dependiendo del nivel al que haya descendido. El salto de nivel 001 al nivel 100 es más corto y la longitud de onda es mayor. Por otra parte esta es la transición más común de la molécula de bióxido de carbono y por esta causa el haz producido por esta tiene una longitud de onda de 10.6 micro, y se caracteriza por ella.

Mediante descargas eléctricas de alto voltaje, las moléculas del bióxido de carbono son excitadas a sus estados

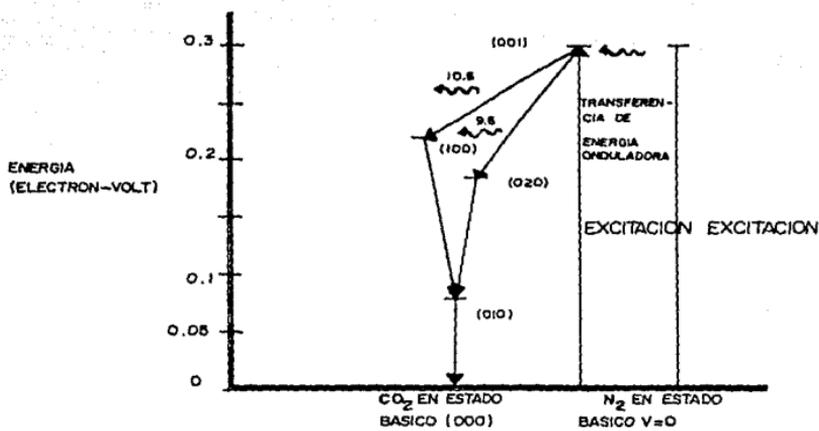


FIG. 1.4. NIVELES DE ENERGIA DEL CO_2 .

mas altos de energía. En una atmósfera de CO₂ pura, cierta cantidad de moléculas pasa a cada nivel, pero la mayoría de ellas se mantienen en los estados de energía inferiores evitando que se efectue la inversión de la población

Para facilitar la inversión de la población en la atmósfera de CO₂ se añade cierta cantidad de gas Nitrógeno (N₂) y Helio (He). Este último aumenta la conductividad térmica. Como se muestra en la figura 1.4., uno de los niveles de alta energía de las moléculas de nitrógeno tiene una magnitud aproximadamente igual al nivel 001 de las moléculas de CO₂. En consecuencia algunas moléculas de N₂ pueden aumentar la cantidad de moléculas de CO₂ en el nivel 001 al transferirles energía por resonancia. Y ya que no hay niveles de energía similares para los dos gases en niveles inferiores, la población del nivel alto 001 aumenta más que la de los niveles inferiores, obteniéndose así la deseada inversión de la población.

Una vez que se establece la inversión de la población, la emisión de fotones sigue aumentando hasta que se alcanza un estado de equilibrio, ocasionado por una creciente rapidez de retorno de las moléculas del nivel superior al inferior. Se llega al equilibrio cuando el número de moléculas del nivel superior excede al número de moléculas del nivel inferior por la cantidad justa para restituir las pérdidas de energía. Entre las pérdidas de energía esta desde luego el haz laser emitido.

1.5. Secuencia de la emisión laser.

El resonador mostrado en la figura 1.3., determina todas las características del haz laser, excepto la longitud de onda. En el laser de bióxido de carbono, el resonador esta formado por un tubo de vidrio resistente al calor y en cada extremo un espejo alineado con precisión. Uno de estos espejos es 100% reflector para la longitud de onda de 10.6 micras, mientras que el otro espejo refleja solo una porción determinada de luz; por ejemplo 85%.

La cantidad de luz aumenta en el resonador por la reflexión, al hacer varios cientos de viajes de ida y vuelta entre los espejos opuestos (esto sucede en pocos microsegundos). En cada viaje de ida y vuelta, una porción de la energía radiante (15% por ejemplo), se transmite a través del espejo parcialmente transparente, siendo este el haz laser que se emite. Si el laser esta en el modo pulsante, la

emisión es intermitente: si esta en el modo de onda continua (CW), la emisión es continua.

Los esquemas de la figura 1.5. muestran el proceso laser desde la iniciación, hasta la emisión estable del haz.

- a). Las moléculas del gas se encuentran en estado básico ya que no existe ninguna energía de excitación.
- b) y c). Cuando se aplica primeramente el voltaje de excitación al medio, muchas moléculas son excitadas pasando a un nivel de energía superior, y emiten fotones espontáneamente.
- d). Si un fotón emitido choca con una molécula excitada, ocurre una amplificación, ya que esa molécula será estimulada a emitir un fotón idéntico al primero y que se movera en la misma dirección. La emisión estimulada prosigue, puesto que cada uno de los fotones es capaz de estimular la emisión de más.
- e). El movimiento de los fotones puede realizarse en cualquier dirección, pero aquellos que se desplazan paralelos al eje del tubo chocan en un espejo de los extremos y se reflejaran hacia atrás, paralelamente al mismo eje.
- f). Estos fotones son los que forman dentro del tubo el haz de luz coherente de una sola frecuencia al reflejarse en uno u otro sentido, estimulando la emisión de más fotones idénticos en una reacción en cadena. Algunos de estos fotones pasan a través del espejo parcialmente transmisor (el acoplador de salida) y emergen como un haz de rayos paralelos, mientras que otros continúan oscilando en el oscilador generando más fotones. Este fenómeno se continuará mientras se mantenga la "inversión de la población" entre las moléculas del medio de emisión laser.

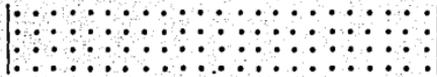
1.6. Modos del HAZ.

Modos transversales del haz.

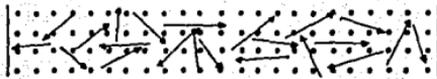
Los fotones que oscilan de un extremo a otro del resonador son energía electromagnética que forma un campo electromagnético intenso el cual depende de factores tales como: La longitud de onda de los fotones; la alineación, curvatura y distancia entre espejos; y el diámetro interior del tubo del laser (llamado generalmente tubo de descarga en un laser de gas).

Dicho campo puede tener diferentes formas transversales llamados modos electromagnéticos transversales (TEM), pero únicamente ciertos modos o combinaciones de ellos son útiles para tratar materiales. En la figura 1.6. se muestran

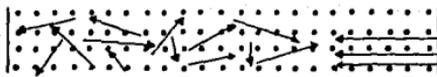
FIG. 1.5. PROCESO DE LA EMISION LASER.



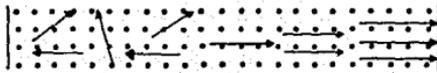
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

ejemplos de estas formas de modo.

El diseño de los resonadores actuales permite que los equipos laser funcionen en un modo transversal, y este puede adaptarse a una aplicación dada.

El modo TEM₀₀ es ideal para operaciones de corte, perforación y soldadura, porque produce un haz que puede enfocarse hasta en una mancha de tamaño mínimo, con una alta densidad de potencia.

El modo TEM_{01*} (se lee "TEM cero uno con asterisco") tiene una sección transversal con un centro hueco y con la mayor parte de la energía concentrada cerca de la periferia de la superficie enfocada. Este modo distribuye la energía en forma eficaz para otro tipo de operaciones de tratamiento térmico y perforación.

El modo TEM₀₁ tiene también sus aplicaciones particulares.

Podemos expresar además la diferencia entre el modo TEM₀₀ y TEM₁₁ donde la distribución transversal de la energía del haz del modo TEM₀₀ es más eficiente para cortar, que la distribución de potencia más fragmentada del haz dividido de TEM₁₁, como se observa en la figura 1.7. donde se da la curva de Gauss de ambas.

1.7. Propiedades de la luz .

Las propiedades de la luz emitida por un sistema laser, pueden comprenderse más fácilmente si se le compara con la luz emitida por una fuente incandescente, tal como una bombilla eléctrica común.

Como se muestra en la figura 1.8., la fuente de luz incandescente emite fotones aleatoriamente, en el espacio y en el tiempo, y se dice que es una emisión de luz "incoherente". También se le llama luz blanca, pues contiene todos los colores del espectro visible. Si la densidad de potencia de una fuente incandescente de 100 Watts se mide a un metro, sólo se detectan 0.8 miliwatts por centímetro cuadrado.

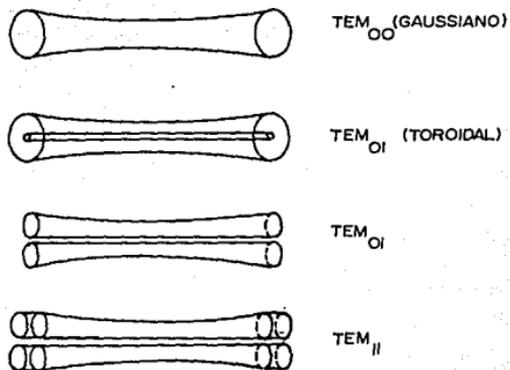


FIG. 1.6. MODOS TRANSVERSALES DEL HAZ.

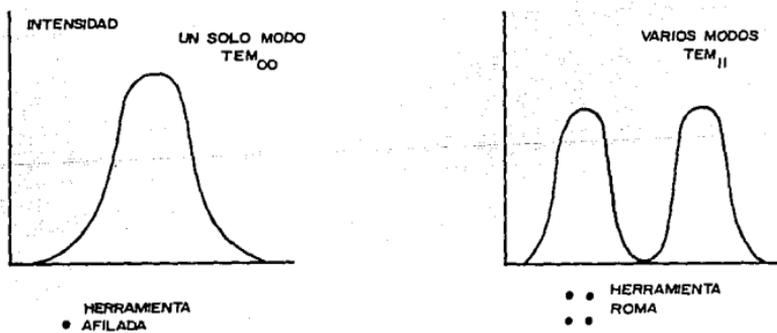


FIG. 1.7. ANALOGIA ENTRE MODO DE HAZ Y HERRAMIENTA.

Es posible enfocar toda esta energía radiante de la fuente incandescente en un haz colimado espacialmente coherente.

Debe hacerse notar que la emisión laser es una luz en un haz espacialmente coherente. Este haz esta casi perfectamente colimado (tiene rayos paralelos) con una divergencia axial típica de solamente 1 a 2 miliradianes (en un haz TEM₀₀ de un laser de CO₂). Un haz con esta baja divergencia puede tener una densidad de potencia de varios cientos de Watts por centimetro cuadrado a un metro de la fuente emisora: es monocromático ya que su luz corresponde a una banda muy estrecha del espectro. Por ejemplo, un laser Helio-Neón tiene una luz de color rojo brillante que corresponde a su longitud de onda en el espectro visible. El laser de CO₂, sin embargo, no emite luz en el espectro visible sino en la región del infrarrojo lejano (infrared far).

Un haz laser puede enfocarse por medio de un lente sobre una pequeña superficie, "una mancha", cuyo tamaño esta limitado teóricamente por:

- a). La divergencia del haz.
- b). El diámetro del haz.
- c). La longitud focal del lente.
- d). La longitud de onda de la luz.

Por ejemplo, el haz de luz de un laser CO₂ de 100 Watts puede enfocarse hasta tener una mancha de menos de 0.005" (0.1270 mm) de diámetro con una densidad de potencia de 800,000watts por centimetro cuadrado. Aún un haz no enfocado del laser de CO₂ produce, a un metro de distancia, una densidad de potencia de 110,000 veces mas grande que una lámpara incandescente de igual potencia, o sea de 100 Watts. Sin embargo, si se necesita iluminar un area grande, una bombilla de luz incandescente es mas económica y efectiva que un laser.

Ahora bien, veamos la forma en que la luz se irradia en una bombilla incandescente y el laser:

En la figura 1.9.a., la fuente incandescente irradia fotones espacialmente incoherentes. También emite fotones en

una amplia gama de longitudes de onda, es decir, incoherentes en el tiempo.

La figura 1.9.b. se observa que se ha puesto en la trayectoria de la luz una pantalla con una pequeñísima apertura para seleccionar fotones espacialmente coherentes, pero a costa de la disminución de una gran parte de la energía.

En 1.9.c. se colocó un filtro óptico en la trayectoria de la luz, seleccionando fotones coherentes en el tiempo, pero con gran sacrificio de la intensidad.

En 1.9.d. se colocan tanto el filtro óptico como la pequeña apertura en la trayectoria de la luz, con lo que se seleccionan fotones espacial y temporalmente coherentes pero con una extrema pérdida de energía e intensidad.

En la figura 1.9.e. se observa al rayo luminoso laser caracterizado por su coherencia espacial y en el tiempo sin pérdidas de energía e intensidad desde que es emitida.

La imagen del haz completo de luz coherente de un laser se puede proyectar como una "mancha" en el espacio, enfocando el laser con una lente. La intensidad de la luz en el punto de la imagen (relativa a la intensidad de la fuente), es proporcional al ángulo sólido subtendido por el lente, lo que hace que la superficie pequeña de la imagen tenga mucha más intensidad que el haz no enfocado. Esto se observa en la figura 1.10. en el cual prácticamente todo el haz se enfoca en el punto focal de la lente.

En la figura 1.11. se representa la luz que emiten dos puntos hipotéticos, A y B, en los extremos de una fuente incandescente que emite luz, la que es enfocada por una lente. Sólo una fracción del frente de onda luminosa es abarcada por la lente y proyectada hacia el plano focal. Entonces la intensidad resultante en el plano focal (puntos A' y B') es mucho menor que la intensidad de la fuente.

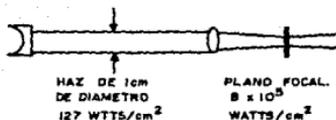
De aquí se puede decir que la diferencia entre estas 2 situaciones es que en el laser la fuente emite luz colimada, lo que permite aumentar la intensidad de la imagen enfocada, mientras que la fuente incandescente emite luz no colimada que no permite tal fenómeno.

LAMPARA (SIN COLIMAR).



100 WATTS DE POTENCIA TOTAL
A UN METRO DE DISTANCIA
PROPORCIONAN:
DENSIDAD DE POTENCIA
NO CONCENTRADA DE 8×10^{-6} WATT/cm².

HAZ COLIMADO.



UN LASER DE 100 WATTS CONCENTRADO EN
UNA MANCHA DE 0.008 PULG. DE DIAMETRO
(0.0254 cm) PROPORCIONA:
DENSIDAD DE POTENCIA
CONCENTRADA 8×10^5 WATTS/cm².

FIG. 1.8. COMPARACION ENTRE LUZ ESPECIALMENTE ALEATORIA Y LUZ COLIMADA.

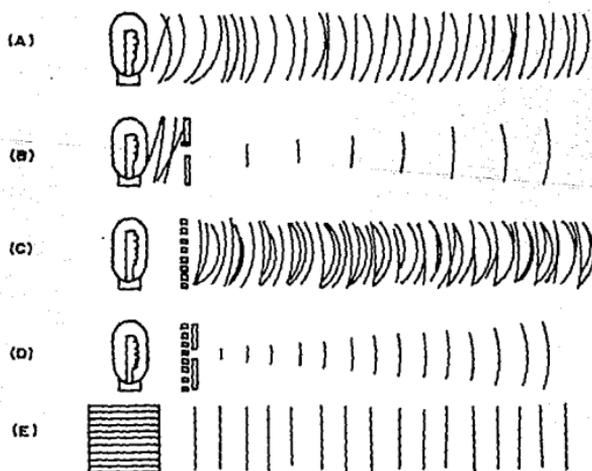


FIG. 1.9. LUZ COHERENTE Y LUZ INCOHERENTE.



FIG. 1.10. INTENSIDAD DE HAZ COHERENTE ENFOCADO.

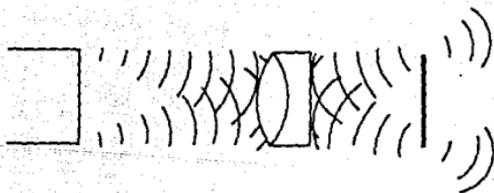


FIG. 1.11. INTENSIDAD DE HAZ INCOHERENTE ENFOCADO.

1.8. Ejemplo esquemático de un sistema laser de gas CO2 real (modelo ERCELAS 80).

Este sistema laser, que tomaremos como muestra de estudio, es un sistema comercial que tiene uso en el área médica, específicamente en el área quirúrgica, que aprovechando las características del laser, realiza curaciones en los tejidos humanos.

Como se menciona en el subtítulo, el sistema es del tipo en el cual se utiliza como elemento activo el bioxido de carbono (CO2) que como se mencionó anteriormente es en realidad un gas mezclado que permite mejorar el fenómeno laser.

Así pues, este equipo consta de las 3 partes ya mencionadas en la sección 1.3.

- a.) El material activo, el cual es un gas mezclado dentro de un cristal cerrado. El gas consta de dióxido de carbono, nitrógeno y helio.
- b.) Un sistema de bombeo eléctrico o fuente de energía, el cual proporciona la energía necesaria para excitar las partículas de gas y consistente de dos electrodos y una fuente de alto voltaje.
- c.) La cavidad laser o resonador óptico, consistente de dos espejos en lados opuestos de la parte activa y los cuales son responsables de amplificar la radiación por el principio de reflexión sucesiva de los fotones inducidos en esta parte.

Además de estas partes básicas, el sistema consta de otras partes necesarias para su funcionamiento, tales como:

1) Sistema de enfriamiento, consistente de:

- Una bomba hidráulica.
- Un depósito de refrigerante.
- Un radiador térmico con flujo forzado de aire.

2) Un sistema de suministro de gas mezclado, consistente de:

- Un depósito de gas mezclado.
- Válvulas reguladoras.
- Electroválvulas de control.
- Bomba de vacío.

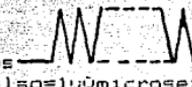
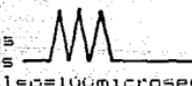
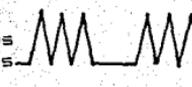
3) Un sistema de control y de alimentación de energía

TABLA 1.1. Características técnicas.

* Longitud de onda *	* Foco *	* Diam del foco *	* Divergencia *	* Tipo de emisión de potencia *	* Maximo tiempo de uso a toda potencia *
* Rayo principal * * 10.6 micras infrarojo lejano (invisible) *	* En el fin con el estaño apropiado *	* 0.25mm para F=125mm *	* X *	* continuo super-pulso *	* 5min en modo continuo seguido por 5min de paro de trabajo *
* Rayo auxiliar * * rojo *		* 0.25 *	* X *	* continuo *	* X *

* Gas *	* Consumo *	* Composicion *	* Suministro *
* Gas laser *	* 1.5lt/min en baja presión. 2.5lt/min en alta *	* Helio 74%,nitrogeno 20% CO2 6% *	* Botella <200 bar *
* Carro de nitrogeno *	* X *	* nitrogeno *	* Botella <200bar sistema de tubos 0.1bar< P <1bar *

TABLA 1.2. Diferentes modos de operación del emisor LASER.

TECLA	MODO ELEGIDO	CARACTERÍSTICAS	EMISION DE POTENCIA			
			BAJA POTENCIA		ALTA POTENCIA	
			MIN	MAX	MIN	MAX
	Continuo	Continuo 			20W (25W)	60W (74W)
	Duración simple	Pico simple  T=.05/.1/.2/.4	2W (2.5W)	30W (37W)	A	A
	Duración + repeat	Picos + repeat  T=.05/.1/.2/.4			25W (31W)	65W (80W)
	superpulsos + continuos	Pulsos continuos  pulso=100microseg Frec=500Hz	30W (45W)	260W (347W)	180W (180W)	460W (460W)
	superpulsos + duration de pulsos	grupos sencillos de pulsos  Pulso=100microseg Frec=500Hz T=.05/.1/.2/.3seg	A	A	A	A
	superpulsos + duration + repeat	Grupos repetidos de pulsos  Pulso=100microseg Frec=500Hz T=.05/.1/.2/.3	60W (74W)	230W (395W)	220W (271W)	500W (617W)

NOTA: Los valores en parentesis son potencias obtenibles en el final de la cavidad laser.

en la cual se tiene:

- Suministro de alto voltaje.
- Sistema de regulación.
- Sistema de control.
- Sistema de protección.
- Medición de potencia .

4)Un sistema de manejo del haz por medio de un brazo articulado a través de espejos y lentes de enfoque.

5)Un sistema laser helio-neón como alineador de posición del laser principal (CO₂).

6)Un sistema de inyección de nitrógeno .

El rayo principal de bióxido de carbono del ERCELAS 30 CO₂ es emitido por la parte activa que es una mezcla de gases (dióxido de carbono, nitrógeno y helio).

El gas mezclado esta contenido en un tubo ceramico refrigerado, este es sujeto a corriente de alto voltaje continua o en pulsos (según el modo en que se desea trabajar), por medio de dos cátodos electrodos localizados en cada extremo del tubo y un electrodo ánodo localizado en el centro. Esta fase, en la cual se produce la excitación de las moléculas del nitrógeno bajo los efectos del campo eléctrico aplicado, constituye el " bombeo " de la parte activa.

Las moléculas de nitrógeno chocan con las moléculas de dióxido de carbono (CO₂) a las cuales ellas transfieren su energía. De esta manera (emisión estimulada) se obtienen los fotones.

La emisión asociada a una longitud de onda de 10.6 micrometros es reflejada por el espejo totalmente reflector y el espejo semirelector en la cavidad resonante, y realiza travesías repetidas en la parte activa. Una porción de esta radiación escapa de la cavidad a través de la ventana semireflejante para formar el rayo laser.

Dado que el proceso electrónico en el gas mezclado tiene la desventaja de modificar su composición química, esto se trata de evitar renovando continuamente el gas, cada vez que el laser es emitido.

El calor generado durante la emisión es desplazado por

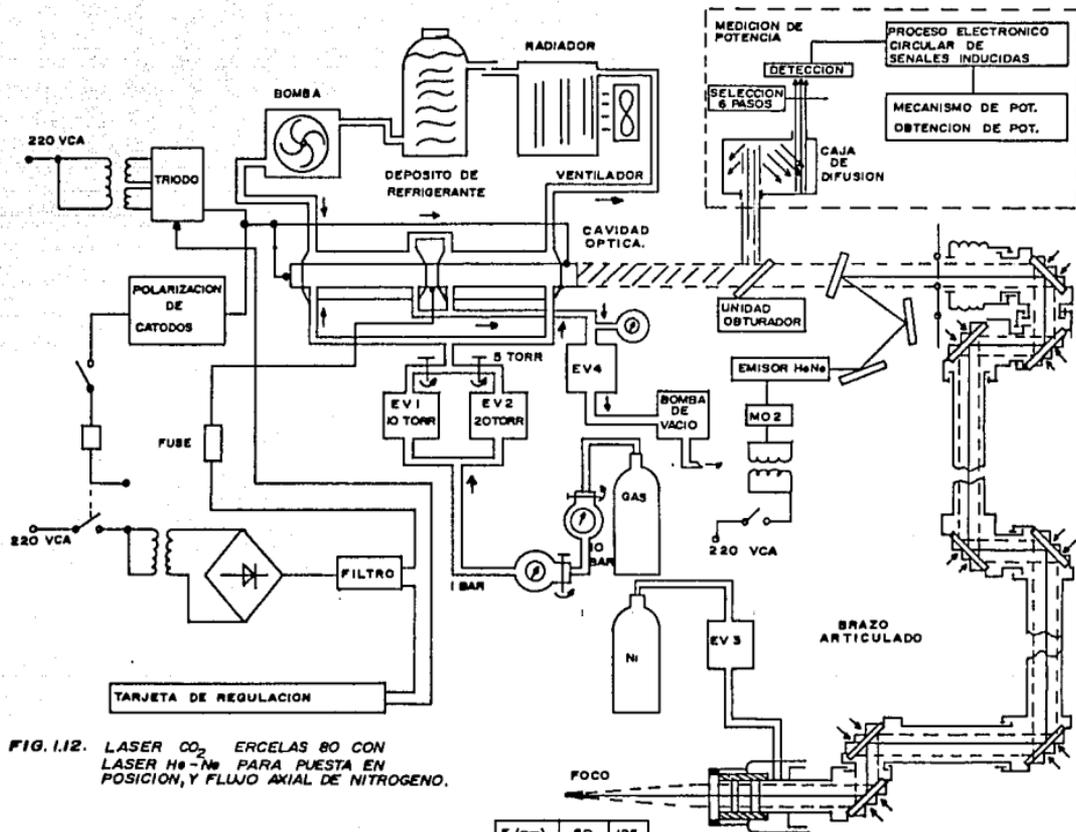


FIG. 1.12. LASER CO_2 ERCELAS 80 CON LASER $\text{He}-\text{Ne}$ PARA PUESTA EN POSICION, Y FLUJO AXIAL DE NITROGENO.

F (mm)	80	125
X (mm)	123	156

medio del sistema de enfriamiento.

El laser de un gas helio-neón es emitido a una longitud de onda de 0,6328 micrómetros. Esta radiación se sitúa en la parte roja del espectro de luz visible.

1.9. Seguridad.

El manejo de los sistemas laser implica un cierto riesgo, dado que por una parte se maneja, en la mayoría de estos sistemas laser un alto voltaje para excitar ya sea el gas activo, el material de estado sólido, etc.; y producir el efecto de emisión reestimulada. Este alto voltaje representa un riesgo al operario del equipo. Además se trabaja con gases, de los cuales se deben de saber los efectos que producen al operador en funcionamiento normal del equipo; o en una fuga, pues se puede llegar a situaciones peligrosas que van desde un ambiente difícil de asimilar hasta posibles explosiones en el equipo. Así mismo el laser es en sí un riesgo ya sea tanto actuando en los ojos, destruyendo nervios ópticos; como un manejo inadecuado y sin precaución del laser produciendo heridas y/o quemaduras a seres vivos que se encuentren cerca.

Por lo expuesto anteriormente es recomendable el hacer ciertas observaciones respecto a evitar o reducir estos riesgos.

1.9.1. Alto voltaje.

Para que el efecto laser se produzca ya sabemos que es necesario el uso de fuentes de muy alto voltaje eléctrico generado. Cualquier persona que use un laser o se encargue de su mantenimiento, requiere que consulte las reglas referentes a la seguridad, que se incluyen en todo manual de uso y/o mantenimiento del equipo laser a operar.

Algunas recomendaciones generales que se hacen son como las siguientes:

- El tablero de control del sistema debe ser conectado a tierra a través de cables de suministro principales.
- Cualquier trabajo a realizar en la parte externa del equipo, implica que la unidad sea conectada a tierra (por ejemplo, una medición en puntos de prueba) para con ello desviar una corriente no deseada. El trabajo debe realizarse con extrema precaución.
- El equipo debe constar con sistemas que prevengan el

corto circuito e indiquen tal condición.
-Mantener el equipo en una superficie seca.

Los altos voltajes pueden producir graves choques eléctricos y quemaduras. Como resultado de las descargas eléctricas de bombeo en la cavidad óptica y la ionización del aire que rodea a los rayos laser de alto poder se puede producir ozono.

Cualquier equipo de alto voltaje (de más de 5000 volts) puede generar rayos X, sin embargo la mayoría de los equipos laser de uso industrial funcionan dentro de una gama de 1000 a 4000 volts.

En el caso de lámparas destelladoras de Xenón (para laser de estado sólido) producen destellos brillantes blancos, los cuales pueden producir radiaciones ultravioletas o infrarrojas.

1.9.2. Seguridad con el laser.

Debido a la baja divergencia (haz colimado) con que trabaja el laser, éste puede concentrarse en muy alta densidad de energía en un área pequeña. Esta característica le ha permitido al laser aumentar su campo de aplicaciones tanto en procesos mecánicos y de materiales, como en la medicina.

El manejo del rayo laser implica el peligro, a todo ser vivo, de quemaduras locales que pueden ser causadas al tejido humano, ropa, ect. Los rayos laser de estado sólido encierran los mayores peligros debido a que logra picos de energía muy altos, con lo que la densidad de energía que recibiría el cuerpo sería muy alto produciendo daños o lesiones.

Los laser de inyección y de gas son de menor potencia que los de estado sólido, pero el no manejarlos con medidas de seguridad puede provocar quemaduras en la piel y lesiones permanentes en los ojos.

La sensibilidad de los ojos a la radiación electromagnética (luz) esta en función de la longitud de onda. El peligro que representa el rayo laser, que se encuentra en el espectro infrarrojo, al ojo es substancialmente muy grande, ya que si un rayo de este tipo actuara directamente en el ojo y pasara a través de los

diferentes medios oculares, la potencia del rayo se enfocaría entonces en la retina cubriendo un área de pocas décimas de micras de diámetro con un alto riesgo de daños o lesión.

En el caso de los rayos ultravioletas enfocados al ojo, produce daños a la cornea antes que a la retina debido a la forma que se comporta el ojo ante estos rayos.

El rayo generado por un emisor Helio-Neón (he-ne) es de baja potencia (siendo este de $0.1 \text{ mW} < P < 1 \text{ mW}$ ya que su uso más común es como alineador de objetivo de disparo, es decir, hacia el punto al cual se dirigirá el rayo principal de mayor potencia y sus efectos de calentamiento en la piel y ropa es muy baja. Si este rayo es enfocado a la retina del ojo, su exposición prolongada puede ser peligrosa.

Cuando se maneja un rayo del espectro invisible, tal como lo es el laser CO₂, puede ser peligroso a menos que sea usado con las medidas precautorias necesarias. En estas medidas tomaremos en cuenta dos casos: uso normal y mantenimiento.

--En el primer caso, uso normal, el rayo se enfoca al punto deseado. Exactamente antes de su uso y en los puntos de enfoque, la potencia del rayo es concentrado en un diminuto punto, y este es muy peligroso. Después de su uso el riesgo se reduce ya que su divergencia aumenta.

--En el segundo caso, mantenimiento (o servicio de mantenimiento), el técnico tal vez necesite la emisión del rayo en algunas parte del sistema (ajuste de los espejos reflectores, alineamiento del laser principal con el laser de enfoque, ajuste de la lente de enfoque, etc), se debe tener cuidado con la divergencia del rayo que depende del punto que se este observando del equipo, ya que esta es muy pequeña.

Los riesgos principales que se tienen en el manejo del laser se enlistan a continuación:

- Daño en piel u ojos de las personas cercanas al sistema.
- Riesgo de fuego en materiales tales como tejidos sintéticos, plásticos, etc.
- Explosión, cuando se utiliza en un ambiente explosivo.

De acuerdo a estos riesgos, las reglas de seguridad a

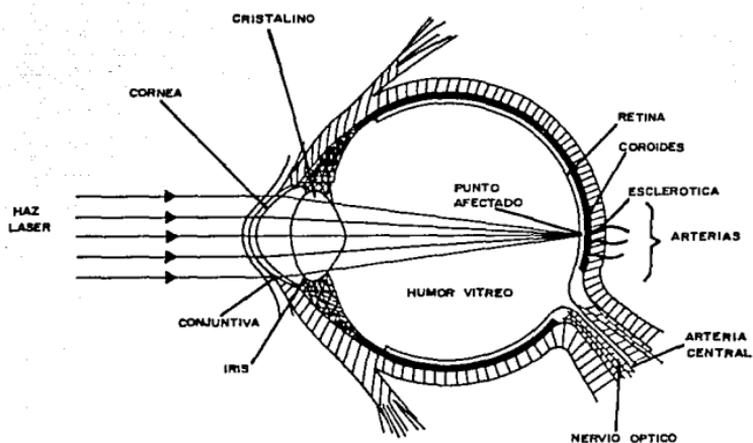


FIG. 1.13. CUANDO EL OJO SE ENCUENTRA EN REPOSO, LOS RAYOS PARALELOS DE LUZ COINCIDEN EN UN PUNTO DE LA RETINA. ESTE FENOMENO PRODUCE, CUANDO LA FUENTE DE LUZ ES UN HAZ LASER, UNA CAUTERIZACION EN EL, O LOS PUNTOS AFECTADOS DE LA RETINA, PROVOCANDO DAÑOS NEUROLOGICOS Y REDUCCION DE LA CAPACIDAD VISUAL.

seguir son las siguientes:

-Observación del lugar de aplicación del laser. El operador debe en todo momento tener el control de la orientación del rayo. El rayo no debe ser direccionado hacia una persona y mucho menos a sus ojos, excepto claro esta los equipos diseñados para el tratamiento medico de esta parte del cuerpo.

-Es esencialmente importante recordar que el rayo laser puede ser reflejado por algunos materiales. Se deben eliminar del área de trabajo cualquier superficie metálica pulida o cubierta con una película líquida. pues aún el rayo laser reflejado puede ser peligroso. Se debe remarcar que el vidrio absorbe radiación de una longitud de 10.6 micras y de aquí que no exista peligro de transmisión del rayo a través de ventanas de vidrio en el caso del laser CO₂, sin embargo este material puede presentar daños.

-Cuando la unidad laser emitiera al medio ambiente, toda persona presente debe colocarse lentes protectores apropiados a la longitud de onda del rayo. Los accesos al área deben ser restringidos.

-Para contener los rayos laser, se deben contar con pantallas adecuadas a la longitud de onda.

1.9.3. Manejo de gases.

El manejar algunos tipos de gases o materiales sólidos puede implicar un riesgo al fugarse estos, cambiar su composición química, o presentar mal estado sus contenedores. Todo ello es un riesgo para el operador. Es por ello necesario realizar un estudio de los materiales utilizados y sus efectos a corto y largo plazo actuando sobre el cuerpo humano.

Por ejemplo, para enfriar el cristal (rubí o neodimio) en los equipos laser de estado sólido, se utilizan gases criogénicos, como el nitrógeno líquido o helio líquido. Estos gases producen al contacto quemaduras en la piel. Si se produce una pérdida en un ambiente cerrado (fugas) estos gases pueden desplazar al oxígeno de la atmósfera haciéndolo insuficiente para la vida.

En el caso de los laser de gas mezclado, tales como los laser CO₂, el gas mezclado (CO₂, Ni, He) no implica un alto riesgo, aunque puede llegar a ser inadecuada la atmósfera para ser respirable.

1.9.4. Protección de los ojos para el rayo laser.

Ninguna clase de vidrio brinda protección para todas las longitudes de onda de los rayos laser. En consecuencia, la mayoría de las empresas que utilizan laser, no dependen de los anteojos de seguridad para proteger a sus trabajadores contra quemaduras de estos rayos. Algunos señalan que las gafas y los vidrios para rayos laser pueden dar una falsa sensación de seguridad con la cual el usuario se sentiría inmune a los peligros y se expondría innecesariamente.

A pesar de esto, algunos investigadores y técnicos en rayo laser necesitan con frecuencia protección visual. Existen disponibles tanto anteojos como gafas, y además por encargo especial a fabricantes de protectores usuales se pueden obtener vidrios para casi cualquier tipo de rayo conocido. Típicamente el protector visual tendrá una atenuación máxima a un rayo laser de una longitud de onda específica. Esta protección disminuye rápidamente a otras longitudes de onda.

Las gafas o anteojos protectores para rayos laser helio neón se clasifican por factores de 10 (D.O.=1), 100 (D.O.=2), 1000 (D.O.=3) o más. Una densidad óptica (D.O.) de tres o cuatro todavía hace que el rayo sea visible a una luz brillante de sol. El modelo de gafa utilizado como protector visual para laboratorio no es apto para exteriores debido a su empañamiento.

La densidad óptica de los vidrios de seguridad debe ser evaluada periódicamente.

Se deben extremar precauciones para usar las gafas protectoras adecuadas a la longitud de onda del rayo con que se va a trabajar.

Las gafas expuestas a energías intensas pueden perder su efectividad y deben ser desechados.

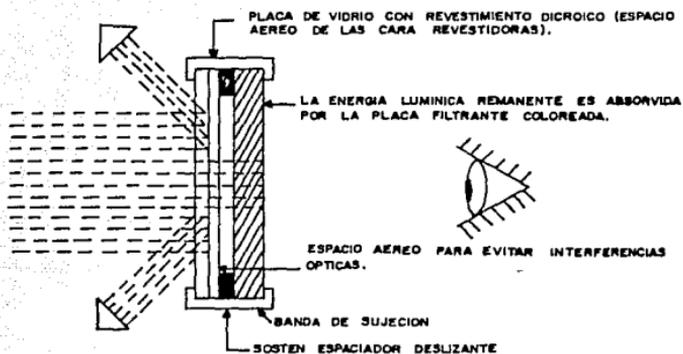


FIG. 1.14. EL DIAGRAMA MUESTRA COMO UN PROTECTOR VISUAL ANTLASER, DESVIA UN RAYO LASER ANTES DE QUE LLEGUE AL OJO.

TABLA 1.3. Transmitancias y tolerancias de las transmitancias de distintos matices de lentes filtrantes,

Matriz num.	densidad optica			transmitancia luminosa			maxima transmi- tancia infrarroja %	transmitancia espectral maxima de las bandas ultravioleta y violeta infrarroja para 4 longitudes de onda (micrones)			
	min	estan	max	max %	estan %	min %		313	354	365	407
1.5	0.17	0.214	0.26	57	61.1	35	25	0.2	0.8	25	65
1.7	0.26	0.30	0.36	55	50.1	45	20	0.2	0.7	20	50
2.3	0.36	0.429	0.54	45	37.3	35	15	0.2	0.5	14	35
2.5	0.54	0.643	0.75	35	22.8	18	12	0.2	0.5	5	15
3.0	0.75	0.857	1.07	18	13.9	8.5	9	0.2	0.2	0.5	0.6
4.0	1.07	1.286	1.5	8.5	5.18	3.18	5	0.2	0.2	0.2	1.0
5.3	1.5	1.714	1.93	3.18	1.93	1.18	2.5	0.2	0.2	0.2	0.5
6.0	1.93	2.143	2.36	1.18	0.72	0.44	1.5	0.1	0.1	0.1	0.5
7.0	2.36	2.571	2.79	0.44	0.27	0.164	1.3	0.1	0.1	0.1	0.5
8.0	2.79	3.0	3.21	0.164	0.10	0.061	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5
9.0	3.21	3.429	3.64	0.061	0.037	0.023	0.9	0.1	0.1	0.1	0.5
10.0	3.64	3.857	4.07	0.023	0.0137	0.0085	0.6	0.1	0.1	0.1	0.5
11.0	4.07	4.286	4.50	0.0085	0.0052	0.0032	0.5	0.05	0.05	0.05	0.1
12.0	4.5	4.714	4.93	0.0032	0.0019	0.0012	0.5	0.05	0.05	0.05	0.1
13.0	4.93	5.143	5.36	0.0012	0.00072	0.00044	0.4	0.05	0.05	0.05	0.1
14.0	5.36	5.571	5.75	0.00044	0.00027	0.00016	0.3	0.05	0.05	0.05	0.1

Los valores dados se aplican a vidrios filtros clase I. Para lentes filtrantes clase II, las transmitancia y tolerancias son los mismos, con el requerimiento adicional que la transmitancia de 587.3 micrones no habra de exceder del 15% de la transmitancia luminosa.

2. SISTEMAS LASER .

2.1. Clasificación de los equipos laser por su medio activo .

Aun cuando el inicio del laser el año 1959, existen en la actualidad diversos laser comerciales que se pueden obtener.

En la figura 2.1. se muestra una tabla de los diversos sistemas laser, de los cuales existen muchos mas que son de importancia para la ciencia, la medicina, el campo militar, comunicaciones, etc.

Los equipos laser para las aplicaciones industriales que utilizan un gas como medio activo son mas comunes que los basados en otras sustancias. Mientras que un laser de gas emplea como emisor un gas puro, otro utilizan una mezcla de gases para que haya una transferencia de energía mas eficiente previamente y durante la emisión laser, como se observó en el caso del laser de dióxido de carbono. En una mezcla de esta clase, el gas emisor del laser no necesita estar en mayor proporción volumétrica.

Entre los equipos laser de gas, el basado en dióxido de carbono es el empleado mas frecuentemente en aplicaciones industriales debido a la alta potencia que puede generar a una longitud de onda conveniente para procesar una gran variedad de materiales. La fuente comun para excitar el medio emisor del laser es una descarga eléctrica (lo que se denomina en el medio industrial como fuente de "bombeo" del laser).

La variedad de emisores laser del tipo de estado sólido es menor que la variedad de los laser basados en gases. El primer emisor de estado sólido en el que se logro con éxito el fenomeno de la emisión laser es el basado en una barra de rubi sintético. Los emisores de estado sólido más utilizados son los tipo Nd:YAG y Nd:vidrio. Ambos son "bombeados" con lámparas de destellos.

En la figura 2.2. se realiza una descripción de los diversos sistemas laser situados en el espectro de frecuencias.

Los sistemas actuales tienen amplias gamas de potencias

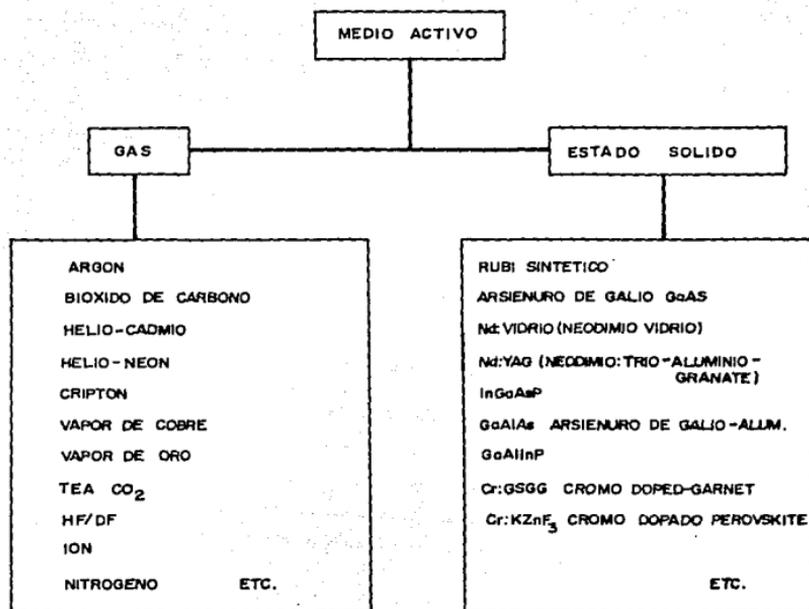


FIG. 2.1. ALGUNOS DE LOS MAS IMPORTANTES SISTEMAS LASER.

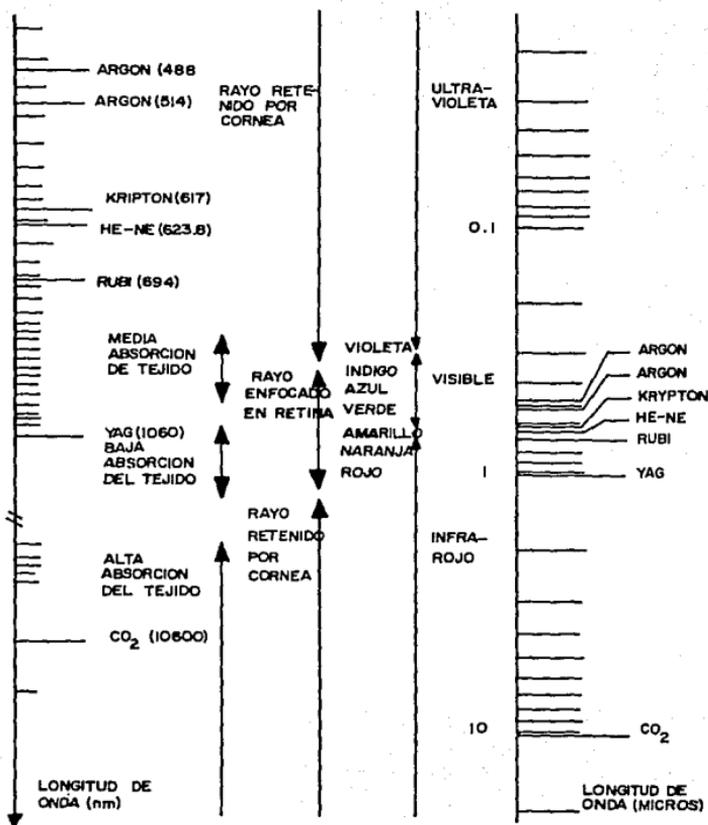


FIG. 2.2. DIVERSOS SISTEMAS LASER EN EL ESPECTRO DE LUZ.

de salida y de energía luminosa, que se resumen someramente en la tabla 2.1. La longitud de onda obtenible va desde los 325 nanómetros para el laser de helio cadmio (He-Cd), hasta 10.6 micras para el laser de bióxido de carbono (CO₂).

2.2. Características de operación .

Al observar la tabla anterior nos encontramos con algunos conceptos nuevos para nosotros. En este inciso se tratará de aclarar algunos de estos conceptos.

Cuando observamos el modo de operación, un laser puede funcionar en el modo de onda continua (CW) (Continuous wave) o en el modo pulsante (pulse), tal y como se aprecia en las características de operación del sistema visto en el inciso 1.8. Algunos sistemas emplean velocidades de repetición hasta de 50,000 pulsos por segundo. En algunos sistemas pueden obtenerse pulsos con duración de sólo 10 picosegundos.

El rango de las potencias de salida es también muy amplio. Muchos sistemas comunes en la industria (tal como el tipo rojo de Helio-Neón que se emplea para alineación, impresión, medición o demostraciones) tienen potencias nominales de miliwatt. En el otro extremo, un haz simple de laser de CO₂ en operación de onda continua, puede producir hasta 100,000 watts. En un haz de modo múltiple de un laser de Nd:Vidrio, en modo pulsante puede tener más de 1megawatts de potencia.

Por otra parte, la conmutación Q es una forma de manejar el laser y será estudiada en un inciso más adelante. De igual manera se verá más adelante al sistema llamado "TEA".

2.3. Diversos tipos de laser.

Esta sección trata de dar una idea de la manera en la cual funcionan los distintos laser existentes de una manera breve, sin pretender llegar a ser un tratado completo de cada uno de ellos. El objetivo es obtener un panorama del amplio mundo de los laser.

TIPO	LONGITUD DE CADA una	MODEO DE OPERACION	FRECUENCIA MAXIMAS	DURACION DEL PULSO	POTENCIA TEMP (Watts)	MODEO MULTIPLES
He-Ne	632.8	CW	---	---	0.005-0.015	---
Ar	481.7-514.3	CW	---	---	20 o	---
	o 486.1-514.5				10	
CO ₂	10.6	CW	---	---	500	hasta 100kW
	13.2	pulsante	25%	100microseg o mas	---	1 kw para 500 CW
CO ₂ TEA	Aprox. 10.6	pulsante	400	400 microseg	---	100 kw
He-Ne	325.0	CW	---	---	---	---
Cristal	351.7-779.3	CW	---	---	o	---
Nitrogeno	307.1	pulsante	200	10 microseg	---	250 kw
Neodymio	1.064	pulsante	1	50micro-10ms	---	10 Mw
Nd:YAG	1.064	CW	---	---	20	300
	1.064	pulsante, fase de extra- lites	400	1.2microseg 1.2miliseg	---	400
	1.064	pulsante, con mutado C.A.O.	50000	20microseg	---	50

TABLA 2.1. Características típicas de los diferentes sistemas laser.

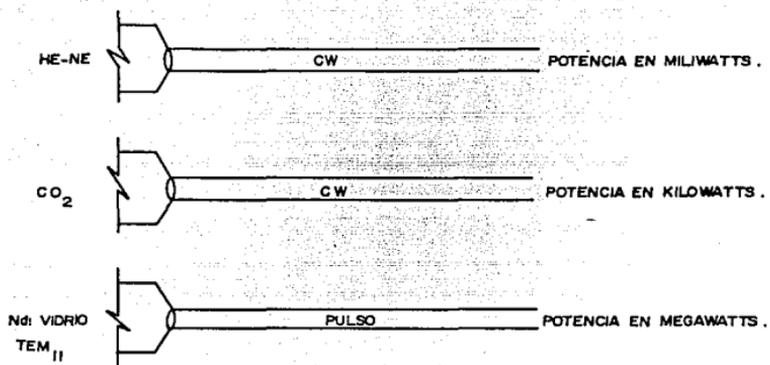


FIG. 2.3. COMPARACIONES DE LOS VALORES EXTREMOS DE POTENCIA LASER.

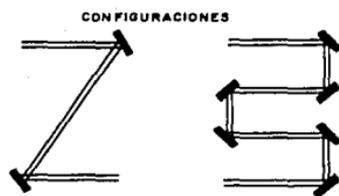
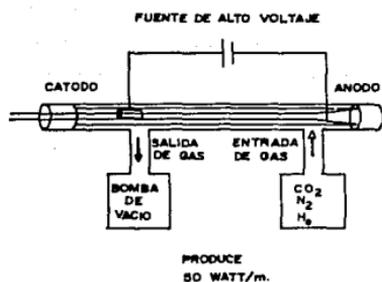


FIG. 2.4. LASER CO₂ DE FLUJO AXIAL.

2.3.1. Laser de dióxido de carbono de flujo axial.

El laser de dióxido de carbono es el sistema de más simple construcción y altamente eficiente, por lo que es muy utilizado en aplicaciones industriales.

Aún cuando sabemos que este laser está basado en el dióxido de carbono, como lo vimos en el inciso 1.8., repetiremos de una manera más general su estructura.

Como se ilustra en la figura 2.4., este emisor laser está formado por un tubo de vidrio que contiene el medio gaseoso emisor. Un flujo axial de gas se mantiene a lo largo del tubo para reemplazar aquellas moléculas modificadas por los efectos de las descargas eléctricas de varios kilovolts que se utilizan para la excitación. Se sitúa un espejo en cada extremo del tubo de descarga (tubo laser) cerrando así la cavidad del resonador óptico. Generalmente un espejo es totalmente reflector a la longitud de onda de la luz que se produce en la cavidad, en tanto que el otro espejo es parcialmente transmisor y parcialmente reflector, al cual se le llama acoplador de salida, y que es el que permite que una fracción de la luz salga del tubo, siendo ésta el haz laser emitido.

Un laser de flujo axial es capaz de generar un haz de luz coherente con una potencia continua nominal mayor de 50 watts por cada metro de longitud del resonador. Para obtener distintos modos TEM (modos electromagnéticos transversales) y niveles de potencia estables es necesario que la estructura mecánica del resonador sea extremadamente rígida. Pueden obtenerse varias configuraciones en la cavidad del resonador para obtener grandes longitudes y con ello mayores potencias.

2.3.2. Laser de dióxido de carbono en tubo sellado.

En esta versión del laser de dióxido de carbono, se suministra al resonador gas emisor contenido en el mismo aparato. El gas se encuentra en un depósito que rodea el tubo de descarga y como su reemplazo es en cantidades bajas, varios litros de este gas son suficientes para cientos de horas de operación. En este tipo de laser los espejos están situados externos al tubo de descarga estando el acoplador de salida orientado a un ángulo de Brewster para que la

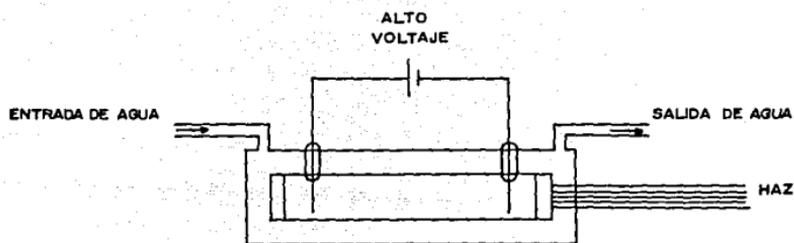


FIG. 2.5. ESQUEMA DEL LASER DE TUBO SELLADO.

transmisión de la luz sea máxima.

La excitación se realiza con descargas eléctricas en electrodos situados a los extremos del tubo. Todas las superficies del tubo tienen control de temperatura por enfriamiento de agua lo que contribuye a la gran estabilidad de la frecuencia y amplitud de potencia que produce este laser. Con la potencia de salida limitada a no más de algunas decenas de watts, este tipo de laser se emplea principalmente en investigaciones y comunicaciones más que en la industria.

2.3.3. Laser atmosférico excitado transversalmente. (TEA)

El laser atmosférico de bióxido de carbono excitado transversalmente (TEA) es capaz de producir haces pulsantes con potencia máxima muy alta siendo por tanto muy útil en la industria.

El medio gaseoso emisor se mantiene a la presión atmosférica y se excita por una descarga eléctrica en electrodos paralelos respecto al eje de la cavidad óptica como se observa en la figura 2.6.

Puesto que los electrodos en este laser son paralelos al eje mayor del resonador, se requiere un potencial en cierta forma bajo para mantener una elevada intensidad de campo. Los cortos intervalos entre descargas permite que la descarga eléctrica sea uniforme a altas presiones del gas (una atmósfera o más). A estas presiones la densidad molecular del gas de bióxido de carbono es más elevada que en el tubo de descarga convencional. Por esto, el laser TEA es capaz de generar 10 megawatts o más en un solo pulso de luz de menos de un microsegundo de duración. Estos equipos se hacen funcionar a bajas velocidades de repetición, de unos pocos pulsos por minuto.

El Haz del laser TEA es extremadamente uniforme con respecto a su frente de onda, por lo que es útil en la etiquetación de paquetes sin contacto físico. Para esta aplicación se coloca una máscara frente del haz, distante del artículo a etiquetar con lo que el dibujo de la máscara se enfoca en la superficie del paquete. El laser TEA también se usa en tratamiento de materiales tales como perforación, más sin embargo en la actualidad su principal uso se presenta en laboratorios de investigación.

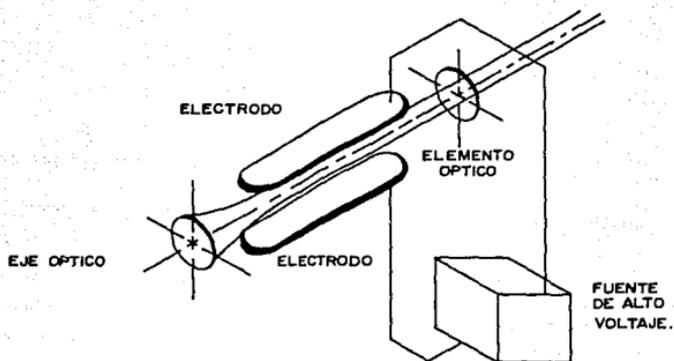


FIG. 2.6. LASER ATMOSFERICO EXCITADO TRANSVERSALMENTE.

2.3.4. Laser de transporte de gas (GTL).

El laser de transporte de gas (GTL) es una combinación de principio de funcionamiento de otros tipos de laser de gas. El medio gaseoso emisor del laser circula continuamente a través de la cavidad del resonador por medio de un ventilador de alta velocidad, se mantiene una estabilidad térmica mediante un intercambiador de calor y la recombinación de las moléculas del gas -después de la excitación- se aumenta por medio de catalizadores químicos.

La excitación del GTL se realiza con descargas eléctricas en electrodos colocados paralelamente al eje óptico, y dado que el volumen del resonador es grande con respecto a su longitud se deben colocar espejos grandes en cada extremo para reflejar el haz varias veces a lo largo del resonador antes de que salga por el acoplador de salida.

Este laser puede generar un haz de gran potencia dentro de un resonador relativamente pequeño y esta es su principal ventaja. Además se cuenta con la posibilidad de obtener una trayectoria óptica efectiva larga en una distancia real corta.

Existen equipos comerciales de este tipo de laser de onda continua que genera potencias de salida de 1 a 5 kilowatts.

2.3.5. Laser's de estado sólido.

El medio de emisor laser de estado sólido consiste de iones (llamados "contaminantes") que están distribuidos dentro de una matriz sólida con forma de barra, y que son excitadas por una fuente de luz interna. Esta fuente consta de una o dos lámparas cilíndricas de destellos o una lámpara de destellos helicoidal que rodea la barra.

Si se usan dos lámparas cilíndricas, la barra emisora laser se coloca entre ellas en el foco común de dos elipses y el foco restante de cada una determina la localización de las lámparas de destellos según se observa en la figura 2.8. La distancia entre los focos de cada una de las dos elipses que comparten un foco común, está definida por la forma de un reflector elíptico que rodea la fuente de excitación y la barra del laser, tal que proporciona un acoplamiento efectivo

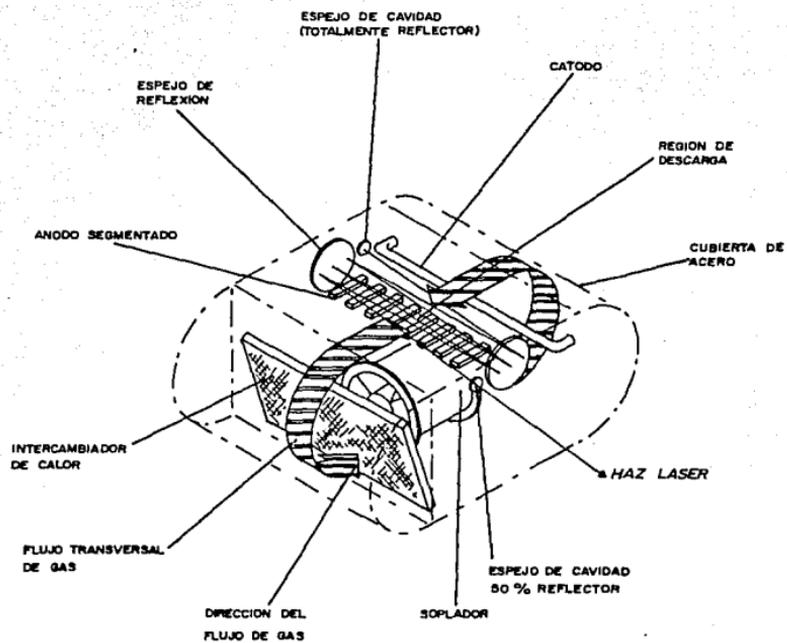


FIG. 2.7. DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA DEL LASER CO₂L.

de la luz de excitación con el medio emisor del laser. Un sistema de enfriamiento basado en agua controla la temperatura de la barra y de la lámpara de destellos.

Las matrices sólidas más importantes que se fabrican son tres, y se mencionan a continuación:

- a) Rubí sintético.
- b) Neodimio:vidrio (Nd:vidrio).
- c) Neodimio:itrio-aluminio-granate (Nd:YAG).

En cada uno de estos materiales, los iones "contaminantes" emisores del laser están presentes en minoría en la matriz anfitriona. Para estos tres materiales, la vida de la lámpara de destellos es algo limitada y los costos de operación son mayores que los producidos por el manejo del laser de dióxido de carbono, pero el laser de estado sólido tiene ciertas ventajas. Esto es, puede funcionar de varias maneras. Una manera es excitando el medio laser con descarga capacitiva a través de la(s) lámpara(s) lo que produce se emita un breve destello luminoso lo que a su vez excita al medio emisor laser a que se produzca un destello. En el caso del laser Nd:YAG, este produce una longitud de onda de 1.064 micras. En esta forma se puede producir pulsos de entre 0.2 a 12.0 milisegundos, con frecuencia hasta de 100 pulsos/segundos. A bajas frecuencias, la energía del modo TEM múltiple en cada pulso de salida puede ser de 20 Joules o más para un laser común disponible comercialmente; mientras que a frecuencias mayores la energía puede disminuir hasta 2 Joules por pulso. Esto se puede observar en la figura 2.9.

Aún cuando se tienen más altas frecuencias, la energía en cada pulso es suficiente para perforar o soldar metales por puntos. Dado que el laser Nd:YAG tiene una longitud de onda relativamente pequeña, el haz de salida se puede enfocar en una mancha de pequeños diámetros. Estos equipos, bombeados por lámparas de destellos, pueden hacer perforaciones hasta de 0.001 pulgadas de diámetro, pero no son recomendables para realizar perforaciones de mayor diámetro porque la distribución de energía a través del haz de salida no es uniforme.

Los laser hechos con semiconductores y medios dieléctricos se benefician por la expansión de aplicaciones en productos de consumo, sistemas de comunicación, instrumentos quirúrgicos y procesos industriales. Así también, se han desarrollado importantes técnicas que incluyen nuevas longitudes de onda y elevadas potencias de los laser "diodo". el efectivo "doble-teo" de frecuencias de

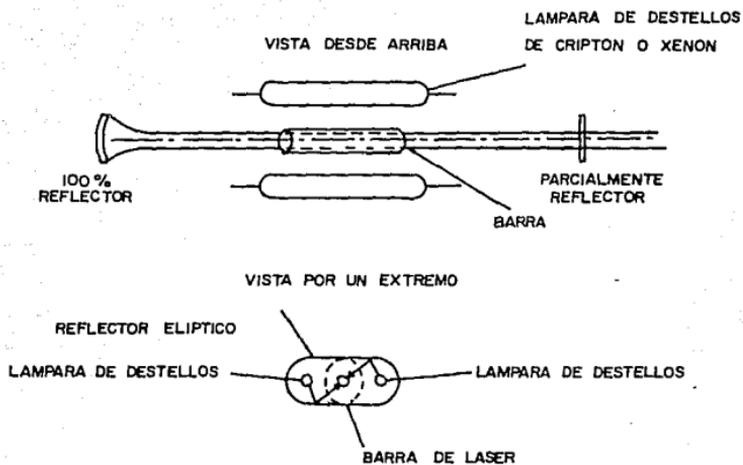


FIG. 2.8. LASER DE ESTADO SOLIDO.

radiación Nd:YAG y la investigación de un "diodo de bombeo" del laser Nd:YAG para ser utilizado en nuevos sistemas laser de estado sólido.

Algunos de los sistemas aplicables a los laser de estado sólido son:

I.-Laser de diodo de frecuencia fija.

El rango de longitudes de onda que maneja el laser InGaAsP aumenta año con año. La demanda de estos laser es dirigida a las fibras ópticas de telecomunicaciones de largo alcance y en instrumentación, así como en equipos de prueba.

En 1986 la industria Sharp Electronics presentó un laser GaAlAs que tiene una longitud de onda de salida de 750 nm. Esta longitud de onda, estable y corta, de los sistemas GaAlInP y GaInAsP están en desarrollo, particularmente en compañías japonesas, con el fin de lograr igualar la salida del laser He-Ne de 633 nm, la cual es auxiliar en el alineamiento de rayos laser de mayor potencia, y proporciona una alta resolución en aplicaciones tales como almacenamiento de datos e impresión.

Existen también los arreglos de fase de alta potencia de los laser de diodo GaAlAs y con el cual equipos normales pueden lograr potencias de salida de 200 mW CW en temperatura local con eficiencias típicas electro-óptico de más del 25%. El tiempo medio de debilitamiento en servicio esta sobre las 50,000 horas y que puede ser demostrado con un laser de 100 mW CW en temperatura ambiente. Estos dispositivos son efectivos en el bombeo del laser Nd:YAG.

II.-Diodo de sal con guía sintonizada (tunable lead - salt diode).

Este laser proporciona salida con costo un reducido. Las técnicas con base líquida y rayo molecular epitaxial se le pueden aplicar al laser de diodo de sal. Los mecanismos de cavidad acoplada-enclavada proporcionan salida de modo sencillo y permite modulación de alta frecuencia. Los arreglos del laser guías de sal tienen potencias de salida generada de cientos de miliwatts.

III.-F-centro sintonizable (tunable F-center).

En el laser centro-F sintonizable utiliza nuevos cristales que se han desarrollado, de estado sólido, y se

Nd: YAG EXCITADO CON LAMPARAS DE DESTELLOS.

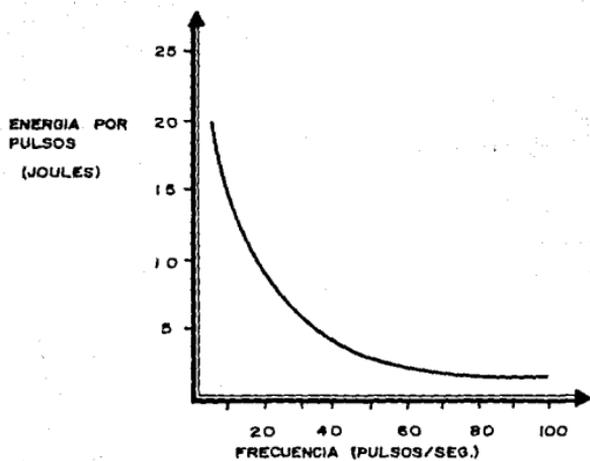


FIG. 2.9. LASER Nd: YAG PULSADO POR LAMPARA DE DESTELLOS.

caracteriza por una extensa longitud de onda proxima al IR (infrarrojo), siendo las fibras ópticas donde mayor aplicación encuentran. Las técnicas tales como el láser de pulsos comprimidos es un desarrollo logrado con el uso del láser F-centro sintonizable.

IV.- Otros sintonizables de estado sólido.

Cabe mencionar que se han desarrollado nuevos cristales láser que tal vez sean comercializados. Uno de estos es el cristal cromo-copado perovskite Cr:KZnF_3 que es intercambiable por el cristal cromo copado Garnet Cr:GGG en un láser con arreglo de bombeo. Cuando el bombeo es por un láser de ion Cripton, este cristal produce radiación sintonizable de salida en un rango de longitud onda entre 750 y 850 nanómetros.

Láseres tales como el Nd:YAG de pulsado industrial hacen posible el barrenado y cortes de difícil realización: tal como el modelo "Coherent General" que proporciona sobre los 400 Watts de promedio de potencia de salida. Algunos proyectos que se han elaborado permiten la distribución de pulsos láser secuenciales en diferentes fibras ópticas, alimentadas posiblemente por estaciones de trabajo separadas y realizando posiblemente diferentes tareas, usando la salida del láser. Por otra parte, existe un diseño de resonador láser Nd:YAG que tiene un autoajuste no estele del resonador. En su versión comercial tiene pulsos de 10- μ s con una frecuencia aproximada de 20 hertz, que forman un rayo de salida con una divergencia de solo 3.4 miliradianes.

De los láser Nd:YAG de bombeo de onda continua (CW) el promedio de potencia multimodo es tanto como 200 warts obtenibles bajo la marca Quantronics para microtaquinado, punteado, soldado y cortado. Esta compañía tiene desarrollados fuentes Nd:YAG CW de "frecuencia doblada por intracavidad" que genera sobre 2 Watts de potencia promedio en el rango visible de 532 nm. Se piensa que el uso del láser CW Nd:YAG se ampliará como fuentes de bombeo sincrónico del láser de teñido (dye laser).

En 1985 se introdujo la versión comercial de un láser de bombeo por diodo Nd:YAG y se espera que este se desarrolle aún más. En un laboratorio, con un láser Nd:YAG de 200mW de bombeo con arreglo de diodo láser puede producir 70mW CW en 1064 nm y sobre los 10 mW en 532 nm. El total de eficiencia tiene un 1% de los 532 nm resultantes. Existe también la llamada plancha láser no ha tenido aparición comercial, pero esta puede llegar a ser parte estructural de los sistemas láser industriales.

2.3.6. Laser de conmutación "Q".

Un laser de Nd:YAG, o un laser de CO₂, puede también funcionar, bajo un bombeo continuo, en un modo de conmutación "Q". La conmutación "Q" produce el efecto de un obturador que se moviera rápidamente, interceptando y dejando pasar el haz, limitando la salida de luz hasta que se almacena gran cantidad de energía radiante en el resonador. Cuando el obturador queda abierto finalmente (Se detiene la conmutación "Q"), se libera un gran pulso de potencia. La potencia media de salida del haz en este modo en diversas velocidades de repetición de pulsos (calculada como potencia de CW) se representa con una línea interrumpida en la figura 2.10. La línea llena, representa la obtención de un laser modulado por medios acústicos y ópticos (A.O.) dentro de la cavidad óptica, para generar pulsos de conmutación "Q".

Tales pulsos son de muy corta duración (típicamente 200 nanosegundos), por tanto se pueden obtener frecuencias de más de 25000 pulsos por segundo; aunque a estas velocidades la energía en pulso es baja comparada con el laser CO₂ con baja velocidad de repetición y el laser Nd:YAG pulsante con lámparas de destellos.

Los equipos Nd:YAG con conmutación "Q" a bajos niveles de potencia se emplean generalmente para eliminar materiales de recubrimiento, tal como la evaporación de películas delgadas aplicadas en superficies. La eliminación selectiva de carbono de las resistencias montadas en los C.I. para ajustar con precisión su valor es una de las aplicaciones principales.

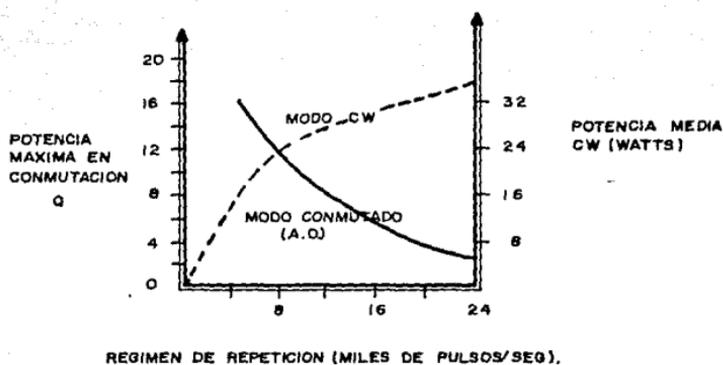


FIG. 2.10. LASER Nd:YAG CON CONMUTACION Q.

2.3.7. Laser de color o tejido laser (dye laser).

Este laser se caracteriza fundamentalmente en que puede sintonizarse de un modo continuo dentro de una amplia gama de longitudes de onda (colores). lo que aumenta considerablemente sus posibles aplicaciones. Prácticamente el laser de colorante funciona introduciendo una solución alcohólica de la sustancia activa (molécula orgánica compleja) rodamina, eosina, etc. en una cavidad resonante que es excitada por la radiación de un laser de rubí o nitrógeno, por ejemplo. La cavidad resonante posee un dispositivo que permite seleccionar dentro del espectro continuo emitido la longitud de onda que se desee. De esta forma como el número de colorantes en el que se ha conseguido efecto laser es ya superior al centenar, se puede conseguir emisión laser en cualquier longitud de onda comprendida entre 340 y 1200nm.

Los métodos más comunes para conseguir sintonización son el uso de filtros, prismas o redes de difracción para seleccionar la emisión, pero también puede utilizarse la propia excitación, la concentración de colorante, la longitud de la cavidad resonante o la temperatura. La anchura de banda laser seleccionada varía entre 10 y 0.001 nm según el método de selección utilizado. Naturalmente cuanto más fina es la excitación, menor es el rendimiento del laser; pero aun con la anchura de banda de 0.001nm es posible utilizar la mayoría de las propiedades del laser. Hasta el momento las aplicaciones más notables del laser de colorante se debe a su poder de sintonización y se han realizado en problemas puramente científicos, aunque es de esperarse que sean aplicados en problemas de soldadura delicada (microcircuitos eléctricos, desprendimiento de retina), la propiedad de sintonización y la variación de intensidad pueden ser útiles para mejorar técnicas.

El papel del laser de color (dye laser), tanto pulsado como en onda continua (CW) en la medicina es muy importante debido a que presenta una alta selectividad de interacción con los tejidos. Existen equipos que dejan totalmente libres las manos del usuario al realizar su actividad. Llamados "hands-off", basados en articulaciones que permiten gran movilidad y a la vez pueden mantener una posición fija del haz laser. Estos equipos son unidades móviles muy utilizadas por los optalmólogos y cirujanos.

Se tienen laser de color de bombeo sincronizado que incluyen sistemas híbridos utilizados en la observación que

se basa en absorbentes saturables que generan pulsos de subpicosegundos. Existen compresores de pulso fibra-reja que se comercializaron rápidamente en el área de la física. En 1985 se observó la introducción comercial, por parte de una compañía nueva del femtocromo rojo que son de un modo muy lento de laser de color que genera pulsos mucho menores de 250 fs de longitud.

El bombeo "azul-amarillo" de CW de laser de color infrarojos estan constantemente activos, tecnológicamente hablando. Se estudian en la actualidad nuevas fuentes CW para nuevas aplicaciones tales como fotocoagulación de clasificado real y pantallas de video.

2.3.8. Laser infrarojo lejano.

Dentro de este grupo de laser se puede incluir a todos aquellos que su longitud de onda se encuentra en el área mas alejada de los rayos infrarojos en el espectro electromagnético.

En la actualidad, este tipo de laser se utiliza como fuente de "bombeo" para los laser de potencia de CO₂ de línea-sintonizable, creados para ser bombeados en su gas activo por laser far-IR (infrarojo lejano). En el mercado comercial se pueden obtener sistemas que proporcionan 150 mW de salida de far-IR de potencia en 1118 micrómetros, 200 mW en 180 micrómetros y 10 mW en 1.22 mm; utilizados para radar, espectroscopios y diagnósticos de plasma.

2.3.9. Laser Helio-Neón (He-Ne).

El laser Helio-Neón se encuentra, con su longitud de onda, en el rango visible al ojo. Este laser visible se presenta al ojo con un color rojo, y su aplicación mas común dentro de la industria y la medicina es como un alineador para la aplicación de un laser de mayor potencia, aunque cabe mencionar que es también usado para fines de entretenimiento. Dado que se utiliza con bajas potencias, no presenta problemas en su uso aunque se debe tener cuidado de no enfocarlo directamente al ojo humano.

Primeramente, la reducción de tamaño y costos jugaron la regla clave en el fortalecimiento de las manufacturas del laser He-Ne para estructurar parte del mercado y rechazar

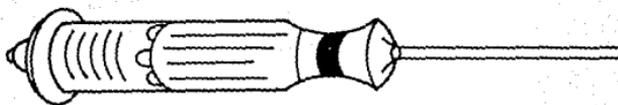


FIG. 2. 11. LASER He - Ne (TUBO SELLADO).

incurSIONES de tecnologÍas competitivas tales como los laser "diodo". En 1985 se introdujo al mercado un laser He-Ne con un color de salida verde en una longitud de onda de 543.5nm en contraste con la salida estandar roja de 633 nm de longitud, proporcionando un nuevo foco de atencion a la tecnologia comercial He-Ne.

En aplicaciones, tales como pantallas, el laser He-Ne proporciona muy buena visibilidad. Este laser utiliza diseños de tubo sellado con una elevada calidad.

Otras longitudes de onda podrian ser obtenidas del He-Ne, pero la introducción del verde ha catalizado la industria. La competitividad del laser verde He-Ne es muy fuerte, y son obtenibles configuraciones que proporcionan nuevas características, tales como un prisma selector de tres longitudes de onda de operación.

Adicional al reciente desarrollo del laser He-Ne se realizan esfuerzos para obtener una estabilización de la salida para propósitos interferométricos en 632.8 nm, así como la compresión y controlado de características de ruido de tubos He-Ne. Las operaciones con bajo ruido es uno de los propósitos de aplicaciones de reproducción gráfica.

2.3.10. Laser HF/DF (Químico).

Los laser de fluoruro de Hidrogeno y fluoruro de Deuterio (HF/DF) son de tipo químico, en los que el material activo se consigue a partir de una mezcla de gases mediante una reacción química que se produce en la cavidad resonante, por lo que debe de contar con una salida para gases tóxicos.

Tiene un amplio uso en el area militar debido a la gran salida de potencia que pueden presentar, así como en la investigación del comportamiento atmosférico.

Los laser HF/DF químico es otro de los tipos de laser actuales y puede ser aplicado para pulsar la radiación infrarroja media para aplicaciones médicas. Un laser HF/DF con 3 a 5 W de potencia de salida puede servir como una fuente versátil laser con longitudes de onda de entre de 2.8 y 3.8 micrómetros.

2.3.11. Laser Ión.

Actualmente los abastecedores de la industria de los semiconductores han entregado la producción de equipo que incorpora laser argón-ión para el reemplazo directo de laser-asistido de cromo en la reparación y limpieza de defectos de fotomáscaras. Para aplicaciones OEM, la coherencia es proporcional a la alta visibilidad, y las potencias ultravioletas (UV) de este laser pueden ser de media y alta potencia. Estos laser ya se ofrecen con control por microprocesador y existen también tubos de plasma (cavidad resonante con una mezcla de gases) que pueden ser nuevamente recargados o reprocesar para contener costos.

El laser de argón es utilizado en el sistema denominado compact-disc debido a sus características de alta resolución. En este caso, el laser es de baja potencia. El disco compacto se encuentra grabado con información binaria en codificación PCM. Conforme el disco pasa por el punto de enfoque del laser, el disco se encarga de reflejar alguna proporción del haz mediante cavidades situadas en su superficie que contienen la información. Estas cavidades actúan como difractores de la luz, modulando la intensidad del haz laser reflejado. El haz laser reflejado se hace pasar por el eje del lápiz luminoso que lo genera, para luego dividirlo mediante un prisma en dos haces; cada haz de luz se dirige al elemento correspondiente del fotodiodo.

2.3.12. Laser helio-cadmio (He-Cd).

La unión, como un medio activo laser, de un gas ligero y de poca actividad química como es el helio con un metal de color blanco azulado, dúctil y maleable, dió como resultado la generación de un haz luminoso que se ubica en el espectro ultravioleta.

Las salidas multimodo CW de los laser helio-cadmio en UV han sido significativamente aplicados en pruebas de color penetrante (dye penetrant) y procesos de inspección de materiales. Este laser se puede obtener comercialmente en tubos con espejos laterales que proporcionan sobre los 15 mW en 532 nm y 100 mW en 442 nm.

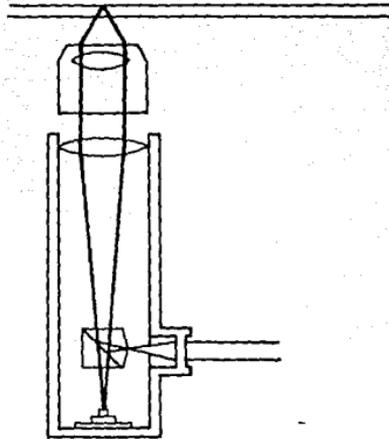


FIG. 2.12. LECTOR OPTICO O LAPIZ LUMINOSO EMPLEADO POR LA FIRMA PHILIPS.

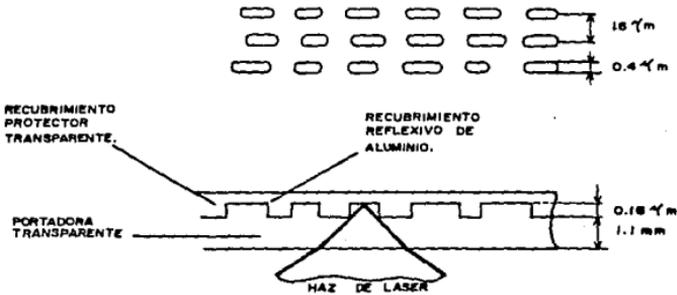


FIG. 2.13. DIMENSIONES DE LAS PISTAS Y DISPOSICION DE CAPAS DEL COMPACT-DISC.

2.3.13. Laser de nitrógeno .

Como el propio subtítulo lo indica, el medio emisor de este sistema está basado en el gas nitrógeno, siendo este un metaloide gaseoso.

Los laser de nitrógeno inicialmente eran excitados por fuentes de lámparas estándar. Ahora son reemplazadas estas por arreglos de diodos laser que pueden producir 70 mW CW en 1064 nm y sobre los 10 mW en 532 nm. El total de eficiencia tiene 1% del total de 532 nm.

2.3.14. Laser de vapor de metal .

El laser también puede ser obtenido teniendo como medio emisor un vapor de algunos metales. De la gama de laser de vapor metálico se puede mencionar un laser de vapor de cobre de 40 Watts y varios laser de vapor de oro de hasta 10 Watts de potencia. Su rápida salida pulsante (de 5000 a 20000 impulsos por segundo) los orienta a aplicaciones donde se requiere que la potencia sea proporcionada en forma pulsante.

Existen también modelos híbridos, es decir, laser combinados. Por ejemplo, existe un laser de color (dye laser) diseñado para ser bombeado por un laser de cobre. Estos presentan una eficiencia de conversión de más del 10% y un margen de sintonía de 550 a 900 nm (según el matiz empleado).

Los laser de vapor metálico pueden presentar doble tubo, con fuentes de alimentación conmutadas de alta tensión, etc.

Se tienen en el mercado sistemas laser de color de alta resolución donde una configuración de retícula de incidencia rasante proporciona a estos laser una resolución de longitud de onda ajustable de 0.1 nm para aplicaciones que requieren un alto grado de monocromaticidad. El margen de longitudes de onda es de 365 a 950 nm con ajustes micrométricos que pueden seleccionarse entre cuatro márgenes discretos de 100nm cada uno.

Los laser metálicos de vapor de oro y vapor de cobre están siendo obtenibles comercialmente en sistemas móviles para estudios de fototerapia del cáncer (oro) y dermatológicos (cobre). Se encuentran con enfriamiento por

aire, de suministro de fase sencilla, que produce sobre 10 Watts de potencia de salida pulsante.

La implantación de procesadoras como controladores del laser de vapor metálico se encuentran en desarrollo con el fin de aumentar la versatilidad de estos equipos.

Existen también los llamados laser de vapor de cobre de plasma dinámico que puede tener nuevas aplicaciones científicas en bombeo de laser de color y aplicaciones de pulsos cortos.

2.3.15. Laser excímero (excimer laser).

Estos laser proporcionan en la actualidad 100 Watts de potencia de salida promedio en 248 y 308 nm de longitud de onda con partes de pulsos de repetición de 500 hertz. En operación continua CW se puede demostrar que se pueden realizar más de 107 tiros bajo control de un microprocesador. El gas criogénico procesado proporciona larga vida a estos sistemas. Para aplicaciones científicas, se pueden obtener laser excimeros de 30 pulsos por segundo.

En 1985, los laser excimeros irrumpieron en las aplicaciones industriales OEM. Estos equipos son utilizados industrialmente en máquinas para recubiertas de cromo e impresión de contacto de circuitos integrados. Tiene además promisorios usos médicos bajo investigación, que incluye cirugía reflectiva (realizada en el ojo) y recanalización de vasos sanguíneos.

2.4. Sistemas laser industriales de dióxido de carbono.

Hasta el momento de realiza este trabajo, uno de los laser de mayor uso, debido a su expansión comercial, es el laser de dióxido de carbono, por lo que se hizo conveniente realizar un pequeño apartado referido a este tipo de laser.

El primer laser de tipo industrial se fabricó en 1966 y fue llamado Coherent model 40, con una potencia de salida de 100 Watts, le siguió el modelo 42 de 50 Watts en 1969 el cual se usa extensamente para corte, perforación y sellado de plásticos.

En 1971 se construyó un modelo 43 usado en tratamiento de metales y otras aplicaciones más que requerían elevadas capacidades de producción. Este modelo tenía una salida de potencia nominal de 500 Watts. Debido a su longitud del tubo de descarga, aproximadamente 12.2 metros, se requería un exacto alineamiento de los espejos por lo que se colocaban en una base de granito, pero el alto voltaje (25 000 volts) formaba junto con el granito de la base un generador de ozono el cual dañaba todas las partes orgánicas de la estructura del laser. Así también, por el calor producido, el granito se deformaba causando desalineamientos entre los espejos, por lo que su uso continuo no era confiable en procesos industriales. Este sistema aún se utiliza en sistemas con bajo nivel crítico tales como grabar hule.

2.4.1. Laser de bioxido de carbono EVERLASE.

Para fijarnos una mejor idea de la forma en la cual el laser de bioxido de carbono está constituido como un sistema completo, se ha tomado el laser CO₂ EVERLASE para realizar una descripción de él, que nos sirva de una manera general para comprender todos los laser que se pueden obtener en el mercado de los laser.

La figura 2.14. muestra la estructura global del resonador de un laser de CO₂ de la serie EVERLASE. Esta serie presenta cuatro modelos con potencias de 135, 375, 675 y 775 Watts del haz de salida.

El resonador es un conjunto "activo", en el que la estructura mecánica es enfriada continuamente por un sistema de circulación de aceite para mantener la temperatura estable. La temperatura del resonador se mantiene dentro de un intervalo de ± 0.05 grados Celsius alrededor del valor elegido. La distorsión mecánica se ha eliminado para que el laser funcione de manera continua en un modo TEM₀₀ estable. La potencia de salida del laser es también estable con variaciones lentas de solo $\pm 2\%$ de la potencia nominal. La estructura está alineada permanentemente por unas placas de hierro fundido colocadas a los extremos del conjunto. El conjunto completo es mucho más ligero que los diseños anteriores.

Los tubos de descarga son de fácil reemplazo y los daños mecánicos se han eliminado ya que no existen conexiones de enfriamiento, eléctricas, o de vacío en tales tubos. El resonador se mantiene al potencial de tierra y con ello se elimina la generación de ozono. En estos sistemas se pueden tener uno, dos, tres o cuatro tubos de descarga, y puede

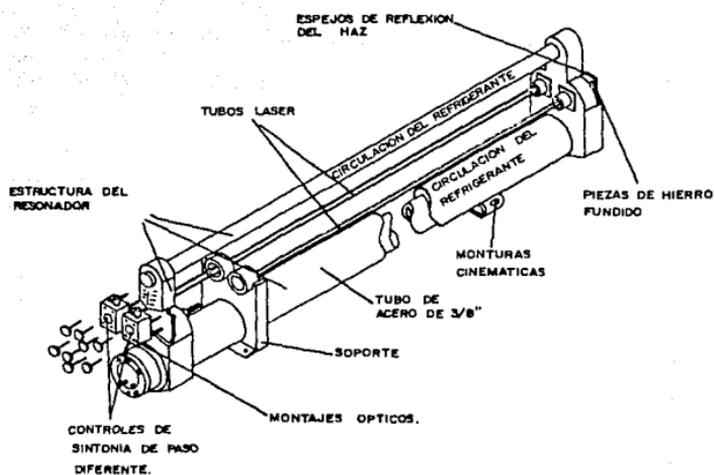


FIG. 2.14. ESTRUCTURA GENERAL DE UN RESONADOR DE CO₂.

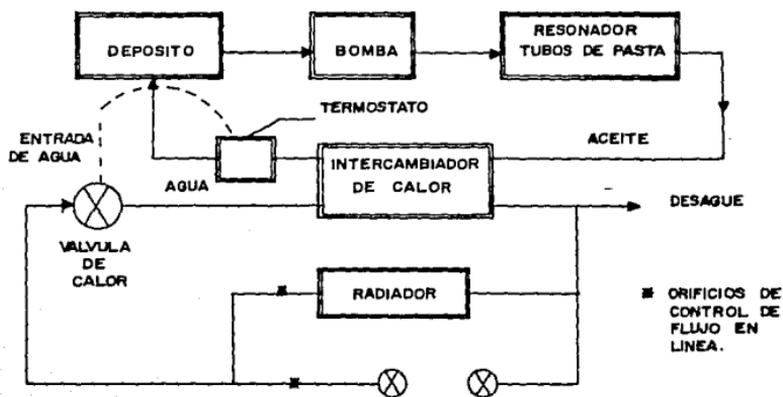


FIG. 2.15. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL LASER DE CO_2 .

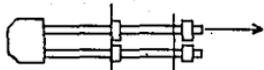
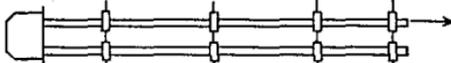
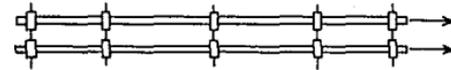
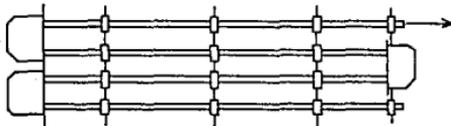
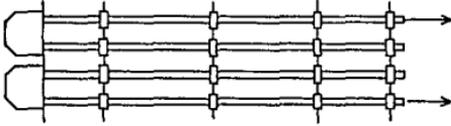
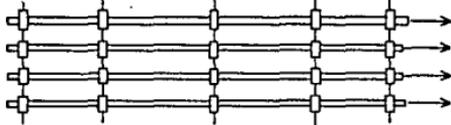
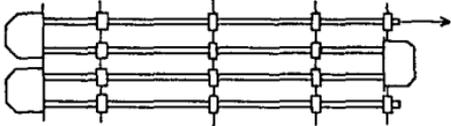
MODELO EVERLASE Nº	POTENCIA DE SALIDA POR HAZ	TOTAL POR HAZ	HAZ DE SALIDA
150	185	1	
325-1	375	1	
325-2	185	2	
525-1	575	1	
525-2	375	2	
525-4	185	4	
725-1	775	1	

FIG. 2.16. CONFIGURACIONES DE LA SERIE EVERLASE.

tener uno, dos o cuatro haces de salida. Se pueden tener resonadores de doble trayectoria. El líquido de enfriamiento circula por el resonador, los tubos de descarga y las monturas ópticas; y es un sistema de enfriamiento de malla cerrada para el control de temperatura.

La familia EVERLASE de laser CO₂ comprende cuatro modelos, cada uno con distinta potencia máxima nominal del haz de salida. En la figura 2.16. se dan los modelos, las potencias de salida, los haces de salida y la configuración de los tubos. Obsérvese como se reduce el tamaño del laser al utilizar este tipo de arreglos en los tubos de descarga.

La figura 2.17. muestra el diagrama de la fuente de energía del laser de 185 Watts, que es controlada por reactancias saturables con una alimentación trifásica de 208 volts. La energía pasa a través de las reactancias de control hacia la fuente de alto voltaje con una salida de 25,000 volts. Si el laser trabaja de modo pulsante, una fuente "suave" de energía alimenta otros 10,000 volts para aplicar a los tubos de descarga un total de 35,000 volts. El circuito de realimentación detecta las variaciones de la corriente de descarga. El circuito de control compensa las variaciones controlando la intensidad de corriente que fluye hacia las reactancias de control.

El gas utilizado para los tubos de descarga es una mezcla comercial de 13.5% de Nitrógeno, 4.5% de dióxido de carbono y 82 % de Helio para trabajar a frecuencias de pulsos hasta de 1000 Hertz. Para frecuencias mayores se utiliza una mezcla especial que soporta hasta 2500 Hertz, que no es muy común en el mercado. El consumo de gas es de 2.8 pies cúbicos (0.7335 metros cúbicos) de gas no circulado por hora, además de que el 90% del gas se hace recircular, por lo que el consumo es lento.

En la figura 2.18. se muestra el diagrama de bloques de un sistema de recirculación de gas para laser CO₂. El flujo de gas a lo largo del sistema es controlado por válvulas automáticas. Del depósito de suministro, el gas pasa por un medidor de flujo hacia los tubos de descarga, y luego a la bomba de vacío la cual succiona el gas. A la salida de la bomba de vacío, el gas puede ser descargado a la atmósfera o hacerse recircular por el sistema del mismo. Si el gas va a ser recirculado, se le hace pasar por un sistema de filtración y regresar a los tubos del laser. El sistema de recirculación es autoregurable, excepto que el nivel de aceite del depósito de la bomba de vacío debe comprobarse y, en su caso, reponerse periódicamente.

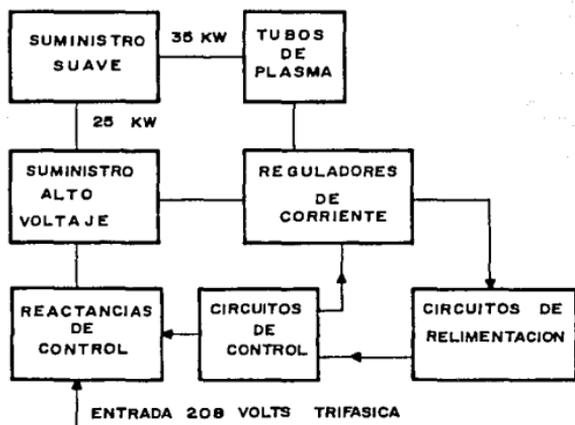
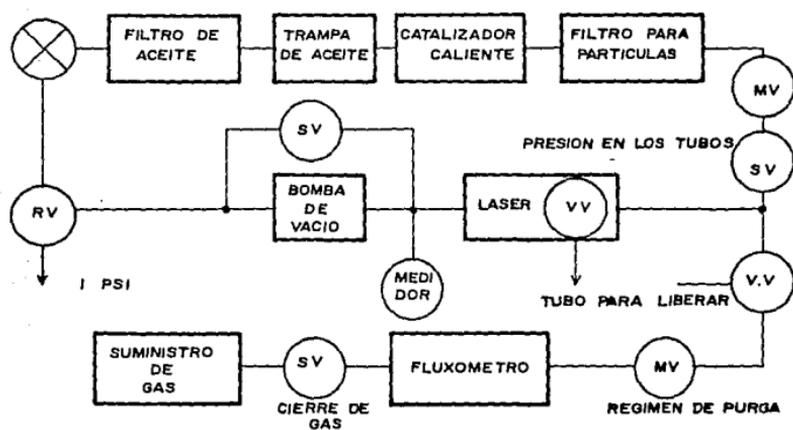


FIG. 2.17. SUMINISTRO DE ENERGIA DE UN SISTEMA LASER.

VALVULA DE AISLAMIENTO
DEL RECIRCULADOR (ABIERTA
NORMALMENTE)

FILTRO DE
ABSORCION
DE
ZEOLENITA



MV- VALVULA DE MEDICION
SV- VALVULA DE SOLENOIDE
VV- VALVULA DE VENTILACION
RV- VALVULA DE ALIVIO

FIG. 2.18. DIAGRAMA DE RECIRCULACION DEL GAS.

2.4.2. Pulsación del haz laser.

Pulsación intensificada.

El haz laser puede manejarse de diversas maneras, como lo observamos en el inciso 1.3. del caso específico del sistema ERCELAS 20. Estos modos de funcionamiento son emitiendo un haz continuo (CW) o un haz intermitente de corta o larga duración. El nivel de potencia de salida de onda continua (CW) es equivalente a la potencia total nominal del modelo particular de laser. Cuando se opera en forma intermitente el laser se modula electrónicamente para que el pulso tenga una potencia máxima intensificada, varias veces mayor que el nivel de potencia de onda continua.

En el pulso intensificado se tiene un aumento pronunciado de energía que produce una alta potencia máxima como puede observarse en la figura 2.19.

Esta alta potencia máxima se caracteriza por tener el material al que se aplica una rápida variación en el HAZ (Heat Affected Zone) por lo que es muy útil en perforación de materiales ya que no calienta la zona que rodea el lugar donde se enfoca el laser. También se utiliza para cortar, con mínima fusión del material circundante, por lo que la zona afectada se reduce en comparación con procedimientos tradicionales tales como la aplicación de calor directa. También da buenos resultados siendo usado para soldar metales ya que la energía del borde frontal supera rápidamente la reflectividad superficial para realizar soldaduras de penetración profunda con daño térmico mínimo.

El pulso intensificado corto puede tener una potencia máxima de 5 a 8 veces la potencia de salida de onda constante y es utilizado para perforar, grabar o cortar materiales, con bordes bien formados.

El pulso intensificado largo alcanza una potencia hasta de 4 o 5 veces la potencia de salida de onda continua.

El máximo del borde es útil para iniciar la reacción de la superficie del metal, mientras que el borde menor mantiene la reacción, y esto lo hace valioso para la soldadura ya que son más profundas y menos amplias. Este modo de pulso también es útil para cortar metales y plásticos.

POTENCIA MAXIMA DE SALIDA
(NORMALMENTE AL VALOR DE CW)

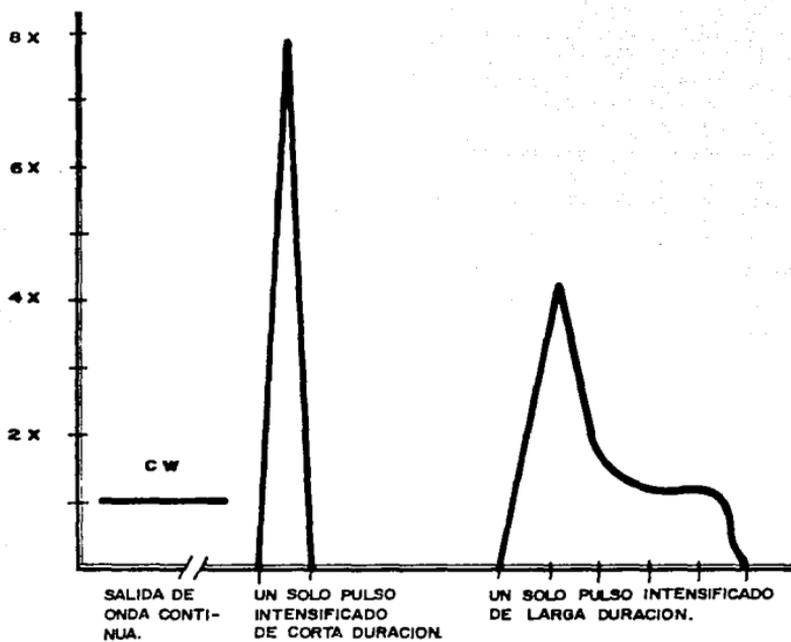


FIG. 2.19. ONDA CONTINUA, PULSO INTENSIFICADO CORTO Y PULSO INTENSIFICADO LARGO.

La figura 2.20 muestra la diferencia entre el modo de onda continua y el modo de pulso intensificado en el caso del laser EVERLASE CO₂ 150. La potencia máxima de salida que puede obtenerse en el modo CW se marca en línea interrumpida. La potencia de modo pulsante (líneas curvas continuas) se muestra la duración de pulsos y rapidez de repetición (frecuencia). Excepto para velocidades muy altas de repetición de pulsos, la energía y la potencia por pulso intensificado es generalmente mayor que la disponible en CW.

Las velocidades de repetición altas con menor potencia máxima de salida son propias para corte, perforación de papel y plástico delgado, y operaciones de grabado donde se requieren altas velocidades de barrido.

En velocidades de repetición bajas es mayor la potencia máxima por pulso y son apropiadas para perforación por pulso simple, perforación de metales por pulso múltiple, soldadura por puntos, corte y soldadura de metales, y grabado de cerámica. En este caso la zona afectada por el calor (HAZ) es tan reducida que no existen problemas de transferencia de calor.

Cuando la frecuencia de pulsación intensificada es muy alta, se necesita reducir el tiempo de decaimiento de la parte final del pulso. Como se observa en la figura 2.21., un pulso intensificado requiere 100 microsegundos aproximadamente para obtener la potencia máxima y requiere después casi 1 milisegundo para regresar a cero. Si la frecuencia es menor de 1,000 pulsos por segundo, este tipo de decaimiento es aceptable. Al aumentar esta cifra, los pulsos se traslapan.

El tiempo de decaimiento se puede acortar a 400 microsegundos utilizando una mezcla especial de gases en el tubo de descarga sin que afecte la potencia máxima. Con una menor duración por pulso se puede operar el laser a frecuencias mayores de 2 500 pulsos/seg. Las velocidades de repetición altas de pulsos configurados de esta forma, son útiles para perforación de papel a altas velocidades, grabado y en algunos casos corte.

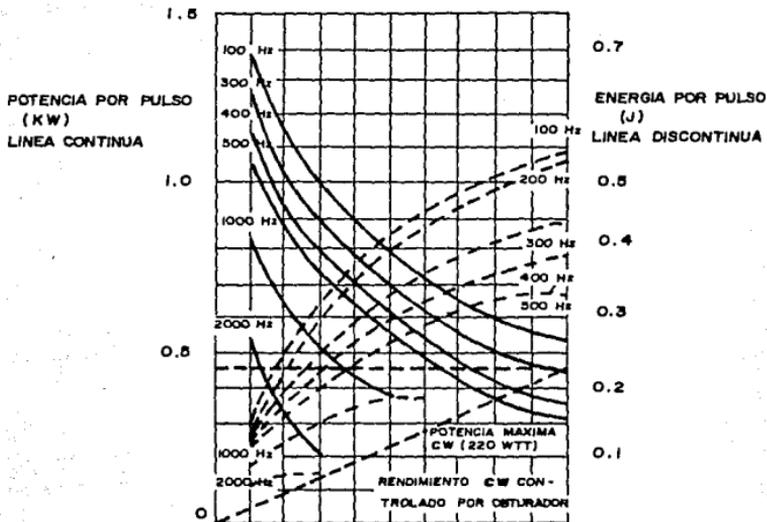


FIG. 2.20. PULSO INTENSIFICADO DEL LASER EVERLASE 150.

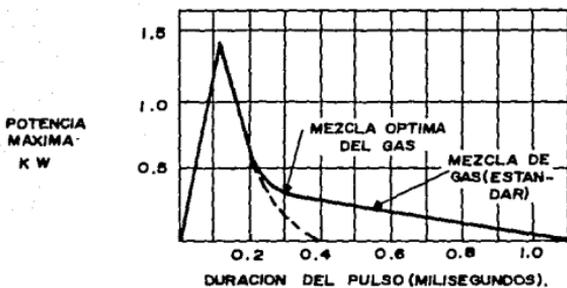


FIG. 2.21. CONFIGURACION DE PULSO.

2.4.3. Rafaga de pulsos.

La ráfaga de pulsos es otra opción en el manejo del haz laser y consiste en emitir grupos de pulsos en forma intermitente. Esto es, un determinado número de pulsos, de duración definida, puede repetirse a una frecuencia determinada por la regulación de control de la compuerta laser, lo que permite aplicar potencias máximas elevadas a pulsos cortos repetidos para vaporizar el material. Este es un medio eficaz de perforar, especialmente cuando la aplicación total de calor debe reducirse al mínimo.

En la figura 2.22. se muestra una ráfaga de pulsos donde se obtiene 6 veces la potencia normal máxima de onda continua.

2.4.4. Configuración de potencia.

En algunas ocasiones, se necesita variar el nivel de potencia del haz de tiempo, y esto se consigue por medio de la configuración de potencia.

En la configuración de potencia puede ser deseable cambiar el nivel de potencia, de una forma lineal hacia un nivel mayor o menor, o puede preferirse hacerse en pasos discontinuos. Ambos métodos se observan en la figura 2.24. Estos niveles de potencia son útiles para soldadura circular, de tal modo que puede suprimir la discontinuidad al regresar al punto de inicio. Una computadora externa al sistema laser puede programarse para realizar la misma función u otras funciones mas complejas.

2.5. Manejo optico del haz.

2.5.1. Características del haz .

En las condiciones de trabajo de un sistema laser son importantes los factores que determinan la profundidad de campo y el diámetro mínimo enfocado. En la figura 2.25. se muestra que ambas cantidades son funciones de la longitud de onda, de la energía del haz, del diámetro del haz no enfocado y de la distancia focal del lente (las fórmulas que aparecen son válidas sólo para el laser que funcione en el modo TEM₀₀

POTENCIA MAXIMA
DE SALIDA CW



FIG. 2.22. RAFAGA DE PULSOS.

POTENCIA MAXIMA
DE SALIDA CW

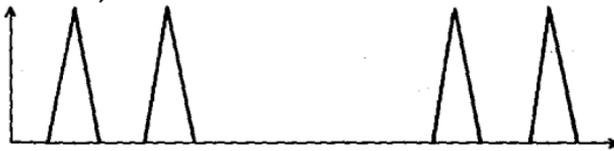
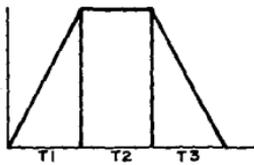


FIG. 2.23. RAFAGA DE PULSOS POR PULSOS.

POTENCIA



POTENCIA

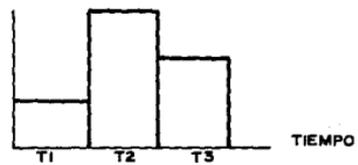


FIG. 2.24. CONFIGURACION DE POTENCIA.

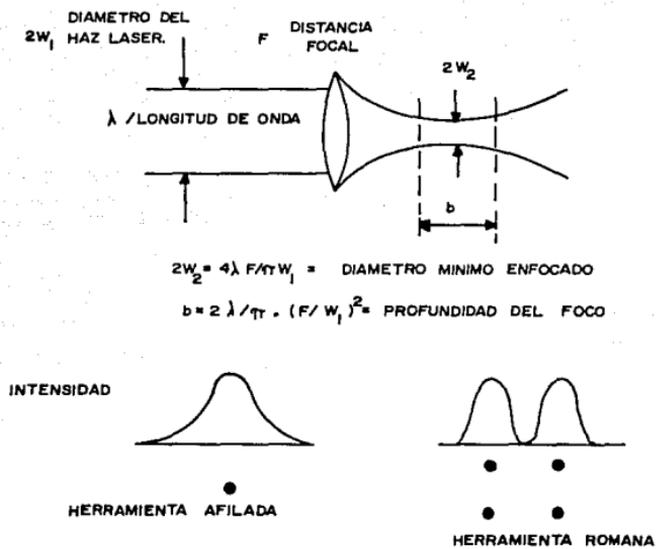


FIG. 2.25. PROFUNDIDAD DE FOCO Y DENSIDAD DE POTENCIA.

(gaussiano)).

En la figura 2.25 se muestra el haz, con una curva exagerada, a cada uno de los lados del plano focal que contiene el diámetro mínimo enfocado donde el tamaño de la mancha varía de manera alineal con respecto a la distancia al plano focal principal, debido a que los rayos que pasan por el centro del lente no enfocan en el mismo plano de los que pasan por la periferia de este. En efecto, junto con la divergencia normal del laser, produce una región acinturada y una mancha mínima enfocada, cuyos tamaños se pueden calcular con las fórmulas dadas.

El grado de divergencia en el haz afecta en forma directa la densidad de potencia en el plano focal principal.

En la figura 2.26 se muestra la relación entre el diámetro del haz enfocado (mancha) y la distancia desde el plano focal para distintos lentes. Su análisis nos permite valorar los factores óptimos, la geometría de la instalación y la rapidez en el trabajo, necesarios para una aplicación en particular.

En la figura 2.27 se aprecia la relación entre la profundidad del foco y la densidad de potencia; y entre la distancia del foco y la densidad de potencia. En esta figura se tiene un lente de 5 pulg. (distancia focal) que produce una profundidad de foco mayor y una mancha mayor en el plano focal que un lente más pequeño con un 25% de la densidad de potencia que se obtiene de una lente de 2.5", pero este permite mayores tolerancias en las especificaciones de operación y el trabajo con laser será más lento.

La posición del foco del lente con respecto a la superficie de trabajo tiene un efecto crítico en la forma y profundidad de los agujeros perforados por laser. Cuando el foco queda antes de la superficie, las perforaciones son poco profundas, el diámetro grande y los lados algo cónicos. Cuando el foco coincide con la superficie, las perforaciones son uniformes. Cuando el foco está más allá de la superficie las perforaciones son menos profundas y con lados cónicos.

Es posible aumentar la distancia de trabajo entre un lente y el plano focal con mismo tamaño de mancha e igual densidad de potencia de otra lente aumentando el diámetro del haz del laser al doble con un lente telescópico, y usar luego una lente de 5" para enfocar en vez de una lente de 2.5", con este arreglo la profundidad de campo es equivalente como

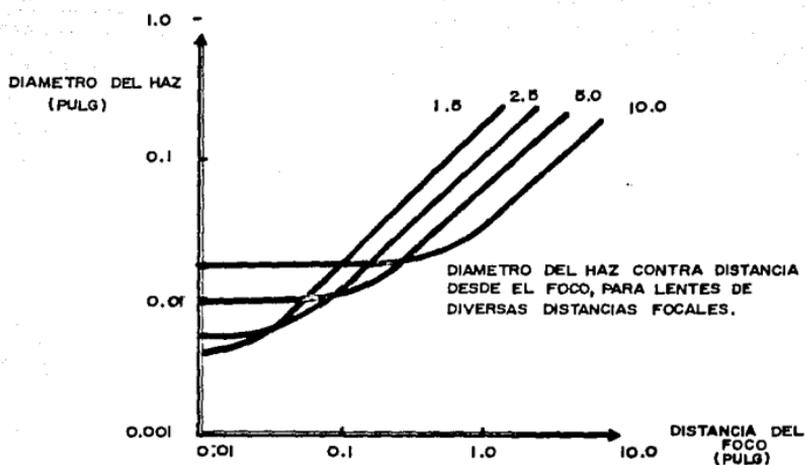


FIG. 2.26. DIAMETRO DEL HAZ CONTRA DISTANCIA FOCAL

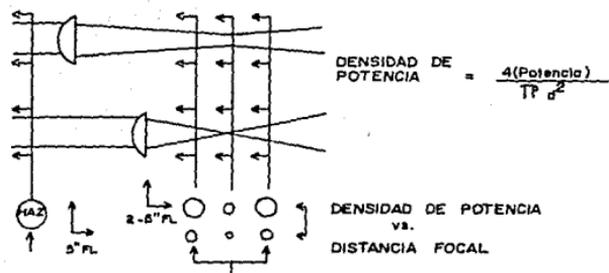


FIG. 2.27. DENSIDAD DE POTENCIA Y DISTANCIA FOCAL.

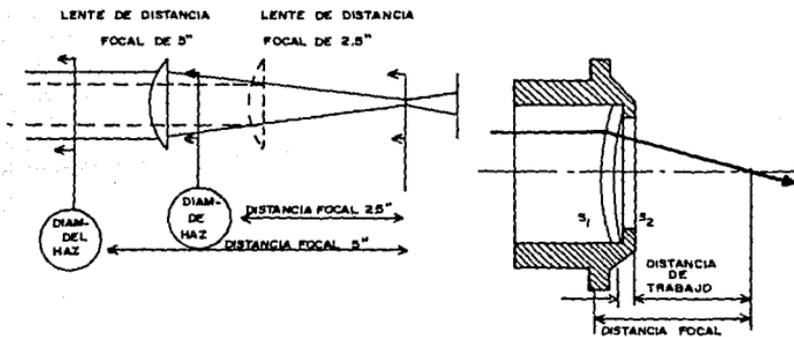


FIG. 2.28. EXPANSION DEL HAZ, DISTANCIA FOCAL Y DISTANCIA DE TRABAJO.

se observa en la figura 2.28.a.

En la figura 2.28.b. se observa una montura normal en la cual la lente se compone de un solo elemento elegido especialmente por sus propiedades ópticas para la longitud de onda de 10.6 Micras. En esta figura se aprecia la diferencia entre la distancia focal del lente y la distancia de la montura de la cara del lente al plano focal (distancia de trabajo). En este caso, la distancia focal la determina el borde del lente (S1), el borde de la montura (S2) y por el índice de refracción del material del lente para 10.6 micras.

2.5.2. Propiedades de los elementos ópticos.

Los materiales presentan propiedades inherentes respecto a la frecuencia a la que trabajan. En el caso del laser CO2 se requiere que los elementos ópticos presenten las mejores propiedades en la transmitancia y reflectancia necesarias para la frecuencia de 10.6 micras. La figura 2.29. muestra la transmitancia de varias longitudes de onda para cuatro materiales NO RECUBIERTOS que pueden usarse como elemento óptico en el laser CO2. En esta figura se observa al cloruro de sodio que transmite bien esta frecuencia, pero es muy higroscópico. El selenio de zinc es muy utilizable para 10.6 micras, así como longitudes de onda visibles. El arseniuro de galio tiene aceptables propiedades ópticas. útil para el laser CO2. El germanio también posee buenas propiedades ópticas, pero su uso es limitado por sus características térmicas a bajas temperaturas ya que puede ser dañado a potencias máximas de 200 Watts/cm² de densidad.

Estos cuatro materiales son utilizados para lentes de enfoque y acopladores de salida.

Los lentes se construyen con materiales dados según las necesidades, por ejemplo: En la figura 2.30. se tiene la transmisión de un material de lente seleccionado para 10.6 micras y tratado con una superficie antireflectora (AR), con lo que el material transmite el 99% de luz incidente a esta longitud de onda.

Como se observo en el ejemplo esquemático del inciso 1.8., se tienen lentes que son reflejantes a una longitud de onda y que permite el paso de otras longitudes, ya que la lente observable en la figura 1.12. la lente que se encuentra en seguida del obturador, permite el paso total de la

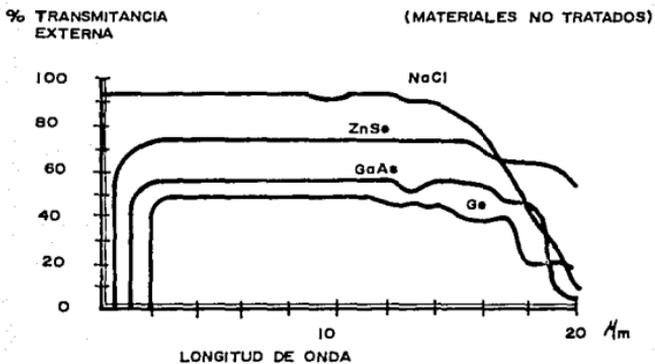


FIG. 2.29. TRANSMITANCIA DE MATERIALES OPTICOS NO RECUBIERTOS.

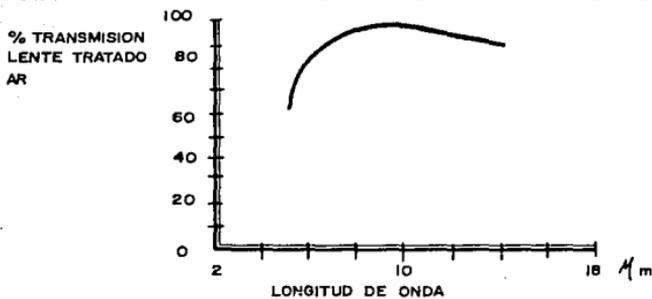


FIG. 2.30 TRANSMISION DE LENTE RECUBIERTO.

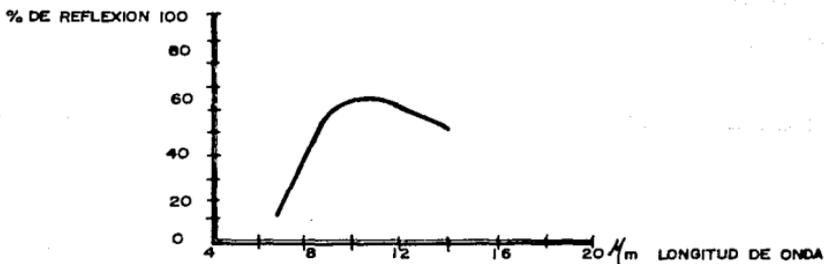


FIG. 2.31. REFLECTANCIA PARCIAL DE UN LENTE RECUBIERTO.

frecuencia del laser CO₂, mas no permite el paso del laser He-Ne, y lo refleja totalmente.

Un acoplador de salida es un lente parcialmente reflector que se utiliza para reflejar una porción definida de luz, de una longitud de onda en particular, en la cavidad resonante del laser y transmitir o acoplar la luz restante como un haz de salida. El que se describe a continuación es otro tipo de lente y la figura 2.31. muestra sus características de reflectancia de este acoplador de salida en particular. El arseniuro de galio recubierto con un material especialmente preparado para que refleje el 65% de la luz incidente de 10.6 micras. El recubrimiento reduce la luz de 10.6 micras transmitida por el arseniuro de galio del 58 % al 35%. Este acoplador de salida se fabrica para usarse en el tubo de descarga del haz de 185 Watts.

2.5.3. Sistemas ópticos en la salida del haz.

En la figura 2.32. se muestra un diagrama de la sección transversal del arreglo de salida para el manejo del haz laser. En él, se observa la forma en que el laser se encuentra primeramente con un espejo a 45 grados enfriado por agua que refleja a un ángulo de 90 grados hacia una lente de enfoque situada al final del tubo. La posición de la lente se regula por medio de un micrómetro con vernier para el enfoque fino o recorrer el plano focal. Dentro del alojamiento se introduce un gas y se hace pasar por una boquilla para que forme un chorro axial alrededor del haz que emerge. La boquilla del gas puede ajustarse alrededor del eje optico del haz.

Se emplean diversos gases con el haz, de acuerdo a los fines que se persigan. El oxígeno inicia una reacción exotérmica y aumenta la rapidez de corte de secciones de alto calibre de metales. El chorro de aire tiene el mismo efecto en secciones delgadas de metal, plásticos o madera. Los gases inertes, como el argón y el nitrógeno producen bordes nitidos en metales delgados. El chorro de gas permite también proteger la cara del lente contra partículas del material que se desprenden, y para desalojar o desechos de cortes profundos.

2.5.4. División del haz.

El haz laser puede ser dividido ópticamente y obtener varios haces como se observa en la tecnica descrita en la

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

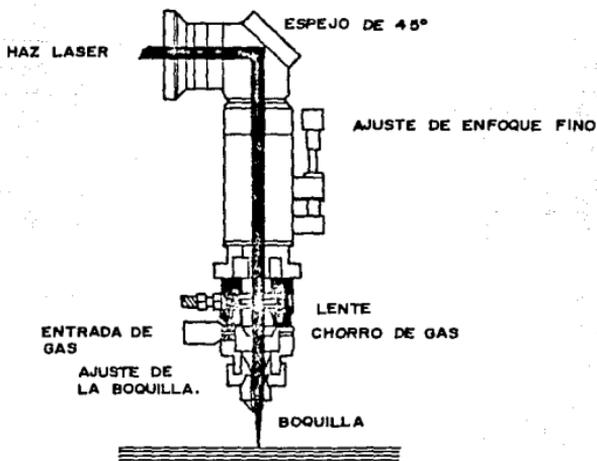


FIG. 2.32. DIAGRAMA DE SALIDA DEL HAZ, CON CHORRO AXIAL.

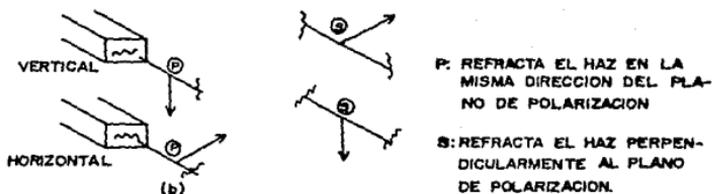
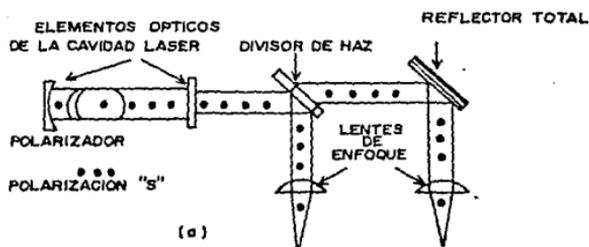


FIG. 2.33. (a) DIVISION DEL HAZ.

(b) EFECTOS DE LA POLARIZACION EN LA DIVISION DEL HAZ.

figura 2.33. Un divisor de haz es una lente, un elemento ópticamente plano que esta recubierto y refleja una porción definida del haz incidente, transmitiendo la restante. Los divisores de haz normales tienen relaciones reflexión-transmisión de 50/50, 30/70 o 10/90. La división del haz de niveles de potencia, como el laser CO₂, se realiza mejor si se elimina la capa reflectora del divisor de haz. Las relaciones anteriores pueden obtenerse polarizando el haz laser de salida y usando un material optico, sin recubrimiento, para dividir el haz. La parte superior de la figura es un diagrama del sistema.

Para que la división del haz se realice correctamente, este se debe polarizar en la dirección S que se observa en la figura 2.33., ya sea horizontal o vertical, con respecto al divisor del haz y en la dirección que tendrá despues de dividido el haz.

La división del haz puede emplearse en equipos con haz de salida sencillos o múltiples, aunque esta técnica se utiliza solo si es necesario un arreglo de haces múltiples sin dividir.

2.6. Movimiento de la pieza de trabajo.

El laser, como una herramienta industrial, ofrece ventajas unicas. Algunas de estas ventajas son la posibilidad de mover la pieza de trabajo, de mover el haz o modificar el haz. Algunos sistemas combinan estas posibilidades.

Se pueden tener sistemas sencillos de haz estacionario y la pieza de trabajo en movimiento, en donde un solo haz apunta a la banda transportadora y cuando cada haz esta en posición debida, se cierra el interruptor que dispara el laser durante un tiempo determinado.

Otro sistema sencillo sería la perforación de válvulas de aerosol con laser, en el cual este último esta fijo y es un claro ejemplo de la forma en que operan dos estaciones laser. En el sistema operan dos bandas vibradoras alimentando cada una 175 piezas por minuto dando un total de 350 piezas por minuto, o sea 5 piezas por segundo, y donde el laser aun no opera a su máxima capacidad, siendo limitado por la capacidad del sistema del transporte del material para colocar en posición las piezas.

Otro tipo mas de sistema de movimiento de piezas es una mesa giratoria que transporta jeringas que seran perforadas con orificios de ± 0.001 pulgadas de tolerancia y lo mas perpendicular posible, de manera que la aguja a insertar sea perpendicular a la jeringa, esto se realiza empleando un laser CO2 de 150 Watts.

Existen muchos sistemas mas en los que las piezas a tratar estan en movimiento empleando mesas con movimientos en los ejes X y Y. Estas mesas son livianas, rapidas, precisas, permiten seguir perfiles y pueden ser controlados por gran variedad de señales procedentes de: teclados, discos, cartuchos, cintas de papel y/o PROM. Las mesas son complementos excelentes de un sistema laser y pueden ofrecer velocidades lineales hasta de 10 pulg por segundo. Las velocidades para seguir contornos pueden ser de 1.5 pulgadas por segundo, con un control de posicion muy preciso.

2.7. Movimiento del haz .

Para trabajos en los cuales se realizan perforaciones circulares, soldar y realizar cortes de perfiles circulares se pueden utilizar montajes estandarizados de lentes giratorias. Estos dispositivos hacen girar una lente de enfoque en un plano horizontal (o en el plano de la lente) alrededor de un eje que coincide con el del haz a enfocar. Como la mancha ya enfocada estara siempre en el plano focal de la lente, girara circularmente segun el movimiento del lente. El montaje giratorio del lente es impulsado en la mayoría de los casos por un motor de velocidad variable y puede adaptarse a una boquilla para chorro de gas auxiliar. El radio efectivo de operacion está limitado por el tamaño de lente utilizado.

Si se van a realizar orificios de mas de 1" de diametro, por lo general es preferible hacer girar un conjunto de espejos de 45 grados que giran alrededor del eje del haz.

También se pueden realizar movimientos de los ejes "x" y "y" mediante una mesa.

Un laser se puede también compartir en el tiempo entre diferentes puntos mediante espejos que desvien en distintas direcciones y a intervalos precisos para efectuar operaciones en estaciones de trabajo distintas.

La figura 2.35 es una representación esquemática del haz de tiempo compartido, y una aplicación es el uso de este dispositivo en la perforación de válvulas para aerosol donde el laser es desviado a dos estaciones de trabajo en las que se realiza una operación de perforación.

Otra técnica que ilustra los sistemas laser en movimiento es la de seguimiento donde se logra un efecto de detención siguiendo con un haz a la pieza en movimiento y exponiendo al material a tratar al abrir un obturador o al pulsar el laser mientras que los movimientos relativos son de cero o casi cero. Si los tiempos de exposición son muy cortos se puede obtener a veces el efecto de detención sin mover realmente el haz. Este fenómeno se ha utilizado eficazmente para perforar hojas delgadas de plástico o papel en movimiento.

Los haces laser se pueden dirigir con lentitud o a velocidades realmente elevadas por medio de espejos montados en mecanismos que oscilan por medios mecánicos o en galvanómetros controlados electrónicamente. Se puede utilizar para dirigir una menor cantidad de energía sobre una área determinada o para lograr un control muy preciso del calor aplicado en tratamiento térmico o sellado. Se tiene otra aplicación también interesante: la impresión de marcas comerciales, logotipos o números de identificación; esto se realiza mediante un espejo movable controlado por computadora.

2.8. Modificación del haz.

Trabajando con laser se tiene otra opción más: la modificación del haz laser. Esta modificación se puede realizar con diversas técnicas con las que el laser puede operar en sistemas de diversos tipos. Una de estas técnicas es la de dividir el haz, como se observa en la figura 2.36. lo cual nos es útil cuando se requiere trabajar con varios haces dirigidos a distintos puntos o trabajar en piezas en más de una dirección. Esta técnica utiliza generalmente espejos parcialmente reflectores colocados a 45 grados con respecto al haz, con lo que una parte del haz se desvía a 90 grados respecto al eje primario y la otra parte del haz pasa a través del espejo paralelo al haz recibido, aunque ligeramente desviada por la refracción.

El grado de división depende de las características ópticas de la capa reflectora del espejo y la relación de reflexión o transmisión, siendo la más común de 50/50, aunque

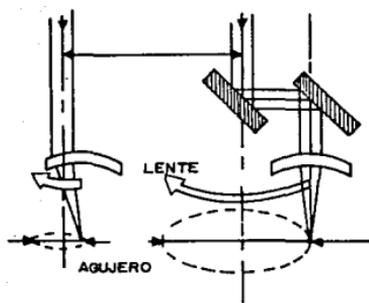


FIG. 2.34. LENTES Y ESPEJOS GIRATORIOS.

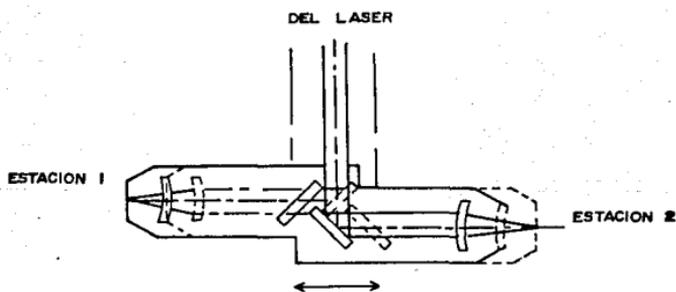


FIG. 2.35. HAZ LASER EN TIEMPO COMPARTIDO.

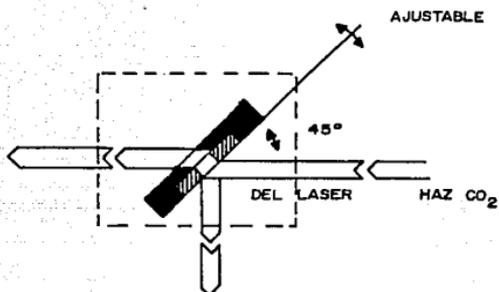


FIG. 2.36. DIAGRAMA DE UN DIVISOR DE HAZ.

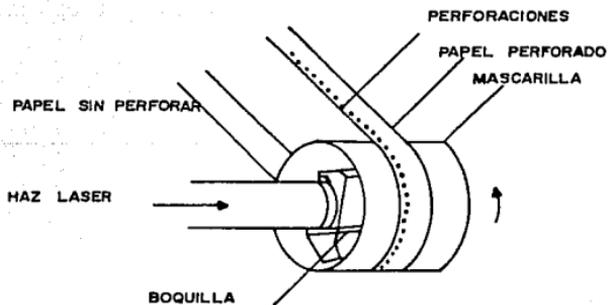


FIG. 2.37. PERFORACION DE PAPEL PARA CIGARROS MEDIANTE UNA MASCARILLA PERFORADA DE TIPO CILINDRICO.

también se emplean de 30/70 , 85/15 y 90/10. Debido a las pérdidas internas, puede ser necesario enfriar el divisor, ya que a más de 200 Watts los elementos de transmisión pueden experimentar cambios en su relación de división debido a la absorción de energía. El enfriamiento ayuda, pero generalmente a altas potencia se debe evitar la división del haz.

Para obtener varios haces a niveles de potencia elevados, el uso de un laser de haces múltiples es muy efectivo y económico.

Otra forma de modificar el haz es a través de mascarillas reflectoras fotograbadas, método muy utilizado para grabar mediante haz laser en plástico, madera u otro fondo similar, barriendo la mascarilla con el laser, obteniendo un fino relieve.

Una técnica más de la modificación del haz laser es la intermisión o conmutación. Se emplea cuando se necesita rapidez de pulsación mayor que la que tiene el laser. En la figura 2.38. se muestra un haz laser continuo bloqueado intermitentemente por un disco dentado que gira a velocidades de más de 10 000 RPM.

Una modificación de esta técnica es usar una superficie reflectora a 45 grados sobre el disco interruptor para cambiar la dirección o conmutar el haz hacia otra parte de la superficie de trabajo. Esta técnica se ha empleado con éxito en sistemas que realizan tres millones de perforaciones por minuto en una cinta de papel en movimiento.

La figura 2.39. muestra otra forma de alterar la potencia de salida del laser. A la izquierda se muestra el nivel de potencia máxima en modo continuo (CW) la cual es la nominal. En la siguiente sección se muestra el modo interumpido donde el laser "enciende y apaga" a intervalos específicos tales como pulsar automáticamente con frecuencias de 200 a 2500 ciclos por segundo. Si se opera en modo de pulsación intensificada con pulsos de menos de un milisegundo de duración, se aplica el factor de multiplicación de 6 a 10 para estimar la potencia máxima del pico frontal.

Se puede también utilizar una compuerta para disparar una ráfaga de pulsos a intervalos determinados de tiempo. La parte interior derecha de la figura muestra las posibilidades de configuración de la potencia. Las configuraciones en equipos disponibles comercialmente permiten realizar ajustes

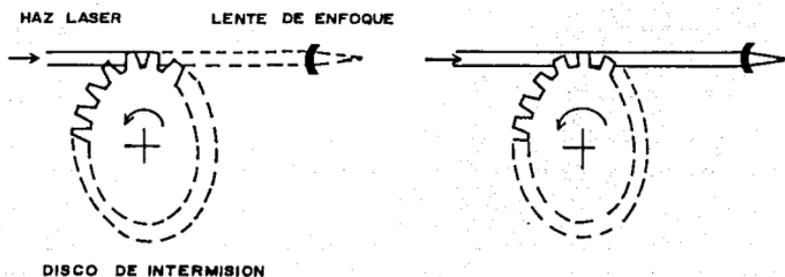


FIG. 2.38. INTERRUPCION DEL HAZ MEDIANTE UN DISCO DENTADO.

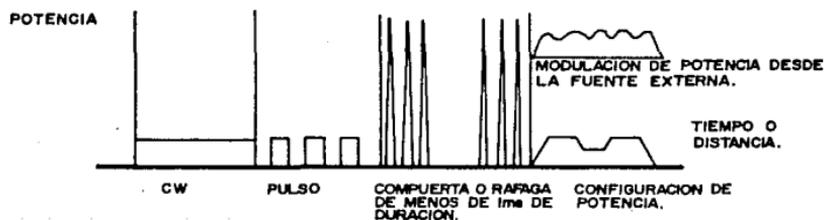


FIG. 2.39. ALTERACION DE LA POTENCIA DE SALIDA.

tanto para reducir la potencia máxima para aplicaciones tales como el tratamiento térmico o soldadura, como para pasar de una potencia a otra cuando se requieren diferentes profundidades de corte.

La parte superior derecha de la figura indica que la potencia puede variarse desde la fuente externa, esto resulta parcialmente útil en aplicaciones en que la velocidad del material varía con respecto al punto de emisión o cabeza laser, con lo que se garantiza profundidad de corte constante, aunque la velocidad varíe. La potencia del laser se puede variar en forma lineal desde casi el máximo hasta aproximadamente 25% de potencia total.

2.9. Combinación de los movimientos del haz y de la pieza a tratar.

La mayoría de los sistemas se diseñan combinando las técnicas descritas anteriormente. Un sistema de haz en movimiento podría emplear la modulación de potencia para hacer cortes de profundidad constante. Un sistema transportador podría colocar la pieza a tratar bajo el haz mientras que con ayuda de una lente giratoria se podría soldar la parte superior de la pieza cuando esta se encuentra estacionaria. Se podría emplear un divisor de haz y recurrir a la técnica de seguimiento para tratar un material.

2.10. Manejo del laser con fibra óptica.

La fibra óptica esta abarcando en esta era cada vez mas terreno debido a una verdaderamente muy alta maniobrabilidad que le proporciona al haz laser al ser introducido en ellas. Tales fibras son fabricadas con material sintético y su característica principal, útil para el laser, es de poder transportar luz. Tal característica le permite manejar el haz para comunicaciones con haz laser modulado, en aplicaciones industriales donde se requiere mucho movimiento del haz, etc. En su uso se presentan algunos decibeles de pérdida en función de las longitudes, pero a su vez permite dejar a un lado los espejos reflectores, ya que esta fibra permite cualquier configuración, pues es, en forma análoga, igual a un cable conductor de la electricidad.

Las fibras ópticas pueden ser un complemento de un sistema laser, muy comunmente en el área de las comunicaciones. Dado que cualquier sistema de comunicaciones presenta pérdidas, y las fibras ópticas no son una excepción

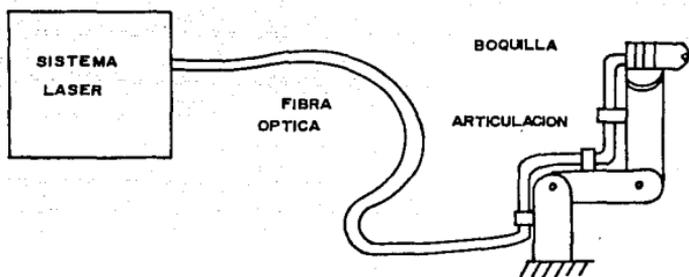


FIG. 2.40. LA FIBRA OPTICA ES CAPAZ DE TRANSPORTAR EL HAZ LASER Y PERMITE UN MANEJO MAS LIBRE DE ESTE.

aunque con características propias. se tienen las pérdidas que presenta la fibra dentro de la transmisión con parámetros tales como las pérdidas por absorción, pérdidas por esparcimiento y pérdidas por la curvatura de la fibra; así como el ensanchamiento temporal de los impulsos de luz al viajar por la fibra óptica.

En la actualidad se cuentan con nuevos sistemas de transmisión de energía luminosa, ya no en la antigua técnica de modulación de la luz sino bajo modernas técnicas denominadas "comunicaciones coherentes" basados en principios de sistemas homódinos y heteródinos.

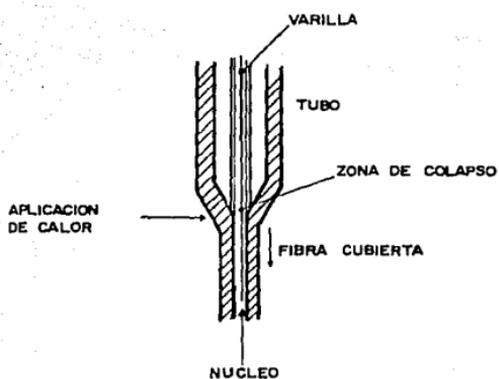
Las fibras se dividen en su manufactura por: fibra de paso indexado y fibra de gradado indexado. Estos tipos de fibra requieren fundamentalmente diferentes tipos de fabricación.

La mayoría de las fibras ópticas de la actualidad se fabrican de vidrio, consistente de sílica o silicato. Las guías de onda o fibras ópticas ofrecen las más bajas pérdidas que se pueden obtener en el presente, el cual tiene un rango típico de menos de 2 dB/km. Para aplicaciones de medios de transmisión largos, una pérdida de 10 dB/km es el objetivo a lograr. Las fibras hechas con plástico, generalmente tienen pérdidas mucho más altas y frecuentemente degradaciones más diversas en los niveles de radiación y tiempo, que las fibras hechas con vidrio.

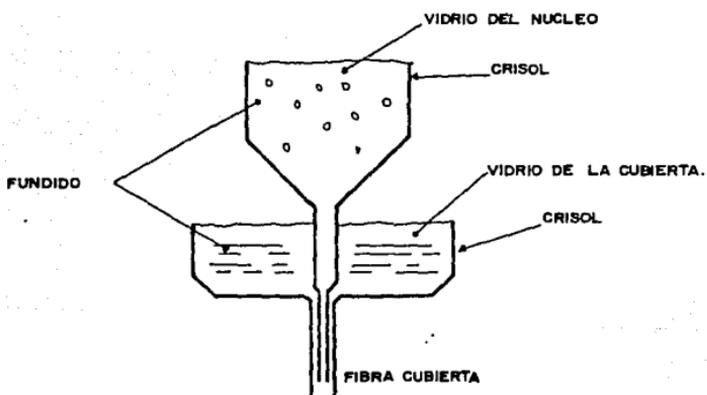
A continuación se da una tabla en la cual se muestran las propiedades de las guías de onda ópticas hechas de diferentes materiales, por diferentes métodos de fabricación.

MATERIAL	TECNICA DE FABRICACION	DIAMETRO DE NUCLEO TIPICO (MICRONS)	AFERTURA NUMERICA (NA)	PERDIDAS EN 0.95 MICRONS. (dB/Km)
Alcaline-lead-silicate	Clad rod	90-80	0.45-0.55	35-50
Soda-lime-silicate	Clad rod	20-40	0.15-0.25	50-60
Soda-borosilicate	Double crucible	10-20	0.10-0.20	20-25
Silica GeO2	vapor deposition	5-15	0.10-0.15	3-5
SiO2-P2O3	Vapor deposition	10-50	0.15-0.20	1-3

En las fibras ópticas se pueden utilizar fuentes tales



a) PROCESO VARILLA EN TUBO.



b) PROCESO DE DOBLE CRISOL.

FIG. 2.56. PROCESOS DE FABRICACION DE LA FIBRA OPTICA.

como: Diodos emisores de luz (LED's) que utiliza materiales tales como el GaAs y GaAsAl, de luz incoherente con un rango de 30-50 nm; Inyección laser de diodo semiconductor (I LED's), fabricados con GaAsAl, de luz incoherente y un rango de 0.7-0.9 microns; Diodo de superluminiscencia (SLD's); Laser no semiconductor tal como el laser Nd:YAG, de luz coherente con una longitud de 1.05 microns, la cual coincide con una de las más bajas pérdidas mínimas en las fibras de vidrio. Esto permite operaciones en el sistema en una longitud de onda donde la dispersión Rayleigh en la fibra son significativamente menores que en la luz emitida por el diodo led o el diodo de inyección laser con una longitud de onda de 0.85 microns. El laser Nd:YAG tiene un importante ancho espectral limitado, el cual resulta siempre con mucho mayor dispersión del material que en la inyección laser.

Al final de la fibra óptica, se utiliza un detector óptico los cuales son convertidores O/E (óptico/eléctrico). Algunos de los detectores ópticos son: Fotodetector eléctrico; Fotodiodo de capa de agotamiento (PIN fotodiodo) y Fotodiodo barrera Schottky; Fotodiodo de avalancha unión PN (APD); Barrera Schottky (APD); Electroabsorción.

Cabe mencionar que no se puede hablar de atenuación de la misma manera en el que nos referimos al que se obtiene en un cable metálico (coaxial, por ejemplo) ya que si no se fijan los modos en que se distribuye la potencia luminica obtendríamos resultados distintos al repetir las medidas, puesto que cada modo presenta una atenuación distinta.

Los laboratorios T&T Bell realizaron un prototipo de un sistema submarino basado en fibra óptica en las Islas Canarias para un servicio comercial la cual es la primer aplicación transoceánica en el mundo en 1986 el cual es un sistema óptico submarino que consta de 6 fibras, cuatro para transmisiones y dos de repuesto recorriendo 123Km de longitud con tres repetidoras para completar el sistema y que utiliza fibra de modo simple con un drenado continuo a cada 10 Km de longitud. Las longitudes de la fibra son de 50 a 60 Km (la construcción de fibras muy largas es un proceso muy complejo). El cable soporta temperaturas de -2000 a +60 grados Celsius.

El cable además de seis fibras consta de un cable central de acero en el centro, tiene dos capas de acero que lo aíslan del exterior y una soldadura continua de cobre como forro para conducir potencia a las repetidoras submarinas. Una capa de polietileno rodea el forro de cobre para proveer aislamiento. El cable completo mide 21 mm de diámetro.

Las repetidoras son diseñadas a usarse en un espacio de 52 Km, cada una contiene circuitos de regeneración tanto monitoreado como supervisión. La señal de onda luminosa es recibida en el regenerador óptico por un fotodiodo p-i-n de In-Ga-As acoplado a un circuito integrado de silicón el cual transforma la señal luminosa en corriente eléctrica. Los circuitos integrados también ejecutan amplificación, temporizado de recuperación y funciones de transmisión-manejo. Una heteroestructura interna laser convierte las señales eléctricas de nuevo a impulsos ópticos, los cuales son transmitidos al siguiente tramo. El laser In-Ga-As opera en 1.3 microns y cada regenerador contiene seis tramos laser, el cual puede actuar automáticamente bajo comandos desde la costa.

3. Análisis de una aplicación práctica del laser.

Para cimentar una mejor idea de las situaciones que implica el uso de un sistema laser, este inciso trata de las cuestiones que se producen al realizar dicha acción tomando un modelo ya realizado.

En el caso de un usuario, el punto de partida cuando se piensa en el uso de un sistema laser consiste en ponerse en contacto con un laboratorio de estudio de cualquiera de las marcas comerciales existentes. El usuario llevará las partes o piezas de trabajo para determinar las necesidades primordiales.

Ya dentro del punto de vista de diseño se observaran puntos tales como:

Entre las variables que se definirán se encuentra la potencia requerida para el tratamiento de la pieza, y esta potencia se conoce con precisión por medio de medidores portátiles que realizan su función directamente en la superficie de trabajo.

La velocidad de tratamiento se puede establecer gracias a las mesas X-Y y cronómetros. Se consideran también los elementos ópticos puesto que puede ser justificable la adquisición de una lente giratoria, o tal vez un divisor de haz.

Las características del haz se deben de determinar. El modo TEM₀₀ es el que se usa más a menudo por su estabilidad y su facilidad con que se realizan operaciones de corte, perforación y soldadura. Se pueden emplear otros modos transversales como fuentes de calor o para alguna otra aplicación. Se elegirá el modo que mejor se adapte a las necesidades de trabajo, y este se usará en las pruebas de estudio.

Otra área importante en la cual puede ayudar el laboratorio de estudio es en el diseño de las partes. El ejemplo siguiente tiene como fin ilustrar una aplicación hecha a raíz de la soldadura con laser de bióxido de carbono en unas piezas metálicas producidas en grandes cantidades y

que fueron diseñadas hace 30 años de acuerdo con las técnicas de soldadura por resistencia. Cuando esta pieza se estudio en el laboratorio, se encontró que era posible lograr un significativo ahorro al rediseñarla. El cliente en este caso podía ahorrar 30,000 dolares al año sólo en el costo de los materiales. La soldadura laser no requiere una operación previa de limpieza, con lo que le ahorraría alrededor de los 35,000 dólares anuales. Además la parte diseñada para tratamiento con laser ofrece la ventaja de que se presta a la alimentación automática de gran velocidad y de que la altura se puede controlar con precisión suficiente para eliminar una de las operaciones de maquinado posteriores. El sistema propuesto hace posible prescindir de siete empleados de producción y eliminar varias etapas del control de calidad. El sistema se pagará por sí solo en menos de un año gracias a los ahorros en costo de mano de obra, materiales y herramienta.

El paso siguiente de la definición del sistema consiste en estudiar el proceso en términos de las necesidades de producción.

La alimentación manual comparada con la alimentación automática o semiautomática es una de las primeras consideraciones en la especificación de un sistema. Muchos usuarios deciden que el sistema deberá ser diseñado para alimentación manual por el momento, con la posibilidad de acoplar alimentadores vibratorios o mecanismos de recogida directa para automatizar mas al sistema en el futuro.

El factor velocidad contra precisión puede ser importante al determinar las necesidades del sistema. El laboratorio podría determinar que una velocidad de 60 pulgadas por minuto es razonable para soldar o cortar. A esta velocidad puede ser difícil mover la pieza con precisión (ver fig 3.2.). En este caso se podría usar un laser de menor potencia a una velocidad más fácil de controlar.

Por el contrario, podría pensarse en un laser de 150 Watts para cortar o soldar a velocidades de 20 pulgadas por minuto y los dispositivos de manejo del material o las bandas transportadoras podrían moverse a 60 pulgadas por minuto, en este caso sería preferible un laser de mas potencia para aceptarse a la velocidad de las bandas transportadoras.

Los accesorios son también partes importantes en el diseño del sistema. La precisión de posición de partes pequeñas, para tratarlas con laser, es normalmente del orden de 0.0004 a 0.002 pulgadas. Para garantizar esa colocación

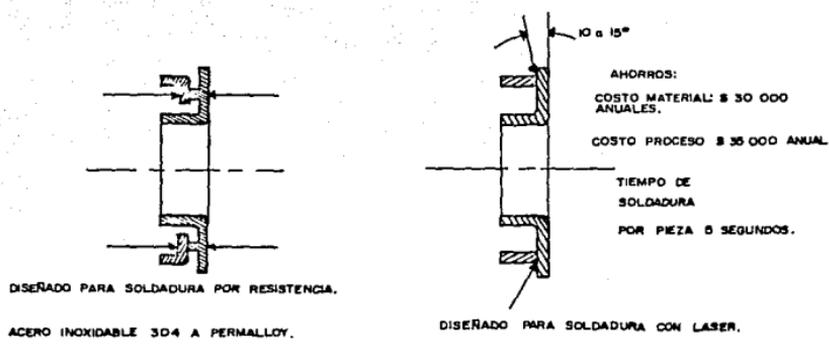


FIG. 3.1. POSIBILIDADES DEL LASER PARA EL DISEÑO PARTES.

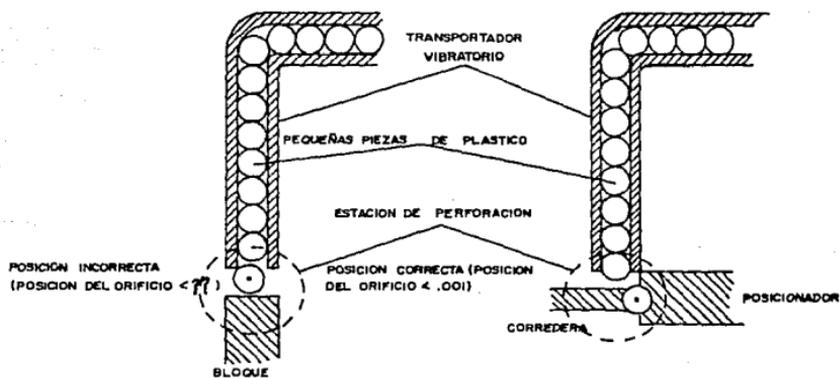


FIG. 3.2. EXACTITUD DE LA POSICION (COLOCACION).

ten precisa, el sistema de movimiento debe mantener definitivamente la pieza dentro de ese rango durante el tratamiento. La acción del laser sobre la pieza equivale en realidad a una microexplosión que puede mover ligeramente la pieza. Para lograr las tolerancias que la aplicación exige, el accesorio de sujeción de piezas debe estar diseñado para lograr la mayor precisión posible.

También las necesidades ambientales deben de considerarse cuando se especifica un sistema laser. Muchos productos son tóxicos al vaporizarse; el humo es molesto mientras se trabaja y perjudicial a largo plazo. Casi todos los sistemas laser tienen dispositivos para eliminar humos y residuos, buscando la seguridad del operador, la duración del equipo y la limpieza de los elementos ópticos.

La confiabilidad del sistema incluye la selección de un sistema accesorio buscando la mejor duración a precio razonable. La confiabilidad implica también la adquisición de piezas de repuesto que son reemplazadas con mayor frecuencia. Esta generalmente se incluye con el sistema para facilitar la reposición. El diseño debe permitir un acceso fácil a los componentes que deban ser ajustados o reemplazados con frecuencia. Los requisitos de la comisión americana de la seguridad y de salud en el trabajo (OSHA) están contemplados en el diseño de la máquina con la inclusión de la cubierta protectora, la que generalmente acompaña a los sistemas laser. Los componentes móviles pueden ir dentro de la cubierta para evitar que el operador entre en contacto con cualquier mecanismo en movimiento.

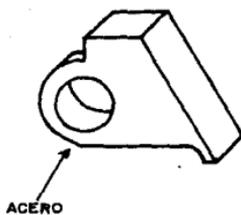
3.1. Revisión del diseño.

Una vez acordadas las especificaciones e iniciado el proyecto, se realiza una revisión para discutir el diseño real. La revisión abarca la disposición de los instrumentos con detalle suficiente para que las partes interesadas tengan la seguridad de que el equipo se ajustará a las especificaciones.

En la etapa de revisión de diseño se analizan los diversos factores que no se contemplaron en fases anteriores. Como ejemplo de los problemas que pueden resolverse durante la revisión del diseño, mencionaremos la dificultad para sujetar la pieza a tratar según se observa en la figura 3.3.

Los sujetadores para soportar un material tejido en

DISEÑO ORIGINAL



DISEÑO CORREGIDO

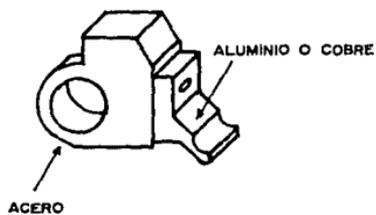


FIG. 3.3. DISEÑO DE UN SUJETADOR DE PIEZAS.

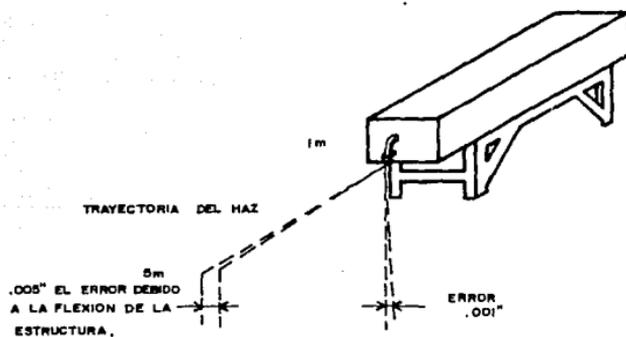


FIG. 3.4. ERROR AL DIRIGIR EL HAZ LASER.

plástico pueden también definir el borde del corte. En este caso, el haz y los vapores resultantes entran en contacto con el borde de sujeción a la vez que el haz incide parcialmente en éste. Esto plantea varios problemas y consideraciones de diseño tales como los siguientes:

-El borde de sujeción debe estar hecho de material reflector para minimizar el ataque de la pieza por el haz.

-El borde de sujeción debe estar biselado para que refleje la energía radiante hacia el área de corte.

-La pieza de sujeción debe ser fácil de quitar para facilitar la limpieza.

-La pieza de sujeción debe tener holgura para permitir la eliminación de los numos.

3.1.1. Errores en la dirección del haz.

En los primeros sistemas laser se recurría deliberadamente a trayectorias largas del haz de manera que las partículas de polvo presentes a lo largo de la trayectoria pudieran ser dispersadas. Por el contrario, la trayectoria del haz debe ser lo más corta posible para minimizar los problemas de dirección, la vibración y la expansión del haz debida a la divergencia.

Deben evitarse las disposiciones o instalaciones en las que en una parte de la estructura de apoyo haya recirculación de fluidos del sistema de enfriamiento, ya que pueden modificar la posición relativa entre el punto de trabajo y el haz laser enfocado.

3.1.2. Tolerancias en las costuras de las soldaduras.

Una pieza de sujeción bien diseñada y un sistema de emisión del haz correctamente anclado al laser o un dispositivo de apoyo pueden dar tolerancias entre el haz de trabajo y la pieza de ± 0.0005 a ± 0.002 pulgadas. El haz conservará una precisión verdadera de 0.0005 pulgadas. La costura de soldadura debe estar situada con precisión en relación al haz.

La separación entre las piezas a unir debe ser pequeña

para que el haz no pase sin fundir las piezas. Puesto que normalmente el perfil del haz es Gaussiano (la mayor parte de la energía se encuentra en el centro) la separación máxima deberá de ser del 10 al 15 % del tamaño de la mancha óptica, para obtener los mejores resultados.

Usando laser de potencia estandar mayor, la distancia focal del lente será mayor y la mancha resultante será más grande. Las tolerancias aumentan de esta forma.

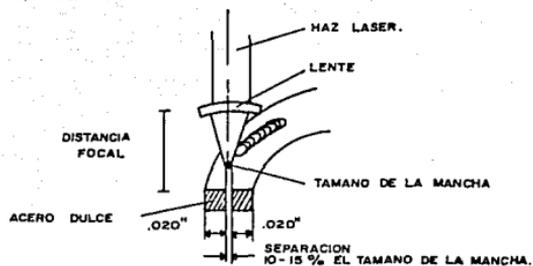
Una manera de colocar el objeto de trabajo con precisión milimétrica, o de verificar su posición es a traves de un haz laser He-Ne. Las trayectorias ópticas de el haz principal y el haz apuntador pueden tener ejes diferentes o ser coaxiales, dependiendo de la necesidades. Si las trayectorias son coaxiales, el haz He-Ne puede ser cambiado con el haz de CO₂ en operacion haciendo pasar este a traves de una ventana optica de germanio de 45 grados en el cual el haz de CO₂ no se afecta y el haz de He-Ne es reflejado totalmente hacia la salida, de tal manera que concidan, como se observa en la figura 3.6.

Los dos haces se enfocan a distancias ligeramente distintas (diferencia por lo general no critica). Por supuesto el lente de salida debe ser transparente a ambas longitudes de onda. Uno de estos lentes esta hecho de seleniuro de Zinc.

Otra manera de hacer coincidir los ejes de los dos haces consiste en hacer pasar el haz operante de CO₂ a traves de la apertura de un espejo de 45 grados y reflejar el haz ensanchado del laser de He-Ne, el cual se refleja coaxialmente al haz de trabajo y enfoca por medio del mismo lente.

3.1.3. Prueba de aceptación.

Una vez terminado el diseño y construido el sistema, se lleva a cabo una prueba de aceptación. El sistema debe tratar la pieza de trabajo en un tiempo especificado. La prueba de aceptación se debe de llevar a cabo en el lugar donde trabajará el sistema para ajustar el lente, sistema o el proceso.



POTENCIA DEL HAZ	D.F. DE LA LENTE	TAMANO DE LA MANCHA	ANCHO DE SOLDADURA	PENETRACION DE SOLDADURA	VELOCIDAD DE SOLDADURA	SEPARACION MAXIMA
150 W	1.5"	.004"	.012"	.015"	30"/min	.0005"
300 W	2.5"	.008"	.020"	.030"	30"/min	.0008"
500 W	5.0"	.010"	.040"	.060"	30"/min	.0015"

FIG. 3.5 TOLERANCIAS DE COSTURAS EN SOLDADURAS CON LASER.

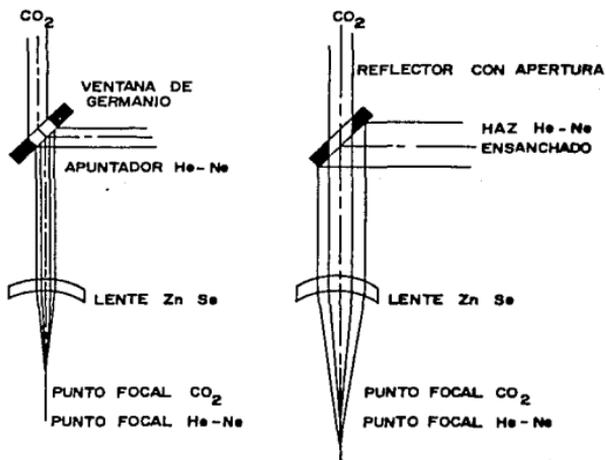


FIG. 3.6. COMBINACION DE LOS HAZ HELIO NEON Y CO₂.

3.2. Instalación.

Al instalar el sistema el usuario debe ser asesorado para que el laser opere correctamente, como lo hizo en el lugar de trabajo durante la prueba de aceptación. Personal especializado debe de llevar a cabo las operaciones de conexiones de alimentación de electricidad y agua, para a continuación verificar el modo y la potencia que asegurará que el laser no se dañe durante el transporte. Se debe capacitar también al personal del usuario en lo referente a la operación y mantenimiento preventivo del laser.

3.2.1. Prueba de instalación.

Una vez que el laser es instalado y opera satisfactoriamente, personal altamente capacitado en apoyo de sistemas verifica que el sistema este funcionando conforme a las especificaciones acordadas al inicio del proyecto. Su tarea consiste a veces en realinear los elementos ópticos o hacer las adaptaciones necesarias a los accesorios del sistema de movimiento de piezas de trabajo, por ejemplo. Se lleva a cabo una prueba de aceptación bajo las condiciones de trabajo normales para verificar su funcionamiento. Después de la aceptación, se capacita al personal que manejará el sistema. Si se trata de sistema controlados numericamente por computadora (CNC) con frecuencia habrá que impartir conocimientos básicos de programación. Si se emplean alimentadores vibratorios, la capacitación comprende algunos principios de operación y descripción de puntos de ajuste y mantenimiento.

3.2.2. Servicio.

Los fabricantes de sistemas laser generalmente garantizan su equipo por un año o 2000 horas, a excepción de algunos componentes ópticos y aquellos elementos en los que un proveedor particular ofrece garantía menor. Durante este periodo, los problemas del sistema son atendidos por personal de los fabricantes de los sistemas laser, que conocen la relación particular entre el laser y el resto del diseño. Si un sistema no esta soldando a la velocidad debida, es importante determinar si el laser no esta aplicando la potencia requerida o si el sistema de manejo de materiales no operó a la velocidad correcta. Con una compañía que asuma toda la responsabilidad del sistema, no puede haber

desacuerdo acerca de quién debe resolver cualquier problema que surja.

3.2.3. Manuales de operador y mantenimiento.

En todos los sistemas laser se proporcionan manuales completos del laser y del sistema en los cuales se muestra con detalle la operación de todo el sistema, los programas de mantenimiento preventivo, las listas de partes, las partes de repuesto recomendadas y los dibujos necesarios para que el usuario pueda cuidar del sistema.

Las empresas dedicadas a los sistemas laser proporcionan a sus clientes cursos de capacitación donde incluye todo aquello que el usuario deba saber acerca de limpieza y alineación, tal que este pueda dar servicio al laser después del periodo de garantía.

Además de lo anterior, las empresas dedicadas a los sistemas laser pueden proporcionar a sus usuarios contratos de servicio.

3.3. Medidas de seguridad.

3.3.1. Requisitos de la BRH.

En Estados Unidos, los requisitos relacionados con el uso de sistemas laser esta regulado por la BHR (oficina de salud radiologica) que es un organismo del departamento de educación, salud y bienestar. En la última década se han fijado normas que los fabricantes de equipo laser deben de satisfacer para la protección del personal de operación. Entre tales medidas figuran:

- 1.- Blindaje del tubo de plasma. Evita las emisiones secundarias de los tubos laser.
- 2.- Blindaje de la fuente de energía. Evita la emisión de rayos "X" "blandos".
- 3.- Etiquetas de advertencia. Indican el nivel de potencia y advierten del peligro que representan.
- 4.- Indicador de emisión. Luz indicadora que enciende

cuando el haz laser se enciende.

5.- Luz de obturador. Luz indicadora que enciende cuando el obturador está abierto y emite el haz.

6.- Retardo. Retardo mínimo de 10 segundos en la emisión, previendo accionamiento accidental del sistema.

7.- Cubierta de seguridad del haz. Impide la exposición accidental al haz mientras se ajustan los elementos ópticos.

8.- Controles de cierre con llave. Impide que el sistema sea utilizado por personas no autorizadas.

3.3.2. Alto voltaje.

El riesgo con el alto voltaje de operación es, para el personal, mucho mas alto que el representado por el haz laser. Las medidas que se toman a fin de reducir este riesgo y proteger al personal de mantenimiento y operador son:

1.- Bastidor y puertas tipo NEMA (asociación nacional de fabricantes de equipo eléctrico de los Estados Unidos). Protege al operador y equipo de peligros exteriores tales como el agua.

2.- Protección a tierra de las cubiertas de acceso. Esto conectara al laser automaticamente a tierra si la cubierta es abierta.

3.- Conexión total a tierra. Todos los componentes del sistema estan directamente conectados a tierra.

4.- Sensor de alta temperatura. Para disminuir la potencia del laser cuando se alcancen temperaturas anormales.

5.- Sensor de corriente elevada. Para disminuir la potencia del laser cuando se produzcan corrientes extraordinarias.

3.3.3. Seguridad del sistema.

Las medidas anteriores son referentes al laser mismo. Se requieren otras medida adicionales cuando se acopla un

sistema, para asegurarse que el operador o el personal de mantenimiento no será afectado inadvertidamente por el haz. Estas son:

1.-Haz cubierto. El haz laser que pasa dentro de los tubos de paredes gruesas, desde la salida del resonador hasta los elementos opticos de enfoque.

2.-Cubierta del area de trabajo. Garantiza que los haces dispersos no dañaran a las personas que pasen.

3.-Enclavamiento de las cubiertas de acceso. Impide que el laser se encienda mientras las cubiertas estan abiertas. Un seguro impide abrir la cubierta cuando el laser está funcionando.

4.-Elemento optico focal. El último elemento optico en el paso del haz es la lente de enfoque. Mas alla del foco el haz diverge y su intensidad (densidad de potencia) disminuye en proporción directa al cuadrado de la distancia del foco.

5.-Sistema de extracción. Elimina vapores dañinos o toxicos producidos al procesar ciertos materiales.

3.3.4. Sentido común.

Los usuarios deben manejar con precaución el sistema instalado. El mejor sistema de seguridad que se lleve a instalar puede ser anulado por personal bien intencionado.

Para el operador se marca lo siguiente:

1.-Gafas de seguridad. Cualquier lente de seguridad de plástico o de vidrio es opaco al haz laser del equipo de dióxido de carbono.

2.-Personal autorizado. Las personas que operen el sistema deben estar capacitadas para ello y adiestradas en las medidas de seguridad que se han mencionado.

3.-Precaución. El laser y el sistema se deben de manejar con bastante precaución y hacer a un lado la "alta experiencia" del operador.

3.4. Elementos del sistema laser .

Los sistemas se pueden desglosar para su apreciación en partes componentes, tales como:

- a.-El laser. Descrito anteriormente.
- b.-La base. Debe ser robusta y sostener debidamente tanto el laser como las piezas de trabajo.
- c.-Eliminación de vapores. Los equipos de extracción son importantes en casi todos los sistemas, ya que eliminan los vapores producidos por los materiales atacados por el laser.
- d.-Trayectoria del haz. El arreglo para la salida del haz también comprende componentes necesarios para que este llegue a la superficie de trabajo. Los componentes en su mayoría son estandar y ajustan entre sí. Dentro de estos componentes el haz viaja en forma segura, crea una estructura rígida y minimiza vibraciones del haz.
- e.-Cubierta. Retiene:
 - I) Los vapores.
 - II) La energía del laser reflejada.
 - III) La maquinaria en movimiento.

A menudo se coloca una ventanilla de plástico acrílico o policarbonato transparente, materiales que absorben la mayor parte de la radiación no colimada y advertirán oportunamente si un haz colimado o concentrado se ha reradiado en alguna forma de humo o comenzando a arder.

f.-Controles del sistema. Los controles del sistema deben estar concentrados en un sitio donde el operador pueda manejar el laser y el dispositivo de manejo de las piezas de trabajo. Muchos sistemas concentran los controles del laser y del sistema en un solo lugar pues no es conveniente el desplazarse de un sitio a otro.

3.5. Mención de algunos accesorios.

Durante estos años se han desarrollado muchos accesorios para dirigir eficazmente el haz hacia el dispositivo de

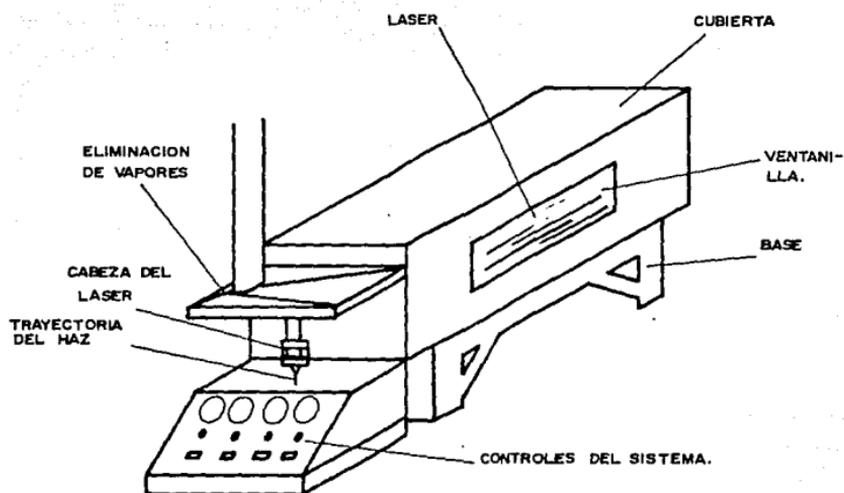


FIG. 3.7. ELEMENTOS DE UN SISTEMA LASER.

manejo de las piezas de trabajo. La mayoría de tales accesorios fueron concebidos durante el diseño de un sistema en particular, y en la actualidad se puede adaptar fácilmente a otros sistemas.

Así tenemos cabezas de enfoque fino (dispositivo de sostén del lente para entocar en incrementos muy precisos), cabezas de enfoque de peso ligero (dispositivos de sostén que pueden enfocar mediante anillo de cierre micrométrico que permite volver fácilmente a enfoques anteriores), divisores de haz estándar, lentes giratorias, codos, colimadores (ensancha o contrae el haz), boquillas, tubos estándar, sujetadores y anillos para ajustar. Existen muchos otros accesorios que fueron creados para aplicaciones especiales; entre ellos figuran componentes ópticos y sujetadores, anillos especiales, codos y tubos telescópicos, gran variedad de placas acopiadoras y ajustes de los ejes X, o X y Y, para asegurarse que el sistema de un usuario de laser podrá incluir componentes de conducción del haz que fueron ya probados.

3.6. Economía del laser.

Los aspectos económicos de la operación de un laser deben ser investigados a fondo antes de emprender un proyecto. Los costos representativos dados a continuación se refieren a una máquina para tratamiento térmico de ejes (las cantidades se encuentran en dólares). Un análisis de costo completo ocuparía varias paginas, por lo que sólo se muestran puntos relevantes.

El sistema es un laser de CO₂ de 525 watts de un solo haz. Un laser de 525 watts y cuatro haces tiene aproximadamente el mismo costo mientras que uno de 150 watts costaría aproximadamente la tercera parte.

Los costos totales por hora indican que los servicios públicos no son un factor de peso en el análisis de costos. Cualquier sistema que no tenga recirculación de gas tendrá costos cuatro o cinco veces mayores que los obtenidos aquí.

A.-Gas.

2.8 pies cúbicos/hora
a 0.17 dólares/pie cúbico
= 0.48 dólares

B.-Electricidad.

12 kilowatts/hora
a 0.3 dólares/kilowatt-hora
=0.36 dólares

C.-Agua.

200 a 400 galones/hora
a 0.08 dólares/hora
=0.08 dólares

D.-Mano de obra.

Los costos de mano de obra varía de una fábrica a otra y de una ciudad a otra. Tomando el costo promedio de una persona de capacidad media dedicada 3/4 partes del tiempo de máquina. Como la máquina es automática, no se necesita operador de tiempo completo.

Salario 3/4 hora	\$ 5
Utilidades 40%	\$ 2
Costos indirectos 200%	\$ 10

	\$ 17

E.-Costo del equipo.

La máquina para tratamiento térmico cuesta 150,000 dólares, incluyendo un número razonable de partes de repuesto. Se calculan 10,000 dólares mas para la ampliación de los servicios (agua y electricidad), capacitación y costos de ineficiencia inicial. Considerando una depreciación lineal en 5 años, el costo anual será de 160,000 dólares divididos entre 5, o sea 32,000 dólares. Si la máquina se va a usar dos turnos, o sea 4,000 horas al año, el costo del equipo es de 8 dólares la hora.

El costo total por hora de operación es:

Servicios	0.92 dólares
Mano de obra	17.00 dólares.
Equipo	8.00 dólares

	25.92
	Dólares por eje.

Ejemplo de análisis de costo.

Un eje común podría tener 12 pulgada de largo y 0.325 pulgadas de diámetro, con superficies de apoyo. Este eje

típico puede ser tratado en 14 segundos, incluyendo el posicionado bajo el laser y la translación. Aplicando un factor de eficiencia del 90% para tener en cuenta los tiempos muertos, el mantenimiento preventivo, la hora del café y la preparación del equipo, la cantidad de ejes tratados por hora será (en 3600 segundos) $(0.8 \text{ de eficiencia} / 14 \text{ seg por operación}) = 205 \text{ ejes por hora}$. Esto da un costo de $25.92 / 205 = 10.13 \text{ dólares por eje!}$

El análisis hecho indica que los sistemas laser pueden competir económicamente con los métodos actuales de producción. Aparte del análisis, el eje tratado termicamente con laser puede ser hecho de un acero menos costoso, por ejemplo el 1030, y adquirir dureza solo obtenible con otros métodos de un acero 4140 y 4150.

El cambio de material también influye en las operaciones previas de maquinado, pues el acero 1030 es más fácil de trabajar. La ventaja principal del tratamiento térmico por laser es que no produce deformaciones y los ejes no tiene que ser rectificadas después del tratamiento térmico.

4. Aplicaciones del laser .

El objetivo principal de este capítulo es dar una idea general de las distintas áreas (en la industria, en la medicina, en las comunicaciones, en la investigación, etc) en las que se aplica el laser, así como algunas de sus características.

Primeramente iniciamos con los tratamientos térmicos en plásticos y los distintos materiales plásticos que son atacados con el laser, así como aplicaciones específicas y características. Dentro de los plásticos se incluye también el tratamiento del hule.

Después de ver las aplicaciones en plásticos, pasamos a ver aplicaciones en cerámica como son: el corte y el grabado. En este inciso se incluye el vidrio.

A continuación observaremos las aplicaciones en papel y madera, para terminar con aplicaciones en metales.

Finalmente los tres últimos incisos son aplicaciones específicas que se mencionan como una forma de ampliar la información. Estos son: Un uso médico, un contador de partículas y el marcado con laser.

Específicamente se hace referencia del uso del laser de dióxido de carbono con una frecuencia de 10.6 micras. La absorción de energía a esta frecuencia es muy eficiente a materiales orgánicos y materiales inorgánicos. Los materiales orgánicos referidos son:

- Acrílicos .
- Polimetilenoóxido .
- Polietileno .
- Polipropileno .
- Policarbonato .
- Caucho sintético .
- Caucho natural .
- Piel .
- Madera .
- Lana .
- Algodón .
- Laminados unidos con resina .
- Cloruro de polivinilo (PVC) .

Los materiales inorgánicos se dividen por su coeficiente de expansión térmica:

-Material inorgánico con coeficiente de expansión térmica alto.

Vidrio.

-Material inorgánico con coeficiente de expansión térmica bajo.

Cerámica .

Cuarzo .

Alumina .

Porcelana .

Asbesto .

Mica .

Gemas naturales .

4.1. Uso en plásticos y no metales-no plásticos.

4.1.1. Tratamiento térmico en plásticos.

Los materiales plásticos que se pueden trabajar con el laser de CO₂, porque absorben energía de 10.6 micras, son:

-Acrílicos .

-Politetrafluoretileno (PTFE) .

-Polimetilenoóxido .

-Polipropileno .

-Policarbonato .

-Cloruro de polivinilo .

En estos materiales el laser de CO₂ puede:

-Cortar .

-Perforar .

-Soldar .

-Calentar .

TABLA 4.1. TRATAMIENTO TERMICO EN PLASTICOS.

TRATAMIENTO	PIEZA	MATERIAL	POTENCIA	VELOCIDAD	GRUESO (EN CORTE)	OBSERVACIONES
corse	cinturon de seguridad	nylon	500 W	8"/seg	0.05"	Corta y sella el material
corse	tejido	polipropileno 250 W		300"/min	0.015"	-----
corse	-----	poliuretano gris	255 W	28"/min	4"	lente de 10" d.f. y chorro axial de gas
corse	-----	nule espuma	275 W	40"/min	4.5"	lente de 10" d.f. y chorro axial de gas
perforacion	valvulas de aerosol	PVC	50-125 W	1-50 mseg/agujero 100-500 valv./min	0.006"-0.040"	el diametro se modifica con la distancia focal
perforacion	boquilla rociadora	acatanc	5K W	8 mseg/agujero	0.10"	lente de 1.5" d.f.
perforacion	tubo para irrigacion	polietileno	185 W	2-10 mseg/agujero	0.010"-0.020"	lente de 2.5" y 5" d.f.
perforacion	canula	polietileno	185 W	2-10 mseg/agujero	0.016"	rafaga de pulsos de 100 microseg.
perforacion	punta	nylon	125 W	500 mseg/agujero	0.006"	rafaga de pulsos de 100 microseg.
perforacion	-----	poliestireno	135 W	200 mseg/agujero	0.019"	rafaga de pulsos de 100 microseg. espesor 0.125
perforacion	lamina	nylon	135 W	1 mseg/agujero	0.005"-0.010"	lente 1.5" d.f. y chorro axial de gas. Rafaga de pulsos de 150 microseg.
perforacion	cateteres cardiovasculares	poliuretano	125 W	600 mseg/agujero	0.01"	rafaga de pulsos de 200 microseg. lente de 5" d.f. espesor 0.015"
corse selectivo	torros de cable coaxial, plano estandar y circuitos flexibles	varios	50 W	0.5-10"/seg	varios	lente de 1.5" d.f. evapora el ferro plastico y el oetal refleja la energia
perforacion de cospuestos	-----	resina epoxica	185 W	420 mseg/agujero	0.2"	lente de 2.5" d.f. chorro axial de gas. pulsos de 200 microseg. Espesor 0.05"

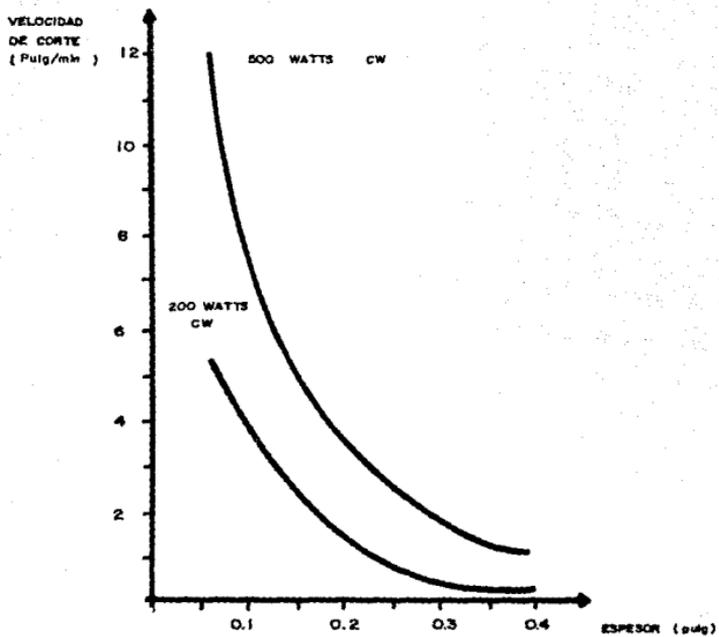


FIG. 4.1. REGIMENES DE CORTE DE PLASTICOS ACRILICOS.

4.1.2. Tratamiento de acabado de los metales no plásticos.

Tabla 4.2. Tratamiento técnico de los metales no plásticos.

TRATAMIENTO	MATERIAL	POTENCIA	LENTE D.F.	PIEZA	VELOCIDAD	ESPESES	DIMETRO DE PERFORACION
corte de	níquel	150 w	2,5"	sello de níquel para eje lubricado. (resen)	1,5 seg/sello	-----	-----
corte	silicio	165 w	2,5"	-----	2,5 seg/corte	-----	-----
corte	brasa-M	165 w	2,5"	-----	3,5 seg/corte	-----	-----
perforación	níquel	180 w	1,5"	cinta aislante	20 aseg/partor.	0,012"	0,017"
perforación	níquel	165 w	2,5" (mont. girat.)	sello extruido	100 aseg/partor.	0,1"	-----
perforación	níquel escueta	776 w	2,5" (mont. girat.)	hoja	20 asag/agujero 40 asag/agujero 60 asag/agujero 20 asag/agujero	0,05" 0,06" 0,06" 0,06"	0,06" 0,12" 0,25" 0,5"
perforación	níquel	375 w	2,5" (mont. girat.)	válvula para medición de flujo	45 agujeros/seg	0,09"	0,097"
perforación	níquel	165 w	2,5"	chupón de bicoron	20 asag/perforac.	-----	0,015"
perforación	silicio	165 w	2"	cateteras	100 agujeros/seg (ráfaga de pulsos de 200 microseg)	-----	0,035"
corte selectivo	níquel	165 w	-----	cualquier figura	20 a 25 "/seg	-----	-----

En este sistema, el corte se realiza con un rodillo de níquel en el cual se coloca una plantilla con la figura que se desea en níquel. Un detector láser de He-Ne se encarga de guiar y otro láser produce los cortes, el material se transfiere a 0,002-0,004"/seg y puede tener una resolución de retícula hasta de 100 líneas-pulg.

4.2. Tratamiento de la Cerámica .

TABLA 4.3. TRATAMIENTO EN CERÁMICA.

TRATAMIENTO	MATERIAL	VELOCIDAD	POTENCIA	OBSERVACIONES
corte	cerámica	20"/minuto	185 W con 200 pulsos/seg y pulsos de 120 microseg.	-----
marcado	cerámica CaI (óxido de aluminio)	-----	185 W pulsos de 100-300 microseg	0.25" de espesor y penetración de 20-30% del grueso
perforación	cerámica	-----	185 W pulsos cortos de 200 microseg con 500 pps	0.025" de espesor, diámetro 0.010", lente 2.5" d.f.
marcado	vidrio	3"/segundo	185 W pulsos cortos 130 microseg) y 1000 pps para ranura estrecha	espesor 0.025", penetración 0.003 - 0.004", lente de 1.5" d.f.
EL VIDRIO ES SUSCEPTIBLE AL CHOQUE TÉRMICO.				
corte	tubo /placaca de cuarzo	1.5 seg/corte	250 W	lente 1.5" d.f. con montura giratoria, corte limpio
corte	borosilicato (ampolleta médica)	1 seg/ampolleta	50 W	lente 1.5" d.f. espesor 0.014"
soldadura	vidrio y metal	-----	50 W en 2 seg	sin precalentarse
soldadura	vidrio y metal	-----	575 W	mayor sellado, precalentac arriba del límite de deformación
microsoldadura de reflejo en capas	plástico y cerámica	60 segundos	50 W	paquetes planos de C.I. sobre zonas de cobre previamente es- tañado. lente 2.5" d.f. enfoca- do o ligeramente desenfocado. Flujo axial que remueve el óxido y permite que la soldadura fluya
microsoldadura de reflejo en capas	diástico y metal	300 segundos	50 W	soldar condensadores en table- ta, lente 2.5" d.f.
microsoldadura de	retal (Cu) metal (Fe)	100 segundos	375 W	soldar terminales Co-Fe

NOTA: Algunos materiales de vidrio tal como la cal sodada deben precalentarse arriba de su límite de deformación antes de tratarse con laser.

4.3. Uso en el papel y madera .

El corte de papel con laser elimina los desechos por vaporización; se usa un laser de 185 Watts con lente de 1.5" de distancia focal y 1000 pies/minuto de velocidad de su corte.

La perforación de pequeños orificios en papel utilizado para la fabricación de cigarrros (control de la rapidez de paso de alquitran y nicotina), se puede realizar por: haz de 185 Watts, lente de 1.5" a 1000 pies/min en pulsos o en onda continua (CW) con mascarilla de perforar y laser de 185 Watts

El corte de cartón por matrices se emplea para la madera de arce laminada y contrachapada de 0.75" de espesor. Se corta con un laser de 375 Watts con lente de 5" y chorro axial de gas.

4.4. Uso en metales.

El laser CO2 es excelente para tratamiento de metales. El metal en estado sólido refleja gran parte de la energía del haz de 10.6 micras. Los metales pasan al estado líquido, si se someten a altas temperaturas que genera el haz laser enfocado (gran densidad de potencia). El cambio de estado produce un aumento de la absorción de la energía, así el laser se puede usar en los metales para:

- Soldar .
- Cortar .
- Tratar térmicamente .

4.4.1. Soldadura de metales con laser.

Para soldar los metales, se requiere que el laser tenga una alta densidad de potencia para producir el baño de metal fundido. Esto se logra mediante:

1.-Onda continua (CW).

a)Aumentando la potencia de salida del laser.

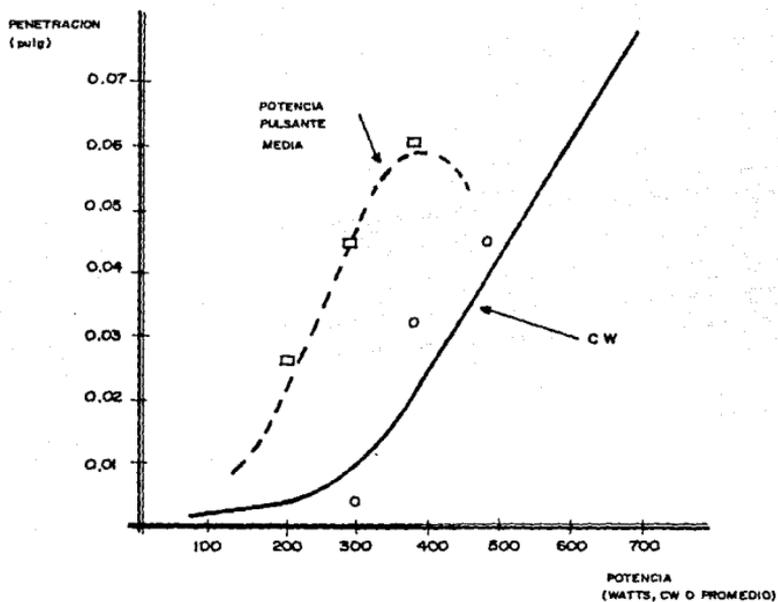


FIG. 4.2. SOLDADURA. PENETRACION PULSANTE COMPARADA CON LA CW CON CORDON DE SOLDADURA EN PLACA METALICA. VELOCIDAD DE SOLDADURA 30 pulg/min.

b) Concentrando el haz en una lente de muy corta distancia focal.

2.-Onda pulsante.

Como ejemplo de estas dos formas, tenemos:

El laser de onda continua (CW) a 575 Watts, con distancia focal de 2.5" o menos es utilizado para soldar metales. El haz se concentra en un círculo (mancha) de 0.005" de diámetro.

El laser de onda pulsante intensifica su energía. En pulsación intensificada el laser permanece definido, formandose un cavidad en el material y produce evaporación. Cuando la potencia frontal disminuye, la evaporación desaparece y el material fundido llena la cavidad.

El tiempo típico para soldar es de 3 a 6 milisegundos.

En la figura 4.2. se compara la penetración de soldadura pulsante contra soldadura CW en un cordón de soldadura en placa metálica con una velocidad de soldadura de 30"/min.

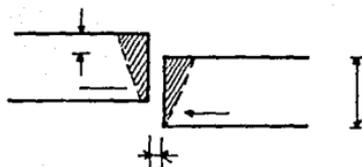
En el caso de corte, se lleva al metal a estado líquido y se vaporiza utilizando un chorro de gas auxiliar que da un acabado liso al corte.

En los gases que se pueden utilizar, de acuerdo al nivel de potencia, se cuenta con:

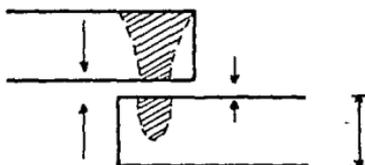
- Gas reactivo (oxígeno). A niveles de potencia bajo.
- Gas inerte (argón o nitrógeno). A niveles de potencia altos (modo pulsante).

Otros gases empleados son:

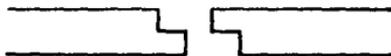
- Argón. Gas protector en modo CW, pero se ioniza en alta densidad de potencia, como en el caso de haz pulsante.
- Helio o Helio-Argón. Atmósfera protectora con los equipos laser operados en modo pulsante.



a) SOLDADURA A TOPE. LOS BORDES DEL MATERIAL NO NECESITAN BISELARSE.



b) SOLDADURA A SOLAPA. SE MANEJA PENETRACION TOTAL O PARCIAL, SON IMPORTANTES LOS BORDES A ENSAMBLAR.



c) SOLDADURA EN BRIDAS. SE REQUIERE DE BORDES RECTOS Y EN ESCUADRA.

FIG. 4.3. TECNICAS BASICAS DE SOLDADURA EN METALES.

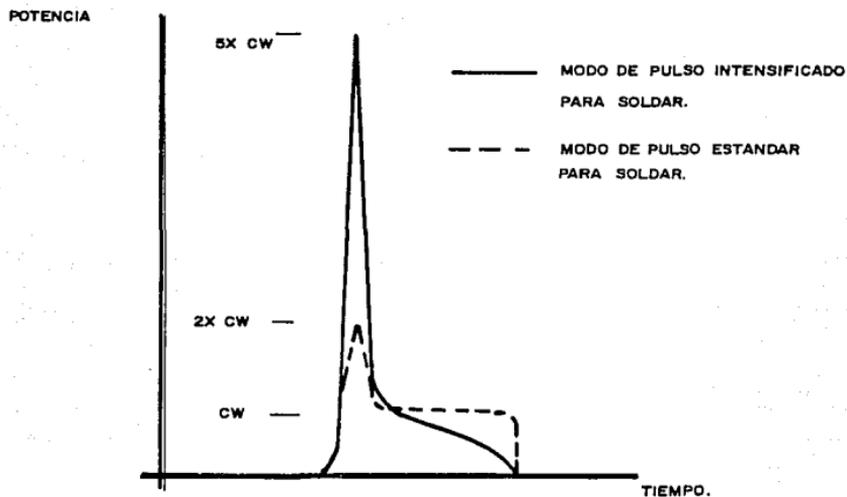


FIG. 4.4. DIAGRAMA DE MODO INTENSIFICADO.

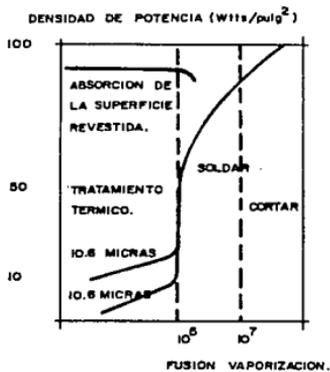


FIG. 4.5. POTENCIAS USADAS EN METALES.

TABLA 4.4. POTENCIAS USADAS EN SOLDADURA

MATERIAL 1	MATERIAL 2	TIPO DE SOLDADURA	POTENCIA	ATMOSFERA	TIPO DE BARRA	LENTE	VELOCIDAD
acero inox 416	acero inox 316	solara	375 W	helio	pulsante 100 pps de 4 asq	5"	0.045" a 30"/min
acero inox 347	acero inox 347	tapa	575 W	helio	pulsante 100 pps de 4 asq	5"	0.025" a 30"/min
acero laminado en frio	acero inox 410	solara	575 W	---	pulsante 100 pps de 5 asq	2.5"	0.05"
acero laminado en frio	niquel	tapa	575 W	---	pulsante 100 pps de 5 asq	2.5"	0.06"
niquel alto contenido	niquel bajo contenido	brida	375 W	---	pulsante 50 pps de 4 asq	2.5"	0.02" a 30"/min
acero niquelado laminado en frio	acero niquelado lacinado en frio	brida	375 W	---	pulsante 30 pps de 1 asq	2.5"	0.05"
acero inox	acero inox	sin puntos	575 W	---	pulsante 300 asq	2.5"	---
acero inox jalado	acero inox delgado	tapa con punto	125 W	---	pulsante 4 asq	2.5"	---
niquel delgado	acero inox	tapa con punto	375 W	---	pulsante 12.0 pps de 20 asq	2.5"	---

En la soldadura de metales se utilizan tres técnicas básicas (ver figura 4.3.):

- a) Soldadura a tope. En esta técnica, los bordes del material no necesitan biselarse.
- b) Soldadura a solapa. Se maneja penetración total o parcial, son importantes los bordes a escuadra.
- c) Soldadura en bridas. Se requiere de bordes rectos y en escuadra.

En la figura 4.4. se presenta la comparación entre el modo de pulso estándar y el modo de pulso intensificado, donde se observan sus características básicas para soldar.

En la figura 4.5. se realiza una separación de las densidades de potencia necesarias para corte, soldadura y tratamiento térmico, que nos permitirá seleccionar la densidad adecuada a lo que se desea realizar.

4.4.2. Corte en metales.

En el corte de metales se utiliza un chorro axial de oxígeno para producir el corte. El corte con laser es de 0.04" de apertura en materiales hasta de 0.375" de espesor. El corte se opera con CW, aunque a veces se utiliza el modo pulsante para minimizar el calor. En la tabla 4.5 se observan las potencias utilizadas para corte de algunos materiales .

TABLA 4.5. CORTE DE METALES.

MATERIAL	POTENCIA LASER	LENTE	MODO DEL LASER	CHORRO	OBSERVACIONES
Acero revestido de plomo 0,0005" de espesor.	50 W	2,5"	Cw a 30"/min	-----	-----
Acero revestido de plomo 0,0005" de espesor)	100 W	2,5"	Fulsante 150pps 200 microseg. a 30"/min	-----	Mejor acabado que el anterior ya que el plomo no lo afecta el calor.
Acero dulce de 0,157" de espesor.	575 W	2,5"	Fulsante 150pps 200 microseg. a 40"/min	de oxigeno de 0,02- 0,05" de diametro -----	-----
Titanio	375 W	2,5"	Fulsante 150pps 200 microseg. a 100, 200 y 350 pulg/min	oxigeno	El titanio es de temperatura de ignicion baja y reacciona fuertemente con oxigeno

La facilidad de trabajo en el corte con laser auxiliado por oxigeno se puede dividir por los materiales en 3 grupos:

FACILIDAD DE TRABAJO	MATERIALES
Buena	Aleaciones de titanio Aleaciones de Zirconio Aceros comunes al carbono y aleaciones bajas
Regular	Acero inoxidable
Poco	Aleaciones de Niquel Aluminio Cobre

En la figura 4.6. se realiza una gráfica para el corte de diversos metales donde se relaciona el espesor del material con la velocidad de corte optima.

En la figura 4.7. Se observan las diferencias de realizar corte con oxigeno y cortes con arco de plasma en los metales.

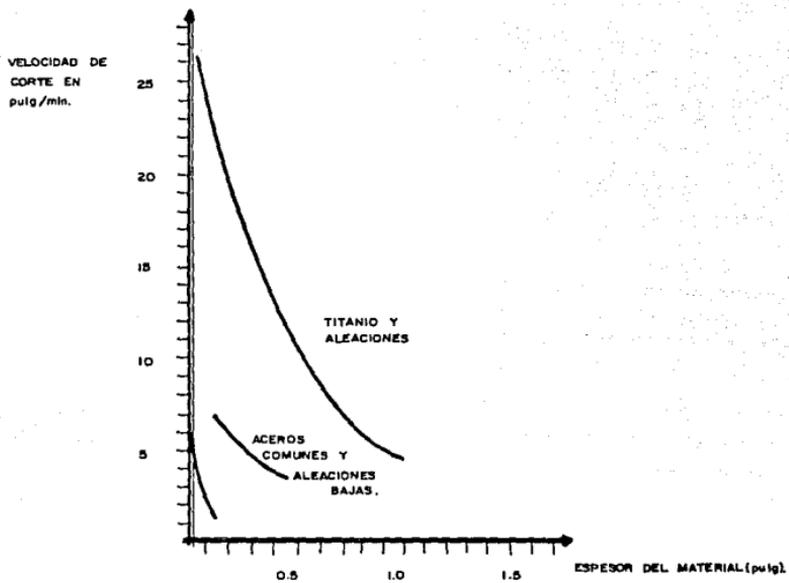
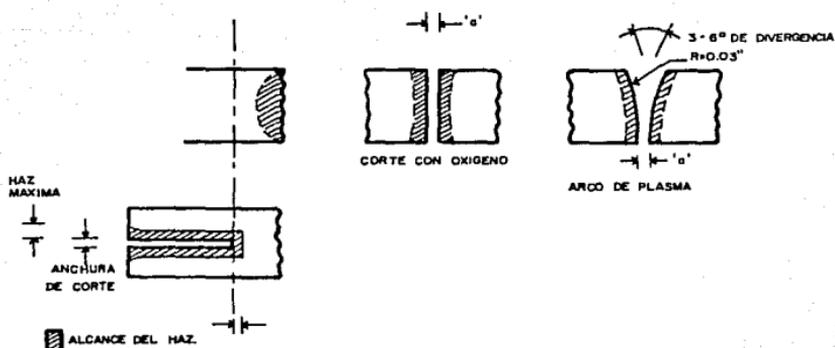


FIG. 4. 6. RELACION ENTRE ESPEJOR Y VELOCIDADES DE CORTE EN METALES.



CORTE DE METALES

	LASER	OXIGENO	ARCO DE PLASMA
Haz	0.01-0.03	0.250	0.1
Corte 'a'	0.035-0.055	0.080	0.312
EMA	0.05	0.375	0.2

HAZ- ZONA AFECTADA POR EL CALOR.

EMA- TOLERANCIA DE MAQUINADO EN BORDE.

FIG. 4.7 CARACTERISTICAS DEL CORTE EN METALES, CON LASER Y PLASMA.

4.4.3. Tratamiento térmico de metales.

El laser aplicado a superficies metálicas imparte textura al material debido a sus características, ya que el laser transforma la superficie a estado sólido rápidamente y esto da como resultado una distribución uniforme del material.

Un ejemplo de esta técnica es la aplicación de laser a acero inoxidable para darle textura, es el siguiente:

MATERIAL	POTENCIA DEL LASER	MODO
Acero inox.	185 watt	100 PPS de 300 microseg.

Uno de los principales objetivos del tratamiento térmico es el endurecimiento por transformación, donde el material se calienta por debajo de su temperatura de fusión (pero sobre la temperatura de transformación), templarlo y solidificarlo, distribuyendo el carbono del material uniformemente.

Las superficies del material deben pasar previamente por un proceso de revenido y se reviste con pintura a base de carbono o fosfatos de manganeso, debido a que los metales son muy reflectores del haz laser, aumentando su absorción.

A continuación se realiza un listado de posibilidades que se tienen con los metales al aplicar el laser.

MATERIAL

-Acero dulce bajo en carbono (0.03 o menos)
1010, 1015, 1020

-Acero dulce contenido medio y alto de carbono
1033 o mas: 1020, 1040, 1050, 1060, 1080, 1095

-Aleacion baja-alta resistencia martensitico endurecido con ferrita y bajo en carbono 1340, 4063, 4120, 4320, 4340, 4620, 4820, 5140, 5150, 6150, 8620, 8650, 8740

-Acero para herramientas H24, M30, H2, T7

-Acero inoxidable

1. Austeniticos
Crooniquel 18-8, 302, 304, 316, 317

2. Martensiticos.
Croco endurecible 17-4, 17-7, 15-7, AM350, AM355, 403, 420, 414, 410, 430

3. Ferriticos 405, 430

-Superaleaciones
A286, 57, Incoloy 901
W545, AM35700, Multimet
N-15b, refractaloy 20
SS90, 19-9DL

-Metales pulverizados F0010F, FX2010T, SS410H, 99Fe1C, 29Fe20Cu1C

-Metales fundidos

1. Hierro fundido gris
Grado 20 ferriticos
25 30
40 0 Perliticos
60

2. Hierro fundido de aleacion
Mechanine. Ni resist.
Niduro . Nodular
Hi al Cr. Maleable
Duriron
Sisal

CARACTERISTICAS

-No puede tratarse termicamente, solo se limita a piezas con problemas de distorsion

-Bueno para el tratamiento termico no requiere un acero de aleacion

-Los elementos de aleacion influyen en la posibilidad de endurecer el acero

-Muy tratables termicamente

-No pueden ser endurecidos termicamente

-Responden al tratamiento termico

-No se pueden tratar termicamente

-Se pueden tratar termicamente siempre que haya carbono presente

-Dificil , pero pueden tratarse termicamente

-Si no hay perlita, no hay tratamiento termico , el grado de endurecimiento depende de la cantidad de perlita

-Tambien depende de la cantidad de perlita

MATERIAL

CARACTERISTICAS

3. Hierro fundido ma-
leable

Ferricos 32510
35018

Perliticos 45010,
45007, 48004, 50067,
53004, 60002, 80002

4. Hierro nodular
(Hierro esferoidal)
o ductil

90-55-06
60-40-1E

100-70-03
120-90-02

Resistente al calor
austenitico

-Las estructuras perliticas se pueden
tratar termicamente

-Las estructuras ferriticas no se pueden
tratar termicamente

A continuación se dan algunos ejemplos de aplicación laser en tratamiento térmico de metales:

MATERIAL Y PIEZA	POTENCIA DEL HAZ	LENTE d. f.	PENETRACION DEL HAZ LASER
Eje de acero 1060 de 0.375"	375 W	2.5"	0.02" a 9"/min
Eje de motor Acero al carb. 1050 75"	375 W	2.5"	0.015" a 5"/min
Trinquete de freno de mano	375 W	2.5"	0.01" a 21"/min

4.5. Usos medicos.

En el area médica también se utiliza el laser. Las características del laser lo hacen una herramienta muy útil dentro de la medicina. El laser es aplicable en la mayoría de las partes del cuerpo humano. Se utiliza en cirugía plástica: realiza cortes exactos y limpios de las partes adecuadas y formas necesarias en la construcción o corrección cutánea; en dermatología es capaz de eliminar células muertas (lunares) y otros problemas dermatológicos; en ginecología realiza diversas intercuraciones en el área genital; en Ortotorinolaringología actúa en problemas de los oídos, la nariz y la garganta; en Pediatría actúa rápidamente para evitar los problemas que implica trabajar con niños; en Urología también tiene sus usos como el caso de la aplicación de laser para la eliminación de calculos renales, bombardeandolos hasta despedazarlos a dimensiones que hacen posible su eliminación por vía normal; en el sistema circulatorio, mediante fibras opticas introducidas en venas y/o arterias, es posible despedazar coagulos que producen problemas circulatorios. así como también se utiliza el laser para atacar el colesterol al limpiar las venas y/o arterias de residuos grasos depositados en ellas; en la Oftalmología se realizan cortes en el iris para eliminar imperfecciones de córnea, siendo también útil para el caso de cataratas y otras enfermedades del ojo. En el caso del cáncer, el laser se encarga de realizar cirugía en la parte afectada dejandola libre de avance de la enfermedad, destruye células cancerosas en forma selectiva a través de algún reactivo químico.

En conclusión, el laser representa en la medicina una lista numerosa de aplicaciones, la cual continua alargandose día con día debido a las características propias del laser que representan una ventaja para la medicina.

Algunos de los sistemas comerciales utilizados en el área medica son descritos a continuación.

4.5.1. Laser optamologico CILAS 201.

-Laser de fotocoagulación.

El laser optamologico CILAS201 es del tipo de laser Nd:YAG. La idea original de utilizar el laser en optamologia viene de los trabajos de Meyer Schwickeratt en Alemania en 1950, quien tuvo la idea de utilizar energia luminosa para reemplazar la termocauterización y electrocoagulación.

La energía luminosa es de hecho transformada en calor cuando es absorbida por una zona de la retina con un nivel de pigmentación previo. La transparencia de envoltente ocular permite una acción directa de luz sin apertura quirúrgica del globo ocular.

El uso de haz laser de optamología comenzó en 1963 cuando Zweng probó el primer laser de Rubí en California. El factor decisivo fue el uso de Argón por Francis L. Esperance de Nueva York en 1968.

El efecto inicial es el incremento termico causando una quemadura, la cual produce una adherente atrópica que deja cicatriz, la cual es retractible en ciertos casos. Esta cicatriz característica es la que a producido un tremendo desarrollo en el uso del laser en esta rama.

Un nuevo tipo de laser condujo a una beneficiosa revolución en 1980. Lasers que permiten la practica de la cirugía en una sección endocular sin inserción de algún instrumento y en consecuencia sin necesidad de abrir el globo ocular.

-Laser de fotoseccionado.

Este tipo de aplicación se basa en los trabajos de Krasnov de la Unión Sovietica, Aron-Rosa en Francia y Fankhauser en Suiza.

El principio es totalmente distinto: un pulso laser de muy alta potencia, de algunos megawatts, muy corto -de algunos picosegundos-, enfocados en un muy pequeño punto -40 microns- es capaz de formar un microplasma, el cual llega a generar una onda de choque.

La cantidad de energía es muy ligera -algunos milijoules- y es una onda de choque que se usa para seccionar o separar los tejidos intraoculares.

La densidad de potencia en el punto focal de un laser YAG es tal (de 100 Gigawatts hasta 1000 Gigawatts/centimetro cuadrado) que el campo eléctrico es capaz de extraer electrones desde la capa periférica de los átomos. Así, la envoltente es ionizada, creandose el plasma el cual es rápidamente dilatado asemejanoo a una microexplosión. La onda de choque que esto produzca deberá de seccionar o romper los tejidos intraoculares.

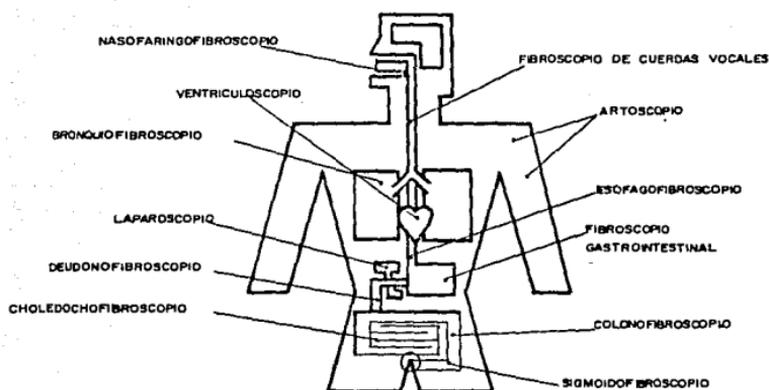


FIG. 4.8. PARTES DEL CUERPO HUMANO QUE PUEDEN SER OBSERVADOS O TRATADOS CON ENDOSCOPIOS DE FIBRA OPTICA.

Puesto que la emisión laser es extremadamente corta, y además localizada en el espectro infrarrojo invisible, las unidades laser se equipan con un sistema de mirilla exacto formado de la intersección de varios rayos laser rojos de He-Ne. La observación y mira se obtienen mediante un biomicroscopio especialmente adaptado para optamología, normalmente llamado lámpara de apertura (Slit lamp).

Las modernas técnicas para extracción extracapsular de los lentes cristalinios, en una primera implantación intraocular, sustituyen el lente cristalino, por cápsulas. Sin embargo esta cápsula se opaca en un segundo periodo, causando reducción de la visión, por lo que se hace necesario realizar una nueva intervención. El laser YAG permite aperturas ambulatorias, ya sea que el ojo tenga un implante o no.

Los fragmentos de lentes cristalinios que quedan en su lugar después de unas cataratas traumáticas, la extracción de cataratas congénitas u operaciones incidentes, se llegan a opacar. El laser YAG permite realizar aperturas en estos fragmentos opacos.

Las adherencias son desarrollados entre dos o más de las siguientes estructuras: Córnea, iris, retina, lente cristalino, cuerpo vítreo y tejido intraocular debido a efectos posteriores de inflamación de ojo enfermo o complicación de cirugía. El laser YAG realiza seccionado.

En la iridiotomía es muchas veces necesario seccionar el iris. Cuando se tiene un bloqueo o potencial existente que evita el flujo de humor acuoso de la pupila, una iridiotomía remueve este bloqueo, se usa en el tratamiento de iris con protuberancia, pero principalmente en la prevención de glaucomas serios. Un segundo tipo de iridiotomía es el tratamiento de la ascensión de pupila, donde el iris es progresivamente empujado hacia una córnea traumática no cicatrizada (después de una cirugía), donde el efecto en la visión es muy severo. En estos casos es posible reformar la pupila al eje ocular.

Las ventajas que ofrece el uso del laser YAG en la optamología son:

- Mejora el confort del paciente (y del practicante), el tratamiento es ambulatorio, sin sufrimiento, no requiere anestesia ni tampoco hospitalización.
- Elimina los riesgos de infección enlazados con el

instrumental quirúrgico con la apertura del globo ocular.

-La posibilidad de evitar el glaucoma agudo.

La ausencia de cuidados post-quirúrgicos permite la consideración de prevenir campañas de altas áreas endémicas.

La longitud de onda de este sistema equipado con laser YAG es de 1064 nm con conmutación Q por absorción de tipo sólido saturable y pulsos de 10 ns de duración.

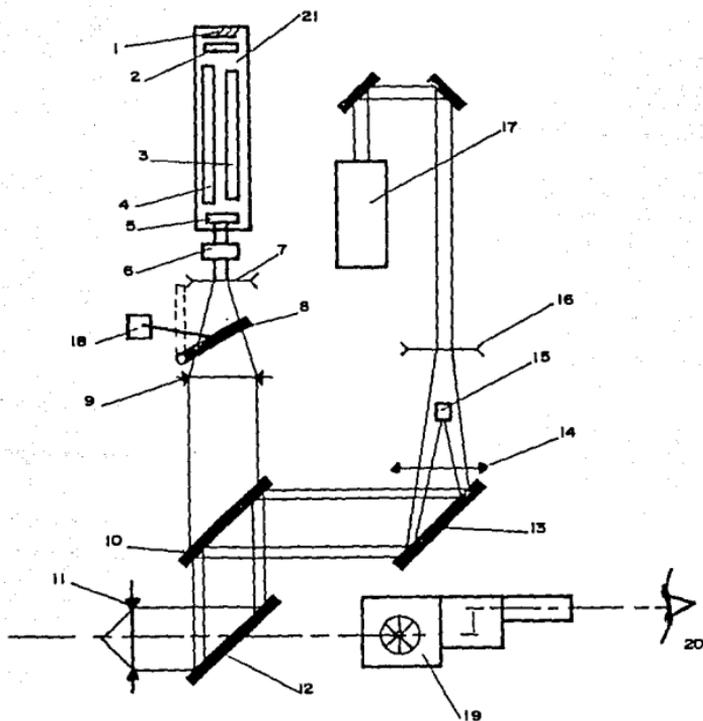
4.5.2. Laser CILAS CM 25 de CO₂.

Los sistemas laser CM 25 están diseñados para utilizarse en despachos con pacientes externos y facilidad ambulatoria, y en hospitales. El sistema está pensado para utilizarse libremente en aplicaciones tales como dermatología, ginecología, otorrinolaringología, cirugía plástica, pediatría y urología.

Como ya sabemos, el laser CO₂ trabaja a una frecuencia de 10.6 microns y es un rayo invisible. La energía del laser es absorbida instantáneamente por el agua o fluidos en contacto, y por policarbonato y materiales plásticos. La energía del laser CO₂ causa una reacción térmica en tejido blanco o materiales en contacto. El laser CO₂ puede ser reflejado por superficies brillantes o absorbido por superficies oscurecidas. La luz laser de CO₂ puede ser enfocada con lentes de acuerdo al uso que se le da, en aplicaciones de cirugía. Mas allá del punto focal el rayo laser se difunde (la porción de difusión depende sobre el tamaño de mancha enfocada de la lente).

Este sistema tiene una potencia de 0-25 watts, sus aplicaciones tienen un número de consideración, ya que permite cortes limpios en tejido vivo, coagulación instantánea, rápida cicatrización, laceración al instante de corte, puntos exactos de corte, etc.

Otro sistema similar a este, pero mas sofisticado, es el ERCELASBO CO₂ también de la empresa CILAS del cual ya describimos sus características en la sección 1.8. Este sistema referido también es de uso médico.



- 1.- ESPEJO RMAX.
 2.- DISPARADOR.
 3.- BARRA LASER.
 4.- LAMPARA DE DESTELLO
 5.- HOJA SEMIREFLECTORA.
 6.- ATENUADOR.
 7.- LENTE DIVERGENTE.
 8.- SISTEMA DE OBTURADOR.
 9.- LENTE CONVERGENTE
 10.-HOJA DE ACOPLAMIENTO.

- 11.- LENTES DE ENFOQUE.
 12.- HOJA SEMIREFLEJANTE.
 13.-ESPEJO.
 14.-LENTE CONVERGENTE.
 15.- MARCA.
 16.- LENTE DIVERGENTE.
 17.- LASER He - Ne.
 18.- MEDICION.
 19.- MIRILLA.
 20.-OJO HUMANO.
 21.-LASER YAG-Nd.

FIG. 4.9. DIAGRAMA OPTICO DE UN LASER OPTAMOLOGICO.

4.5.3. Laser fluorimétrico para mediciones medicas del metabolismo en tejidos.

El Fluorimetro laser, el cual mide el metabolismo de tejidos, es una importante herramienta de diagnóstico médico. Con la ventaja de los avanzados procesos quirúrgicos, particularmente de los trasplantes de órganos humanos, se hace necesario un monitoreo continuo del estado metabólico en periodos pre y post operatorios. Diversos métodos pueden ser ideados para monitorear el metabolismo de órganos vivos. Uno de los mas interesantes métodos es el NADH/FLAN "radio in situ", mediciones por cateterización (NADH = Reducida nicotinamide adenine dinucleotide).

Otro metodo es el fluorimetro laser, el principio de este método esta basado en la luz ultravioleta de 340 nm de absorción por la forma reducida de el NADH. La forma oxidada de esta molecula no es absorbente en esta longitud de onda. Esta absorción es seguida por una emisión fluorecente de 480 nm y esta es intensificada directamente por la acción de las moléculas excitadas de NADH. Esto permite las lecturas del estado de oxido-reducción de la muestra biológica a ser investigada.

La luz de referencia es dada por el regreso disperso del rayo laser teñido (en 586 nm de longitud de onda) en el tejido viviente investigado.

Los elementos fundamentales del fluorimetro laser son:

- Un laser de nitrogeno (337 nm). La fuente de excitación del NADH.
- Un laser de color (dye laser de 586 nm). La luz de referencia fuente.
- Fibra óptica que transporta el laser fuente al tejido viviente investigado y recolecta la luz fluorecente y la luz de regreso de referencia dispersa. La longitud de la fibra es de sobre los 5 metros y tiene un diámetro de 400 micrómetros.
- Un módulo óptico con fotomultiplicadores.
- Un microprocesador que hace el tratamiento numérico de la señal.

El modo de funcionamiento del laser fluorimétrico se muestra en la figura 4.10.

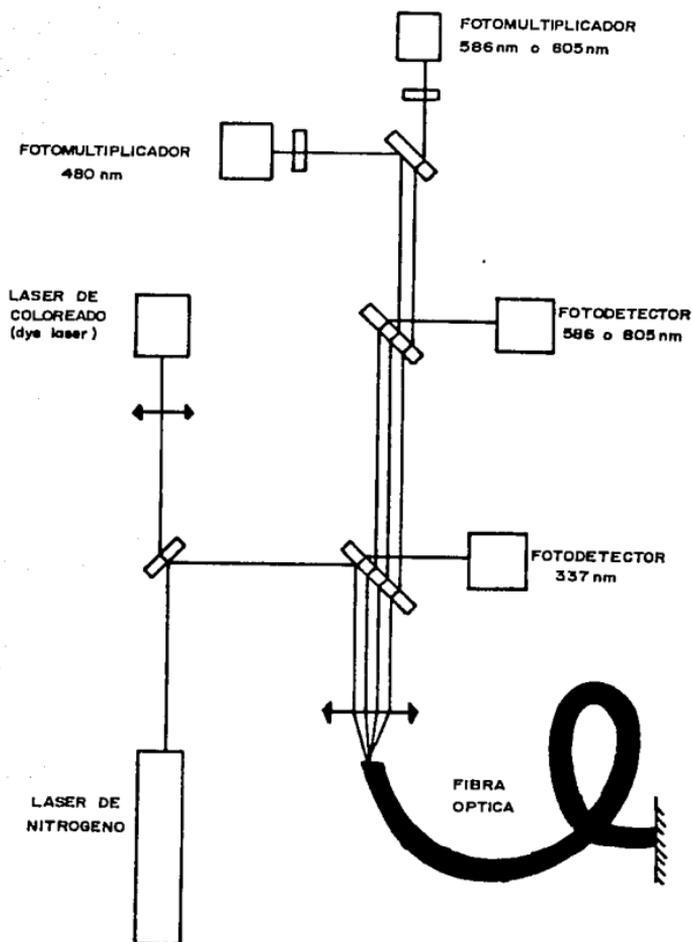


FIG. 4.10. DIAGRAMA OPTICO DEL FLUORIMETRO LASER PARA EL METODO "in situ NADH/NAD ratio" MONITOREADO.

En fin, las aplicaciones del laser en la medicina son muy amplias, por lo que el tratarlas todas nos llevaría muchos capítulos, por lo que con lo visto podemos decir que se dio la pauta sobre el tema.

4.6. Otros usos del laser .

El laser encuentra infinidad de aplicaciones dentro de distintas áreas y situaciones especiales que le permiten resolver problemas difíciles de resolver mediante sistemas convencionales (mecánicos, hidráulicos, etc.).

Un ejemplo de esto es el contador de partículas el cual realiza, con gran flexibilidad, el monitoreo de procesos, de búsqueda de anomalías y de contaminación de cámaras asépticas. Realiza la monitorización continua de puntos múltiples. Trabaja a base de sensores miniatura que pueden actuar y montarse en cualquier posición con el único requisito de tener una conexión electrónica mediante cable coaxial al procesador para su alimentación y la transmisión de datos, y una conexión a la cámara de vacío para absorber la muestra por el sensor. El contador de partículas emplea un laser de estado sólido, cuya energía de salida es controlada por realimentación lo que proporciona gran estabilidad. Se utiliza un detector de estado sólido, y el conjunto esta prácticamente libre de mantenimiento. Los sensores son leídos por un procesador central y que puede conectarse a un procesador central IBM, por lo que el equipo se suministra comercialmente con software incluido.

Por otro lado, también existen marcadores laser los cuales pueden grabar inscripciones permanentes y legibles en materiales tales como el metal, el vidrio y el plástico. Es un sistema flexible controlado por ordenador. Muy apto para aplicaciones donde cambia continuamente la inscripción. Las inscripciones pueden ser diseñadas especialmente o normalizadas, como el código en barras. Trabaja a una velocidad hasta de 300 mm/s y utiliza un laser YAG de estado sólido o bien un laser CO₂ (apto par grabar vidrio con motivos funcionales o decorativos). El grueso de la inscripción se varía de 0.1-2.5mm tanto en superficies pulidas como bastas.

Otra aplicación más es en el área de control de instrumentos; Caso concreto: Un altímetro laser. Este altímetro se emplea en helicópteros pilotados a distancia y en vehículos donde es importante disponer de una información de altitud a baja altura. Es un dispositivo muy útil en descenso automático para el aterrizaje . Transmite estrechos

impulsos de radiación infrarroja. El margen de funcionamiento es de 0.5 a 50 metros y la precisión específica es de $\pm 1\%$ en el margen de 10-50 metros y de $\pm 0.1\%$ entre 0.3-10 metros. Tiene un peso menor de 1kg y su consumo es de menos de 10 watts para una alimentación de 12 volts.

El laser también se utiliza en equipos de análisis computarizado de imágenes, realizando un mapeo por puntos de imágenes y convirtiendo esta información a sistemas electrónicos que lo transforman en datos binarios. Se aplica también en comunicaciones transmitiendo información, ya sea mediante fibras ópticas o a través de la atmósfera. En esta aplicación, el laser presenta mejores ventajas que el transmitir por cable metálico ya que las pérdidas son menores, así como la velocidad y la fidelidad de la información son mejores. A través de la atmósfera, el laser envía información a satélites o sondas espaciales en forma directa y localizada (es decir, en un punto dado). En fin el uso del laser es muy amplio y se espera que siga en aumento ya que a cada día se crean nuevos diseños.

5. Propagación atmosférica del laser.

Desde el nacimiento de la fibra óptica, las comunicaciones a frecuencias ópticas a través de la atmósfera se han visto relegadas por la transmisión por cable óptico. La extremada dificultad que ofrece la caracterización de la propagación de señales ópticas a través de la atmósfera, sobre todo en condiciones de baja visibilidad, contrasta con el sencillo problema de ingeniería que es hoy día el diseño de enlace por fibra. Sin embargo, hay gran variedad de campos en los que la propagación atmosférica de haces laser encuentra interesantes aplicaciones. Podemos mencionar por ejemplo el radar óptico (llamado también Oadar, ladar o lidar) y los telemetros y teoloditos de laser. Pero también se han desarrollado en todo el mundo redes de datos locales a frecuencias ópticas que incorporan sistemas híbridos (atmosféricos y de fibra óptica) o puramente atmosféricos. Se tiene también el extenso campo de aplicaciones militares, desde las defensivas (lasers de alta potencia), a las comunicaciones entre puntos que cambian frecuentemente de posición.

La óptica de la atmósfera se había estudiado ya en la astronomía, primero, y después con la meteorología aplicada a la navegación aérea. Sin embargo las características de alta cromaticidad de las radiaciones laser, es decir, su alta pureza espectral, le dan un nuevo enfoque que requiere mayor resolución de frecuencia. Pero también la posibilidad de transmitir pulsos más estrechos y a mayor velocidad, obliga a un detallado estudio de la dispersión temporal de los mismos.

La propagación de ondas a frecuencias ópticas presenta características peculiares dentro del espectro electromagnético. A diferencia de los campos electromagnéticos de radio frecuencia, la atmósfera no puede asimilarse al vacío a frecuencias ópticas y milimétricas. Ello es debido a dos fenómenos. De un lado, la mayor energía de los fotones a estas frecuencias produce fenómenos de interacción radiación-materia. De otro, las menores longitudes de onda resultan comparables a ciertos fenómenos habituales en la atmósfera, por los que lo detectan y se ven afectados por ellos mediante interacciones ópticas que debemos describir como clásicas. Ejemplo del primero era la absorción de radiación, y el segundo la dispersión.

En este capítulo se pretende analizar las interacciones

entre haces laser y la atmosfera terrestre dividiendola del siguiente modo:

- 1).-Emisores y receptores. Atenuación.
- 2).-Refrección y turbulencias: efectos no lineales; radiación de fondo.

Así también, se abordaran las modificaciones que la atmósfera introduce sobre el haz, tanto sobre su trayectoria, como sobre su forma, y el enmascaramiento que otras fuentes de radiación pueden ejercer sobre la nuestra.

5.1. El emisor y el receptor.

Los laseres de semiconductor tienen la gran ventaja, respecto a la mayor parte de los de cualquier otro tipo, de que la modulación se realiza internamente. Esto significa que la propia señal moduladora es aplicada al laser, el cual proporciona un señal modulada. Mas claramente, la propia señal moduladora forma parte de la alimentación del laser, controlando la oscilación o no oscilación del mismo.

En los demás casos la modulación es externa, requiriendose un dispositivo electro-óptico que reciba la señal y actue como modulador. Los dispositivos electro-ópticos normalmente se basan en tres tipos de efectos:

- 1). Absorción de luz en semiconductores cuya banda de absorción se pueda controlar por una polarización eléctrica. Esto es conocido como efecto Franz-Keldysh, y se basa en la variación del "gap" (o anchura de la banda prohibida) ΔE_g en la unión p-n, debida a la polarización de la misma. La frecuencia mínima ν que es absorbida es $\frac{\Delta E}{h}$ siendo h la constante de Planck. Variando $\frac{\Delta E}{h}$ podemos conseguir que el material absorba o no la frecuencia del laser emisor, según se observa en la figura 5.1. Sin embargo tiene el inconveniente de requerir la difusión de uniones p-n en capas muy delgadas. Por otra parte requieren enfriamiento criostático, es decir, temperaturas cercanas al cero absoluto, para una correcta operación.

- 2). Efecto electro-óptico y magneto-óptico (Se denominan efecto Kerr y efecto Faraday respectivamente). Se basan en la rotación del eje de polarización de la luz mediante la aplicación de un campo eléctrico o magnético a cristales con anisotropía óptica. Si situamos un cristal de este tipo entre dos polarizadores ópticos

cruzados podemos conseguir pasar de un estado de no transmisión de luz, cuando el haz atraviesa el cristal sin cambiar su polarización, a la transmisión total, cuando el eje de polarización es girado 90 grados, y ello se logra mediante la aplicación externa de un campo eléctrico o magnético. Tiene el gran inconveniente de requerir tensiones de operación muy elevadas (miles de voltios).

3). Efecto mecano-óptico y acusto-óptico, muy usados actualmente.

Cualquiera de los métodos tienen el inconveniente de llegar a producir efectos no lineales ópticamente inducidos sobre el propio modulador, si los haces empleados son de alta potencia. Esto anota una ventaja a los sistemas láser de semiconductor, con el inconveniente que proporcionan una menor potencia.

Respecto a los receptores, se mencionará que lo más usual es emplear fotodetectores de semiconductor aunque si la señal recibida es muy débil, esto obliga a utilizar tubos fotomultiplicadores. Tampoco se tomará en consideración el ruido en recepción.

El tema de las antenas requerirá una atención especial. La antena emisora, también llamada colimador, pretende conseguir una mayor directividad del haz. La receptora pretende concentrar una mayor cantidad de energía en el receptor. Las antenas más sencillas están hechas simplemente de lentes. Sin embargo, para sistemas más finos se utilizan reflectores -espejos-. Puede comprenderse fácilmente que es mucho más simple preparar una superficie que construir una lente de grandes dimensiones de un material homogéneo. Las geometrías utilizadas son las mismas que las de los telescopios, por lo que reciben los mismos nombres que estos.

Las antenas emisoras suelen estar enfocadas al infinito con lo que, idealmente, se consigue el haz paralelo. La divergencia del haz se debe así únicamente a la difracción. Si la antena tiene un tamaño suficientemente grande respecto al del haz, la difracción está producida por la forma de éste. En caso contrario es la forma de la antena la que determina la difracción. En el primer caso son divergencias típicas del orden de miliradian (o menores) para antenas con lentes, y unas mil veces menores (o más, dependiendo del tamaño de la antena) para colimadores con espejos. Las antenas receptoras, en cambio suelen tener una cierta apertura para facilitar el alineamiento de emisor y receptor.

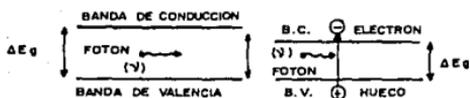


FIG. 5.1. MODULACION POR ABSORCION EN UNA UNION $p-n$. CUANDO ΔE_g ES MAYOR QUE LA ENERGIA DEL FOTON, ESTE NO ES ABSORBIDO. SI VARIAMOS LA POLARIZACION ELECTRICA, DISMINUIMOS ΔE_g , EL MISMO FOTON PUEDE SER ABSORBIDO.

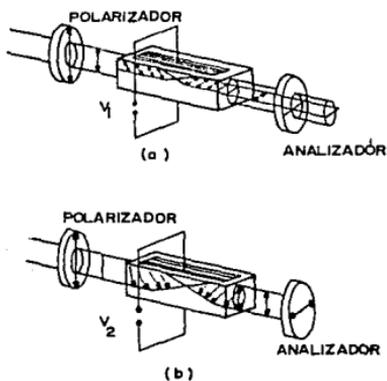


FIG. 5.2. MODULACION ELECTROOPTICA. a) A LA TENSION V_1 EL EJE DE POLARIZACION ES GIRADO 90° , CON LO QUE SE TRANSMITE EL HAZ. b) A LA TENSION V_2 EL GIRO ES DE 180° , Y LA LUZ NO PUEDE ATRAVERZAR EL SEGUNDO POLARIZADOR.

Suelen variar entre 1 y 10 miliradianes, aunque algunas veces llegan a valores tan altos para evitar la excesiva acumulación de radiación de fondo. También depende mucho de la aplicación. Hay quien prefiere enfocar directamente la antena emisora sobre la receptora, sin embargo esto no es recomendable debido a la dificultad de alineamiento a que conduce. Antenas emisoras enfocadas sí pueden ser útiles, en cambio, en sistemas militares defensivos o de guiado. Las antenas típicas se muestran en la figura 5.3. En la figura 5.4. se esquematiza el sistema completo atmosférico.

5.2. La atenuación atmosférica.

La atenuación atmosférica fue estudiada por primera vez por el físico y astrónomo Pierre Bouguer (1698-1758) y dada a conocer en su obra "Essay d'optique sur la gradation de la lumiere". Se rige por la ley que lleva su nombre (a veces conocida por la ley de Lambert), que en el caso más general se puede expresar:

$$I(r) = I_0 \exp \left\{ -\int_0^r K dr \right\}$$

donde I es la irradiancia (o densidad de potencia por unidad de superficie), I_0 la irradiancia en $r=0$, y K es el coeficiente de atenuación en nepers por kilómetro.

Si la atenuación es constante a lo largo de toda la trayectoria, la ley queda de forma simple.

$$I(r) = I_0 e^{-Kr}$$

A veces se puede dar el coeficiente de atenuación en dB/km, en cuyo caso, como se sabe,

$$I(r) = I_0 10^{-\frac{Kr}{10}}$$

La atenuación se produce al ser el aire el medio absorbente y dispersante, a diferencia del vacío. Conviene distinguir dentro de este medio dos componentes de diferente tipo. Por un lado los gases atmosféricos, y por otro los aerosoles. Denominamos aerosoles a partículas sólidas o líquidas en suspensión en un medio fluido. Así pues son aerosoles atmosféricos el polvo, partículas contaminantes, calimas, nieblas y neblinas, nubes y precipitaciones.

Son dos los fenómenos que contribuyen a la atenuación de

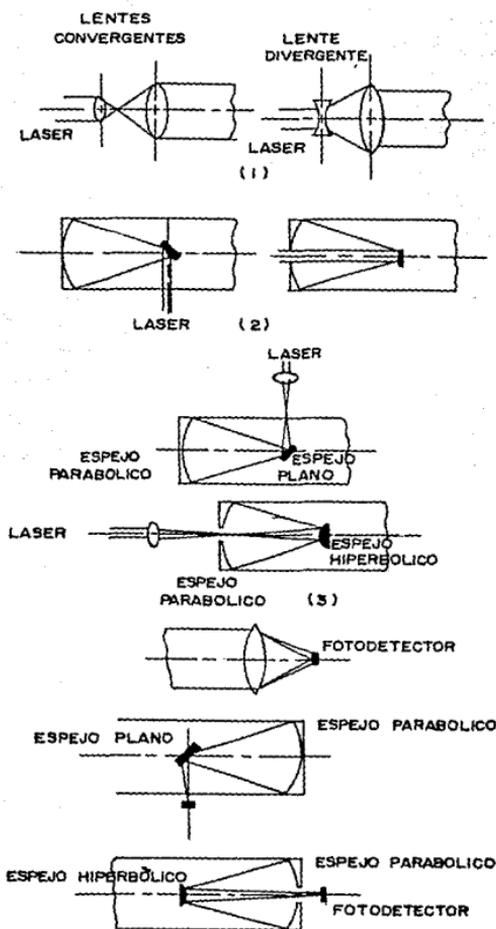


FIG. 5. 3. a) ANTENAS EMISORAS O COLIMADORES: 1. CON LENTES. 2. CON ESPEJOS PARABOLICOS. 3. HIBRIDAS (ESPEJOS Y LENTES) b) ANTENAS RECEPTORAS O CONCENTRADORES.

la señal; la absorción y la dispersión, como ya se había observado. La absorción es energía que pierde la señal y adquiere el medio de transmisión, involucrando fenómenos de interacción radiación materia. La dispersión se produce al incidir una radiación sobre una partícula de tamaño comparable a la longitud de onda. Parte de la energía se dispersa en todas direcciones contribuyendo a la atenuación. Si denominamos α al coeficiente de absorción y σ el coeficiente de dispersión, el coeficiente de atenuación será:

$$\gamma = \alpha_m + \sigma_m + \alpha_a + \sigma_a$$

donde el subíndice "m" corresponde a la atenuación debida a las moléculas de gases atmosféricos y el "a" corresponde a la contribución de aerosoles.

5.3. Absorción molecular.

De todos los fenómenos de atenuación es la absorción molecular el que tiene una mayor variación con la frecuencia. De la espectroscopia se observa que los átomos y las moléculas absorben energía en "rayas espectrales", es decir, a frecuencias muy determinadas, bien localizadas en el espectro. De su origen hemos oído que los átomos y las moléculas tienen estados energéticos discretos, cuantizados. Podemos recordar que un electrón de un átomo que se encuentra en una órbita más alejada del núcleo tiene más energía que otra cercana al núcleo, y que puede pasar de una a otra si el átomo emite o absorbe un fotón. La frecuencia de la radiación emitida o absorbida ν será tal que $h\nu$ (siendo h la constante de Planck) coincida con la diferencia de energía que hay entre los dos posibles estados del átomo correspondientes a dos posiciones del electrón.

Generalizando, diremos que la energía de la molécula de un gas, si prescindimos de su movimiento de translación por efecto térmico, tiene una energía debida a la posición de las partículas del núcleo y a la masa de estas, y otra debida a la configuración electrónica, o sea a la posición de los electrones en las capas de la corteza. Además existe una energía cinética de vibración de unos átomos con respecto a otros y otra de rotación de la propia molécula:

$$E_{\text{molecular}} = E_{\text{nuclear}} + E_{\text{electrónica}} + E_{\text{vibración}} + E_{\text{rotación}}$$

Cualquiera de ellas puede variar en forma discreta. Por ejemplo la energía electrónica aumenta a cierta cantidad cuando un electrón pasa de una capa electrónica a otra más externa, y ello lo hace absorbiendo ese aumento de energía en

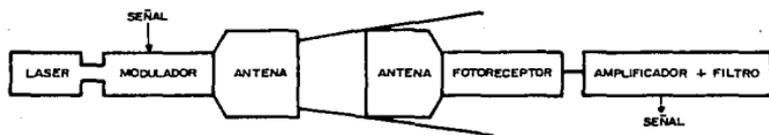


FIG. 5.4. SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICAS ATMOSFERICO. EL MEDIO DE TRANSMISION PUEDE SER SOLO EL AIRE O PUEDE INCLUIR UN OBJETIVO EN EL QUE SE REFLEJA Y REGRESA HASTA EL RECEPTOR.

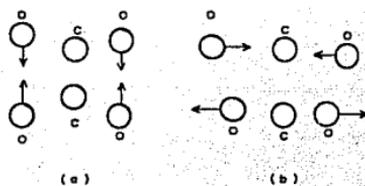


FIG. 5.5. DOS DE LOS MODOS DE VIBRACION DE LA MOLECULA DE CO_2 .

forma de fotón de luz visible. Pero una molécula de CO₂, por ejemplo, puede pasar del estado de vibración descrito en la figura 5.5.a. al descrito de la figura 5.5.b. aumentando su energía en una cantidad fija, para lo cual debe absorber un fotón infrarrojo. El mecanismo general de absorción se esquematiza en la figura 5.6.

En la atmósfera se produce absorción en las siguientes bandas de frecuencia:

-Microondas. (a partir de 10 GHz), debido a variaciones en el estado de rotación de las moléculas, fundamentalmente el agua, y de los spins electrónicos en la molécula del oxígeno.

-Infrarrojo, produciendo variaciones en los estados de vibración de las moléculas.

-Visible y ultravioleta, debido a transiciones electrónicas, aunque también algunas transiciones electrónicas caen en el infrarrojo próximo.

-La radiación gamma interacciona con los núcleos de los átomos.

Los gases atmosféricos y sus concentraciones relativas se indican en la tabla 5.1.

tabla 5.1. Concentraciones habituales de gases atmosféricos al nivel del mar .

<u>GASES MAS ABUNDANTES</u>	<u>CONCENTRACION %</u>	<u>COMPONENTES MENORES</u>	<u>CONCENTRACION EN PARTES P/MILLON</u>
N ₂	78.084	Ne, He	5.24
O ₂	20.946	CH ₄	1.6
		Kr	1.14
Ar	0.934	H ₂	0.5
CO ₂	0.033	N ₂ O	0.35
		CO ₂	0.07
	superior en zonas urbanas		
H ₂ O	Cantidad variable (humedad)	O ₃ NO ₂ , NO	0.601 de 0a 0.2

La mayor parte de las transiciones electrónicas de estos gases se producen en el ultravioleta (UV), por lo que la atmósfera es completamente opaca a partir de un cuarto de micra aproximadamente, y de ahí en adelante, hacia las longitudes de onda mas cortas, incluyendo rayos X y Gamma,

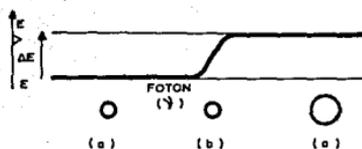


FIG. 5.6. VARIACION DEL ESTADO ENERGETICO DE UNA MOLECULA MEDIANTE LA ABSORCION DE UN FOTON: a) MOLECULA EN REPOSO; b) INCIDENCIA DE UN FOTON DE LA FRECUENCIA ADECUADA $\nu = \Delta E/h$; c) MOLECULA EXCITADA.

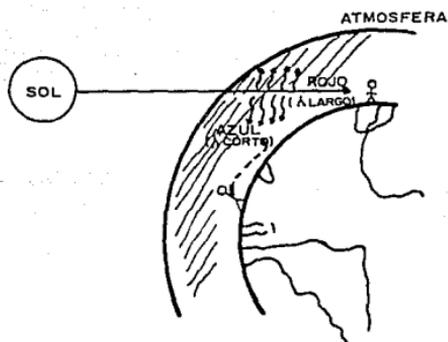


FIG. 5.7. DISPERSION MOLECULAR DE LA LUZ SOLAR.

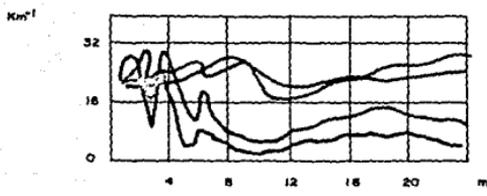
puesto que todas las moléculas los absorben. En cambio en el visible alguna pequeña banda de absorción no afecta a la transparencia de la atmósfera que a simple vista podemos observar.

Los gases más abundantes, sumando más del 99.99% de la composición total de la atmósfera, son gases monoatómicos (Ar) o cuya molécula tiene dos átomos iguales (N_2, O_2). En el primer caso resulta evidente que no hay posibilidad de vibración, y que la rotación no afecta al estado de la molécula debido a su simetría esférica. En cuanto al segundo, solo hay una posible simetría de vibración y otra de rotación que no tiene simetría de revolución. Este es una aproximación clásica del problema. La explicación puramente física es que las transiciones de estado de energía requieren un cambio en el momento dipolar de la molécula, y ni las moléculas monoatómicas ni las diatómicas homonucleares tiene momento dipolar. En consecuencia los gases más abundantes no absorben en el infrarrojo (IR), ni en microondas (M). Por esta razón, la atmósfera presenta un infrarrojo con zonas de gran transparencia, correspondiendo la mayor parte de las bandas al vapor de agua, y en segundo lugar al dióxido de carbono. En menor medida absorben el ozono, el metano, y el anhídrido nítrico entre otros. En el caso del ozono la absorción es francamente importante en las capas altas de la atmósfera, donde su concentración es más elevada debido a procesos fotoquímicos.

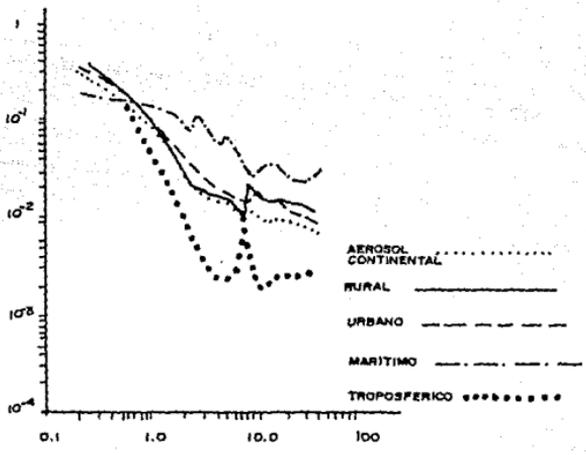
Nos encontramos pues con una atmósfera cuyo espectro de frecuencias presenta bandas opacas a la radiación, dejando otras bandas de gran transparencia, que se denominan ventanas. Más adelante veremos estas ventanas una vez analizados todos los factores que influyen sobre la atenuación.

5.4. Dispersión molecular.

Se conoce también con el nombre de dispersión Rayleigh por haber sido John William Strutt (1842-1919), tercer Barón de Raileigh quien en 1871 publicó un artículo analizando el fenómeno. Lord Rayleigh estaba interesado en la naturaleza de la luz azul procedente del cielo. Resulta bastante claro que se trata de una luz dispersa, y no producida por la propia atmósfera, desde el momento en que solo esta presente cuando hay sol (de noche el firmamento es negro, o si se quiere transparente). Lord Rayleigh supuso que la luz era una onda elástica, de acuerdo con la entonces vigente teoría del éter. Supuso que la dispersión se producía al incidir esta onda sobre partículas esféricas mucho más densas que el medio que las rodea, y de tamaño mucho menor que la longitud de



(a)



(b)

FIG. 5.8. COEFICIENTES DE ATENUACION EN Km^{-1} EN FUNCION DE LA LONGITUD DE ONDAS EN MICRAS PARA a) DIVERSOS TIPOS DE NUBES Y NIEBLAS Y b) DIVERSOS TIPOS DE CALIMAS Y NEBLINAS.

onda. Así llegó a la conclusión que la cantidad de luz dispersa de este modo sería proporcional al inverso de la cuarta potencia de la longitud de onda (o lo que es lo mismo, a la cuarta potencia de la frecuencia). De este modo la mayor parte de la luz dispersa procede del extremo de menores longitudes de onda del espectro visible (luz azul), mientras que apenas dispersa las longitudes mayores (luz roja). Podemos observar esto en la figura 5.7., en la que un observador que mira hacia el cielo en dirección distinta al sol, solo ve la luz dispersa, fundamentalmente azul. En cambio un observador que mira al sol sobre el horizonte, por ejemplo al crepúsculo, lo ve prácticamente desprovisto de longitudes de onda cortas por haber atravesado un largo camino en el seno de la atmósfera, por lo que solo le llegan las ondas más largas, es decir el color rojo. La dispersión molecular se produce cuando la corteza electrónica de las moléculas es alcanzada por una onda electromagnética y se pone a vibrar con ella. Se comporta entonces como un dipolo radiante dispersando parte de la energía en todas direcciones. Este fenómeno verifica la ley de Rayleigh, por tanto

$$\sigma_m \approx \frac{1}{\lambda^4}$$

Sin embargo del trabajo de Rayleigh nada parece indicar que tengan que ser necesariamente las moléculas quienes actúen como centros dispersores. Efectivamente la teoría de dispersión provocada por aerosoles concluye que, cuando las partículas dispersantes son de tamaño mucho menor que la longitud de onda se verifica

$$\sigma_a \approx \lambda^6$$

En la práctica, sin embargo, cuando nos referimos a dispersión Rayleigh hablamos de dispersión molecular, y aproximación Rayleigh cuando se provoca por aerosoles.

Por lo que se refiere a la transmisión de haces láser, la propia dependencia espectral de la dispersión molecular nos aconseja la elección de la frecuencia de transmisión. Si tomamos longitudes de onda suficientemente largas, la dispersión molecular será despreciable. En la práctica, la dispersión a longitudes mayores a una micra no es significativa. Por los menos acostumbrados a uso de longitudes de onda ópticas puede ser ilustrativo saber que la luz visible se extiende entre el rojo extremo, alrededor de 0.7 micras, y el violeta extremo, alrededor de 0.3 micras. La longitud de onda de una micra es considerada IR próximo.

5.5. Atenuación de aerosoles.

En el caso de los aerosoles, se suele abordar en conjunto, desde el punto de vista de cálculo, tanto para la absorción como la dispersión. Por ello simplemente se utiliza un índice de refracción complejo, cuya parte imaginaria corresponde a la contribución de la absorción de la radiación.

De acuerdo con la densidad y naturaleza de los aerosoles, estos se dividen en 3 grupos:

-Neblinas o Calimas: son aerosoles que permiten una visibilidad directa del orden de 2 o más kilómetros. Pueden ser de agua, de polvo, de origen volcánico o de origen industrial.

-Nieblas y Nubes, considerando como tales las que permiten una visibilidad directa a su través de menos de 2 Km.

-Precipitaciones: lluvia, nieve, granizo, etc. En general con partículas de mayor tamaño que la longitud de onda.

Muchos autores han intentado dar fórmulas aproximadas para describir la variación espectral de neblinas. En general corresponden a las fórmulas de tipo

$$\alpha_{\alpha} = \delta_0 (n_0 + n_1 \lambda^{-\alpha})$$

con α entre 0 y 4. Frecuentemente n_0 no es una constante, sino que se mantiene en un cierto valor para un cierto margen espectral y varía bruscamente de valor o introduce una segunda dependencia de la longitud de onda en otra zona del espectro.

Lo que si conviene observar es que casi todos los tipos de niebla y neblina tienen una zona de menor atenuación alrededor de las 10 micras de longitud de onda, mientras que la atenuación en el visible e infrarrojo próximo es más elevada. En la figura 5.8. se observan algunas curvas espectrales de coeficientes de atenuación de aerosoles en función de la longitud de onda para calimas, nubes y nieblas.

En definitiva observamos que la zona alrededor de las 10 micras es la de mejor penetración a nieblas, mientras que el visible e infrarrojo próximo es poco recomendable para transmisión a distancias medianamente largas. Por lo que se refiere a la lluvia, se ha comprobado que la atenuación tiene un espectro plano, es decir, atenúa uniformemente en todo el

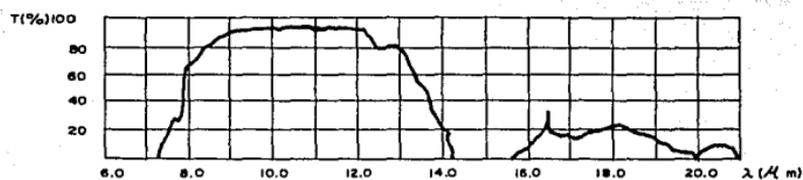
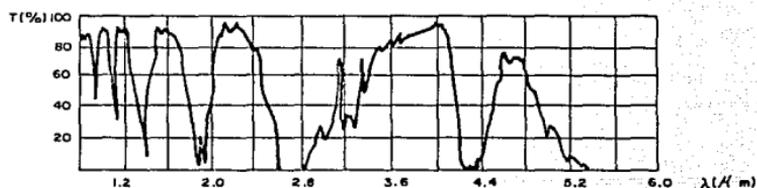


FIG. 5.9. PORCENTAJE DE ENERGIA TRANSMITIDA A UNA DISTANCIA HORIZONTAL DE 1 Km, EN FUNCION DE LA LONGITUD DE ONDA.

infrarrojo, a excepción quizás de las submilimétricas más largas, y visible, por lo que no proporciona fuentes de decisión acerca de la frecuencia más adecuada. Se suele evaluar la atenuación de la lluvia, a partir de una potencia del flujo o intensidad de precipitación:

$$\gamma_a(\text{lluvia}) = A I_p^b$$

donde dependiendo del tipo de lluvia, A varía entre 0.2 y 0.5 y beta entre 0.6 y 0.8 (cuando la intensidad de la lluvia I_p se expresa en mm/h).

Todo ello nos aconseja usar ventanas atmosféricas en el infrarrojo medio y lejano, fundamentalmente alrededor de las 10 micras si queremos evitar desvanecimientos debidos a la presencia de nieblas.

5.6. Atenuación total.

En la figura 5.7. se da el coeficiente de atenuación en tanto por ciento de la atmósfera en la mayor parte del infrarrojo. Dicho coeficiente se calcula como cociente de la intensidad transmitida entre la recibida. La curva espectral es de baja resolución. Una curva detallada ocuparía mucho más espacio. Piensese que la anchura de una línea de absorción puede ser de algún nanómetro. Sin embargo en ella pueden observarse claramente las ventanas atmosféricas, indicadas como las zonas de mayor transmisión. Los datos corresponden a un día claro (visibilidad de unos 23 Km), y los valores de temperatura, presión y humedad corresponden a los medidos en el observatorio de Barajas, España en Julio de 1979 a las 12 Hrs. Para ver la variación con el tiempo, en la figura 5.10. se da una comparación de esta curva con la que correspondería a enero de 1979 a las 9 Hrs en el IR próximo y medio. La diferencia se debe fundamentalmente a la mayor cantidad de bruma presente (visibilidad menor que de 1 Km), cuya repercusión corresponde a la envolvente que, como vemos, decrece mucho más en el RI próximo que alejado de él. Otras diferencias importantes serían la mayor cantidad de agua (más humedad) y las diferentes presiones y temperaturas, que redundan en una densidad de moléculas por unidad de volumen distinta.

El resultado de un análisis atento de todos los fenómenos presentados anteriormente revela que las ventanas más útiles son las de 3-4 micrones, con una absorción muy baja y una atenuación por aerosoles aceptable, y la de 9-13 micrones con una absorción algo mayor, pero una gran transparencia de aerosoles. La muy baja absorción del infrarrojo próximo se ve desbancada por la gran opacidad que

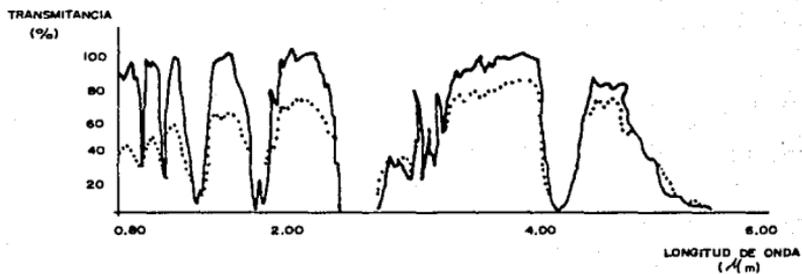


FIG. 5.10. COMPARACION DE LAS CARACTERISTICAS DE TRANSMISION PARA MEDIODIA DE VERANO (LINEA CONTINUA) UNA MAÑANA DE INVIERNO (LINEA DISCONTINUA). LA ENVOLVENTE CORRESPONDE A LA ATENUACION POR AEROSOL Y REVELA LA PRESENCIA DE UN AEROSOL MAS DENSO EN EL SEGUNDO CASO.

los aerosoles presentan a estas longitudes de onda. Para hacernos una idea comparativa, la tabla 5.2. de las atenuaciones típicas de algunos sistemas laser funcionando en diferentes ventanas atmosféricas.

Los laser de semiconductor en el infrarrojo próximo son útiles para comunicaciones a distancias cortas debido a su sencillez de modulación. Los de Neodimio fundamentalmente los de tipo YAG, se utilizan en telemetros debido a la facilidad con que pueden proporcionar un impulso aislado de corta duración. También se utiliza como topocitos y otros instrumentos similares, pero prácticamente requieren visibilidad directa sobre el objetivo. También se han usado, y se usan, para sistemas de guiado de misiles.

Los sistemas laser químicos de Fluoruro de Hidrogeno (HF) y Fluoruro de Deuterio (HD) tienen un gran interés militar debido a su alta potencia. Conviene hacer una comparación entre estos y el de CO₂ para ver las diferencias entre las ventanas respectivas. La atenuación calculada con varios tipos de bruma y para diferentes condiciones atmosféricas, esta entre 0.40 y 2.3 dB/Km para la línea R₁ de la banda 1-0 del laser de HF ($\lambda=2.90$ microns), entre 0.18 y 0.65 dB/Km para la línea P₁₂ de la banda 2-1 del laser de DF ($\lambda=3.95$ m), y entre 0.42 y 1.65 dB/Km para la línea R₀ de la banda 001-100 del laser de CO₂ ($\lambda=10.57$ microns). Vemos incluso que a visibilidades tan bajas como 2 km puede ser ventajoso usar sistemas laser en la ventana 3-4 micras, en particular el de fluoruro de deuterio (sin embargo, en el caso de nieblas mas o menos densas la atenuación se dispara en la ventana del infrarrojo medio. Puesto que los coeficientes de absorción y dispersión por aerosoles son alrededor de 20 veces mayores que para el laser de CO₂). La causa es la absorción relativamente alta de los gases al laser de CO₂ (α entre 0.1 y 0.4 Km⁻¹ frente a 0.014 o 0.015 Km⁻¹ para el DF) debida a dos motivos. En primer lugar una fuerte atenuación por el vapor de agua en toda la ventana, que puede hacer aumentar la atenuación hasta 3 dB/Km en zonas tropicales. Por otro lado, la presencia de CO₂ en la atmósfera que hace que cada línea de emisión del laser coincida con la línea de absorción en la atmósfera. Recuerdense que los espectros de emisión y de absorción coinciden.

Los sistemas laser de CO₂ utilizados para radar optico suelen ser del tipo de guiaonda. La cavidad resonante es un tubo guiaondas relleno de una mezcla de gases entre los cuales esta el CO₂. Las potencias de este tipo de laser alcanzan 40 W en modelos comerciales, y pueden pesar entre 5 y 20 Kg. Emiten varias longitudes de onda discretas entre 9 y 11 micras.

Los sistemas laser HF se suelen utilizar en investigación atmosférica más que los de DF. Tienen varias líneas de emisión entre 2.6 y 3 micras (3.4-4 para los DF), y permiten alcanzar potencias de 150 vatios cuando emiten simultáneamente todas las líneas. Ambos laser son de tipo químico, en los que el material activo se consigue a partir de una mezcla de gases mediante una reacción química que se produce en la cavidad laser. Esto les obliga a disponer de una salida de gases tóxicos. Este inconveniente unido a un peso de entre 150 y 2000Kg les hace poco atractivos para sistemas de radar.

Por último conviene tener en cuenta los diodos laser de sales de plomo, de reciente desarrollo, que puede trabajar en el infrarrojo medio y lejano (2.7 a 30 micras), cubriendo por tanto las dos ventanas atmosféricas más útiles. A la ventaja de modulación directa se une el que una adecuada selección de longitud de onda nos puede situar en las zonas de mínima absorción de las ventanas. Las potencias proporcionadas son en cambio bajas (máximo 3 mW aproximadamente) y además requieren enfriamiento criostático.

TABLA 5.2. Atenuación de varios tipos de Laser

BANDA	LASER	LONGITUD DE ONDA	ATENUACION	
			TIEMPO CLARO	NEBLA SUAVE
visible (rojo)	rubi	674 nm	1dB/Km	5dB/Km
IR proximo	semiconductor (AsGaAl)	840-950 nm	1dB/km	3-4dB/km
	Nd:YAG			
	Nd:Vidrio	1.06 micras	0.8dB/Km	3dB/Km
ventana 3-4 micras	HF	mejor linea 3.47 micras	0.2dB/Km	2dB/Km
	DF	mejor linea 3.96 micras	0.3dB/Km	2-3dB/Km
ventana 9-13 micras	CO2	mejor linea 10.4 micras linea mas intensa 10.6 micras	0.3dB/Km 0.6dB/Km	1dB/Km 1dB/Km
	semiconductor (Pb Sn Se)	toda la ventana	segun longitud de onda puede ser < 0.2 dB/Km	

5.7. Refracción de la luz.

Como ya se había mencionado, la propagación de ondas a frecuencias ópticas presenta ciertas características en el espectro electromagnético ya que, a diferencia de los campos electromagnéticos de la radiofrecuencia, la atmósfera no puede asimilarse al vacío debido a dos fenómenos. De un lado

la mayor energía de los fotones a estas frecuencias produce fenómenos de interacción radiación-materia. De otro, las menores longitudes de onda resultan comparables a ciertos fenómenos habituales de la atmósfera, por lo que los detectan y se ven afectados por ellos mediante interacciones ópticas que podemos describir como clásicas. Ejemplo del primero es la absorción de radiación y del segundo es la dispersión.

Ante esto es necesario observar las modificaciones que la atmósfera introduce al haz, tanto sobre su trayectoria como sobre su forma, y el enmascaramiento que otras fuentes de radiación pueden ejercer sobre esta. En ambos problemas se encuentra de nuevo a los dos tipos de interacción. De un lado interacciones clásicas, como la refracción conducen a nuevos fenómenos provocados por las turbulencias, al que son ajenas otras radiaciones de mayores longitudes de onda. Tanto en este caso como en ciertos fenómenos no lineales que involucran fenómenos de interacción radiación-materia, el resultado es una modificación no deseada de la forma y trayectoria del haz.

Respecto a la radiación de fondo, de nuevo aparecen las dos posibilidades: radiación procedente de otras fuentes y que la atmósfera dispersa (óptica clásica) y radiación generada por la propia atmósfera (de origen cuántico).

Habitualmente se suele considerar que el índice de refracción del aire es la unidad, como en el vacío, sin embargo en realidad es ligeramente superior a ese valor y varía con la densidad y composición del aire. Para apreciar mejor estas pequeñísimas diferencias con el índice del vacío, y sobre todo, su variación, se suele trabajar con la reflectividad, también llamada coíndice de refracción, definida como

$$N = (n-1) \times 10^6$$

Este valor debe ser diferente para cada longitud de onda como sucede con cualquier material. En las fórmulas que se suelen dar para la refractividad se tienen en cuenta, en general un término dependiente de la humedad y otro dependiente de la densidad de los restantes gases. Se hace de este modo porque el vapor de agua es el gas de más variable concentración, mientras que los restantes se consideran que entran en proporción constante. De este modo la variación de la refractividad se recoge de la siguiente forma

$$N = C_1(\lambda) \frac{P-pv}{T} - C_2(\lambda) \frac{pv}{T}$$

donde C_1 y C_2 son dos factores dependientes de la longitud de onda, P y T son la presión y temperatura absoluta de la atmósfera, y p_v la humedad absoluta en unidades de presión; es decir, la presión parcial del vapor de agua. Notese que la densidad es directamente proporcional a la presión e inversamente a la temperatura, por lo que el segundo término está relacionado con la densidad del vapor de agua, y el primero con la de los gases restantes.

En general se ha comprobado que las mayores variaciones de la humedad apenas influyen un 0.5% del valor total de N , por lo que son útiles casi sin error fórmulas aproximadas en las que se desprece esta variación, e incluso se reduce la variación con la longitud de onda a una expresión simple. Es bastante exacto tomar para la refractividad el valor

$$N = 77.867 \left(1 + (7.53 \times 10^{-3} / \lambda^2) \right) P/T$$

con P en milibares, T en kelvin y λ en micras. Puesto que el cociente P/T , o dicho de otro modo, puesto que la densidad del aire decrece monótonamente con la altura, también lo hará el índice de refracción.

Para un haz que se propaga a lo largo de una trayectoria horizontal corta, esta variación es despreciable. Sin embargo, en haces que se propagan en trayectorias inclinadas (por ejemplo entre un avión o un satélite, a tierra) el efecto de refracción es muy importante. Teóricamente los rayos deben curvarse intentando cruzar perpendicularmente las zonas más densas. Esto supone que en la superficie de la tierra el haz tiene un ángulo cenital mínimo y por tanto máximo con respecto al suelo.

Es interesante apreciarlo desde el punto de vista de lo que puede ser una observación cotidiana de fenómenos ópticos para comprender mejor la refracción. En la figura 5.11. se muestra el sol ocultándose tras el horizonte. La curvatura de los rayos del sol por refracción atmosférica hace que se vea el sol sobre el horizonte cuando en realidad ya se ha ocultado. Este efecto explica que el sol y la luna se vean de mayor tamaño cuando aparecen sobre el horizonte. La atmósfera se comporta con la luz como una lente convergente, aumentando así el ángulo bajo el cual se ven.

Pero de la dependencia de la refracción con la presión y la temperatura se pueden sacar otras conclusiones igualmente curiosas. Por ejemplo, gradientes (variantes especiales importantes de temperatura producen variaciones del índice de refracción en espacios muy reducidos). Ejemplo de ello son

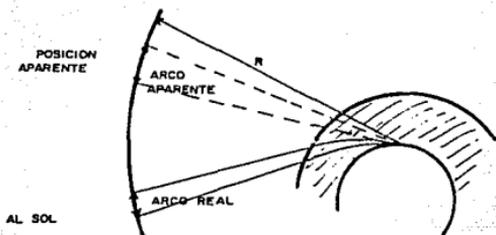


FIG. 5.11. REFRACCION ATMOSFERICA DE LOS RAYOS DEL SOL.

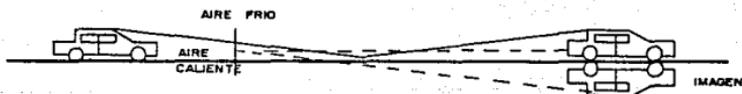


FIG. 5.12. ESPEJISMO PROVOCADO POR DESIGUAL DENSIDAD DEL AIRE. LA TEMPERATURA ES MAYOR CUANTO MAS CERCA SE ESTA DEL ASFALTO.

los espejismos . En la figura 5.12. el asfalto caliente de una carretera calienta el aire en su proximidad produciendo una variación grande de la temperatura del mismo en una distancia muy corta. De este modo se produce una gran variación en la densidad del aire que provoca una fuerte curvatura de los rayos de luz rasantes, dando la apariencia de un espejo que reflejase automoviles. Los espejismos que se producen en los desiertos a las horas de mayor calor se deben al mismo motivo. Una variación de la temperatura del aire en diferentes zonas produce variaciones del índice de refracción que dan como resultado la curvatura de los rayos de luz.

De todo lo dicho se deduce que se requiere un mayor estudio de la trayectoria del haz laser cuando este va a recorrer un largo camino y sobre todo en el caso de trayectorias inclinadas respecto a la superficie del suelo. Esto se tratará en los siguientes incisos.

5.8. Efectos de las turbulencias.

La refracción que hemos visto hasta el momento es más o menos determinista: nos permite calcular la trayectoria del haz. Sin embargo, la presencia de turbulencias en la atmósfera da lugar a otra refracción aleatoria que requiere tratamiento estadístico.

Las turbulencias se producen por el calentamiento de pequeñas masas de aire que ascienden provocando variaciones locales de temperatura, y por lo tanto, el índice de refracción. El ejemplo del espejismo indicado anteriormente incorpora la aparición de turbulencias. De hecho las imágenes se suelen ver temblando.

El efecto óptico a que dan lugar las turbulencias se puede ver claramente cuando un radiador caliente está situado bajo una ventana por la que entra el sol. El ascenso turbulento del aire caliente provoca variaciones en el índice de refracción que da como consecuencia la observación en el suelo, una mesa o sobre la pared de zonas de mayor o menor intensidad de luz en movimiento, dando la impresión de "sombra de humo". Cuando la luz proviene de un laser este efecto es más patente debido a que la gran pureza espectral de la luz da lugar a interferencias constructivas y destructivas mucho más contrastadas, con lo que esta "sombra de humo" es más visible. El temblor que vemos sobre los objetos lejanos los días calurosos y el centelleo de algunas estrellas cuando observamos el cielo por la noche son también efectos de turbulencias.

Desde el punto de vista de propagación de haces laser, existen dos tipos de turbulencias que dan lugar a dos tipos de efectos.

- 1). turbulencias pequeñas, de tamaño mucho menor que el haz. El efecto de estas turbulencias es el que se conoce como centelleo.
- 2). Turbulencias grandes o de tamaño comparable al del haz. El efecto conocido como vacilación del haz es el de cambiar aleatoriamente la trayectoria del mismo.

El resultado, aparte del desalineamiento del emisor con el receptor conduce a dos problemas:

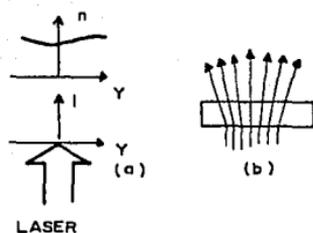


FIG. 5.13. a) EFECTO TERMICO PRODUCIDO POR EL PERFIL NOHOMOGENEO DEL HAZ SOBRE EL INDICE DE REFRACCION: LAS ZONAS DE MAYOR DENSIDAD DE POTENCIA SE CALIENTAN MAS, DISMINUYENDO SU INDICE DE REFRACCION. b) DESENFQUE PRODUCIDO POR UNA CAPA DE AIRE CON UN INDICE DE REFRACCION COMO EL DE a).

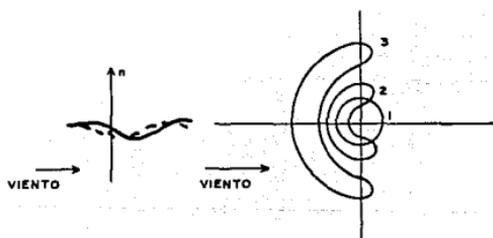


FIG. 5.14. a) EFECTO DEL VIENTO LATERAL SOBRE EL AIRE CALENTADO POR UN HAZ GAUSSIANO. b) SECCION TRANSVERSAL DEL HAZ: 1 EN REPOSO, 2 COMIENZA LA DISTORSION Y 3 DESENFQUE Y FLEXION LATERAL

1). Perdida de coherencia del haz, o sea la perdida de la relacion de fase entre puntos distintos de un mismo frente de ondas.

2). Fluctuaciones del tamaño del haz, dando lugar a un ensanchamiento del mismo que varía en forma aleatoria.

En principio podría parecer que las fluctuaciones aleatorias de amplitud darían lugar a un ruido añadido por efecto de las turbulencias. Sin embargo el movimiento del aire caliente es lento en comparación con la duración de los impulsos del laser, de forma que el ruido es de muy baja frecuencia (habitualmente por debajo de 10 Hz) y por tanto fácil de eliminar en sistemas de transmisión de alta velocidad. También los desplazamientos de fase juegan un papel importante sobre la probabilidad de error de los sistemas de detección coherentes aunque también siguen variaciones lentas. Por otra parte, igual que sucede con la dispersión, las turbulencias influyen en el ensanchamiento de los impulsos transmitidos, limitando en consecuencia el ancho de banda máximo del sistema. Existe a este respecto la posibilidad de calcular a partir de un determinado volumen de turbulencias o una determinada densidad de aerosol, el tamaño de antena óptimo. En principio se debe pensar debe ser ventajoso trabajar con antenas receptoras grandes. No solo se concentra mayor cantidad de radiación, sino que se produce un valor "promediado" de los efectos de las turbulencias que hace reducir las pérdidas. Lo mismo se consigue con ángulos de apertura grandes. Sin embargo este efecto de promedio llega a una saturación, de modo que para turbulencias grandes, el tamaño de la antena ya no influye en el centelleo. En cambio cuanto más aumentamos el tamaño de la antena, mayor es la dispersión temporal de los impulsos recibidos. De este modo para unas condiciones dadas de aerosol y turbulencias hay un tamaño óptimo. Esto no es de mucha utilidad desde el momento en que las condiciones meteorológicas cambian rápidamente a lo largo del día.

5.9. Efectos no lineales

Como los lasers empleados son de muy alta potencia como sucede en sistemas de comunicaciones tierra satélite, y sobre todo en sistemas de defensa antimisil, los grandes campos eléctricos involucrados pueden dar lugar a efectos ópticos no lineales.

Pensemos simplemente en la posibilidad de que se produzca la disrupción óptica del aire si el campo eléctrico

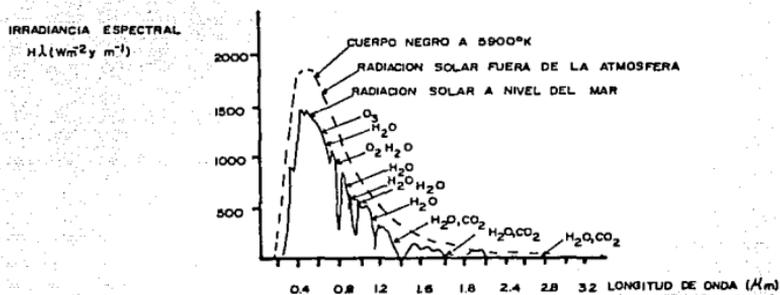


FIG. 5. 15. RADIACION SOLAR.

$0,47 \text{ cm s, } \mu\text{m}$

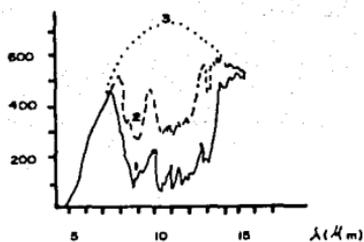


FIG. 5. 16. RADIACION ATMOSFERICA: 1) DESDE EL CENIT: 2) A 8° SOBRE EL HORIZONTE: 3) CUERPO NEGRO IDEAL.

del haz supera el valor de interrupción. Evidentemente esto requiere haces muy intensos.

Son más frecuentes algunos efectos que podríamos denominar espectroscópicos, como la saturación y la dispersión Raman.

La saturación se produce cuando las moléculas a lo largo de la trayectoria del haz no pueden absorber más radiación por encontrarse la mayor parte de ellas en el estado excitado.

La dispersión Raman es un efecto más complicado. Se produce cuando una molécula dispersa parte de la energía que incide en ella en otra longitud de onda diferente de la incidente. Para ello la molécula debe absorber parte de la energía del fotón incidente reduciendo así su frecuencia, o bien proporcionándole parte de su energía aumentando de este modo su frecuencia. En consecuencia la molécula modifica su energía interna, y esto lo hace normalmente cambiando su estado de vibración o rotación. Esto no es propiamente considerado como una absorción o emisión de radiación, puesto que requiere la presencia de un fotón externo que interacciona con la molécula. En realidad corresponde a una dispersión inelástica de radiación con el símil mecánico de un choque inelástico entre un fotón y una molécula intercambiando energía entre sí distinta de la cinética. La dispersión elástica sería la dispersión Rayleigh. El fenómeno de dispersión inelástica de radiación había sido predicho por el Austriaco Adoif Smekal en 1923 y por el holandés Henrik A. Kramers en 1924 independientemente, y observado por primera vez en 1928 por Chanorasekhara Venkata Raman, por lo que obtuvo el tratamiento de Sir en 1929 y premio novel de física en 1930.

Se pueden producir también efectos fotoquímicos por estimulación óptica del laser. Es conocido el importante papel de la fotoquímica en la química de la atmósfera, especialmente en sus capas altas. La concentración de determinados gases poco estables, como el ozono se mantiene debido a reacciones estimuladas por radiación solar. La presencia de un laser puede dar lugar a fenómenos de este tipo.

Los efectos más interesantes, y tal vez los más frecuentes, son los efectos térmicos tanto autoinducidos sobre el haz como los producidos por aerosoles. Los autoinducidos se fundamentan en el llamado autodesenfoco, que en presencia de viento lateral da lugar a la flexión del

haz.

Los haces laser son ondas Gaussianas, es decir, la amplitud del campo electromagnético sigue una distribución de Gauss en un frente de ondas. El efecto es que la intensidad del campo es máxima en el eje del haz, decreciendo a medida que nos alejamos de él. Esto produce un calentamiento debido a la absorción que no es uniforme en el medio que atraviesa: la zona contigua al eje del haz se calienta más, decreciendo la temperatura a medida que nos alejamos del mismo. Teniendo en cuenta la dependencia del índice de refracción con la temperatura, la zona por la que se propaga el haz tendrá un índice de refracción más pequeño en el eje, aumentando suavemente hacia el contorno. El resultado (recuérdese que los rayos se curvan hacia las zonas más densas) es como si una lente divergente produjese el desenfoque del haz como se indica en la figura 5.13.

Si sobre un medio de estas condiciones incide un viento lateral, enfría el aire por uno de los flancos y desplaza el aire caliente hacia el otro, produciendo el efecto de una lente asimétrica. Si observamos una sección del haz veremos que esta pierde su simetría cilíndrica (fig 5.14.) y se curva el haz dirigiéndose hacia el lugar del que proviene el viento.

Efectos térmicos sobre los aerosoles pueden producir la evaporación superficial de gotillas de agua fragmentación y explosión de partículas, vaporización de partículas sólidas, etc. Otros efectos puramente no lineales sobre aerosoles puede llevar a un autoenfuego ya que la atmósfera contiene centros de absorción, o la inducción de efecto Keer y electrofricción, conduciendo también en ocasiones al autoenfuego. Se han propuesto geometrías de antenas que minimizan los efectos térmicos. Una primera medida que se ocurre es utilizar antenas enfocadas al objetivo de modo que la mayor parte del haz esta muy expandido y se concentra en su tramo final.

5.10. Radiación de fondo.

La atmósfera es un medio no protegido en el que se propagan gran cantidad de radiaciones. Pensemos simplemente en el papel que puede tener la radiación solar en enmascaramiento de señales ópticas. En general, en la atmósfera se propagan radiaciones de tres tipos de fuentes:

-Los astros, principalmente el sol.

-La propia atmósfera.

-El suelo.

Aparte de la luz directamente emitida por estas fuentes es igualmente importante la luz dispersa. Efectivamente la principal fuente de radiación es el sol, y su radiación y también dispersada por la atmósfera y por el suelo. A la difusa procedente de la dispersión de la luz solar, se le denomina albedo.

No se va a describir la radiación dispersa por el suelo por dos razones. En primer lugar, dependiendo del tipo de suelo la luz solar dispersa tiene muy diferentes características espectrales. En segundo lugar, la radiación emitida por efecto térmico se puede asimilar a la radiación del cuerpo negro.

La radiación solar está menguada por la absorción atmosférica, sobre todo en determinadas bandas. Entonces precisamente es en las ventanas atmosféricas donde la absorción de la radiación es mínima en las que se intenta transmitir. La radiación solar medida al nivel del mar sigue la curva mostrada en la figura 5.5. donde se expresa la irradiancia (densidad superficial de potencia) por unidad de intervalo espectral. Interesa evitar la incidencia de la luz solar directa en el receptor (con lo que solo se recibirá el albedo), así como limitar el ancho de banda que este admite, para reducir la radiación de fondo recibida. Lo primero se consigue con ayuda de protecciones ("viseras") que mantengan a la sombra la antena, y lo segundo mediante filtros ópticos.

La radiación dispersa por la atmósfera obedece a dos mecanismos: la dispersión molecular y la provocada por los aerosoles. Depende, lógicamente, de la radiación solar incidente sobre el aerosol o el aire. Sin embargo, para longitudes de onda superiores a cuatro micras, el efecto de la dispersión solar es despreciable. La dispersión Rayleigh no es significativa a estas longitudes de onda, pero además la dispersión por neblinas no puede ser muy alta por ser la radiación solar muy baja en esa zona del espectro. Por tanto para sistemas que trabajen con longitudes superiores a cuatro micras, la única fuente de radiación de fondo es la propia atmósfera.

La radiación térmica de la atmósfera se produce fundamentalmente en las líneas de emisión de los gases

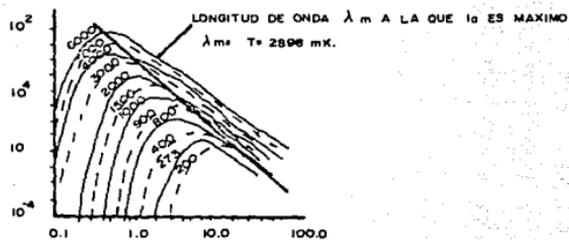


FIG. 5. 17. RADIACION DEL CUERPO NEGRO.

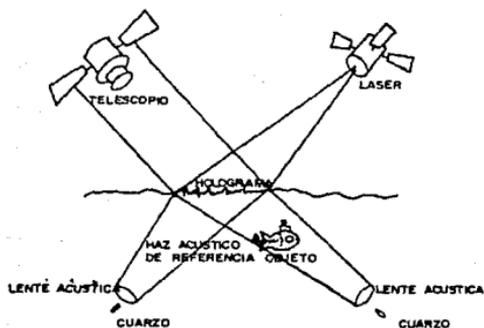


FIG. 5. 18. HOLOGRAMA ACUSTICO SUBMARINO RECOGIDO POR UN LASER.

atmosféricos, y es, por tanto mas reducida en las ventanas. El resultado depende fuertemente del ángulo de observación, de modo que observando hacia el horizonte, la radiación atmosférica es practicamente la de un cuerpo negro ideal, y tanto más parecida a esta cuando menor es la cantidad de nubes presentes. En la figura 516, se puede observar que para ángulos de visión inclinados o verticales, la radiación es inferior a la del cuerpo negro, siendo esta diferencia mayor en torno a las 10.11 micras. en el seno de la ventana de 9 a 13 micras. El máximo entre 9 y 10 micras se debe a la radiación del ozono.

Por tanto, la radiación térmica es siempre inferior o igual a la del cuerpo negro, que se rige por la ley de Plank, según la cual la irradiancia por unidad del ángulo sólido y de intervalo espectral es:

$$W_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left\{ \exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right\}^{-1} d\lambda \quad (\text{W/m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$$

donde h es la constante de Plank, c la velocidad de la luz, k la constante de Boltzman y T la temperatura absoluta en Kelvin.

La variación se puede ver en la figura 517, donde sr (o mejor srad) quiere decir estereoradian, y es la unidad del ángulo sólido.

APENDICE A.

Panorama comercial de los distintos tipos de laser.

En este apéndice se busca representar el consumo que existe de los tipos de laser en el mundo y observar sus tendencias, es decir, cuales son los tipos de laser, en que actividad aumenta su uso y cuales tipos están entrando en desuso.

Este es un buen indicador de tendencias que nos permite la elección del laser adecuado y que por su mayor consumo, presenta mayores ventajas y técnicas funcionales.

El amplio mercado de los sistemas laser a tomado una tendencia de crecimiento desde 1980 y esto fue motivado por el crecimiento de mercados anteriormente pequeños. Así, el mercado laser creció 23 % en 1985, siendo mucho mayor al año anterior. El más amplio sector de ventas de dispositivos laser es el sector industrial. En 1985 las ventas se elevaron adicionalmente el 22%. El número total de laser vendidos en el sector comercial a nivel mundial esta sobre los 3 millones de unidades en este año mencionado, representando un porcentaje de expansión del 38%.

Los sistemas laser de CO₂ se mantienen firmes con un 24% del mercado, representando la mayor proporción de ventas comerciales laser siendo la mayor aplicación en procesamiento de materiales. Por otra parte el reciente laser Diodo tiene un rapido crecimiento (vendiendose en 1984 más del doble que 1985).

La tabla A.1. nos muestra un sumario completo del mercado comercial laser.

TABLA A.1. Mundo comercial de ventas laser (1985-1986 en millones de dolares).

	CO2		Estado solido		Ion		Diodo		He-Ne		Dye		Excimer		He-Cd		Total	
	85	86	85	86	85	86	85	86	85	86	85	86	85	86	85	86	85	86
Procesado de materiales	74	91	52	68	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	127	162
Medicina	27	31	20	28	32	40	.1	.3	3	4	.5	.9	.2	.2	.1	.2	84	105
S&D	9	10	23	25	18	20	5	6	5	6	25	27	18	22	1	2	104	117
Impresion	0	0	0	0	12	14	3	5	17	18	0	0	0	0	2	2	34	38
Platemaking, col.sep	0	0	.1	.5	14	15	0	0	.02	.02	0	0	0	0	.2	.4	14	16
Comunicaciones	0	0	0	0	0	0	44	53	.04	.05	0	0	0	0	0	0	44	53
Memorias opticas	0	0	0	0	1.1	1.4	18	29	0	0	0	0	0	0	.5	.6	21	31
Busca codigo de barras	0	0	0	0	0	0	.02	.03	4.5	5.2	0	0	0	0	0	0	4.5	5.2
Control, alineamiento	0	0	0	0	0	0	.42	.55	1.5	1.9	0	0	0	0	0	0	2	2.5
Prueba y medicion	3	.3	.3	.3	6	7	3	4	9	11	1.7	2	0	0	.7	1	21	26
Entretenimiento	0	0	0	0	2	3	0	0	1	1.4	1.3	.4	0	0	.1	.1	3.5	4.4
TOTAL	110	132	96	123	85	99	76	97	42	48	28	31	19	25	5	6	460	560

TAOLA 4.2. Mundo comercial de ventas laser.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
CO2	85 1250	1080	396	0	0	0	0	0	0	22	0	2748
	86 1600	1250	476	0	0	0	0	0	0	25	0	3311
ESTADOS	1400	810	738	0	20	0	0	0	0	25	0	2993
SOLIDOS	1500	1100	804	0	50	0	0	0	0	27	0	3781
ION	85 0	2550	560	5000	4560	0	65	0	0	300	200	13635
	86 0	3150	720	5000	5666	0	100	0	0	375	250	16165
DIODO	85 0	950	8880	54000	0	37000	2093000	2000	11085	4312	0	2216270
	86 0	1045	7679	85000	0	44770	2937000	3000	12084	4700	0	3097220
HE-NE	85 0	15800	15600	35000	150	80	0	66000	14000	25000	2000	177030
	86 0	20500	17000	43000	200	90	0	85000	16500	30000	30	215290
DYE	85 0	47	625	0	0	0	0	0	0	78	31	781
	86 0	65	660	0	0	0	0	0	0	85	36	846
EJCI-	85 20	5	360	0	0	0	0	0	0	0	0	385
MER	86 60	5	440	0	0	0	0	0	0	0	0	505
HE-CD	85 0	15	275	950	40	0	90	0	0	180	3	1553
	86 0	25	320	950	80	0	120	0	0	250	3	1748
TOTAL	85 2670	212257	26974	98950	5070	7080	2098155	68000	25088	29917	2934	2415355
	86 3460	27140	30060	17495	5290	44860	2937320	68000	29566	35462	3289	3338926

A=PROCESADO DE MATERIALES

B=MEDICINA

C=RAY

D=IMPRESION

E=PLATEADO

F=COMUNICACIONES

G=MEMORIAS OPTICAS

H=BUSCADORA DE CODIGO DE BARRAS

I=CONTROL Y ALINEAMIENTO

J=PRUEBA Y MEDICION

K=ENTRETIENIMIENTO

L=TOTAL

Los sistemas laser se han beneficiado por la superestructura de la defensa ya que el mercado militar de los dispositivos laser tiene un crecimiento poco menor del 18% en 1986. La mayor proporción en este mercado la ebarcan los sistemas Nd:YAG. En la actualidad ha aparecido un nuevo sistema de CO2 de bajo costo que puede ser usado en laser de "rango encontrado" (stand-alone) que sustituya directamente en sus contenedores e sistemas YAG tradicionales.

El mundo comercial de las industrias laser se encuentra como una de las partes mas importantes del mercado comercial siendo el procesamiento de materiales el area que domina las ventas acumulando un 29% del total de ventas y en 1986 el mercado crecio un 27,5%.

Cada año se instalan sistemas laser industriales "de piso" usadas como muy aceptables herramientas. Los sistemas laser industriales han encontrado trabajo en un extenso rango de areas, en las que se incluye: La electronica, la computacion, la automativa, la aeroespacial e industrias de extracción. Las aplicaciones mas establecidas son corte, soldadura y perforación, observandose un rápido crecimiento en mercado de productos y soldadura de materiales.

Todos los tipos de laser usados en el procesado de materiales tiene buenas ventas, pero como es común, la economía presenta siempre variaciones. Los mercados de laser internacionales interactuan, así el mercado americano se ve afectado por la producción Europea, así como la pujante industria japonesa.

En el aspecto tecnológico, los productores de laser siempre estan bajo la inquietud de que la inversion realizada para el diseño de un equipo se vea perdido por la aparición de otro más innovador, debido a la tendencia de desarrollo.

Los laser de CO2 continuan dominando el mercado industrial, acumulando cerca del 58% de los sistemas laser vendidos para el procesado de materiales.

Por otra parte el laser YAG presenta un crecimiento constante en ventas, aproximadamente el 30% en el ambiente industrial.

El mercado de laser excimero en el area industrial se triplico en 1986. En el procesamiento de semiconductores, el laser excimero tiene un alto potencial de uso en areas tales como la deposición de vapor quimico y fotolitografía.

En el ramo de laser de estado sólido, en la tabla de ventas, este no logró las predicciones quedando con un número de ventas poco significativo.

Las ventas para el area científica se elevaron en 1986 donde en la investigación y el desarrollo (R&D) suman cerca del 23% de las ventas. Todos estos laser son utilizados para propósitos experimentales, tanto en R&D científicos como en evaluación de sistemas laser para aplicaciones futuras. Virtualmente todos los tipos de laser son utilizados para investigación científica.

El tradicional R&D científico representa un crecimiento lento pero estable. Los cuatro laser que comunmente se utilizan en aplicaciones científicas son: El excimero, el de color (Dye), el Ion y el YAG. El laser esta experimentando un rápido crecimiento donde antaño no se valuaba: por ejemplo: el uso del Excimero y del R&D científico para procesado de semiconductores.

Las ventas en el area médica continúan en crecimiento. Los sistemas laser de dióxido de carbono, YAG, argón-ion, He-Ne, y argón laser bombeado con cambio de color son los mas usados en la medicina.

Con fuertes ventas en el area medica, el laser de CO2 encuentra amplios usos en neurocirugía, ginecología, cirugías otorrinolaringológicas, dermatología, y cirugía plástica y reconstructiva. Las ventas de equipos CO2 quirúrgicos crecieron un 20% en 1985. Las unidades de baja potencia (abajo de 40w) tienen un rápido crecimiento especialmente por ventas de aparatos a físicos de oficio y parte por hospitales. En 1986 las ventas crecieron un 16.8%.

Las ventas de laser Nd:YAG pulsado para cirugía optamológica creció en 1985 sobre las 350 unidades en 1984 a 460. Las ventas de estos sistemas tenderian a crecer cero debido a la aparición de un pequeño sistema de Nd:YAG con un valor comercial de cerca de la mitad del tradicional lo anulo. A este pequeño sistema se le llama "add-on".

El mercado de los laser YAG en cirugía optamológica ha virado hacia una fuerte competitividad. Durante 1985, por ejemplo, un fabricante contaba con una competitividad tal que

directa entrega inmediata de sistemas add-on en una escala total de sistemas a cualquier cliente y al entregar el laser add-on se toman las grandes unidades anteriores.

Por otro lado, el mercado de laser YAG en optamología se encuentra próximo a la saturación. Por ello, mientras se tienen cerca de 500 o 1000 ventas de laser pulsado en 1982, se tienen probablemente no más de 200 lugares en el mundo que pueden proveer el sistema.

Los laser CW Nd:YAG alentaron crecimientos en 1985. Debido a su corta longitud de onda (que lo hace apto para pasar a través de fibra optica) y se aplican en áreas del cuerpo tales como canales urinarios o gastrointestinales, que son difíciles de alcanzar en cirugía convencional.

Las ventas de unidades laser He-Ne para aplicaciones de estimulación se extendieron 50% en 1985 y tuvieron un incremento adicional de 25% en 1986. Todos los laser de esta categoría fueron vendidos en Europa. Los fabricantes esperan que la FDA apruebe la entrada del mercado americano.

Las ventas de laser He-Ne en aplicaciones de diagnóstico médico, incluyendo reestablecimiento de células y alineamiento médico tuvieron un total de 10,500 en 1985 sobre los 7,800 de 1983.

Tabla A.3.

Ventas de laser de estado solido y He-Ne en el area militar.

	* unidades		* millones dol	
	* 1985	1986	* 1985	1986
Estado solido	3450	4310	59.0	70.0
He-Ne	20000	20000	1.3	1.0

Las ventas del laser de color (DYE) para uso en terapia fotodinamica (PDT) en el proceso de tratamiento del cancer se mantuvo estable en 1985 y solo unas unidades mas se vendieron en 1986. La medicina exige siempre un rápido crecimiento, así en un corto período el laser excimero es una promesa en la keratotomia radial, en operaciones de elevada exactitud.

El potencial en equipo para millones de sistemas en funcionamiento tambien se encuentra en aumento dia a dia, así se han logrado sistemas flexibles para laser excimero y CO2. Las aplicaciones en areas tales como la cardiología (limpiando arterias bloqueadas) ginecología y en cirugía ortopedica. Incluso se han llegado a ejecutar operaciones para remover depositos en arterias coronarias, sin el uso de fibra óptica, utilizando un laser de CO2 de baja potencia.

Más del 95% de los sistemas laser usados en artes gráficas son destinados a impresoras de no impacto. El restante 15% encuentra uso en separadores de color y tipificadores. Para 1986 se utilizó el 15% en separadores de color, más del 36% en impresión y 41% en el maquinado de placas.

Las ventas de unidades de dispositivos de impresión de no impacto alcanzó 98,950 unidades en 1985 y aumentó 36% en 1986 con un total de 134,750 unidades. Estos sistemas utilizan laser de diodo, He-Ne, He-Cd y laser Ion dependiendo de la velocidad y volumen deseado en operaciones de impresión.

Los laser Diodo tienden a crecer en este sector y son muy utilizadas en impresores para computadoras personales. Las impresoras que utilizan laser He-Ne generalmente estan diseñadas para alta velocidad (más de una página por segundo).

En terminados de alta velocidad (más de un millón de copias por mes) se ha mejorado la tecnología extendiendo la vida del tubo.

En 1985 las ventas de laser YAG utilizado para el maquinado de periódicos fue de 20 unidades y en 1986 se incremento debido a la adquisición de estos equipos por parte de grandes empresas periodísticas. También se utiliza laser Ión para la impresión de periódicos, así como para la manufactura y diseño de circuitos impresos.

El mercado de separadores de color se incremento 15% en 1986 con ventas de 500 unidades. Casi todos los separadores de color basados en laser utilizan laser Ión de Spectra-physics. Este mercado se considera como relativamente saturado y se pronostica que su crecimiento sera modesto.

Por otro lado la mayor parte del campo de las comunicaciones ópticas la absorbe el laser diodo. encontrandose solo algunos aparatos de He-Ne. La mayor parte de este mercado tiene ventas en aparatos de modo simple, es decir, para usarse en sistemas de larga distancia con fibras de modo simple. Por otra parte, la aplicación de el laser en comunicaciones se puede ver reemplazado por el uso de frentes emisores a base de leds que pueden operar en las fibras de modo simple y conectores.

Las memorias ópticas tiene un rápido crecimiento en aplicaciones laser. Bajo esta categoría se incluye el denominado mercado de audio, video y almacenaje de datos.

La producción del laser diodo se elevó en 1986 debido a la espectacular aparición del compact disc (CD), al cual es un audiodisco con grabaciones digitales para alto consumo. Con más de 2 millones de grabaciones y sobre los 15 millones de discos usados en todo el mundo, el CD recibe un rápido crecimiento de los nuevos consumidores de productos electrónicos. Se añade también el audio pregrabado a los mercados existentes para el laser diodo en el video y almacenaje, y recuperación de datos. En el sector de video reproductoras (video disc) el diodo laser está reemplazando al laser He-Ne en las nuevas versiones. Las ventas de laser

He-Ne con esta aplicación variaron de 100,000 tubos en 1983 a 30,000 en 1984 y ninguno en 1985.

El enorme potencial de mercado de almacenaje de datos existente para el laser diodo en CD-ROM y productos de un solo escrito (write once) que se pueden obtener para utilizarse con computadores personales y domésticos, y en la industria de alta densidad de almacenaje. Sin embargo, el producto no es muy buscado en el mercado potencial por su garantía. Se puede predecir que las ventas masivas del laser diodo ocurrirá con productos de "una vez borrable" para 1990.

Después de la dramática experiencia de crecimiento de unidades en ventas de 1985 a 1986, el consumo de las He-Ne para examinadores de código de barras (barcode scanners) fue lenta, con una proporción de expansión de 25%. Así también su precio se vio afectado, reduciéndose un 40%. En el mercado americano, los examinadores de código de barras en supermercados se encuentran en saturación, pero se espera un crecimiento inmediato en Europa y Japon.

Los laser Diodo y He-Ne se utilizan para tareas de alineamiento y control. El 55% de los laser vendidos en la categoría de alineamiento y control son laser He-Ne.

Los sistemas laser vendidos para aplicaciones de medición y prueba, conteo e inspección, tiene un 19% de crecimiento en 1986. Casi el 85% de los laser vendidos en esta categoría son He-Ne.

En el area de entretenimiento, la tendencia de utilizar laser He-Ne en los espectáculos aparece en 1985. Mucha de la gente que renta uno de estos sistemas, tiende a hacerlo suyo mientras lo utilizan. Un sistema típico consiste de un laser montado en un banco óptico, junto con varios buscadores y otros sistemas para crear efectos especiales. Los fabricantes de laser tienen en vista esta tendencia hacia los compradores de equipo, reflejado en el surgimiento de las ventas laser en la categoría de entretenimiento y display.

Los laser de estado sólido, He-Ne y CO₂ tienen aplicaciones militares. Las ventas en esta categoría no han tenido caídas.

Después de experimentar pocos cambios significativos en los procedimientos militares, en 1984 las ventas de laser de estado sólido en detectores de alcance (rangefinder) y

señaladores de tiro militares creció en 1985 para varios proyectos moviéndose hacia fases de producción en masa. Por tanto, el mercado de laser de estado sólido se expandió 38% en 1985, ocasionando un mercado total de 3,450 laser y en 1986 se expandió a 4,310 unidades.

Como ejemplo de aplicaciones militares se tiene: el MULE (Equipamiento laser modular universal) entregado al cuerpo de la marina en 1987 el cual consta de un triple montaje de Nd:YAG y es un señalador de blanco operado por una cuadrilla de dos hombres y puede señalar blancos para todas las armas U.S. guiadas por laser, incluyendo a armas como el maverick, Hellfire, bombas guiadas por laser y cañones de lancha de proyectiles; otro sistema es el TADS (sistema de adquisición de blancos señalados) que es un sistema de visión de noche basado en un subsistema laser Nd:YAG.

Un ejemplo es también el laser para el sistema de control de tiro es el tanque militar M1 Abrams y el M69 Kollman donde el cañon entrega 20 disparos auxiliado por un detector de alcance con una exactitud de puntería de 10 metros del blanco entre 2 y 8000 metros de distancia; se tienen también detectores señaladores de alcance (range-finder) como son el TOW (tubo puesto en marcha para rastreo óptico de alambre guiado) para el helicóptero Cobra, así también el A-6E TRAM (reconocimiento de blanco y multisensor de ataque) desarrollado para el avión de la marina A-6E Intruder. El- TRAM es una combinación laser de paquetes detector señalador que es montado en una pequeña vaina bajo la nariz de la aeronave.

El Hughes VLLd (vehículo terrestre de localización laser, señalador) es una combinación de detector-señalador de alcance el cual puede ser llevado por un hombre o montado en un vehículo.

El laser He-Ne es utilizado en la categoría de tácticas militares, para el apuntado de rifles y otras armas pequeñas. Una batería de potencia es montada en el barril de las armas y alineada a lo largo de la trayectoria de las balas.

En 1985 Texas instruments desarrolló un equipo laser CO2 de bajo costo TEA en módulos que pueden ser usados en stand-alone, detectores de alcance o integrados al frente para sistemas miradores infrarrojos. Las ventajas de esta unidad sobre el tradicional YAG es la habilidad para penetrar en lugares oscurecidos por el hombre, humo, niebla, polvo y

agua. Los módulos laser pueden ser diseñados en sistemas de control de fuego para aplicaciones con el TOW Night Sight M60A3, tanque de vista térmica, tanque de batalla M-1, sistema de defensa aérea Tiger y el tanque XK-1 Coreanos.

VENTAS (\$ MILLONES LIS)

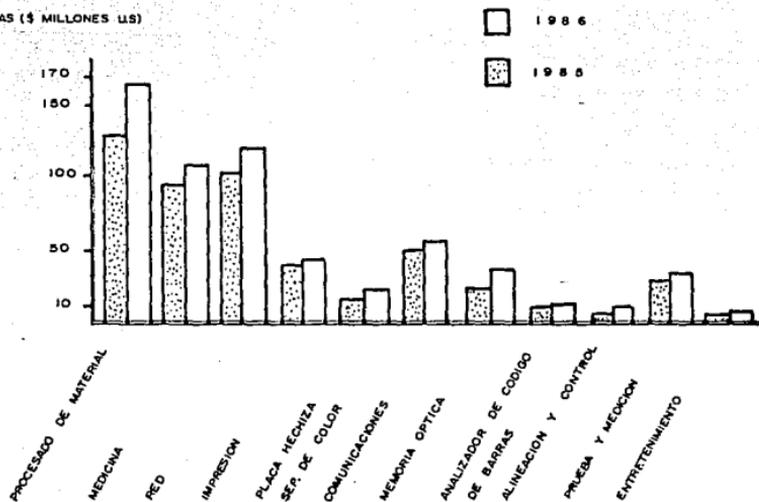


FIG. A.1. VENTAS DE SISTEMAS LASER POR APLICACIONES.

APENDICE B

El objetivo de este apéndice es dar a conocer las diversas empresas dedicadas a la producción de sistemas láser para ayudar al lector en caso de requerir servicios de este tipo.

COMPAÑIA	PAIS	LOCALIDAD.
Advanced Kinetics	USA	Costa Mesa, Calif.
Aerotecn. inc..	USA	Pittsburgh, Pa
Burleigh Instruments, Inc	USA	Fisher, N.Y.
Cilas Alcatel	Francia	Marcoussis
Cit Alcatel	Francia	La Ville du Bolsy
CVI laser Corp.	USA	Albuquerque
Candela Corp.	USA	Wetick, Mass.
Coherent General Inc..	USA	Palo Alto, Calif.
Coherent, inc.	USA	Palo Alto, Calif.
Combustion Engineering Inc..	USA	Mountain View, Calif.
Control Laser Corp.	USA	Orlando, Fla.
Cooper Laser Sonic Division optica	USA	Santa Clara, Calif.
Cyonics (Sub. Uniphase Corp.)	USA	Sunnyvale, Calif.
Edinburgh Instruments	Escocia	Edinburgh
Femtochrome Research Inc	USA	Albany, Calif.
General optronics	USA	Edison, N. J.
General Photonics Corp	USA	Sta. Clara, Calif.
Heliconics, Inc	USA	San Diego, Calif.

COMPAÑIA	PAIS	LOCALIDAD
Sierra Inc.	USA	Longmont , Colo.
JK Laser LTD	England	Rugby, Warwickshire
LASAG USA , Inc	USA	Arlington Heights , Ill.
Laakmann Electro-optics Calif.	USA	San Juan Caistrano ,
Lambda Physik	USA	Acton , Mass.
Laser Analytics of spectra Physics	USA	Bedford , Mass.
Laser applications LTD	England	Hunt.
Laser Corp. of America	USA	Wakefield , Mass.
Laser electronics Pty., LTD	Australia	Southeport , Qld.
Laser Engineering	USA	Waltham , Mass.
Laser Ionics Div. trimodyne. Laser syst.	USA	Orlando , Flo.
Laser Science , Inc	USA	Cambridge , Mass.
Lasertron	USA	Burlington , Mass
Lee Laser . Inc.	USA	Orlando , Fla.
LICONIX	USA	Sunnyvale , Calif.
Line Lite Laser Corp.	USA	Mountain View , Calif.
Lumonics Inc,	Canada	Kanata , Ontario.
Lytel	USA	Someville , N.J.

COMPANIA	PAIS	LOCALIDAD
M/A COM Laser Diode, Inc.	USA	New Brunswick, N.J.
MFB Technologies Inc.	Canada	Canada Dorval, Quebec
Macvide America, Inc.	USA	Orangeburgh, N.J.
Melles Griot	USA	San Marcos, Calif.
Messer Griesheim GmbH	FPA	Puchheim.
Mitsubishi Electronics America	USA	Sunnyvale, Calif.
Morgan Hill Electro-optics	USA	St. Charles, Mo.
Multilaser	Suiza	Anieres.
NEC Electronics	USA	Mountain View, Calif.
Omnichrome	USA	Crind, Calif.
Optoelectronics, Inc.,	Canada	Oakville, Ontario.
Optra Inc.	USA	Peabody, Mass.
Ortel Corp.	USA	Strarrord, Conn.
Ortel Corp.	USA	Alabama, Calif.
Oxford Laser LTD	England	Oxford.
PMS Electro-optics, Div.	USA	Boulder, Colo.
Photodyne Inc.,	USA	Newbury Park, Calif.
Photon Sources, Inc.,	USA	Livonia Mich.

COMFAMIA	PAIS	LOCALIDAD
Physitec Corp.	USA	Norfolk , Mass.
PiessCor Optronics , Inc	USA	Chatswoth , Calif
Polytec GmbH	RFA	Waldbronn.
Quanta Systems , srl,	Italia	Modena.
Quantronix	USA	Smithtown , N.Y.
Quantum Associates	USA	Mento Park , Calif
Quentron Optics Pty,LTD	Australia	Adelaide , S.
Questec . Inc.	USA	Billerica , Mass.
R.K. Manufacturing	USA	Fort Lauderdale , Fla.
RCA New Products Div.	USA	Iancaster , Pa.
Raytheon Laser Products	USA	Burlington , Mass.
Sharp Electronics Corp.	USA	Paramus , N.Y.
Siemens Components Inc,	USA	Iselin , N.Y.
Sopra ,	France	Bois Colombes.
Spectra Diode Labs,Inc.	USA	San Jose , Calif.
Spectra physics.	USA	Mt.View , Calif.
Spectron Laser Systems LTD.	England	Rugby
Tachisto Laser Systems Inc.	USA	Needham , Mass.
Tektronix	USA	Beaverton , Oreg.
Ultra Lasertech Inc .	Canada	Mississauga , Ontario.
Uniphase Corp.,	USA	Sunnyvale , Calif.

GLOSARIO

Absorcencia. Capacidad de un medio para absorber radiación, dependiendo de la temperatura y de la longitud de onda. Se expresa como el negativo del logaritmo común de la transmitancia.

Acolplaje de salida. Espejo del resonador que transmite la luz parcialmente.

Adherente. Fisiología. La fusión de tejidos o estructuras vivas. En curación de heridas el proceso de adherencia resulta beneficioso. Cuando las lesiones se localizan en articulaciones, se producen a menudo las adherencias entre la zona lesionada y las estructuras vecinas. En estos casos las adherencias pueden provocar rigidez, con las consiguientes y desagradables consecuencias.

Focal. Literalmente "sin distancia focal"; es un sistema óptico que tiene los puntos objeto e imagen en el infinito.

Albedo. Es la parte fraccionaria de la radiación total incidente sobre una superficie que es reflejada en todas direcciones. El albedo de la superficie terrestre oscila entre 0,05 si se trata de un bosque oscuro y 0,30 si de arena seca, con valores intermedios para las superficies rocosas, herbosas y cultivadas; en la nieve limpia recién caída; la parte superior de las nubes puede llegar hasta 0,75. La luna, que no tiene atmósfera, posee un albedo de 0,07, lo que significa que absorbe el 93% de la luz solar que recibe.

Aluminio. Metal trivalente, el más abundante de la corteza terrestre, en cuya composición alcanza una proporción aproximada del 8% y en la que principalmente se presenta como elemento integrante de arcillas y rocas. Su color es blanco argentino; símbolo Al ; densidad 2,7; peso atómico 27,98 (inferior al del hierro, 55,85, y la del cobre 63,54). Punto de fusión 933,7 grados C. calor específico 20 grados C, 0,22. Un centímetro cúbico de aluminio pesa aproximadamente 2,718 g. El aluminio es dúctil y maleable, buen conductor de calor y la electricidad, altamente resistente a la corrosión y excelente reflector de la luz y del calor radiante.

Abulatorio. Término médico referido al paciente que puede ser trasladado de lugar.

Amplificación. Crecimiento del campo de radiación en la cavidad resonante del láser. Al reflejarse la onda de luz hacia adelante y hacia atrás en los espejos dentro de la cavidad se amplifica por emisión estimulada, cada vez que pasa por el medio activo.

Amstronq. Ver unidad Amstronq.

Ángulo de Brewster. Dícese del ángulo que se contiene entre un rayo incidente a un cuerpo y el rayo reflejado.

Ángulo cenital. La porción del espacio limitada por dos semirrectas que tienen como origen el cenit, donde una de ellas es perpendicular al eje de la tierra y la otra proviene de una fuente láser.

Ángulo de incidencia. Véase rayo incidente.

Ángulo sólido. Modelo matemático. Es el espacio comprendido dentro de una superficie cónica (o piramidal), su unidad es el estereoradian.

Anisotropía. Propiedad que presentan algunos sólidos especialmente cristalinos, de alterar algunas de sus propiedades físicas, como la conductividad térmica y la eléctrica, la elasticidad y la velocidad de la luz, según la dirección. Los cristales anisotrópicos presentan el fenómeno de "doble refracción" y algunos son fuertemente dicroicos o policroicos, mostrando diferente color según la dirección en que los atraviesa la luz. El vidrio es un ejemplo de sustancia que, siendo ordinariamente isotrópico, que convierte en anisotrópico bajo la influencia de una tensión.

Anodo. Elemento eléctrico que se usa en la excitación láser para atraer electrones desde un cátodo. Un Anodo puede enriarse directamente por agua o por radiación.

Arco de plasma. Ver plasma.

Arco, soldadura por. En la soldadura de arco, el material metálico que se va a unir forma uno de los electrodos. Una varilla conductora constituye el otro electrodo. Esta varilla se aplica al material, completando el circuito. Después se retira ligeramente la varilla formando una chispa eléctrica o arco. El arco calienta los bordes de los metales hasta que se funden y fluyen juntos. A menudo se inserta una segunda varilla similar llamada varilla de relleno, en el arco para agregar su metal a la unión al fundirse.

Aséptico. Ausente de microorganismos patógenos.

Autocolimador. Instrumento que combina las funciones de un colimador y un telescopio para detectar pequeños desplazamientos angulares de un espejo por medio de su propia luz colimada.

Banda visible. Rango de luz electromagnética en el cual se logra obtener el efecto de la visión que constituye la óptica fisiológica. Este rango se encuentra entre los 3800 a 7600 Angstroms.

Barra del laser. Un medio en estado sólido, en forma de barra, en el cual la excitación de los iones ocurre debido a una fuente de luz intensa, tal como una lámpara de destellos.

Bombeo óptico. La excitación del medio de emisión laser por destellos luminosos, en lugar de aplicar descargas eléctricas entre un ánodo y un cátodo.

Calina. Calina. Accidente atmosférico que enturbia la atmósfera y suele producirse por vapores de agua, especie de niebla que provoca baja visibilidad por la presencia de innumerables partículas sólidas en el aire. Difiere de la niebla ordinaria y la niebla en que se seca y casi no contiene condensación. Aunque el polvo sea la causa ordinaria de la calina, puede también provenir de la presencia de capas de aire caliente y frío dentro del campo de la visión.

Calorímetro. Instrumento que mide el calor que se genera en la absorción de luz laser.

Capa FC. Recubrimiento antirreflector que se aplica en la parte posterior de los espejos de salida de los emisores de laser para suprimir las reflexiones múltiples no deseadas, que reducen la potencia.

Cátodo. Elemento de donde son emitidos los electrones para la descarga eléctrica que se usa para excitar el medio emisor del laser.

Catalisis. Variación de la velocidad de reacción de un proceso químico producida por la presencia en el sistema de otra sustancia o mezcla de sustancias, que al finalizar la reacción aparecen inalteradas. Las sustancias que modifican esta velocidad de la reacción química se denominan catalizadores y pueden ser utilizadas en cantidades variables. Esta velocidad puede ser acelerada (catalisis positiva) o retardada (catalisis negativa).

Catalizador químico. Cuerpo que puede producir la transformación catalítica. Ver catalisis.

Cataratas. El cristalino del ojo se halla envuelto en una capsula. Tanto el uno como la otra son transparentes a la luz. La opacidad o una zona no transparente en cualquiera de las dos estructuras o en las dos se denominan cataratas.

Cataratas congénitas. Enfermedad de tipo hereditaria, ver cataratas.

Cataratas traumáticas. Enfermedad producida por trabajar con luces fulgurantes o ambientes de mucho calor, o producida por sustancias, como por ejemplo el dinitrofenol.

Caterización. Aplicación de cateteres. Ver cateter.

Cateter. Sonda que se introduce por la uretra o por cualquier otro conducto para explorarlo o dilatarlo.

Chorro de gas de apoyo. Un chorro coaxial de gas, tal como el oxígeno, argón o nitrógeno, que sirve para alcanzar niveles muy altos de potencia para cortar ciertos metales.

Coagulación. Separación del seno de un líquido, bajo la influencia del calor o de una acción química, de una materia viscosa o masa semisólida. El punto de coagulación es único para cada sustancia. Este es un fenómeno peculiar de los coloides y es similar a la precipitación en el caso de las soluciones. Existe coagulación en la albúmina del huevo, la leche y la sangre, por ejemplo.

Coagulación de la sangre. Mecanismo de defensa gracias al cual la sangre forma coágulos que taponan los vasos sanguíneos rotos o reparan temporalmente los que se han debilitado. La sangre extraída del cuerpo se convierte pronto en una masa gelatinosa o coágulo.

Coefficiente de absorción. Cantidad de energía radiante que se absorbe por unidad de longitud de trayectoria.

Coherente. Ver luz coherente.

Copa del pulso. El tiempo de decaimiento del pulso, que puede disminuirse (por el uso de una mezcla especial de gases) para permitir una repetición rápida de los pulsos del laser en un intervalo de tiempo dado.

Colimador. Dispositivo que realiza la colimación. Antena emisora.

Colimación. Proceso por el cual los rayos divergentes de luz (blanca o natural) son transformados en rayos paralelos (luz coherente).

Configuración de potencia. Un cambio controlado en el nivel de potencia de un haz laser; puede aumentar linealmente hasta un nivel, mantenerse cierto tiempo y bajar de nuevo, o variar en pasos discretos.

Conmutador Q. Un dispositivo que tiene el efecto de un obturador que se cierra rápidamente para interrumpir o dejar pasar el haz, disminuyendo la Q normal del obturador, manteniéndola baja e

impidiendo la emisión hasta que se almacena un alto nivel de energía. Cuando se restaura la Q normal, el resultado es un pulso gigante de energía.

Control de rampa. Controles de la potencia para llevar a cabo su configuración; pueden ser gobernados por computadora.

Constante de Boltzmann. Valor obtenido experimentalmente entre la energía y la temperatura expresada en electron-volt entre Grados Kelvin (eV/K).

Constante de Planck. Semejante a la constante de Boltzmann, pero expresada en Joules entre Grados Kelvin (J/K).

Convergencia. Desviación de los rayos de luz hacia un punto común, como la que produce una lente convexa.

Costura. Reforzo resultado de la unión de dos metales mediante la soldadura por arco. Ver soldadura de arco.

Crepusculo. Claridad que presenta el firmamento antes de la salida del sol o después de su puesta.

Criogenico. Vícese de los elementos que se encuentran a una temperatura cercana al cero absoluto.

Criostático. Referido al punto de fusión de los líquidos que contienen sustancias en disolución.

Cromático. Calidad de cromático. Coloración. Ver cromoático.

Cromático. Dícese del cristal o instrumento óptico que presenta los objetos contornados con los colores del arcoiris.

Cutáneo. Referente al cutis.

CW. Abreviatura en inglés de onda continua; también el modo de emisión continua de un láser en oposición a la operación pulsante.

Densidad de potencia. La cantidad de energía radiante que se concentra en una superficie unitaria por unidad de tiempo.

Dermatología. Parte de la medicina que tiene por objeto el estudio de la piel y sus enfermedades.

Desviación, desviación angular. Todas las variaciones indeseables en la salida del haz (ya sea en amplitud o en frecuencia); variación angular antes, durante o después del calentamiento, medido en miliradianes.

Desviador del haz. Aparato óptico, tal como el espejo, capaz de cambiar la dirección del haz de láser; se emplea para dirigir el haz y en sistemas compactos, "doblados", para aumentar la trayectoria del haz.

Determinismo. Doctrina filosófica según la cual todo acontecimiento resulta necesariamente de causas que operan según leyes.

Deuterio. Isótopo del Hidrógeno de # atómico 2 y masa atómica 2.0147. Su núcleo está constituido por un protón y un neutrón.

Díametro del haz. Díametro de aquella sección transversal de haz que contiene el 60% de la potencia de salida.

Dicroico. Propiedad de algunos cuerpos de presentar dos coloraciones según la dirección en que se le mire.

Difracción. Fenómeno que se presenta cuando la luz pasa a través de una apertura o encuentra un obstáculo de dimensiones del mismo orden que la longitud de onda de dicha luz. Constituye un caso particular de interferencia y un fenómeno esencialmente ondulatorio, común a todas las radiaciones. Los corpusculos materiales, como los electrones, presentan también patrones de difracción al pasar a través de un cristal.

Dipolo radiante. Emisión de radiación electromagnética desde dos puntos fuentes.

Dirección P. Refracción del haz en la misma dirección del plano de polarización.

Dirección S. Refracción del haz perpendicularmente al plano de polarización.

Disipador térmico. Sustancia o aparato que se emplea para disipar o absorber el calor no deseado, como el que resulta en un proceso de fabricación (o en aplicaciones con láser, de los rayos reflejados).

Dispersión. Cambio de dirección de una radiación ondulatória o corpuscular como consecuencia de la interacción con la materia.

Dispersión inelástica. Ver dispersión Raman.

Dispersión Raman. Dispersión inelástica. La radiación difundida de un cuerpo puro al ser iluminado por luz monocromática.

Dispersión Rayleigh. Dispersión elástica. También conocida como dispersión molecular. Se refiere a la dispersión que se produce de la luz solar al incidir sobre la atmósfera, produciendo un fondo azul.

Disrupción. Apertura brusca de un circuito eléctrico.

Distribucion de Gauss. Ver Gaussiano.

Divergencia Angular. En el cual el haz laser se extiende en recorridos largos; tambien, la desviacion de los rayos separandolos entre si, como la que puede producir una lente concava o un espejo convexo.

Division del haz. Division optica de un haz de laser en dos o mas haces, que permiten trabajar en mas de un lado de una pieza simultaneamente, pero con una potencia algo menor que usando un sistema de haces multiples de salida.

Dopado. Dopado. Contaminado con algun otro elemento.

Dureza. Resistencia de un material a ser rayado.

Efecto Faraday. Metodo en el cual se logra que una sustancia llegue a ser opticamente activa, aplicando un campo magnetico estacionario intenso segun la direccion de propagacion.

Efecto Franz-Keldysh. Control de la banda de absorcion mediante una polarizacion electrica para la absorcion de la luz en semiconductores.

Efecto Kerr. La transformacion de sustancias normalmente isotropicas a birrefringentes o anisotropicas sometendola a intensos campos electricos estaticos perpendiculares a la direccion de propagacion.

Eje, eje optico. Linea central optica de un sistema de lentes, la recta que pasa por los centros de curvatura de las superficies opticas de un lente.

Electrofriccion. La carga electrica que se llega a alcanzar por efecto de la friccion.

Emitividad, emittancia. Rapidez con que ocurre la emision, razon entre la energia radiante que emite una fuente o una superficie y la que emite un cuerpo negro a la misma temperatura

Epitaxial. Zona en la cual se encuentra localizado el eje.

Endo-ocular. Referido a que se encuentra en el interior del ojo.

Endurecimiento por transformacion. un proceso metalurgico en el que son muy utiles los equipos laser, para endurecer metales calentandolos a la temperatura critica de transformacion, templandolos y solidificandolos, distribuyendo de manera uniforme el cargono que contienen.

Energia radiante. Energia que viaja como movimiento ondulatorio; especificamente, la energia de las ondas electromagneticas (luz, rayos X, rayos Gamma).

Enfocar. Ajustar la distancia focal para lograr una imagen nitida.

Error de direccion. Movimiento o divergencia del haz; se pueden evitar normalmente con trayectoria cortas.

Esencia monocromatica. Ver Luz monocromatica.

Espectroscopia. Estudio de los espectros de una radiacion electromagnetica, en particular de la luz.

Estabilidad. La capacidad de un sistema para no variar sus caracteristicas de operacion.

Estereoradian. Ver stereoradian.

Exotermalico. Referido a los procesos que se realizan con desprendimiento de calor.

Expansor del haz. Aparato optico que aumenta el diametro del haz y reduce la divergencia. El resultado es una mancha enfocada mas pequena y una distancia mayor entre el lente y la pieza.

Exposicion. Medida de la energia radiante total que incide en una superficie por unidad de area; exposicion a la energia radiante.

Flexografía. Procedimiento de impresion en el cual se emplean placas de nile sin costuras, que se graban mediante laser.

Flujo radiante. Rapidez de emision y de transmision de energia radiante.

Fluorecencia. El resplandor que emite un material cuando absorbe luz. Las ventanas de Brewster de silice fundido flourescen en el rango ultravioleta, aumentando la absorcion de la radiacion del laser y degradando el modo y la salida del haz.

Foco. Punto donde coinciden los rayos de luz que han sido reflejados por un espejo o refractados por un lente, en donde se produce una imagen de la lente. En el trabajo con equipos laser el foco del lente tiene, en relacion con la superficie de trabajo efecto critico, tal como la profundidad y forma de los agujeros que se perforan. Cuando el foco esta en la superficie, los agujeros son de diametro uniforme; cuando el foco esta mas alla de la superficie, los agujeros que se perforaron son cónicos.

Forma discreta. Dicese de la forma obtenida en sistemas de tren de pulsos o codigo digital al obtener datos muestreados, en forma de datos impulsionales.

Fotometro. Instrumento que sirve para medir la intensidad luminosa.

Foton. En la teoria cuantica, la unidad elemental de luz, que se comporta como onda y como particula. Tiene movimiento, pero no masa ni carga.

Frecuencia. En numero de ondas de luz que pasan por un punto fijo, en la unidad dada de tiempo o, el numero de vibraciones en ese periodo de tiempo.

Galvanometro. Dispositivo que consta de un iman estacionario permanente y una bobina conectada a una aguja indicadora que es desplazada al presentarse una corriente electrica en la bobina.

Ganancia. Otro termino que se usa para la amplificacion; generalmente se refiere a la eficiencia del medio emisor del laser para que ocurra una inversion de la poblacion. Una ganancia caracteristicamente alta es del 50% por paso de la onda de luz entre los espejos de la cavidad.

Gas coaxial. Flujo de gas inerte que se dirige hacia la superficie de trabajo y que se usa en la mayoria de los equipos laser para soldadura con el fin de evitar la oxidacion causada por el plasma y la absorcion de calor por el mismo. Para remover los desechos y para controlar la accion del calor, el chorro de gas tiene el mismo eje que el haz, de modo que se les puede dirigir juntos.

Gausiano. La curva normal o distribucion normal. En ejemplo de ello es la forma simetrica de campana de los agujeros creados por el haz laser no corregido, desenfocado y en su modo optimo. Un haz laser Gausiano tiene la mayor parte de su energia en el centro.

Ginecologia. Rama de la medicina que trata de los organos sexuales de la mujer, de su fisiologia y de sus enfermedades.

Glaucoma. Enfermedad de los ojos caracterizada por el aumento de la tension intraocular o el enrojecimiento del globo del ojo. Es bastante frecuente entre los 40 y 70 años. No se conoce la causa exacta del proceso, pero se admite que el factor fundamental es el bloqueo de los conductos por los que deriva el liquido ocular, de tal modo que la presion en el interior del ojo se incrementa de un modo anormal. El objetivo del laser en esta enfermedad es aliviar la presion intraocular y labrar nuevos caminos para permitir el escape del liquido contenido en el ojo.

Gradiente. De una funcion, es el vector que contiene las derivadas parciales de la funcion. Variaciones importantes de temperatura que producen variaciones en el indice de refraccion en espacios reducidos.

Granate. Nombre generico de varias especies minerales muy semejantes. El granate es un mineral corriente y ampliamente distribuido, pues puede encontrarse en rocas igneas, sedimentarias y metamorficas. La almandita y el piropo, variedades de color rojo mas o menos vivo, se utilizan como piedras finas en bisuteria, lo mismo que la grosularia. Las otras clases suelen emplearse trituradas en la preparacion de abrasivos.

Haz Abreviatura en ingles de "zona afectada termicamente" (heat affected zone). Es la zona de la superficie del metal (u otro material) en donde incide el haz laser.

Hendrik Kravens. Fisico holandés que contribuyo al desarrollo de la mecanica cuantica, con sus investigaciones sobre la teoria cuantica de la radiacion.

Hertz. Unidad de frecuencia en el sistema internacional de unidades (SI), se abrevia Hz.

Heteroestructura. De estructura desigual.

Microscopio. Solido que tiene la cualidad de absorber humedad del aire atmosferico, sin llegar a disolverse en el agua adquirida. La humedad absorbida se mantiene mecanicamente y no se combina quimicamente con la sustancia.

Imagen. La reproduccion optica de un objeto producida por un lente o un espejo. Un lente convexo tipico hace converger los rayos para formar una "imagen real" que pueda fotografiarse. Un lente concavo separa los rayos para formar una imagen "virtual" que no puede proyectarse.

Inciencia. Choque de un rayo de luz contra algo que se interpone en su trayectoria.

Incoherente. Sin coherencia. Ver luz coherente.

Intensidad. La magnitud de energia radiante (luz) por unidad, tal como tiempo o superficie reflectora.

Intensidad radiante. Potencia radiante o flujo, que se expresa como la emision por unidad de angulo solido alrededor de la luz en un intervalo dado de tiempo.

Intensificacion de la pulsacion. Modulacion electronica de un haz laser que produce una rapida potencia maxima en la etapa inicial del pulso. Esto permite una rapida evaporacion del material sin que se caliente la superficie alrededor. Tales pulsos tienen varias veces la potencia del modo CW.

Interaccion. Accion mutua entre cuerpos particulas o sistemas.

Intercambiador de calor. Radiador. Aparato que sirve para enfriar fluidos que circulan por su interior.

Intracavidad. Dentro de un espacio hueco del cuerpo humano

Intraocular. Que forma parte del globo ocular.

Intercuación. Que se encuentra en proceso de recuperación de la salud.

Interferómetro. Aparato para medir longitudes según métodos interferenciales sobre la base de una onda luminosa determinada.

Ionización. Proceso mediante el cual un electrón es separado de su átomo, molécula o ión.

Iridectomía. Fotosección del iris del ojo mediante el láser con el fin de eliminar el bloqueo existente o potencial que evita el flujo de humor acuoso a la pupila.

Irisación del objetivo. Pérdida de la luz a través de un elemento óptico que ocurre cuando no pasa en su totalidad el haz: una imagen que se desvanece gradualmente hacia alrededor.

Irradiancia. Intensidad superficial de potencia.

Irradianción. Exposición de la energía radiante, tal como calor, rayos X o luz; el producto de la irradiancia y el tiempo.

Isótopo. Cada uno de los núcleos atómicos de un mismo elemento químico, que poseen distinto número másico.

Isótropico. Sólido cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección en que se miden.

Itirio. Elemento químico situado en el grupo III. Su símbolo es Y, No atómico 39, p.a. 88.9. se emplea en la industria metalúrgica y en la construcción de reactores atómicos. Sus isótopos radioactivos se han utilizado en el tratamiento de cáncer.

John William Strutt, III Barón de Rayleigh. Físico Británico que descubrió los elementos básicos para establecer la teoría de la propagación de ondas en los fluidos.

Joule. Una unidad frecuente de medida en que se expresa la salida del láser en el funcionamiento pulsante. Equivale a 1 watt por segundo.

Keratoplastia radial. La eliminación de pequeñas protuberancias en el iris mediante el haz láser, de tal manera que la miopía es reducida. En el proceso anterior era necesario abrir el globo ocular y "raspar" estas protuberancias hasta reducirías. Es decir, se requería la intervención quirúrgica y un período post-operatorio de recuperación.

Laceración. En medicina, se refiere al corte realizado en tejido vivo.

Lambert. Unidad de luminancia. Es el brillo de una fuente que emite un lumen por centímetro cuadrado.

Lambert. Johann Heinrich. Físico que realizó estudios de la refracción de la luz y estableció las leyes de su propagación rectilínea.

Lámpara de cátodos. Fuente potente de luz, frecuentemente de forma helicoidal, que se emplea para provocar la emisión de fotones en los equipos de láser de estado sólido.

Láser. Acrónimo que se forma con las iniciales de la frase en inglés: amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (light amplification by stimulated emission of radiation). Un láser es una cavidad que tiene espejos en sus extremos y que se llena con cualquier sustancia capaz de emitir fotones, tal como el cristal, vidrio, un líquido, un gas o un colorante. Estas sustancias deben tener átomos, iones o moléculas capaces de ser excitados a un alto nivel de energía, por medio de luz, descargas eléctricas u otro tipo de estímulos. La transición desde el alto nivel de energía al estado normal básico va acompañada por la emisión de fotones que forman un haz coherente.

Lente cilíndrica. Lente cónica que cuando es seguida por una lente usual puede enfocar un haz láser en forma anular.

Lente giratorio. Haz en trayectoria circular para cortar agujeros de diámetro grande (si se desenfoca el rayo en esta operación, la densidad de potencia disminuye y se aumenta el tiempo de perforación).

Lente cóncava. Lente que se usa principalmente en los equipos láser de CO₂, tiene un lado cóncavo y el otro convexo.

Ley de Lambert. Describe la propagación rectilínea de la luz.

Longitud de onda. La longitud de onda de luz; generalmente se mide de cresta a cresta y es característica de su color. Las unidades comunes para medirla son el micrometro (μ m), el nanómetro y el Angstrom (anteriormente).

Luz. Unidad de flujo luminoso en el sistema internacional. es el flujo luminoso emitido por una fuente luminosa puntiforme de una candela de intensidad luminosa en un ángulo sólido de un estereoradian.

Luminancia. Comunmente se denomina iluminación; es el flujo luminoso o visible por unidad de área en un punto dado de una superficie.

Luz. Intervalo de frecuencias de radiación electromagnética que el ojo percibe; es decir, el intervalo de

longitudes de onda de 400 a 750 nanómetros aproximadamente.

Luz coherente. **Radiación coherente.** Radiación compuesta por trenes de onda que vibran en fase o, dicho más simplemente, rayos paralelos de luz.

Luz colimada. Rayos divergentes de luz que se hacen paralelos por medio de un lente o de otro aparato y que permiten que una imagen definida del objeto sea enfocada en el plano focal de la lente.

Luz incidente. Luz que llega a la superficie de un lente o de cualquier otro objeto. El "ángulo de incidencia" es el ángulo que forma el rayo de luz con la perpendicular de la superficie.

Luz monocromática. Teóricamente, luz de una sola longitud de onda. No es posible obtener luz completamente monocromática; generalmente tiene una banda estrecha de longitudes de onda. Los equipos láser producen bandas más estrechas.

Martensita. **Martensítico.** El principal constituyente duro del acero templado; acero templable. Así se le llama en honor de Adolf Martens.

Máser. Abreviatura en inglés de la expresión "Microwave amplified by stimulated emission of radiation". Amplificador de oscilaciones que se basa en la energía interna de átomos y moléculas para obtener radiaciones electromagnéticas coherentes, consideradas dentro del rango de las microondas.

Medidor de potencia. Accesorio que se emplea para detectar la potencia del haz láser en el espejo reflector posterior para afinar el haz y obtener la potencia óptica o para detectar la potencia que se entrega en la estación de trabajo.

Medio activo. Medio en el cual se realiza la emisión láser para una longitud de onda determinada.

Metabolismo. Conjunto de sustancias y transformaciones de energía que tienen lugar en los seres vivos.

Micra. Véase micrometro.

Micrometro. La unidad de longitud del sistema internacional de unidades (SI), la cual es igual a un millonésimo de metro. Anteriormente se le llamaba micra.

Micro-onda. Radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida entre 3 cm y 1 mm, que corresponde a frecuencias comprendidas entre 1,000 y 300,000 Mc, es decir desde la región que va desde las ondas cortas de radio a la de las radiaciones infrarrojas.

Milliradian. La milésima parte de un radian. Ver radian.

Modo. Una forma, arreglo o condición de funcionamiento de la operación de aparatos láser, tal como emisión continua, pulsos o grupos de pulsos. También es un término que describe la forma de la sección transversal del haz. Véase TEM.

Modulación. La capacidad de superponer, como control, una señal externa al haz de salida.

Moléculas clásicas monoatómicas. Estructura formada por dos átomos con dos núcleos idénticos que cuentan con un centro de simetría. La distribución de probabilidad de un electrón debe ser la misma en puntos situados simétricamente respecto al centro, por lo tanto la función de onda del electrón debe ser la misma en puntos simétricos o debe tener el mismo valor, pero signos opuestos.

Moléculas monoatómicas. Estructura formada por átomos de un mismo género unidos por fuerzas de enlace químico o que se mantienen en una ordenación determinada a consecuencia de fuerzas de atracción originadas por la interacción con una nube envolvente de electrones negativos.

Momento dipolar. El dipolo se define como dos cargas opuestas separadas por cierta distancia. En este caso nos referimos al protón y el electrón. El momento dipolar se define como el producto de la carga por la distancia entre ambas cargas.

Monocatómico. Referido a cuando se contiene un solo átomo.

Millimetro. Unidad de longitud del sistema internacional de unidades (SI), igual a un milmillonésimo de metro. Anteriormente se le llamaba milimicra, que se usa para medir la longitud de onda.

Modo de onda. Elemento químico situado en el grupo IIIB, su símbolo Md, No atómico 60, p.a. 144.27. es sólido y cristaliza en el sistema hexagonal a temperatura ambiente.

Meper. Unidad utilizada para expresar la relación entre dos valores. Se utiliza específicamente en movimientos asertiguados de acústica, electromagnetismo, etc. Un Neper equivale a 8.686 dB.

No colimado. Referido a la luz sin colimar. Ver colimado.

Radar. Dispositivo semejante al radar, con la diferencia fundamental que en vez de utilizar señales de radio emplea señales luminosas.

REM. Onda electromagnética.

Oftalmología. Parte de la medicina que estudia al ojo y sus enfermedades.

Onda. Una oscilación o vibración; la forma de movimiento por la cual se considera que se transmite toda la energía del espectro electromagnético.

Onda electromagnética. Perturbación emitida por una carga eléctrica que oscila o es acelerada. Pueden ser ondas de radio, rayos X, rayos Gamma, infrarrojos, ultravioleta y luz visible.

Óptica. Parte de la física que estudia las propiedades de la luz, especialmente en sus reacciones con el fenómeno de la visión. Los rayos que penetran al ojo pueden provenir directamente del objeto, atravesando en línea recta un solo medio transmisor, o bien haber sufrido reflexiones y refracciones en las superficies de separación de entre diferentes medios. El conocimiento de que la luz se transmite en línea recta a través de un medio único y que se refleja o se refracta en la superficie de separación de dos medios diferentes dio origen a la óptica geométrica, la cual deduce geométricamente las propiedades de los espejos y los lentes, partiendo de unos pocos principios fundamentales. Los ángulos que forman el rayo incidente y el reflejado con la normal a la superficie en el punto de incidencia se llaman respectivamente ángulo de incidencia y ángulo de reflexión, y son iguales.

Oscilación laser. La acumulación de ondas coherentes entre los espejos de los extremos de la cavidad laser. En el modo de onda continua (CW), la onda que se refleja hacia adelante y hacia atrás entre los espejos transmite una fracción de su energía en cada viaje; en el funcionamiento pulsante, la emisión ocurre instantáneamente.

Otorinolaringología. Parte de la medicina que tiene por objeto el estudio fisiológico y patológico del oído, nariz y laringe.

Pediatría. Parte de la medicina que tiene por objeto el estudio del desarrollo del niño y sus enfermedades.

Perlitico. Factor que determina la dureza del hierro de fundición gris. Si el metal no es perlitico no se le puede tratar térmicamente. También la perlitita es una roca volcánica vítrea con apariencia de perla.

Picosegundo. Unidad del tiempo del sistema internacional (SI), que es igual a una billonésima parte de un segundo.

Pierre Bouguer. Científico francés que realizó algunas de las primeras mediciones fotométricas e investigó la absorción de la luz en la atmósfera.

Plasma. En la soldadura con laser, un vapor de metal que se forma encima de la zona de incidencia del haz sobre la superficie del metal. También se utiliza para describir el tubo de laser (tubo de plasma, tubo de descarga) que contiene el gas completamente ionizado, en ciertos equipos.

Polarizador óptico. Elemento óptico cuya función es polarizar el campo electromagnético. Ver polarización.

Polarización. Restricción de la vibración del campo electromagnético a un solo plano, a comparación los innumerables planos en que vibra alrededor del eje de propagación la luz no polarizada. Esto elimina las pérdidas ópticas en las interfaces del medio de emisión laser con los elementos ópticos. Entre las diversas formas de polarización se incluyen las siguientes: aleatoria, lineal (plana), horizontal, heliética y circular. De las componentes de polarización, denominadas S y P, la componente p tiene pérdidas nulas para el ángulo de Brewster. véase ventanas de Brewster.

Policromico. Propiedad de algunos materiales de ofrecer distinto color según se miren por reflexión o refracción.

Potencia de salida. Energía que emite el laser por segundo en forma de luz coherente. generalmente se mide en Watts en la operación en modo continuo y en Joules en la operación por pulsos dando a conocer la duración de un pulso.

Potencia radiante. Cantidad de energía radiante disponible por unidad de tiempo; el flujo radiante.

PPOM. Memoria de solo lectura programable.

Q. La eficiencia de almacenamiento de energía de un resonador laser. Mientras mayor sea Q, menor será la pérdida de energía.

Radiación. Emisión de ondas espectrales electromagnéticas o partículas alfa, beta, etc., emitidas por una fuente.

Radiación del cuerpo negro. Explica la intensidad de la radiación electromagnética en equilibrio con la materia.

Radian. Un ángulo es un círculo que subtende un arco de longitud igual al radio; un ángulo 57.3 grados en el centro de un círculo, formado por dos radios que cortan tal arco. Entonces un rad=57.3

grados.

Radiancia. Brillantez, la energía radiante por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada desde una superficie radiante.

Reflectancia. Razón del flujo reflejado entre el flujo incidente, o la razón de la luz relajada entre la luz que incide en el objeto.

Reflexión. El cambio de dirección de energía radiante (luz incidente) causado por una superficie, sin cambiar la longitud de onda.

Refracción. Cambio de dirección de propagación de cualquier onda, tal como una onda electromagnética cuando pasa de un medio a otro, en el cual la velocidad de la onda es diferente. O simplemente, la desviación del rayo incidente cuando pasa de un medio a otro, como del aire al agua.

Regulación de corriente. Regulación del sistema láser en el cual la corriente de descarga se mantiene siempre constante, independientemente de la potencia de salida (la cual puede cambiar por desalineación o por suciedad).

Regulación de la luz. Forma de regulación de la potencia en la cual la potencia de salida se mantiene a un nivel constante por control de la corriente de descarga.

Resolución. Poder de descomposición, o la medida cuantitativa de la capacidad de un instrumento óptico para producir imágenes separadas de puntos diferentes de un objeto, la capacidad de hacer distinguibles las partes individuales de un objeto, de imágenes o fuentes de luz muy próximas.

Resonador. Los espejos o reflectores que forman la cavidad del láser, la cual contiene la barra o el tubo láser. Los espejos reflejan la luz hacia adelante y hacia atrás realizándose la amplificación bajo la acción de un estímulo externo. La emisión se efectúa a través de uno de ellos, que se denomina acoplador y que es parcialmente transmisor.

Respuesta espectral. La reacción de un aparato o un material a la luz monocromática, en función de la longitud de onda de esta.

Retícula. Conjunto de dos o más líneas o hilos cruzados que se ponen en el foco de algunos instrumentos ópticos para precisar la visual o efectuar mediciones muy delicadas.

Retráctil. Que puede ser retirado.

Revanco. Tratamiento térmico que se da a las aleaciones para eliminar la fragilidad que se ha adquirido al ser templadas.

Ruido. Corrientes o voltajes menores indeseables que se presentan en un sistema eléctrico o electrónico.

Saturación de corriente. En un láser es el valor para el que una corriente eléctrica adicional no aumentará la acción del láser.

Simetría. Armonía en la distribución y proporción de las partes de un todo.

Simetría de revolución. Dícese cuando los elementos de los átomos alcanzan un movimiento simétrico.

Simetría de vibración. Dícese cuando los elementos de los átomos vibran en forma simétrica.

Simetría esférica. Dícese cuando los elementos de los átomos tienen una forma esférica simétrica.

Soldadura por resistencia. Proceso para unir láminas de metal. Las dos láminas se colocan de manera que una de ellas se superponga a la orilla de otra. Dos electrodos gruesos de cobre se sujetan con fuerza a los lados de las hojas en el punto que se va a hacer la unión. una corriente muy alta fluye entre los electrodos, y la mayor resistencia de la lámina produce suficiente calor para fundir el metal en la unión de las dos piezas.

Solidificación. Paso de un cuerpo de líquido a sólido, es el fenómeno inverso de la fusión.

Spin. Movimiento angular intrínseco asociado a las partículas subatómicas y característico de las misoas.

Stereoradian. Unidad de medida de ángulos sólidos. Se define como el ángulo sólido que tiene su vértice en el centro de una esfera y que corta en la superficie de esta un cuadrado de lado igual al radio de la esfera.

Sueldado. Unión con una línea recta a los extremos de un arco o de una línea quebrada.

Telemetro. Sistema óptico que permite determinar la distancia a que se halla un objeto.

TEM. Abreviatura en inglés, de modo transversal eléctrico; la forma de la sección transversal del haz láser de trabajo. Se puede producir un número infinito de formas, pero solo un número relativamente pequeño es necesario para aplicaciones industriales. En general mientras más grande sea el TEM, más burdo será el enfoque.

Temple. Dar a un metal, cristal, etc., el punto de dureza o elasticidad mediante templeado. Por ejemplo,

en el templado del acero, este se calienta hasta su temperatura de transformación, para después enfriarlo con agua, aceite o salmuera.

Teodolito. Instrumento de precisión para medir ángulos, acimut y altitudes.

Teoría del éter. Hipótesis en la cual se indicaba la existencia de un fluido incompresible elástico, en el que se propagan las ondas luminosas, y que en el último tercio del siglo XIX no se había conseguido ser probada experimentalmente. Esta teoría fue desechada en el momento en que A. Einstein construyó su teoría de la relatividad.

Transformación. Dícese al proceso en el cual mediante la variación de la temperatura se logra producir la variación de la composición de los elementos del hierro y carbono (acero).

Transmisión. En óptica, el paso de la energía radiante (luz) a través de un medio.

Transmitancia. La relación de la energía radiante transmitida entre la energía radiante incidente, es decir, la fracción de la luz que pasa a través de un medio.

Trasplante. Intervención consistente en implantar a un ser vivo alguna parte orgánica procedente de sí mismo, de otro individuo de la misma especie o de especie distinta.

Tubo fotomultiplicador. Cavidad resonante que está compuesta por varios elementos con el fin de lograr una mayor potencia de salida.

Turbulencia. Variación de las condiciones normales de la atmósfera debida a variaciones irregulares de la velocidad y/o dirección del viento, que produce deformaciones en la señal óptica.

Usojal. El punto en el cual empieza la emisión láser durante la excitación del medio emisor.

Unidad astronómica. Unidad de medición de longitud de onda que es igual a un diezmil millones de metro. Mu es utilizada.

Unión P-N. Dícese de la unión de un material semiconductor intrínseco (puro) con un material semiconductor extrínseco (contaminado) ya sean estos donantes (P) o aceptantes (N).

Urología. Parte de la medicina que se ocupa del estudio de las vías urinarias y su patología.

Vector eléctrico. Dícese del campo eléctrico que se asocia a una onda de luz y que tiene dirección, sentido y amplitud.

Ventana. Una pieza de vidrio con caras planas y paralelas que admite el paso de luz hacia o a través de un sistema óptico y que impide la entrada de la suciedad y la humedad.

Ventana de Brewster. El extremo transmisor (o ambos extremos) del tubo láser, hecho de material óptico transparente y puesto al ángulo de Brewster.

BIBLIOGRAFIA

1. LASER. OPERACION EQUIPO USO Y DISEÑO.
E.E. COHERENT.
2. ERCELAS 80 CO2 LASER
TECHNICAL MANUAL
CILAS ALCATEL
3. CILAS 201
OPHTHALMIC LASER
OPERATING MANUAL
4. LASER FOCUS ELECTRO-OPTICS
NOVEMBER 1985
VACUUM INSTRUMENTS FOR MEASURING AND CONTROLLING LASER
GASES.
5. MUNDO ELECTRONICO.
PROPAGACION ATMOSFERICA DEL LASER I.
BOIXAROU EDITORES
1986 NUM.158
6. MUNDO ELECTRONICO.
PROPAGACION ATMOSFERICA DEL LASER II.
BOIXAROU EDITORES
1986 NUM.160
7. LASER FOCUS ELECTRO-OPTICS
JANUARY 1986
ADVANCES IN COMMERCIAL LASER 1985-86
8. LASER FOCUS ELECTRO-OPTICS
FEBRUARY 1986
1986 LASER ECONOMIC REVIEW & OUTLOOK.
9. MUNDO ELECTRONICO
ELECTRO-OPTICS AND LASER
BOIXAROU EDITORES
1986 NUM.164
10. MUNDO ELECTRONICO
FIBRAS OPTICAS I
BOIXAROU EDITORES
1982 NUM. 114
11. MUNDO ELECTRONICO
FIBRAS OPTICAS II
BOIXAROU EDITORES
1982 NUM. 116

12. HANDBOOK OF FIBER OPTICS.
THEORY AND APPLICATIONS
EDITED BY HELMUT F. WOLF
GARLAND STPM PRESS
13. MANUAL DE PREVENCIÓN DE ACCIDENTES PARA OPERACIONES
INDUSTRIALES.
MAPPRE EDITORES
CONSEJO INTERAMERICANO DE SEGURIDAD (CIAS)
14. FISICA VOL. I. MECANICA
ALONSO FINN
EDITORIAL ADDISON WESLEY
15. FISICA VOL. II. CAMPOS Y ONDAS
ALONSO FINN
EDITORIAL ADDISON WESLEY
16. FISICA VOL. III. FUNDAMENTOS CUANTICOS Y ESTADISTICOS
ALONSO FINN
EDITORIAL ADDISON WESLEY
17. OPTICA
HECHT
SERIE SHAUM
EDIT. MCGRAW HILL
18. MATERIALES DE INGENIERIA Y SUS APLICACIONES
FLINN-TROJAN
MCGRAW HILL
19. ELECTRICIDAD PARA TECNICOS
ABRAHAM MARCUS
EDIT. DIANA
20. CIRCUITOS DIGITALES Y MICROPROCESADORES
HERBERT TAUB
MCGRAW HILL