

300617  
35  
2 ej.



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

ESCUELA DE INGENIERIA

Incorporada a la U.N.A.M.

**ESTUDIO SOBRE PROCESOS DE SOLDADURA  
Y CORTE POR RAYO LASER**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA PRINCIPAL EN INGENIERIA MECANICA

p r e s e n t a :

Juan Eugenio Urbina de la Vega

TEJIS CON  
FALLA DE ORIGEN

México, D. F.

1987



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.

## I N D I C E

	<u>PAG.</u>
INTRODUCCION	1
CAPITULO I.	
<u>PROCESOS DE SOLDADURA Y CORTE CONVEN- CIONALES.</u>	<u>4.</u>
1.1. La soldadura y el corte.	4
1.2. Definición de soldadura y corte.	4
1.3. Clasificación de los métodos de soldadura.	5
1.4. Soldadura por fusión.	5
1.4.1. Procesos de soldadura por arco.	5
1.4.1.1. Arco de carbón.	7
1.4.1.2. Arco metálico.	9
1.4.1.2.1. Proceso T.I.G.	9
1.4.1.2.2. Proceso M.I.G.	11
1.4.1.3. Arco protegido	13
1.4.1.3.1. Soldadura por arco de electrodo recubierto.	14
1.4.1.3.2. Soldadura por arco sumergido.	15
1.4.1.3.3. Soldadura manual, semiautomática y automática.	15
1.4.2. Procesos de soldadura por llama	17
1.4.2.1. Oxígeno - acetileno.	17
1.4.2.2. Oxígeno - propano.	18
1.4.2.3. Equipo para soldar por llama.	18
1.4.3. Proceso de soldadura por alu-	

	minotermia.	19
1.5.	Soldadura sin fusión.	20
1.5.1.	Soldadura por forjado.	20
1.5.2.	Soldadura por resistencia.	20
1.5.2.1.	Soldadura de punto.	21
1.5.2.2.	Soldadura a tope.	21
1.5.2.3.	Soldadura de costura.	21
1.5.2.4.	Soldadura de proyección.	23
1.5.3.	Soldadura fuerte y blanda.	23
1.6.	Procedimientos especiales de soldadura.	24
1.6.1.	Soldadura por haz electrónico.	24
1.6.2.	Soldadura por ultrasonido.	25
1.7.	Tipos de juntas en soldadura.	27
1.8.	Calor de soldadura.	28
1.9.	El corte térmico de los metales.	29
1.9.1.	Corte con oxi-acetileno.	30
1.9.2.	Corte con arco plasma	31

## CAPITULO II.

	<u>PRINCIPIOS DE OPERACION DEL LASER.</u>	34
2.1.	Introducción y antecedentes.	34
2.2.	Naturaleza de la luz.	37
2.2.1.	Teoría electromagnética.	37
2.2.2.	Teoría corpuscular o cuántica.	40
2.3.	Emisión de radiación.	42
2.3.1.	Absorción estimulada de radiación.	42

2.3.2.	Emisión espontánea de radiación	43
2.3.3.	Emisión estimulada de radiación	44
2.4.	El haz del rayo laser.	47
2.4.1.	Homogeneidad.	50
2.4.2.	Coherencia.	51
2.4.3.	Direccionalidad	51
2.4.4.	Densidad fotónica	51

### CAPITULO III.

<u>PROCESO DE SOLDADURA Y CORTE POR RADIACION LASER.</u>		52
3.1.	Fundamentos del proceso.	52
3.1.1.	Definición y descripción general	52
3.1.2.	Principios de operación.	53
3.1.2.1.	Lasers de estado sólido.	53
3.1.2.2.	Lasers de gas	58
3.1.3.	Variaciones del proceso.	62
3.1.3.1.	Lasers de baja potencia.	63
3.1.3.2.	Lasers de alta potencia.	64
3.1.4.	Capacidades y limitaciones.	65
3.2.	Soldadura por radiación laser	67
3.2.1.	Operación pulsada.	71
3.2.2.	Operación continua.	75
3.2.3.	Materiales y sus propiedades.	78
3.2.3.1.	Difusividad térmica.	80
3.2.3.2.	Reflectividad.	82
3.2.3.3.	Absorción.	86
3.2.4.	Parámetros de soldadura laser.	87

3.2.4.1.	Grupo primario.	89
3.2.4.1.1.	Energía y potencia.	89
3.2.4.1.2.	Longitud del pulso	90
3.2.4.2.	Grupo secundario.	91
3.2.4.2.1.	Densidad de potencia.	91
3.2.4.2.2.	Longitud de onda.	91
3.2.4.2.3.	Enfoque.	91
3.2.5.	Diseño de las juntas y ensamblajes.	98
3.2.6.	Comparación con otros procesos de soldadura.	103
3.2.7.	Áreas de aplicación	107
3.3.	Aplicaciones de soldadura por radiación láser.	108
3.3.1.	Operación pulsada.	110
3.3.2.	Operación continua.	112
3.4.	Herramientas y accesorios.	114
3.5.	Corte por radiación láser.	115
3.5.1.	Corte asistido por gas.	117
3.5.2.	Comparación con otros procesos de corte.	123
3.6.	Seguridad.	124

#### CAPITULO IV.

<u>SELECCION DE EQUIPO</u>	128	
4.1.	Introducción.	128
4.2.	Determinación de la aplicación.	128

4.3.	Selección del tipo laser a emplear.	131
4.4.	Selección del sistema.	132
4.4.1.	Sistema haz-laser-muestra.	134
4.4.2.	Circuito eléctrico.	
4.4.3.	Circuito de refrigeración.	136
4.4.4.	Elementos secundarios.	137
4.4.4.1.	Tablas posicionadoras X-Y	137
4.4.4.2.	Componentes de entrega del rayo laser.	138
4.4.4.3.	Bastidores de soporte.	140
4.4.4.4.	Fibras ópticas.	141
4.4.5.	Controles.	142
4.5.	Especificaciones estándar de equipos de soldadura y corte.	142
4.7.	Requerimientos de instalación.	147
4.8.	Entrenamiento al operador.	149
4.9.	Mantenimiento.	150
4.10.	Problemas más comunmente encontrados.	151
	CONCLUSIONES	154
	BIBLIOGRAFIA	159

## INTRODUCCION

## INTRODUCCION

Hace apenas veintisiete años que se pusieron a punto los primeros lasers. Sin embargo, sus aplicaciones son ya numerosas: de la medida a la detección, de la cirugía al armamento, de la metalurgia a la microelectrónica, del corte a la deposición química, etc. Este estudio, se limita a tratar unas aplicaciones, como lo son la soldadura y el corte, en las que el rayo laser permite la transformación de la zona irradiada o de su entorno inmediato por fusión, calentamiento, evaporación, etc..

Conviene tener en cuenta que, salvo algunas excepciones, todas las transformaciones consideradas pueden efectuarse por otras técnicas. Pero en comparación con otras herramientas de manufactura para el corte y soldadura, los lasers poseen tres características esenciales. Pueden suministrar elevadas densidades de energía; durante tiempos que varían del picosegundo ( $10^{-12}$  segundos) al continuo, dependiendo del tipo del laser y su modo de funcionamiento; y esto, en una región del espacio muy localizada, determinada por el diámetro del rayo laser. Además, esta energía luminosa, puede ser transportada cómodamente y sin pérdidas o muy reducidas, mediante un juego de lentes, espejos y diafragmas.

Esto representa una gran ventaja, por ejemplo, en los tratamientos por puntos en blancos de masa importante o

en lugares de difícil acceso.

La utilización de la luz para calentar un material, no es una idea nueva. Según la leyenda, Arquímedes habría destruido la flota romana en Siracusa focalizando los rayos de sol. Es una idea conocida también por los niños que saben quemar una hoja de papel por medio de una simple lupa. Por tanto, no es sorprendente que, desde 1960, haya quien pensara en utilizarlos para calentar materiales.

Es por esta razón, y debido al poco estudio que se tiene en México de la aplicación del laser como herramienta de manufactura, que el sustentante se atrevió a desarrollar un estudio sobre "otro" proceso de soldadura y corte, habiendo más de setenta procesos desarrollados. Se seleccionaron las soldaduras y el corte por ser los procesos de manufactura por rayo laser más desarrollados en nuestro país.

El estudio se divide en cuatro capítulos. Los dos primeros desarrollan los procesos de soldadura y corte convencionales y las bases teóricas para poder comprender; en el tercer capítulo, el proceso de soldadura y corte por laser y el último capítulo se enfoca a la selección del equipo del que se puede disponer (importándolo de otros países) en México.

Para realizar el estudio se recurrió a la investigación bi  
bliográfica y de boletines técnicos, así como de revistas  
de ciencia y tecnología, por lo cual, el trabajo no preten  
de ser un análisis económico o de operación de campo de es  
te proceso tan novedoso en la industria mexicana.

C A P I T U L O I

PROCESOS DE SOLDADURA Y CORTE CONVENCIONALES

## CAPITULO 1 - PROCESOS DE SOLDADURA Y CORTE CONVENCIONALES

### 1.1. La soldadura y el corte.

Prácticamente todos los procesos de fabricación, pueden dividirse en tres grandes grupos: conformación, unión y acabado. La soldadura y el corte se encuentran en el grupo de unión. La unión, a su vez, se divide en sujeción y soldadura.

La sujeción es la unión de materiales por medios mecánicos tales como tornillos, espárragos, pasadores, arandelas, - chavetas, bulones, remaches y ganchos.

La soldadura, no obstante, es algo más que un proceso de producción; es también un proceso muy importante de mantenimiento. Algunos de los problemas más difíciles de soldadura se presentan en el mantenimiento.

### 1.2. Definición de soldadura y corte.

Las técnicas de la soldadura han llegado a ser tan variadas que resulta difícil definir con exactitud qué es una "soldadura". Se ha dicho que es la unión de metales por fusión o por calor, pero se ha demostrado que también se puede soldar sin fusión ni calor. Por lo tanto, se usará como la definición más acertada la siguiente: "Soldadura es la unión de metales y plásticos por métodos que

no precisan dispositivos de sujeción".

Cortar se encuentra definido como la cesión de la continuidad o la unión. Por lo tanto, se puede decir que el corte es una operación contraria a la soldadura.

### 1.3. Clasificación de los métodos de soldadura.

Existen alrededor de setenta procedimientos de soldadura. No es el propósito de este estudio enumerarlos todos a - continuación, no obstante, se van a describir los procedimientos más utilizados a los que se denominan convencionales.

Sin tener que enumerarlos, todos los procesos caen dentro de dos categorías diferentes: soldadura por fusión y soldadura sin fusión. La figura No.1 ilustra unos cuantos procesos de soldadura en las categorías que corresponden.

### 1.4. Soldadura por fusión.

La soldadura por fusión es cualquier proceso de unir metales en que se funden los metales que se van a unir. Los principales procesos de soldadura por fusión, son la soldadura por arco, soldadura por llama y termite.

#### 1.4.1. Procesos de soldadura por arco.

Los procesos de soldadura por arco emplean el calor generado por una corriente eléctrica, para llevar los metales a

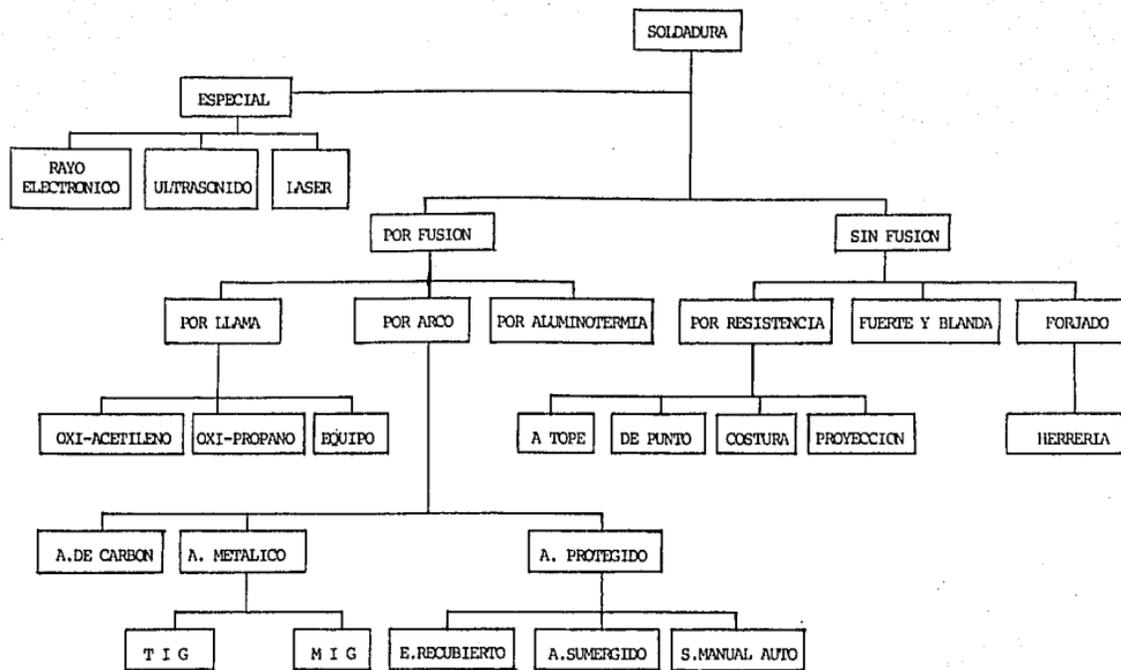


FIG.1. CLASIFICACION DE LOS METODOS DE SOLDADURA CONVENCIONAL.

la temperatura requerida para la soldadura.

El arco eléctrico es el fenómeno físico producido por el paso de una corriente eléctrica a través de una masa gaseosa, generándose en esta zona alta temperatura, la cual es aprovechada como fuente de calor, en todos los procesos de soldadura por arco eléctrico. Tiene la característica de desarrollar una elevada energía en forma de luz y calor, alcanzando temperaturas de  $4,000^{\circ}\text{C}$  ( $7,232^{\circ}\text{F}$ ) aproximadamente. Se forma por contacto eléctrico y posterior separación, a una determinada distancia fija de los polos positivo y negativo. Este arco, se mantiene por la alta temperatura del medio gaseoso interpuesto entre ambos polos. El medio gaseoso se genera por la combustión del revestimiento del electrodo, mediante el cual es posible la fusión del metal de aportación y la pieza.

#### 1.4.1.1. Soldadura de arco de carbón.

En esta soldadura, el arco se establece entre un electrodo de carbón sencillo o doble y los metales por unir. Un porta-electrodo soporta los electrodos de carbón. El arco únicamente provee el calor para ablandar y fundir los metales. No agrega nada al metal.

Este proceso se realiza por medio del circuito eléctrico que se muestra en la Figura No.2. La fuente de energía para soldar proviene de una máquina de corriente, ya sea

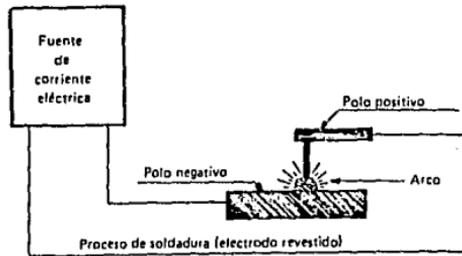
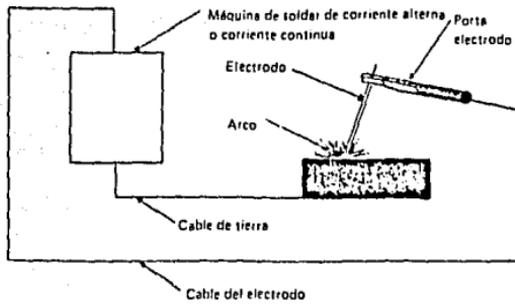


Fig. 2. Soldadura de arco de carbón. Se ilustran procesos de electrodos desnudo y revestido.

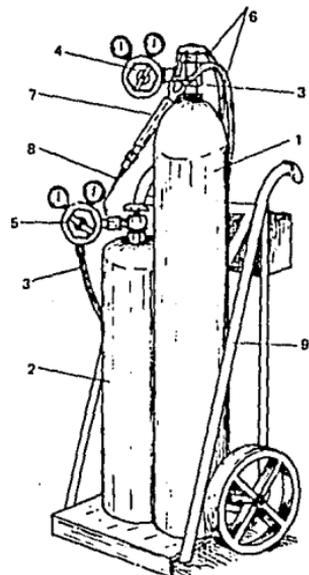


Fig. 4. Equipo de soldadura por llama.

continua o alterna, la cual forma un circuito eléctrico, a través de los cables conductores, del electrodo a la pieza. Este circuito se cierra al hacer contacto la pieza con el electrodo. El arco formado es la parte de donde el circuito encuentra mayor resistencia y es el punto donde se genera la fuente de calor. La alta temperatura generada en el arco, permite la fusión del metal base y la varilla de aporte.

#### 1.4.1.2. Soldadura de arco metálico.

Cada procedimiento de soldeo por arco puede reconocerse normalmente por el aspecto del equipo empleado. En arco metálico se distinguen dos tipos debido a su alta utilización actual. Este tipo de soldadura por arco metálico se explica mejor conociendo los procesos llamados T.I.G. y M.I.G.

##### 1.4.1.2.1. Fundamentos de la soldadura T.I.G.

Aunque la soldadura T.I.G. es un proceso de soldadura de arco metálico, tiene de cierta forma, semejanza con procesos de soldadura por llama. Se utiliza muy comunmente este método para soldar materiales no ferrosos como el aluminio y magnesio. Su ventaja consiste en que el gas inerte protege al metal fundido mucho mejor que la llama del soplete de oxiacetileno u otro proceso de llama, y también, es muy superior al recubrimiento ordinario de

los electrodos de soldadura de arco. Tampoco hay escoria que limpiar de la soldadura.

Las siglas T.I.G. significan "gas inerte y tungsteno".

El equipo básico para la soldadura T.I.G. es:

- a) Una máquina de alta frecuencia de soldar por arco.
- b) Un abastecimiento de gas inerte
- c) Abastecimiento de agua (a veces opcional), y
- d) Un soplete que actúa como portaelectrodo y mango.

Inerte significa simplemente que no reacciona o no se combina con otros elementos. Los dos gases inertes más populares para usarse en esta soldadura son, el argón y el helio. Su propósito es proteger la soldadura de la contaminación de la atmósfera. Cuando se usan amperajes mayores de 150 amperes, se enfría el soplete con agua para evitar el sobrecalentamiento. Los electrodos, aunque se dice que no se consumen, se desgastan por la limpieza, pulido y uso continuo; son fabricados de tungsteno y algunos de ellos se alean con torio o zirconio.

Como no se usa fundente en este proceso, no existe peligro de atrapar fundente en el área de soldadura. Esta soldadura es muy lisa, por lo que se usa para soldar recipientes de alimentos y medicinas donde los residuos de material orgánico en descomposición podrían tener serias consecuen-

cias. Como no hay salpicaduras de soldadura, el tiempo de limpieza se reduce considerablemente. Comparándola con - procesos de soldadura por llama, la T.I.G. se puede usar a más altas velocidades con menor distorsión. El esquema de la Figura No.3 muestra el equipo básico de T.I.G. y sus diferencias comparadas con el equipo básico de M.I.G..

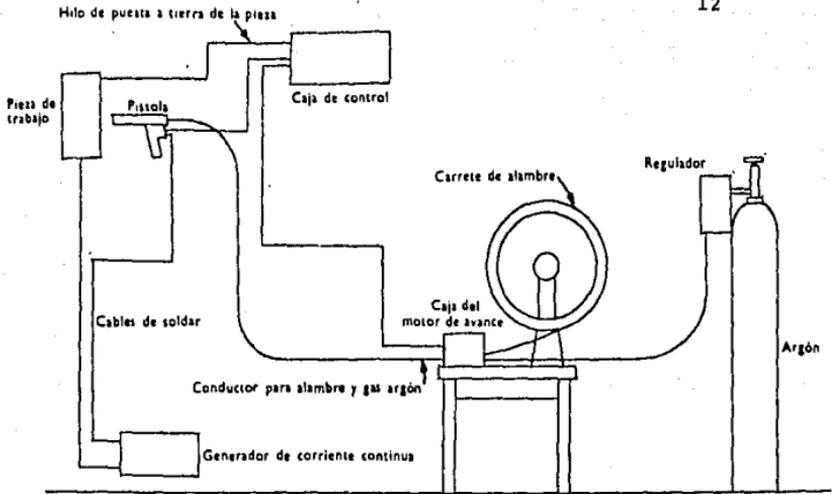
#### 1.4.1.2.2. Fundamentos de la soldadura M.I.G.

Se descubrió que para soldar material con 6.3 mm (1/4 pulg) o más de espesor con soldadura T.I.G., era necesario preca lentar los metales. Por éso, partiendo del proceso T.I.G. se desarrolló el proceso M.I.G.

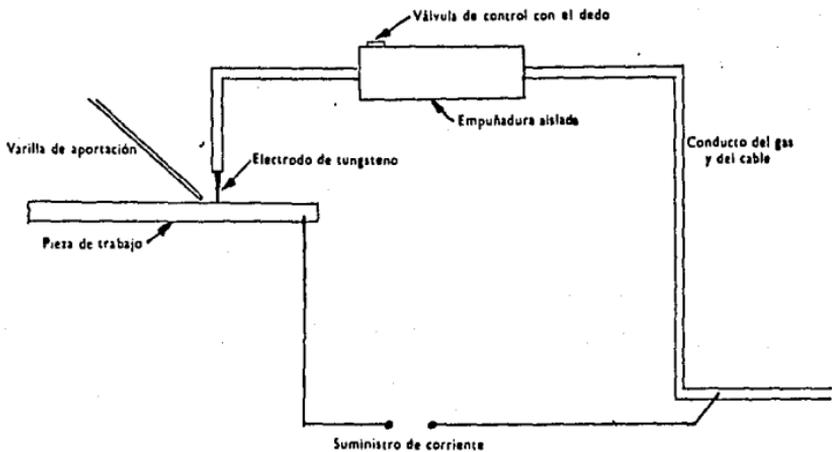
M.I.G. significa "Arco metálico en gas inerte" y difiere del proceso T.I.G. en lo siguiente: En la soldadura T.I.G. el electrodo no se consume, mientras que en la soldadura - M.I.G. el electrodo sí se consume.

El equipo básico para la soldadura M.I.G. (ver Figura No.3) es:

- a) Máquina soldadora de arco completa.
- b) Abastecedor de gas inerte.
- c) Mecanismo alimentador de alambre.
- d) Electrodo, y
- e) Pistola (determinada por el tipo de proceso que se use).



a) Equipo básico para la soldadura M.I.G.



b) Equipo básico para soldadura T.I.G.

Figura 3. Diferentes procesos de soldadura de arca metálico.

Hay muchos procesos que se emplean bajo la denominación de soldadura M.I.G., como son: electrodo desnudo protegido con gas inerte, electrodo recubierto con fundente, electrodo hueco con fundente interior, electrodo, fundente y gas protector, etc.. Los electrodos se diseñan de acuerdo al tipo de metal base que se va a soldar. En este proceso es común mezclar el argón y el helio con oxígeno o bióxido de carbono para reducir el costo del gas inerte. Como el electrodo viene en un rollo continuo, se pueden efectuar soldaduras continuas sin necesidad de parar para cambiar electrodo.

Cuando se usa alambre desnudo y protección de gas, hay muy poco que limpiar. Con M.I.G. manual, se pueden obtener velocidades superiores a 1,030 mm/min (40 pulg./min.). Debido a las velocidades de soldaduras más altas, hay menos distorsión en el metal base.

#### 1.4.1.3. Soldadura por Arco protegido

Este método especial es usado para proteger la soldadura. Debido a que el metal fundido con frecuencia se vuelve frágil cuando se expone al aire, se usa una defensa para protegerlo. La defensa puede formarse usando un electrodo recubierto, un gas inerte (T.I.G. o M.I.G.) o un fundente granulado, dependiendo del proceso usado.

#### 1.4.1.3.1. Soldadura por arco de electrodo recubierto

El electrodo es una varilla metálica, especialmente preparada para servir como material de aporte en los procesos de soldadura por arco. Se fabrica de material ferroso y no ferroso. Existen dos tipos de electrodos: el electrodo revestido y el electrodo desnudo.

##### a) Electrodo revestido

Tiene un núcleo metálico, un revestimiento a base de substancias químicas y un extremo no revestido para fijarlo en el porta-electrodo.

El núcleo es la parte metálica del electrodo que sirve como material de aporte. Su composición química varía y su selección se hace de acuerdo al material de la pieza a soldar. El revestimiento es un material que está compuesto por distintas sustancias químicas que tienen la función de dirigir el arco, conduciendo a una fusión equilibrada y uniforme, crean gases que actúan como protección, evitando el exceso de oxígeno y nitrógeno y producen una escoria que cubre el metal de aporte, evitando el enfriamiento brusco y también el contacto del oxígeno y del nitrógeno, y además estabilizan el arco.

Según la naturaleza del material de revestimiento, se conocen industrialmente tres tipos fundamentales para los electrodos revestidos:

1. Electrodo con revestimiento básico que contienen en su revestimiento calcio o calcita.
2. Electrodo con revestimiento rutflico, el cual posee un alto contenido de óxido de rutilo (titanio) y
3. Electrodo con revestimiento celulósico, cuyo revestimiento contiene más del 12% de materia orgánica combustible.

b) Electrodo desnudo (sin revestimiento).

Es un alambre estirado o laminado. Su uso es limitado por la alta absorción de oxígeno y nitrógeno del aire y de la intensidad de su arco.

1.4.1.3.2. Soldadura por arco sumergido

Este tipo de soldadura suple las funciones del revestimiento en electrodos desnudos por medio de fundente granular que, aplicado a la junta, arropa al arco eléctrico, - razón por la cual llámase a este procedimiento "de arco - sumergido". Su principal desventaja en soldadura manual, es que es muy difícil ver a través del cordón de soldadura.

1.4.1.3.3. Soldadura manual, semiautomática y automática.

Durante la soldadura por arco, se deben controlar tres variables:

- a) corriente,
- b) voltaje, y
- c) velocidad de soldeo.

En el soldeo manual con electrodos, o bien con T.I.G. manual, el soldador fija en la máquina la corriente deseada y mientras suelda, controla dos de las tres variables: velocidad de soldeo y tensión de arco. En la soldadura semiautomática, de la que es un ejemplo típico el proceso - M.I.G., la corriente es igualmente regulada de antemano sobre la máquina. La longitud de arco, y por lo tanto, el voltaje de arco, es automáticamente controlado por el alimentador de la varilla, el cual mantiene una longitud de arco constante. Como consecuencia, el operador controla únicamente la velocidad de soldeo. Finalmente, en soldadura automática por arco sumergido, las tres variables son fijadas de antemano y controladas por el equipo de soldadura.

Las siguientes notas resumen los principios de soldadura al arco:

1. Corriente continua polaridad directa (CCPD): significa que la pieza está conectada al terminal positivo de la máquina de soldadura.
2. El voltaje de arco aumenta con la longitud de éste. Si el electrodo se acerca a la pieza, la caída de voltaje a través del arco, tiende a anularse.
3. La velocidad de deposición del metal de aportación aumenta con la corriente.

4. La mayor penetración se logra con corriente continua con polaridad directa (CCPD) y es menor con corriente alterna, siendo la menos profunda la correspondiente a - - corriente continua con polaridad inversa (CCPI).

5. Alrededor de 2/3 del calor útil del arco aparece en el ánodo, y el tercio restante, en el cátodo.

#### 1.4.2. Procesos de soldadura por llama

Estos procesos aprovechan el calor producido por los gases al quemarse para fundir los metales. Con estos procesos se puede soldar con o sin material de aporte.

##### 1.4.2.1. Proceso oxígeno-acetileno

Existen tres tipos de procesos de oxígeno-acetileno, también conocidos como procesos de oxi-acetileno, y éstos van de acuerdo a la presión de trabajo del acetileno:

- a) Alta presión: de 0.3 (4.4) a 0.5 Kg/cm<sup>2</sup> (7.3 lb/plg.<sup>2</sup>).
- b) Mediana presión: de 0.1 (1.46) a 0.3 Kg/cm<sup>2</sup> (4.4 lb/plg.<sup>2</sup>).
- c) Baja presión cuando el acetileno es mantenido a una presión común, descontando las pérdidas de las válvulas y los conductos.

Combinando el oxígeno con el acetileno, se logra obtener una llama que permite soldar piezas ferrosas y no ferrosas. La combustión del oxígeno con el acetileno produce

la llama con temperatura más alta producida por combinaciones de gas-oxígeno. Esta temperatura debe ser de aproximadamente 3,300°C (6,000°F). Este proceso produce deformaciones por la gran concentración de calor. Por lo tanto, no es muy recomendable en procesos en los que interesa el relevado de esfuerzos o tratamientos térmicos; además la soldadura en espesores gruesos resulta antieconómica.

#### 1.4.2.2. Proceso Oxígeno Propano

De acuerdo con la presión mantenida por el propano, generalmente se utiliza el proceso de baja presión, utilizando la combustión de estos gases, se pueden soldar metales blandos.

La temperatura de la mezcla puede llegar hasta 2,700°C (4,892°F). La ventaja del proceso es que el costo del propano es más económico que el acetileno, pero tiene la desventaja que solamente se pueden soldar metales blandos.

#### 1.4.2.3. Equipo para soldar con procesos de llama.

El conjunto de elementos que, agrupados permiten el paso de gases hasta un soplete en cuyo interior se produce la mezcla que al contacto de una chispa producen una combustión, que se utiliza para soldar, se muestra a continuación: (Véase Figura No.4).

1. Cilindro de oxígeno.
2. Cilindro del gas.
3. Válvulas.
4. Regulador para oxígeno.
5. Regulador para gas.
6. Mangueras.
7. Soplete.
8. Boquillas.
9. Carrotransporte.

#### 1.4.3. Procesos de soldadura por aluminotermia

Este proceso también conocido como soldadura por Termite es muy antiguo, y se utilizaba para soldar piezas relativamente grandes de fierro o acero, por ejemplo: rieles rotos de vías de ferrocarril, planchas de barcos, etc..

Consiste en colocar en un crisol de fondo cónico con una boquilla en su extremo inferior, directamente sobre la pieza que se desea soldar. En el interior del crisol, se pone una mezcla estequiométrica de óxido de fierro y polvo de aluminio. En su parte superior se coloca una cinta de magnesio como mecha. Al encender la cinta de magnesio y alcanzar la mezcla, entra todo en ignición y el fierro metálico, producto de la reacción, cae direc

tamente fundido y a muy alta temperatura sobre la pieza por soldar que se encuentra rodeada con arcilla refractaria, a fin de que no se derrame o escurra el fierro fundido. La temperatura de la mezcla en combustión, casi alcanza los 3,000°C (5,432°F).

#### 1.5. Soldadura sin fusión.

La soldadura sin fusión es cualquier proceso de unir metales en que no se funden los metales que se van a unir. - La soldadura sin fusión no incluye, naturalmente, empernado, remachado o el uso de cualquier tipo mecánico de unión. Existen tres tipos principales de soldadura sin fusión: - forjado, soldadura por resistencia y soldadura fuerte y - blanda.

##### 1.5.1. Procesos de soldadura por forjado

En la soldadura por forjado, las piezas de metal que van a unirse se calientan en una fragua. Mientran se calientan, reposan sobre una capa de carbón de coque y se mantienen - tan limpias como sea posible. Las partes deben de calentarse uniformemente y hasta la temperatura adecuada. Luego son puestas en la posición deseada y martilladas juntas. Los metales se unen por la presión del martilleo. No son unidas al fundirse como en la soldadura por fusión.

##### 1.5.2. Procesos de soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia también utiliza el calor y la presión para unir las partes metálicas. Las partes que

van a soldarse son amordazadas, juntas, entre dos electrodos de cobre, en una máquina. El calor se genera por una corriente eléctrica que fluye a través de los puntos donde se hace la soldadura, o sea, los puntos donde los electrodos tocan el metal. Las soldaduras de punto, a tope, de costura y de proyección, recurren todas a un proceso de resistencia. Los diferentes nombres se refieren a las variaciones de la soldadura por resistencia.

#### 1.5.2.1. Soldadura de punto

En la soldadura de punto, las piezas son traslapadas y la corriente y presión aplicadas en un punto solamente. El proceso se ilustra en la Figura No.5.

#### 1.5.2.2. Soldadura a tope

En la soldadura a tope las piezas son colocadas punta con punta, de modo que la corriente fluya a través de la unión. El proceso se ilustra en la Figura No.6.

#### 1.5.2.3. Soldadura de costura

En la soldadura de costura se ruedan los electrodos, y se van haciendo soldaduras de punto a intervalos regulares a lo largo de la costura. Las soldaduras de punto pueden usarse para traslapar y formar una costura a prueba de agua. Este proceso se ilustra en la Figura No. 7.

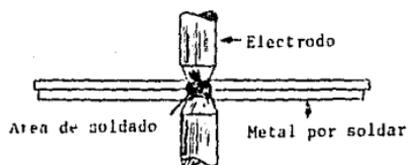


Figura 5. Soldadura de punto.



Figura 6. Soldadura a tope.

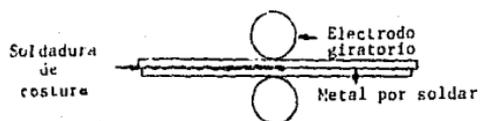


Figura 7. Soldadura de costura.

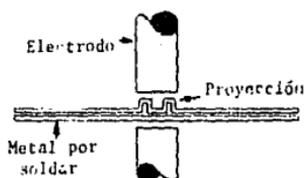


Figura 8. Soldadura de proyección.

#### 1.5.2.4. Soldadura de proyección

En la soldadura de proyección se hacen pequeñas protuberancias en la superficie de uno de los metales que se van a soldar. Estas protuberancias o proyecciones son soldadas a otra pieza metálica, pasando una corriente eléctrica a través de ellas y aplicando presión al mismo tiempo. La operación se muestra a continuación en la Figura No. 8.

Aunque es posible soldar metales medianamente gruesos, estos métodos de soldadura por resistencia son más frecuentemente utilizados por las industrias metálicas ligeras, como la industria automotriz. Un fabricante de automóviles dice que se usan más de mil soldaduras de punto en la fabricación de un automóvil. Si uno examina artículos - tales como refrigeradores, estufas, lavadoras, ductos de calefacción y ventilación, puede observar muchos ejemplos de soldadura por resistencia.

#### 1.5.3. Soldadura fuerte y blanda

La soldadura fuerte es similar al estañado, pero mucho más fuerte. En este proceso se usa una varilla de soldar (varilla de un metal con punto de fusión más bajo que el metal que se va a soldar). Se calienta el metal por soldar a una temperatura inferior a su propio punto de fusión, pero superior al punto de fusión de la varilla de soldadura. Las piezas de metal son unidas por el metal fundido de la

varilla de soldadura. Este método forma una soldadura fuerte y limpia. En esta soldadura, el metal de aportación debe ser uno del tipo no férreo, con un punto de fusión superior a los 436°C (817°F), pero inferior al de las piezas por unir. Este metal de aportación debe fluir entre las superficies estrechamente ajustadas de la unión por acción capilar. La aplicación más conocida de este tipo de soldadura, es la unión entre tuberías y codos de cobre en instalaciones domésticas.

Las soldaduras fuertes en horno, soldadura fuerte por inmersión, y soldadura fuerte por inducción, son algunos de los procesos más comunes y prácticos en este tipo de soldaduras.

La soldadura blanda emplea un metal de aportación con un punto de fusión inferior a los 436°C (817°F), y también inferior al de los metales a unir.

## 1.6. Procedimientos especiales de soldadura

### 1.6.1. Soldadura por haz electrónico.

Un haz electrónico consiste en una corriente controlada de electrones acelerados a través del vacío, impulsados por un voltaje acelerador. Los electrones salen del cátodo y son atraídos por un ánodo positivo, moviéndose a una velocidad en constante aumento, de manera que los electrones alcancen su máxima velocidad en el instante de su impacto

sobre el ánodo. Si el voltaje acelerador es muy alto del orden de muchos miles de volts, el impacto de los electrones sobre el ánodo, produce considerable calor, teniendo que enfriarse éste en casos extremos con agua o aceite.

Ventajas de esta soldadura son que solda metales o cerámicos, ausencia de contaminación, no hay metal de aporte, - excelente para microsoldaduras, altas velocidades de soldadura y no es necesario el precalentamiento. Sus desventajas son que es económicamente muy costoso, se requiere de un buen acabado, resulta difícil soldar metales volátiles y se requieren condiciones de vacío.

#### 1.6.2. Soldadura por ultrasonido

En la soldadura por ultrasonido se utilizan frecuencias comprendidas entre 1,000 (dentro del intervalo audible de frecuencias) y alrededor de 100,000 ciclos (ultrasonido, más allá del intervalo de frecuencias captado por el oído humano). Alrededor del 15 al 30% de la energía acústica es recibida por la costura de la zona de la soldadura. La vibración acústica crea un efecto de fricción, el cual une los metales en una soldadura solapada con una elevación de temperatura mínima. El intervalo de potencias suministradas varía de algunos watts a 8 kilowatts.

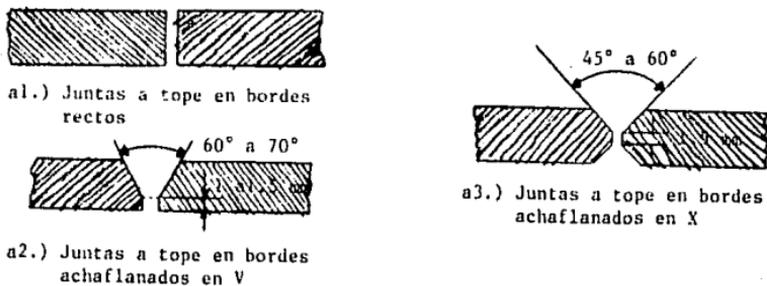


Figura 9. Tipo de juntas de soldadura a tope.

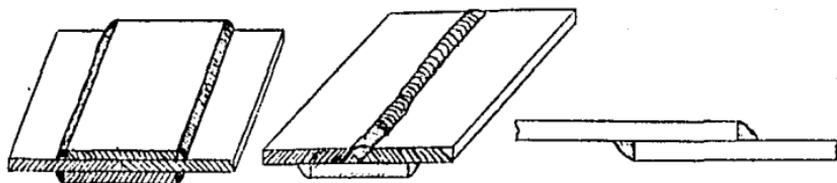


Figura 10. Juntas de solape (y traslape).

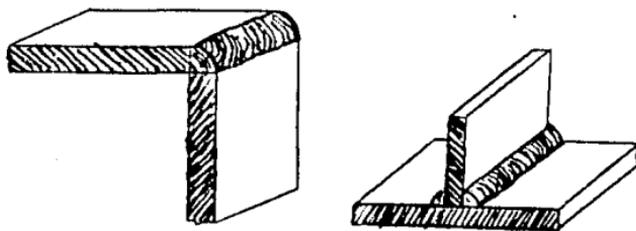


Figura 11. Juntas en ángulo y en T.

### 1.7. Tipos de juntas de soldaduras

Las juntas son las diversas formas que presentan las uniones en las piezas, y que están estrechamente ligadas a la preparación de las mismas. Generalmente se presentan en los tipos siguientes:

- a) Juntas a tope,
- b) Juntas de solape,
- c) Juntas en ángulo.

a) Juntas a Tope.- Son aquellas donde los bordes de las chapas a soldar, se tocan en toda su extensión, formando un ángulo de  $180^\circ$  entre sí. Este tipo de juntas se efectúa en todas posiciones, las juntas a tope a su vez, se subdividen en:

- a1. Juntas a tope en bordes rectos.
- a2. Juntas a tope en bordes achaflanados en V.
- a3. Juntas a tope en bordes achaflanados en X.

Todas estas divisiones se muestran en la Figura No.9.

b) Juntas de solape.- En este tipo de juntas, los bordes de las chapas no requieren preparación mecánica, ya que los mismos van superpuestos (ver Figura No. 10). El ancho de la solapa dependerá del espesor de la chapa.

c) Juntas en ángulo y en T.- Son juntas donde las piezas debido a su configuración, forman ángulos interiores

en el punto a soldar (ver Figura No.11). Debido a esta particularidad, los bordes no requieren preparación mecánica.

#### 1.8. Calor de soldadura

El calor para realizar una soldadura se mide siempre en joules por pulgada, o en joules por centímetro de soldadura. Es fácil de calcular y tiene aplicación universal a todos los tipos de soldeo.

El joule es un watt por un segundo (multiplicado, no dividido). Los watts se toman como el producto del voltaje de arco por la corriente de soldeo. El método para calcular el calor de soldeo, se puede mostrar mejor con un ejemplo.

Se realiza una unión a tope con un voltaje de arco de 25V y una corriente de 170 Amp. Vamos a calcular el calor de soldadura para una velocidad de 7.5 cm. por minuto:

$$\text{Watts} = 25 \times 170 = 4,250$$

Por ser el joule un watt por segundo, convertiremos la velocidad de soldadura en centímetros por segundo, dividiendo esta velocidad por 60 ó lo que es lo mismo, multiplicando por 60 los watts:

$$\text{Joules por centímetro a } 7.5 \text{ cm/min} = \frac{4,250 \times 60}{7.5 \text{ cm/min.}} = 34,000$$

Ahora, supongamos que la soldadura puede hacerse empleando otro electrodo u otro método a 35 V, 300 A y 20 cm/min.:

$$\text{joules por centímetro a 20 cm/min} = \frac{35 \times 300 \times 60}{20} = 31,500$$

El segundo método de soldeo sería entonces mejor por reducir la cantidad de calor.

Para reducir aún más el calor para la unión soldada, la cantidad de metal depositado deberá ser la mínima necesaria para obtener una unión suficiente y satisfactoria. Muchas uniones son sobrecargadas. La cantidad exacta de metal requerido es un problema de análisis de tensiones, por lo que sólo diremos que una soldadura con exceso de material, más que buena, es defectuosa.

### 1.9. El corte térmico de los metales

Aunque los métodos de soldadura por fusión tienen por finalidad la unión de los metales, virtualmente todos estos métodos pueden emplearse para cortar. El corte térmico es uno de los métodos más caros para cortar los metales. Es lento y consume grandes cantidades de oxígeno y gas combustible. Los sistemas de corte más baratos son los de tipo mecánico como son la cizalla, punzonado rápido y normal, sierra o discos. Sin embargo, el corte térmico es más versátil y tiene las siguientes ventajas:

1. Corta metales de gran espesor.
2. Corta cualquier forma y sigue cualquier línea, dependiendo de la exactitud exigida al corte. Los agujeros y ranuras no representan dificultad.
3. Corta en cualquier posición, e incluso bajo el agua.
4. Bien hecho y con control, se obtienen precisiones y buenos acabados.

#### 1.9.1. Corte con oxi-acetileno

Aunque es más común la utilización del propano por ser más barato que el acetileno, el corte se realiza en dos operaciones. En primer lugar, el calor de la llama eleva la temperatura hasta su punto de ignición, no hasta el punto de fusión. Para el acero, la temperatura de ignición es de 870°C (1,600°F), cuando el metal se pone al rojo. En segundo lugar, al metal caliente se le inyecta una corriente de oxígeno que lo oxida o quema.

La superficie oxicortada de cualquier chapa de acero, siempre se endurece, pues la alta conductividad térmica de este material ocasiona un temple. Si tal temple produce agrietamiento en los aceros más altos en carbono o débilmente aleados, puede ser necesario un precalentamiento antes del corte. El corte con llama consume necesariamente más oxígeno que la soldadura por llama. El consumo de acetileno baja un poco, pero el del oxígeno se duplica. Una característica distintiva del corte

con llama, la constituyen los pequeños surcos curvos de las paredes de corte. La distancia en la dirección de corte, entre la parte de arriba y la de abajo de los surcos, recibe el nombre de desplazamiento del corte.

#### 1.9.2. Corte con arco plasma

Esencialmente este método es una extensión del proceso T.I.G.. La pistola de arco plasma es una pistola especial de T.I.G. que lleva un electrodo de wolframio, que no sobresale del extremo de la boquilla. El electrodo se alimenta con corriente continua a polaridad directa (CCPD) estando la pieza a cortar conectada al electrodo positivo. Las máquinas normales de soldadura no son apropiadas, pues el corte por arco plasma necesita unos 150 V. de tensión a circuito abierto, valor que resulta excesivamente alto para las máquinas de soldadura por arco y una intensidad de corriente de 500 A o superior, con factor de marcha de 100%.

En la pistola de plasma, la punta del electrodo está localizada en el interior de la boquilla. Esta pistola tiene solamente un pequeño orificio. El gas de corte debe fluir primero a través del arco, donde se calienta a más de 8,200°C (15,000°F), temperatura mucho más alta que la de cualquier llama. Pero en vez de permitirle la expansión lógica resultante de este gran calentamiento, se le fuerza, mediante una elevada presión, a circular por el estre

cho orificio de la boquilla y como resultado se acelera a velocidades supersónicas de cerca de 1,200 m/s (4,000 pies por segundo). Este chorro de gas, tan extremadamente caliente, puede fundir cualquier metal o material cerámico, y su gran velocidad expulsa el metal fundido rápida y - - limpiamente del corte, obteniéndose un acabado extremadamente suave, limpio y libre de óxidos metálicos.

El plasma es un gas que se ha calentado a temperatura tan grande que se ioniza y puede conducir la corriente eléctrica. En el plasma de corte, solamente el 1% de los átomos de gas están ionizados, pero un porcentaje aparentemente tan pequeño de ionización, es suficiente para conducir la corriente eléctrica.

El plasma se considera como el cuarto estado de la materia además del sólido, líquido y gaseoso. Cuando la materia pasa de uno de estos estados a otro, existe siempre un calor latente, exactamente igual que el paso de agua líquida a vapor a la misma temperatura. De la misma forma la pistola de plasma suministra energía al gas con el fin de convertirle en plasma conductor. Cuando el plasma se - convierte en gas en la pieza, se desprende calor.

El gas empleado en el corte al arco con plasma, depende del metal a cortar. El aire comprimido se prefiere para los

aceros al carbono y débilmente aleados. Algunos aceros fuertemente aleados, tales como los aleados con cromo o níquel, se pueden cortar empleando aire comprimido.

El proceso de corte con arco plasma ofrece dos ventajas de gran importancia: no alabea o distorsiona las chapas, y el corte se puede realizar a elevadas velocidades.

C A P I T U L O 2

PRINCIPIOS DE OPERACION DEL LASER.

## CAPITULO 2 - PRINCIPIOS DE OPERACION DEL LASER

### 2.1. Introducción y Antecedentes

La palabra laser es un acrónimo de la expresión inglesa "luz amplificada por la emisión estimulada de una radiación", (en inglés "light amplification by stimulated emission of radiation").

Esta frase viene a definir el propio concepto del peculiar tipo de radiación ante la que nos encontramos. Por un lado, "luz amplificada" nos habla de que nos movemos dentro del espectro electromagnético, en el campo de la luz, pero con la característica de ser amplificada. La otra parte de la frase: "emisión estimulada de una radiación", nos sitúa, además, en el origen histórico del concepto físico que dio lugar posteriormente al laser. Fue Albert Einstein quien, en 1917, expuso la posibilidad de que el proceso de emisión de la radiación pudiese ser interferido, estimulándose el paso del átomo de su posición de excitación a la de reposo.

Sin embargo, tuvo que llegar la década de los años cincuenta para que tal principio pudiese ser reproducido en un modelo experimental. Concretamente fueron C.H. Townes y sus colaboradores los que en 1950, diseñaron los primeros sistemas de amplificación de radiaciones, utilizando

el procedimiento de estimular la emisión, pero dentro del espectro de las microondas; a tal sistema se le denominó "maser" (microondas amplificadas por la emisión estimulada de una radiación). Tuvo que llegar el año de 1958 para que el mismo Townes y Schawlow en Estados Unidos y N.G. Basov y A.M. Projorov en la URSS, demostraran la posibilidad de construir un sistema capaz de reproducir tales características, pero ya dentro de la emisión lumínica.

En 1960 Teodoro Maiman consiguió construir el primer laser de rubí a impulso en los laboratorios de la Hughes Aircraft Corporation. A partir de este momento se inició una larga carrera en el desarrollo de otros tipos de emisores de laser. En 1962 se crearon los diversos laser con diversos tipos de gas como medio activo. Paralelamente se fue desarrollando un amplio campo de posibilidades prácticas de utilización de los diversos sistemas de radiación laser en Ingeniería, Telecomunicaciones, Industria, Medicina, etc.. La Tabla No.1 muestra los sistemas lasers comerciales disponibles.

Pero antes de avanzar en lo que serán las bases de utilización práctica en soldadura y corte de la radiación laser, resulta imprescindible recordar los principios físicos sobre los que se apoya la misma.

TABLA I

SISTEMAS LASERS COMERCIALMENTE DISPONIBLES

<u>Material Laser</u>	<u>Longitud de Onda.um</u>	<u>Modo de Operación</u>	<u>Potencia de Salida, Watts</u>	<u>Aplicación</u>
RUBY	0.6943	Pulsada Interrumpida	1 - 20 (Promedio) 10 <sup>5</sup> (Pico) 10 <sup>8</sup> (Pico)	Soldadura Soldadura Vaporización
Nd EN VIDRIO	1.06	Pulsada Interrumpida	1 - 15 (Promedio) 10 <sup>6</sup> (Pico) 10 <sup>9</sup> (Pico)	Soldadura Remoción de material Vaporización
Nd EN YAG	1.06	Continua Pulsada Interrumpida	1 - 1100 10 <sup>6</sup> (Pico) 10 <sup>9</sup> (Pico)	Soldadura, Calentamiento Soldadura Vaporización
CO <sub>2</sub>	10.6	Continua Pulsada Interrumpida	50 - 10 K 1 - 250 (Promedio) 10 <sup>4</sup> (Pico)	Corte Soldadura Remoción de Material
ARGON	Cualquiera	Continua Pulsada	1 - 15 1 - 25 (Pico)	Holografía Vaporización.

## 2.2. Naturaleza de la luz

Hay dos teorías básicas para explicar la naturaleza de la luz: como ondas o como corpúsculos. De Broglie demostró la compatibilidad de las dos hipótesis, pues la luz en unas ocasiones se comporta como onda y en otras como corpúsculos.

### 2.2.1. Teoría electromagnética

Se llama radiación electromagnética a cualquier onda portadora de energía, capaz de propagarse a través del espacio como un campo eléctrico variable, ligada a un campo magnético, también variable y perpendicular entre sí.

Son características comunes a todo movimiento ondulatorio los siguientes conceptos físicos:

° Amplitud.- Es la intensidad del movimiento ondulatorio. Se refiere a la mayor o menor intensidad, positiva o negativa, del fenómeno ondulatorio en todo momento, tomando como referencia la situación de reposo.

Si proyectamos en una escala temporal el desarrollo de la oscilación completa de cada punto del movimiento ondulatorio, nos encontramos con el PERIODO, que es el tiempo necesario para que se realice una oscilación completa. Y -refiriendo este tiempo respecto a la unidad, el segundo, obtenemos la FRECUENCIA: número de oscilaciones que tienen

lugar en cada segundo. Por lo tanto, periodo y frecuencia son magnitudes inversas, utilizándose más habitualmente esta última.

En lo referente a la función especial del movimiento ondulatorio, contamos para su mención con la Longitud de Onda o distancia que hay entre dos puntos del mismo movimiento ondulatorio que se encuentran en la misma posición y situados consecutivamente unos tras otros. Así por ejemplo, será la longitud de onda la distancia que hay entre dos crestas o dos valles, situados inmediatamente a continuación unos de otros.

Si, como sabemos, la velocidad es igual al espacio dividido por el tiempo, la velocidad de propagación del fenómeno ondulatorio será igual a la longitud de onda dividida por el periodo, o lo que es lo mismo, multiplicada por la frecuencia.

Pues bien, los fenómenos electromagnéticos se caracterizan porque su velocidad de propagación es una constante, igual a la velocidad de la luz en el vacío: 300,000 km/s, que se representa por la letra  $c$ . Por lo tanto, la diferencia entre los diversos tipos de radiación electromagnética vendrá dada por la variación de las dos variables: longitud de onda y frecuencia de la radiación, que por lo tanto, serán magnitudes inversas.

De esta forma podemos clasificar a los diversos tipos de radiación electromagnética desde las ondas de radio con longitudes de onda que pueden llegar a medirse en kilómetros, hasta los rayos cósmicos en el otro extremo del espectro, con longitudes de onda medibles en nanómetros - ( $1 \times 10^{-9}$  metros) y, por lo tanto, con frecuencias altísimas, pasando por los rayos infrarrojos (de 10,000 a 760 nanómetros), la luz visible (760-380 nanómetros), la radiación ultravioleta (380-180 nanómetros), rayos X y rayos gamma, (menos de 180 nanómetros).

Para catalogar a los diversos tipos de radiación dentro del espectro electromagnético utilizaremos habitualmente el parámetro de la longitud de onda, a fin de no confundir la frecuencia propia de la radiación, según se acaba de definir, con la frecuencia de impulsos del emisor.

Podemos decir ya que los diversos tipos de laser podrán ser construídos en el campo de la luz visible o de la radiación infrarroja, con la peculiaridad de que al ser monocromática (como se verá más adelante), su longitud de onda será siempre fija dentro de algunos de estos campos. Dentro de la luz visible, existen diferencias dentro de los diversos colores, y la siguiente tabla nos indica la longitud de onda de los mismos:

Rojo .....	760 - 630 nanómetros
Naranja .....	630 - 600 nanómetros
Amarillo .....	600 - 570 nanómetros
Amarillo verdoso .....	570 - 550 nanómetros
Verde .....	550 - 520 nanómetros
Verde azulado .....	520 - 500 nanómetros
Azul .....	500 - 450 nanómetros
Violeta .....	450 - 380 nanómetros

De esta forma, cuando se diga que el laser Helio-Neón emite con una longitud de onda de 632.8nm, sabremos ya que será de color rojo, y que por lo tanto, su absorción vendrá dada por la característica de la luz roja.

### 2.2.2. Teoría corpuscular o cuántica

En 1901, el físico Max Planck intentó explicar las características de la radiación que emiten los cuerpos a temperaturas suficientemente elevadas como para ser luminosos. Obtuvo una fórmula del espectro de esta radiación (ésto es el brillo relativo de los diversos colores presentes) en función de la temperatura del cuerpo. Supuso que la radiación es emitida discontinuamente como pequeños paquetes de energía, que reciben el nombre de "cuantos". Fué en 1905 cuando Albert Einstein propuso que la luz no solamente se emite en forma de cuantos, sino que también se propagaba como cuantos individuales.

A partir de Planck (unidades elementales de energía, cuantos) y de Einstein se admite que desde este último punto de vista existen unos "elementos últimos" de energía en la luz que se denominan fotones. La energía de un fotón viene dada por la fórmula de  $E = h \cdot \nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck, igual a  $6.63 \times 10^{-27}$  ergios/s y  $\nu$  es la frecuencia de los electrones distribuidos en capas. Desde el punto de vista atómico, recordemos que existe el núcleo con protones y neutrones, donde se acumula la carga positiva y la envoltura o corteza, donde están los electrones distribuidos en capas. Estas capas se denominan del núcleo al exterior K, L, M, N, O, etc.. Sólo pueden contener un número definido de electrones cada una. Los electrones tienden a situarse en el estado de menor energía. Esto es en el lugar vacante más cercano al núcleo.

Si aplicamos una energía (por una radiación) a un átomo, comunicamos energía en sus electrones, que se sitúan en capas superiores, de nivel energético superior, dejando huecos en capas inferiores. Cuando ha cesado la aplicación de energía, el electrón tiende a ocupar el hueco inferior de la capa de menos energía, emitiendo su exceso de energía entre el nivel superior (en el que estaba cuando el átomo estaba excitado) y el inferior, al que ha pasado tras la excitación.

La luz normal procede de la excitación energética de un emisor, mediante calor, energía eléctrica, etc. Muchos átomos se excitan y se desexcitan rápidamente, emitiendo radiación electromagnética del tipo de la luminosa. Sin embargo, existen diversidad de átomos (cuerpos químicos compuestos) y por tanto, diversidad de momentos de desexcitación. Por éso esta radiación se emite:

- en diversas longitudes de onda.
- en diversos momentos (no coherentes)
- en diversas direcciones del espacio.

Hay casos especiales dentro de la luz normal en que la emisión se realiza con algún intervalo, respecto a la excitación. Por ejemplo:

- a un tiempo corto tras la excitación: fluorescencia.
- a un tiempo más largo tras la excitación: fosforescencia.

## 2.3. Emisión de radiación

### 2.3.1. Absorción estimulada de radiación

Ya se mencionó que los átomos contienen muchos estados de energía discretos y que los electrones pueden ocupar cualesquiera. Por ejemplo: un átomo de hidrógeno contiene un número infinito de estados de energía. Tiene un electrón que puede ocupar solamente uno de estos estados. Cuando hay un número enorme de átomos de hidrógeno, se encuentra

que los electrones están distribuidos estadísticamente entre los distintos estados de energía, de acuerdo con la ley de distribución de Maxwell Boltzmann. Desde luego, la distribución de los estados ocupados depende de la temperatura. El máximo número de electrones se encuentra en el estado de energía más bajo. A temperaturas más altas, hay un número mayor de electrones que pueden existir en los estados de energía más elevados que a temperaturas más bajas.

Para efectuar una transición hacia arriba a un estado de energía más alto, un electrón debe absorber suficiente energía para cubrir la diferencia de energías entre el estado inicial, llamado estado base y el final, llamado estado metaestable, que quiere decir, que el estado es estable, pero no el más estable de éstos. Para lograr esta transición, el electrón absorbe un fotón de energía apropiada o adquiriendo energía por colisiones con otros átomos en el recipiente. A este tipo de absorción de energía provocada por un medio externo (flashes de luz, calor, etc.), se le llama "absorción estimulada de radiación".

### 2.3.2. Emisión espontánea de radiación

Cuando el electrón está en estado de excitación, puede realizar una transición hacia abajo con la emisión de un fotón, incluso aunque el átomo esté aislado de sus alrededores. Este tipo de transiciones se llaman espontánea

y el proceso de radiación respectivo se conoce como emisión espontánea de radiación. Junto con el conocimiento de las interacciones de átomos y fotones, la mecánica cuántica subyacente, permite predecir la probabilidad de la emisión espontánea, y por tanto, la "vida media" de un estado excitado. La vida o duración de un estado excitado depende de la función de onda del electrón para ese estado, y también de las funciones de onda de los otros estados a los que - puede caer el electrón.

En algunos casos, los estados excitados pueden decaer con mucha rapidez mediante la emisión espontánea de fotones, - pero en otros casos puede suceder que la probabilidad asociada a lo que de ordinario será el principal proceso de - emisión, sea muy baja, de manera que la vida o duración del estado de excitación puede ser mucho mayor.

### 2.3.3. Emisión estimulada de radiación

Supóngase ahora que se tiene un recipiente con átomos y un haz de fotones, cada uno con una energía  $h\nu_{12}$ . Se supondrá que esta energía es igual a la diferencia de energía entre los estados 1 y 2 como se muestra en la Figura No.12.

La mecánica cuántica predice determinada probabilidad para que un átomo absorba un fotón, pasando del estado 1 al 2. A esto se le conoce como probabilidad de absorción. La - mecánica cuántica también predice una intensificación en

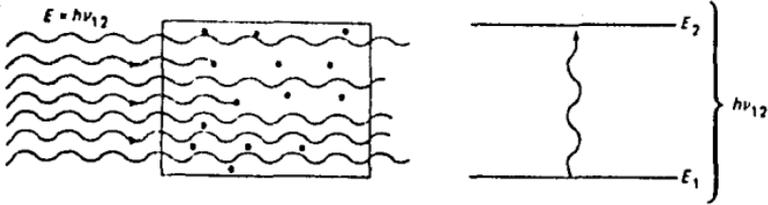


Figura 12. Absorción de fotones de energía  $h\nu_{12}$  que provoca la excitación de estados de energía atómicos a la energía  $E_2$ , para los que  $E_2 - E_1 = h\nu_{12}$ .

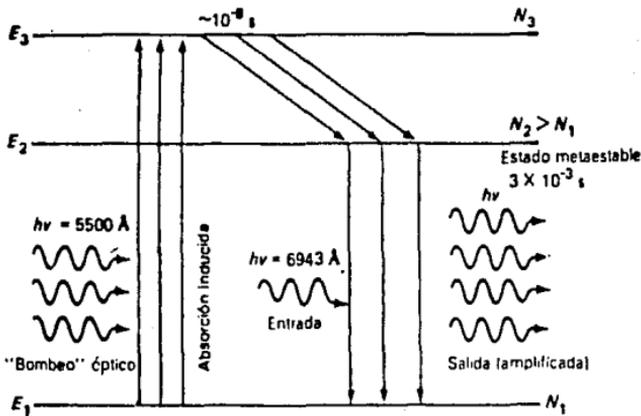


Figura 13. Esquema de funcionamiento de un aparato laser de pulsos, donde se indica la excitación, la inversión de población y la amplificación.

las transiciones desde el estado 2 al 1, lo que lleva al fenómeno de la emisión estimulada, siempre que la frecuencia de la radiación incidente sea muy próxima a  $\nu_{12}$ . La emisión estimulada es un fenómeno de resonancia en el que un fotón "sintonizado" a la frecuencia apropiada puede hacer que radíen los átomos en los estados excitados. Hablando en términos generales, cuando estos fotones están presentes, la emisión estimulada es mucho más importante que la espontánea. Sucede en el equilibrio que la probabilidad de la emisión estimulada es igual a la probabilidad para la absorción. En estas circunstancias los fotones emitidos por los átomos en el estado excitado, pueden ser absorbidos fácilmente por los átomos en el estado más bajo. Por tanto, de ordinario no es posible acumular una emisión muy apreciable de fotones, ya que los emitidos tienen más probabilidad de ser absorbidos que de provocar más emisiones estimuladas, debido a que en el equilibrio hay muchos más átomos en el estado más bajo que en el excitado.

Por lo tanto, al lograr la radiación por medio de la emisión estimulada, se deben invertir las poblaciones de los dos niveles cuánticos, haciendo que la población  $N_2$  en el nivel excitado, sea mayor que el número  $N_1$  en el nivel más bajo. Únicamente de este modo puede predominar el proceso de emisión estimulada sobre el de absorción. En

la práctica se puede provocar la inversión en la población de muchas maneras. En un laser de gas con helio y neón se logra produciendo una descarga eléctrica en la mezcla de gases. En un laser de estado sólido de rubí, se logra exponiendo el sistema a un pulso de luz muy intenso de una lámpara de destellos muy poderosa. En este caso interviene un sistema de tres niveles de energía atómica en el proceso de emisión estimulada como se ilustra en la Figura No.13.

Los átomos se "bombean" inicialmente desde el estado más bajo a la energía  $E_3$ , al estado  $E_3$ , por medio del pulso de luz externa. Luego rápidamente sufren transiciones al nivel de energía  $E_2$ , que tiene una vida de decaimiento muy larga al estado fundamental o base por el proceso espontáneo normal. El efecto neto es que se invierte la población y el número de átomos en el estado superior a la energía  $E_2$  es mucho mayor que en el estado base.

#### 2.4. El haz del rayo laser

Ahora es posible lograr la emisión estimulada desde el estado superior, introduciendo fotones a la frecuencia precisa  $\nu_{21}$ . Cuando ocurre emisión estimulada en estas circunstancias, se absorbe muy poca energía para hacer pasar los átomos del estado 1 al 2, sencillamente porque ahora no hay muchos átomos en el nivel de energía más bajo. Enton

ces ocurre la emisión estimulada y a medida que son emitidos los fotones de frecuencia  $\nu_{21}$ , éstos a su vez, estimulan mas emisión hasta que finalmente el sistema vuelve al equilibrio. En el proceso se genera un pulso poderoso e intenso de luz estimulada coherente. En el laser de gases de helio y neón, se puede lograr una producción continua de luz, utilizando una descarga eléctrica para producir una inversión de población en la mezcla de gases en forma continua.

Para que los fotones emitidos estimulen mas la emisión hasta el efecto máximo, deben de permanecer en el sistema durante un periodo razonable, y no se puede permitir que escapen de inmediato. El confinamiento requerido de los fotones se logra con espejos a ambos lados del sistema; uno reflejante del todo y otro un poco transparente para que escape quizá 1% de los fotones incidentes. Los que escapan a través del espejo parcialmente transparente constituyen el haz efectivo del laser. Lo mejor es estimular con una radiación de características similares a las que se va a emitir, es decir, de su misma longitud de onda.

Vamos a sistematizar todos estos pasos:

1. La sustancia emisora debe poseer gran número de átomos que se puedan situar en estado excitado o metaestable. Hay sólidas, líquidas o gaseosas. Estos átomos están en estado energético básico o  $E_1$ .

2. Un mecanismo que aporta energía ("sistema de bombeo") asciende de la energía de estos átomos (coloca electrones en órbitas superiores o más externas) hasta un estado que designamos como  $E_3$ .

3. Mediante una pequeña emisión de energía en forma de calor, los átomos excitados se colocan todos en un estado de energía homogéneo que designamos como  $E_2$ .

4. Si estimulamos en este momento la emisión de fotones (luz) de una energía similar a  $E_2 - E_1$ , es decir, la que se va a emitir tras la estimulación, conseguimos la emisión de los átomos excitados. Esta emisión consiste en que los electrones de las órbitas externas pasan a las inferiores, y el exceso de energía sale en forma de radiación. Esta radiación es en todos los casos de la misma energía (misma longitud de onda), y se emite a la vez, lo que quiere decir que es sincrónica.

5. Un artificio para potenciar la emisión del laser, es colocar dos espejos, uno de ellos semitransparente en los dos extremos del emisor. La radiación oscila entre uno y otro descargando cada vez más átomos, hasta que al adquirir la suficiente intensidad (gran densidad fotónica) sale al exterior por el semitransparente. Este artificio se denomina "resonador óptico".

6. De esta forma solo se amplifican los fotones o radiación emitida en el sentido del eje de la sustancia emisora. Las radiaciones que salgan en otras direcciones se pierden sin amplificarse. Por ello la radiación laser es direccional.

7. Una vez salido el "paquete" de radiación laser, el bombeo vuelve a cargar el emisor (vuelve a invertir su población) y el proceso se repite. Por ello el laser sale de modo de "pulsos" o disparos de forma discontinua.

En conjunto, el laser no es ningún sistema de crear energía; el sistema realiza una transformación de energía externa (eléctrica, óptica, química) en energía luminosa de características especiales que son:

- Monocromática u homogénea
- Coherente
- Direccional
- Altamente brillante

#### 2.4.1. Homogeneidad

La luz del laser es altamente monocromática, es decir, se emite en una longitud de onda muy concreta, lo que lo hace un haz homogéneo de luz. Es por esta razón que se puede transportar fácilmente por medio de fibras ópticas de un lugar a otro. Al mismo tiempo es posible modularla me-

diante una señal de radio o de televisión como las ondas de radiofrecuencia ordinaria.

#### 2.4.2. Coherencia

Los átomos que sufren las emisiones estimuladas ceden radiación que está precisamente en fase con la radiación excitadora, es decir, se emiten en el mismo momento, lo que indica que todas sus ondas van en fase.

#### 2.4.3. Direccionalidad

La emisión laser se transmite en forma de haz fino, muy angosto y aproximadamente paralelos y presenta muy poca divergencia angular, lo que los hace útiles en actividades como la topografía y la alineación precisa de instrumentos y equipo industrial.

#### 2.4.4. Densidad Fotónica

Que la salida resulte amplificada significa que los fotones emitidos se estimularon hasta su efecto máximo, es decir, que permanecieron cierto tiempo en el sistema, con lo cual se logró una alta densidad fotónica, lo que le dará su alta brillantez.

### C A P I T U L O 3

#### PROCESO DE SOLDADURA Y CORTE POR RADIACION LASER

CAPITULO 3 - PROCESO DE SOLDADURA Y CORTE POR RADIACION LASER3.1. Fundamentos del Proceso3.1.1. Definición y descripción general.

Desde el punto de vista de Ingeniería, el laser puede ser considerado como un aparato de conversión de energía de un recurso primario (eléctrico, químico, térmico, óptico, nuclear) que se transforma dentro de un rayo de radiación coherente electromagnética de frecuencia ultravioleta, visible o infrarroja. La transformación es facilitada por ciertos sólidos, líquidos o gases, los cuales cuando son excitados en una escala molecular o atómica por técnicas especiales, producen una luz coherente. Dicha luz es monocromática (de longitud de onda fija) y coherente, es decir, todas las ondas están en fase. Debido a la alta energía del rayo laser coherente, éste puede ser altamente concentrado para transmitir o reflejar en lentes o espejos, lo que provee de una alta densidad de energía, requerida para soldar, cortar o dar tratamientos térmicos.

El primer rayo laser fue producido en 1960 usando un cristal de rubí, bombardeado por una lámpara destellante. Dichos lasers pueden producir únicamente pulsos cortos de baja energía y la frecuencia de repetición es limitada por el calentamiento del cristal. Asimismo, cada pulso indi

vidual puede exhibir niveles pico instantáneos de potencia en rangos de megawatts, por lo que los lasers pulsados de rubí son limitados a porcentajes bajos de potencia. Comúnmente, lasers de estado sólido de operación continua o pulsada, son capaces de soldar y cortar delgadas piezas de metal. Se utilizan lasers de varillas de cristal de neodimio (\*) contaminado con itrio, aluminio y garnet (\*\*) (Nd-YAG) para producir una salida continua y monocromática en niveles de potencia hasta de 1 KW. Se han desarrollado también numerosos lasers de gas excitados eléctricamente - para producir ondas continuas. Equipos de rayo laser de varios kilowatts basados en CO<sub>2</sub> son capaces de tener penetración completa en soldaduras de paso simple en aceros de (19.05 mm) 3/4 de pulgada en espesor.

### 3.1.2. Principios de Operación

#### 3.1.2.1. Lasers de estado sólido

Los laser de estado sólido están basados en cristales simples o vidrios contaminados con pequeñas concentraciones de elementos de transición (como el cromo en el rubí) o tierras raras pueden ser selectivamente excitados a niveles de energía superiores, debidos a la exposición intensa de una radiación óptica incoherente (luz blanca), como se muestra en la Figura No.14.

(\*) Elemento de número atómico 60, considerado como parte de las tierras raras. Se encuentra en la naturaleza en forma de óxido  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  de color rojo violeta).

(\*\*) Mineral formado por un silicato doble de níquel y magnesio. Es duro y de apariencia vitrea de varios colores. En su aplicación laser se usa de color rojo profundo y transparente.

La excitación selectiva de un nivel de energía específico, es la clave de la operación del laser, dado que ésta nos permite el establecimiento de una "inversión de población". La inversión de población existe cuando el número de partículas que se dan en un nivel de energía exceden substancialmente al correspondiente número del equilibrio térmico. Sin dicha inversión, los fotones generados por la emisión estimulada serán absorbidos entre el medio y la emisión laser pudiera no ocurrir. Una vez excitados los electrones, regresan a su estado normal de energía en uno o más pasos, cada uno involucrando pérdidas de cantidad discreta (cuantos) de energía. La emisión laser ocurre si una de esas pérdidas de energía resulta en la emisión de un cuanto o radiación electromagnética (fotón).

Un ejemplo de laser de estado sólido es el cristal de rubí consistente de un óxido de aluminio con pequeñas concentraciones de átomos de cromo en solución. Cuando el rubí es expuesto a una intensa radiación de una o más lámparas de tellantes de xenón o kriptón, algunos de los electrones en el cromo son excitados a un nivel superior de energía. Estos electrones caen inmediatamente a un nivel intermedio de energía, resultando una evolución de calor. Entonces, estos regresan al estado de energía básico con la emisión de un fotón de luz roja, teniendo una longitud de onda de  $0.69 \mu\text{m}$ . Un electrón de nivel de energía intermedio regresa al estado base más rápido cuando es estimulado por

la luz roja de salida de los electrones cercanos a éste. Cuando un número grande de electrones es envuelto, ocurre la amplificación de la luz roja de salida.

El efecto de amplificación es acentuado por la forma de terminación del cristal y el acabado de espejo de éstos (ó también por el uso externo de espejos), así que la luz emitida es reflejada hacia atrás y hacia adelante a través del cristal. Si a alguna cantidad de esta luz se le permite escapar por el extremo de un espejo transmisor parcialmente reflector, se obtiene un rayo de salida muy mono cromático y no divergente. Varias longitudes de onda corta puede realmente ser vistas debido a la fina estructura del nivel de energía en la emisión laser media. La divergencia del rayo ocurre debido a la difracción y a las - - imperfecciones del sistema (operación de modo múltiple, - dispersión, etc.). Lo anterior es inherente a cualquier sistema óptico de tamaño finito, mientras que los posteriores pueden ser reducidos con técnicas y componentes improvisados. A niveles de energía utilizados para soldar, un típico rayo laser de rubí de pulsaciones tiene caídas de divergencia entre las que se incluyen ángulos entre 0.25 a 0.75 grados.

La longitud de onda de la luz de todos los lasers de estado sólido, es determinada por la fluorescencia del espec-

tro del elemento contaminado. Tanto los lasers de neodimio-vidrio y Nd-YAG, emiten una radiación cercana a la infrarroja con una longitud de onda de 1.06  $\mu$ .

Pueden usarse sistemas ópticos simples para concentrar el rayo dentro de un pequeño punto. Los componentes del sistema de rayo laser de estado sólido, se muestran en la Figura No.15.

La cavidad laser que junta la salida de la lámpara destellante y la emisión laser media, es una parte interesante del aparato. En muchos sistemas, la cavidad comprende cilindros elípticos altamente pulidos con una lámpara destellante y un emisor laser medio de enfoques alternantes. En este tipo de arreglos, la salida de la lámpara destellante es enfocada al cristal laser. Algunas veces se emplean muchos cilindros elípticos, así como se usa más de una lámpara para bombardear un cristal simple. Arreglos de una, dos o cuatro lámparas en conjunto con un cristal simple, es muy común encontrarlos. Son usadas otras cavidades reflectivas, como lo son espirales de tubos destellantes que rodean al cristal. Se usan descargas de gas inerte en cuarzodinio (dióxido de silicio) llamadas lámparas de sol, para generar una salida continua.

Debido a que los lasers de estado sólido son, a lo mucho, solo el 6% de eficientes y pueden tener porcentajes de po

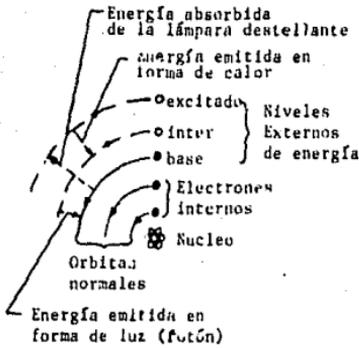


Figura 14. Absorción y emisión de energía del laser.

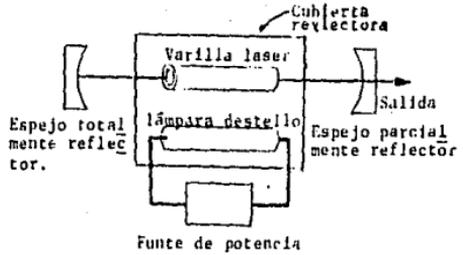


Figura 15. Componentes del sistema laser de estado sólido.

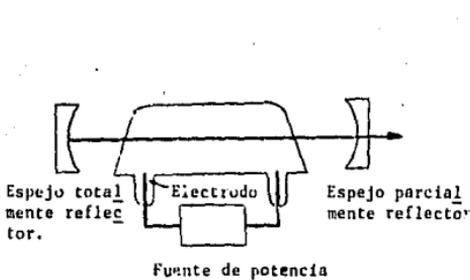


Figura 16. Componentes del sistema laser de gas.

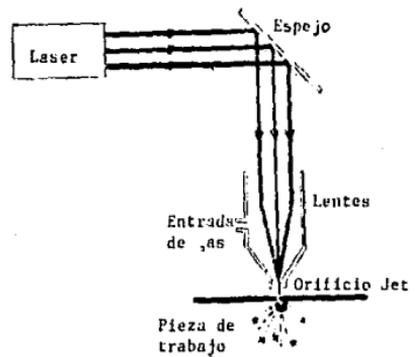


Figura 17a. Laser de gas dinámico

tencia de algunos cientos de watts, se generan grandes cantidades de calor en adición al sistema laser. Por ésto, un sistema de enfriamiento de alta capacidad es indispensable para retirar el calor desarrollado. Típicamente se usan sistemas de ciclo cerrado con agua desionizada como agente enfriador. El agua fluye alrededor de la varilla laser y la lámpara de destellos y adicionalmente enfría las paredes de la cavidad. Para lasers de estado sólido con 400 watts promedio de salida, el sistema de enfriamiento debe remover aproximadamente 15 kilowatts de pérdidas por calor.

#### 3.1.2.2. Lasers de gas

La figura No.16 es un diagrama de un laser simple de gas.

Este consiste básicamente de un tubo hueco por el cual se hace circular la mezcla de gas y emisión laser. El emisor laser es selectivamente excitado entre un espejo totalmente reflejante en un lado del tubo y un espejo parcialmente reflejante del otro lado. Muchos laser de gas han sido desarrollados. El más común de éstos es el laser de helio-neón que da una salida roja y el cual es usado en alineadoras de diezmilésimas, medidores y otras pruebas. Muchos laser de gas están limitados a salidas continuas de miliwatts en potencia. Unos cuantos como el laser de argón, han sido desarrollados con salidas continuas de de

cenas de watts y un laser de  $\text{CO}_2$  es capaz de operación durable de varios kilowatts.

La combustión de monóxido de carbono y metano con oxígeno y nitrógeno nos da dióxido de carbono, nitrógeno y agua que se substituyen por el helio en procesos de laser de  $\text{CO}_2$ . La excitación vibracional del  $\text{N}_2$  y el  $\text{CO}_2$ , ocurre debido a la elevada temperatura de los productos. En una rápida expansión a través de boquillas supersónicas, la temperatura del gas estático es rápidamente reducida. Se usa un juego de pequeñas boquillas a lo largo de una unidad simple para decrecer el tiempo de expansión. Debido a las diferencias en los tiempos requeridos para varias especies, se asume que la distribución apropiada de energía, puede ser momentáneamente congelada. La condición de desequilibrio necesaria para la acción del laser, ocurre cuando se provoca la inversión de población.

A la fecha han sido fabricados sistemas laser de gas dinámico que desarrollan salidas de potencia de hasta 100 kilowatts en modos de operación continua y corta duración. Dicha unidad fue usada para demostrar la capacidad de penetración completa, en soldadura de paso simple de 38 mm (1.5 pulg.) de espesor en placa de acero a una velocidad de 304.8 mm/min. (120 plg/min). Debido a los altos costos de operación, los laser de gas dinámico no son reco-

mendables para aplicaciones de soldadura y corte industrial.

El enfriamiento convectivo en lasers de  $\text{CO}_2$  eléctricamente excitados, es comunmente la base de las altas potencias en rangos de equipos de producción de 20 KW de salidas continuas. El flujo rápido de los gases del laser es utilizado para remover las pérdidas de calor de la cavidad laser. Los laser típicos tienen una eficiencia de conversión de energía eléctrica a óptica del 10 al 15 por ciento, y la re mo ción de pérdidas de calor efectiva es esencial para la o pe ra ción continua. Para minimizar los costos de operación, se emplea un intercambiador de calor de gas a líquido, en laser donde el gas es recirculado a través del sistema. Sólo una pequeña cantidad del gas es consumida debido a los requerimientos de la re mo ción continua de pérdidas de calor y el restablecimiento de pequeñas cantidades de mezcla de gases para prevenir la formación de contaminantes generados por disociación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  en la descarga.

El flujo de gases en laser de  $\text{CO}_2$  puede ser coaxial o trans versal al rayo laser. Esto se muestra en las Figuras Nos. 17 y 18. Las presiones típicas de operación son de 5 bares ( $75 \text{ lb/plg}^2$ ) o menores, aunque los laser de  $\text{CO}_2$  de ope ra ción pulsada, pueden operar a presiones atmosféricas.

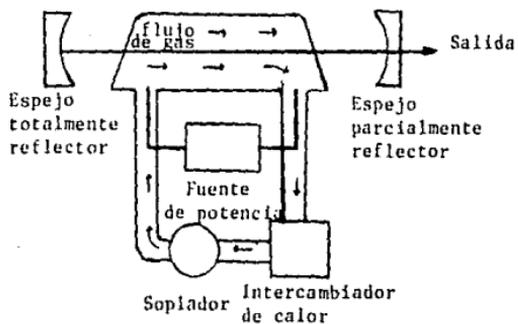


Figura 17b. Sistema laser de flujo coaxial.

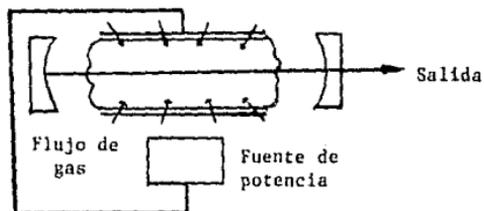


Figura 18. Sistema laser de flujo transversal

Con flujo coaxial, algunos tubos pueden ser ordenados eléctricamente en serie, paralelos y ópticos para producir salidas de alto poder. Físicamente, tubos en paralelo son utilizados para reducir la longitud del sistema. Dichas configuraciones son conectadas ópticamente en serie por medio de espejos y lentes. Con flujo transversal, los espejos son utilizados para reflejar atrás y a través el rayo por medio de un cambiador simple de descarga. Se requiere de múltiples rayos para la remoción efectiva de energía óptica de todo el medio laser. En ambos casos se utiliza un espejo totalmente reflejante en uno de los extremos del tubo, y en el otro extremo, un espejo parcialmente reflejante. Para niveles de poder de algunos KW, materiales semiconductores recubiertos con seleniuro de zinc (compuesto sintético), sirvan efectivamente como boquillas de salida en el espejo parcialmente reflejante. De todas maneras, dicho material semirreflejante, no es durable en niveles de alto poder, - así que se utiliza un espejo metálico anular para facilitar la transmisión parcial. La salida del rayo se produce cuando un flujo de aire comprimido a alta velocidad mantiene la diferencia de presiones entre la cámara laser y la atmósfera.

### 3.1.3. Variaciones del proceso

El laser puede ser arbitrariamente dividido en laser de alta y baja potencia, en base a sus porcentajes de potencia de salida. Desde el punto de vista de soldadura, la división lógica es de 1 KW; en soldaduras de penetración pro

funda se requieren niveles de potencia de 1 KW o superiores, y las soldaduras laser en niveles inferiores a 1 KW son comunmente limitadas al modo de operación.

### 3.1.3.1. Laser de Baja potencia

La mayoría de los laser de estado sólido son operados de forma pulsada y la mayoría de los sistemas de laser de gas pueden también ser operados de esta misma forma. Las salidas varían en magnitudes de algunos cientos de kW durante algunos milisegundos con repeticiones en frecuencias de un Hertz, produciendo así potencias promedio de algunos cientos de watts. Ya sea para laser de estado sólido o gas, los picos de potencia decrecen a medida que la longitud del pulso y la repetición de la frecuencia crece; por ejemplo, la potencia promedio es en esencia fija. Los laser de  $\text{CO}_2$  pueden producir pulsos pico de 3 kW a frecuencias arriba de 2.5 kHz por medio de una unidad de potencia promedio de 500 W nominales.

Mientras el modo de operación es pulsado, laser de Neodimio-YAG, pueden también ser operados para salidas de potencia continua. En este caso, un cristal medio como el itrio, aluminio, granate (YAG), es un huésped más adecuado en el neodimio que el vidrio, porque el cristal puede soportar más fácilmente el gradiente de temperatura y los requerimientos de disipación de calor en operaciones de onda continua. Un recurso de luz incoherente es usado en vez de

una lámpara de destellos. Versiones comerciales de laser de Nd-YAG son costeables en niveles de potencia de algunos cientos de watts en operación continua. Otras versiones de Nd-YAG pueden emitir un tren continuo de pulsos extremadamente cortos. Un ejemplo de este desarrollo es la generación de pulsos de 25 picosegundos ( $25 \times 10^{-12}$  seg) de duración a intervalos de 2.5 nanosegundos ( $25 \times 10^{-9}$  seg).

Los laser de estado sólido dominan en el campo comercial en el número de unidades en operación en potencias bajas en rangos pulsados. En aplicaciones de laser de baja potencia continua, los sistemas laser de  $\text{CO}_2$  predominan en áreas de alta potencia.

### 3.1.3.2. Laser de alta potencia

Hoy en día todos los sistemas laser de alto poder son del modo de operación continua y de  $\text{CO}_2$ . Son unidades comerciales basadas en flujo coaxial o transversal en rangos de cerca de 2 a 10 kW, aunque se consiguen unidades experimentales de laboratorio que llegan a desarrollar cerca de 20 kW.

La emisión de la radiación laser se hace durante la primera etapa de desexcitación. A partir de este mecanismo puede obtenerse teóricamente un rendimiento máximo del 38% para el efecto laser. Desafortunadamente los mejores la-

ser de  $\text{CO}_2$  no dan hoy sino un rendimiento del 15 al 20%. Otra limitación la impone el aumento de la temperatura del gas, resultado de la excitación. La probabilidad de de-sexcitación va asociada a la población de los estados de vibración que depende de la temperatura. Cuando la temperatura aumenta, el número de estados disponibles para la desexcitación disminuye y la potencia de haz laser queda reducida, además cuando la temperatura llega a  $150^\circ\text{C}$  ( $301^\circ\text{F}$ ), la potencia emitida disminuye al aumentar la potencia suministrada. El laser de  $\text{CO}_2$  emite una radiación infrarroja, generalmente continua que puede alcanzar elevadas potencias. Los mayores laser industriales actualmente comercializados, suministran alrededor de 25 kW. Pero la inmensa mayoría de los laser de  $\text{CO}_2$  suministran menos de 2 kW, lo que es suficiente para las aplicaciones habituales.

#### 3.1.4. Capacidades y limitaciones

En las aplicaciones industriales para soldar y cortar materiales, la parte útil del haz laser, es la absorbida por el material. Pero, al alcanzarlo, una gran parte del haz es reflejada, y, por tanto, se pierde. Ahora bien, esta reflexión es muy importante. En el caso del aluminio puro, un 92% de la radiación visible o infrarroja próxima (laser de YAG) y un 98% de la infrarroja (laser de  $\text{CO}_2$ ), son reflejados. En el hierro, estos porcen

tajes son respectivamente, del 60 y el 95%. Es decir, el rendimiento energético del proceso no es muy grande. Para mejorar el rendimiento de un tratamiento (por laser de CO<sub>2</sub>) de materiales de alta reflectividad, como el aluminio, la plata o el cobre, estos materiales pueden recubrirse con una capa poco reflejante (óxido de hierro, negro de carbono). En muchas aplicaciones la energía reflejada queda irremediamente perdida. Sin embargo, es posible recuperar una parte colocando, por ejemplo, un casquete reflejante hemisférico alrededor de la muestra.

La parte de la energía del haz laser que no es reflejada, es absorbida por el blanco. Salvo pocas excepciones, esta energía es convertida finalmente en calor y da lugar a efectos térmicos localizados en los lugares tocados por el rayo. A continuación, el calor puede difundirse en el blanco. Con un laser que proporcione una alta densidad de potencia en un tiempo corto (inferior al milisegundo), la energía absorbida no puede disiparse mucho más allá de la zona irradiada (del orden del milímetro). En este caso, solamente la zona irradiada y sus inmediaciones son calentadas de manera importante. Si la energía suministrada es suficiente, se podrá fundir y eventualmente, vaporizar la zona irradiada. En caso de que el material no sea muy grueso (algunos milímetros), será posible cortarlo o taladrarlo.

### 3.2. Soldadura por radiación laser

Para soldadura, el rayo laser debe ser enfocado en un diámetro pequeño para producir alta densidad de potencia. Este es acompañado por transmisión óptica para laser de baja potencia. El tamaño medio del rayo puede ser ajustado por diseño óptico, la práctica usual involucra el control del diámetro del punto de incidencia por variación de la posición de la pieza de trabajo a la superficie relativa del plano de enfoque óptimo de lentes compuestos. La profundidad del enfoque determina la tolerancia permisible en la distancia a la que deben de estar la pieza de trabajo, los lentes y los espejos.

Igualmente, como en muchos sistemas convencionales de soldadura, las soldaduras laser pueden ser producidas por conducción convencional, limitadas por la manera y la técnica de la penetración. En soldadura de conducción limitada, el rayo choca y es absorbido por la superficie del metal. Las porciones interiores del material son calentadas enteramente por conducción desde la superficie. Este tipo de soldadura son frecuentemente hechas con rayos laser de baja potencia en operaciones continuas y pulsadas.

La soldadura de penetración profunda que se ilustra en la figura No.19, es usada para producir soldaduras con un alto radio de profundidad en sistemas laser pulsados o con-

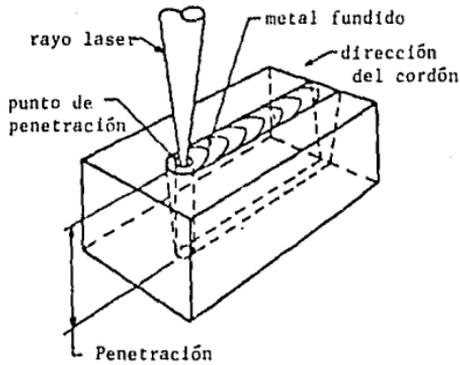


Figura 19. Características de la soldadura de penetración profunda.

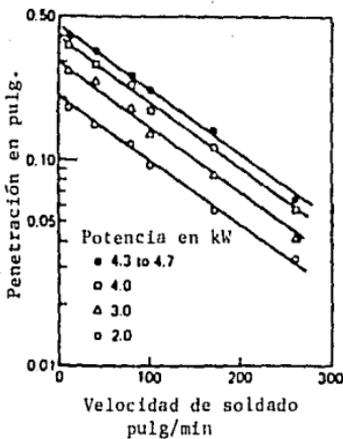


Figura 22. Relación de la penetración de soldadura en acero rimado para varias potencias en lasers de  $\text{CO}_2$ .

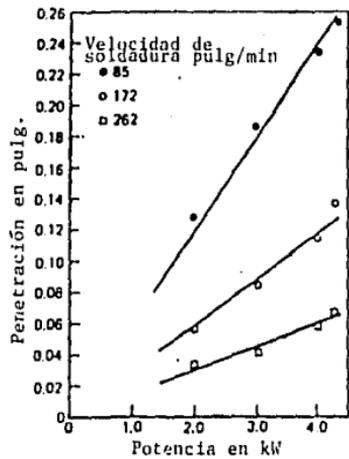


Figura 21. Relación de la penetración de soldadura en acero rimado a distintas velocidades en lasers de  $\text{CO}_2$ .

tinuos. En este tipo de soldadura, la intensa concentración de energía en la superficie de la pieza de trabajo, induce una vaporización local. Una cavidad de vapor cubierta de metal fundido es formada cuando el rayo empieza a moverse a través de la junta. La cavidad se mantiene contra las fuerzas dinámicas de flujo del metal líquido - cercado por la presión del metal vaporizado. El metal es progresivamente fundido en el borde de ataque de la cavidad de metal fundido en movimiento y fluye alrededor de la cavidad de penetración profunda hacia la parte trasera de la cavidad en donde se solidifica siguiendo un patrón de característica en forma de "V". En el método de penetración profunda, la penetración no está limitada por la difusividad térmica del material, debido a que la energía del rayo penetra directamente dentro de la cavidad. El proceso - puede ser comparado con un alambre caliente y rígido que penetra en un pedazo de hielo. Debido a la penetración del rayo dentro del material, el alto radio de penetración de la soldadura, es formado más que en una característica hemisférica por un proceso de soldadura por conducción.

Efectivamente, las soldaduras por rayo laser dependen de la absorción de la energía del rayo por la pieza de trabajo. Desafortunadamente, las superficies de metal brillantes a temperatura ambiente, son reflectoras del rayo.

Por ejemplo, la absorción en un rayo de baja intensidad de  $\text{CO}_2$  puede ser de sólo el 40% para acero inoxidable y menos del 1% para aluminio puro y cobre. Los niveles de absorción son más altos para el Nd-YAG y más altos aún para el rubí, aunque de todas formas la reflexión ocurre.

Aún tomando en cuenta lo anterior, se obtienen niveles aceptables de absorción durante la soldadura. La absorción aumenta cuando la temperatura del metal aumenta, y la intensidad del incremento de potencia en la incidencia del rayo también aumenta. Una manera de incrementar la absorción en laser pulsado, ocurre cuando la densidad de poder excede de cierta concentración mínima. Los niveles de concentración mínima más usuales son de  $10^8 \text{ W/m}^2$  ( $9.2 \times 10^7 \text{ W/pie}^2$ ) para acero al carbón,  $10^9 \text{ W/m}^2$  ( $9.2 \times 10^8 \text{ W/pie}^2$ ) para aluminio y cobre, y  $10^{10} \text{ W/m}^2$  ( $9.2 \times 10^9 \text{ W/pie}^2$ ) para tungsteno.

En soldaduras por laser de alto poder de  $\text{CO}_2$ , la absorción es mejorada por la cavidad para alta penetración, cuya forma de densidad de potencia excede de aproximadamente  $10^8 \text{ W/m}^2$  ( $9.2 \times 10^7 \text{ W/pie}^2$ ). Como el rayo pasa dentro del material, se ocasiona que múltiples reflexiones y absorciones tengan lugar. La absorción acumulada es por lo tanto, muy alta, debido al efecto de la geometría del cuerpo-negro. Medidas tomadas directamente de calorímetros han mostrado niveles de

absorción arriba del 90% en aleaciones de acero y niveles mayores del 50% han sido encontrados en aleaciones de aluminio.

En soldadura laser se aprovecha sobre todo la alta densidad de potencia que es cien veces mayor que las soldaduras que se obtienen con arco:  $10^6 \text{ W/m}^2$  ( $9.2 \times 10^5 \text{ W/pie}^2$ ). Esta fuente concentrada y muy intensa de energía permite fundir una zona muy reducida. Como consecuencia de ello, las deformaciones son muy limitadas y las tensiones residuales quedan muy aminoradas frente a otras técnicas. La zona afectada térmicamente es también muy poco extensa. Esto representa una enorme ventaja cuando se trata, por ejemplo, de ensamblar determinados elementos o de cerrar cajas de relevadores electrónicos sin dañar los componentes.

En la soldadura se utiliza bien un laser YAG (especialmente cuando la precisión es esencial, o bien, un  $\text{CO}_2$  continuo, con el cual las velocidades de soldadura son importantes. Así, con un laser de  $\text{CO}_2$  típico de 1 KW, puede soldarse acero inoxidable 18/10 de 1 mm (3/64 pulg) de espesor, a una velocidad de 6 m/min (19.68 pies/min.), y también de un espesor de 2 mm (3/32 pulg) a 60 cm/min (23.62 pulg/min).

### 3.2.1. Operación pulsada

En un sistema laser de estado sólido pulsado, la penetración

de la junta es primeramente determinada por la energía del pulso y su duración. Se usan puntos de material de aporte para formar un cordón de soldadura a velocidades regidas por la frecuencia de repetición del pulso. Para generar una buena soldadura, el rayo laser debe guiar suficiente energía a la pieza de trabajo para fundir el material adecuado para la fusión de la junta. La duración del pulso debe ser largo y suficiente para permitir la conducción y fundido de la profundidad deseada. Aunque la energía del pulso y su duración son especificadas por la potencia del rayo compuesto, la intensidad de la potencia en la superficie de la pieza de trabajo, puede ser controlada por el enfoque óptico y la localización de la superficie relativa del plano del enfoque óptimo. Estas condiciones deben ser escogidas para evitar la vaporización. Este requerimiento es complicado por el hecho de que la distribución de la energía a través del punto de incidencia, puede ser no uniforme. Frecuentemente los picos de energía en el centro, causan vaporización local. Bajo estas condiciones es necesario desenfocar el rayo, con un pequeño incremento en el pulso de energía que puede ser requerido para compensar la reducción de la intensidad del porcentaje de potencia. En la práctica, dichos ajustes pueden ser hechos rápidamente por aproximaciones sucesivas o procedimientos de tanteo.

La penetración de la soldadura pulsada es gobernada por el proceso laser y los diferentes materiales. Incrementando la energía del pulso y su duración, se incrementa la penetración. Se llega al límite de penetración cuando la superficie del material sufre una vaporización incipiente. Para que se den el pulso de energía y la duración, se da al material una penetración superficial por medio de una alta difusividad térmica. Los pulsos altos de energía y los pulsos cortos de duración (alta potencia), son apropiados para dichos materiales, y la conversión se aplica para materiales de baja difusividad térmica. La máxima penetración para los sistemas de laser de estado sólido, pulsados, es de aproximadamente 0.0625 mm (1/16 pul).

El diámetro del punto individual de soldadura se determina por la energía absorbida, el rango al cual es enviado y a la difusividad térmica del material. La velocidad del cordón de soldadura está dada por el producto del diámetro del punto de soldadura, la fracción de material de aporte requerido y la frecuencia de repetición del pulso. Los factores del proceso que se ilustran en el Figura No.20 para acero inoxidable, titanio y aluminio, representan la difusividad térmica baja, media y alta respectivamente, y la interdependencia del porcentaje de potencia, la velocidad del cordón de soldadura, la energía del pulso, la penetración y la frecuencia de repetición.

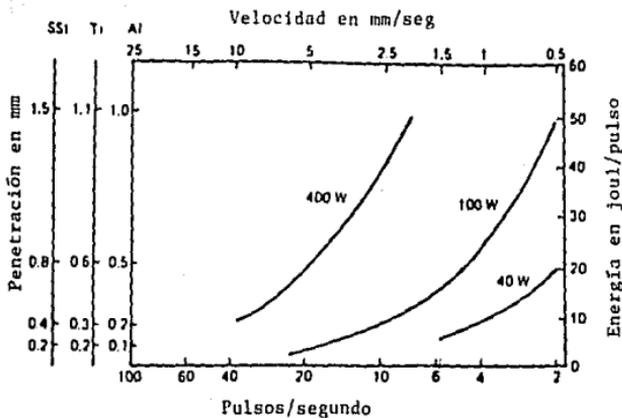


Figura 20. Relación de penetración en tres metales en las condiciones de operación, para lasers pulsados en varias potencias.

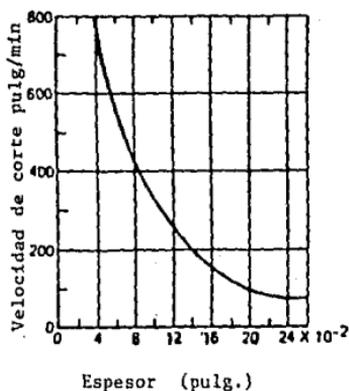


Figura 32. Relación de la velocidad de corte - contra espesor para acero inoxidable - usando un rayo laser de CO<sub>2</sub> de 1.25 kW.

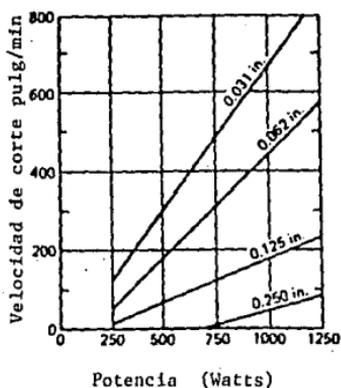


Figura 33. Relación de la velocidad de corte contra potencia en un rayo laser de CO<sub>2</sub> asistido por oxígeno.

### 3.2.2. Operación continua

Operación continua en lasers de baja potencia, pueden ser usadas para producir por conducción convencional, soldaduras a bajas velocidades en placa de acero calibrada. Con lasers de alta potencia, se pueden formar soldaduras delgadas en piezas de metal a altas velocidades, usando el modo de penetración profunda. Este modo de operación puede ser usado solo a bajas velocidades para generar un alto radio de penetración de soldadura en placas de acero. Generalmente, las técnicas de penetración profunda no pueden hacer soldaduras a velocidades por debajo de las 15 plg/min (38.10 cm/min.).

Dentro de las condiciones apropiadas para la soldadura, la penetración en el modo de penetración profunda, es directamente relacionada con la potencia cuando la velocidad y otras variables del proceso son constantes. Este funcionamiento se ilustra en la Figura No. 21 para acero rimado.

Debajo de estos niveles de concentración de cerca de 1 KW, la penetración puede decrecer rápidamente a las velocidades indicadas.

Una penetración de 3/4 pulg. (19.05 mm), es accesible en aleaciones de acero a 15 KW de máximo nivel de potencia de sistemas comunes industriales instalados. Algunas secciones deben ser soldadas en dos pasos, uno de cada lado; de-

ben tomarse algunas precauciones especiales para evitar defectos en la raíz de la segunda soldadura.

A ciertos niveles de potencia, la penetración de la soldadura decrece con el incremento de la velocidad de viaje cuando otras variables quedan fijas. Esta relación para acero rimado aparece ilustrada en la Figura No.22.

En soldaduras de alta potencia, la ionización de los átomos de vapor del metal, pueden tener la formación de plasma por arriba de la pieza de trabajo. Como el plasma absorbe efectivamente el rayo laser, y reduce drásticamente la energía de entrada del rayo dentro de la pieza de trabajo, ésto se previene por un arrastre de iones de la región de interacción del flujo de gases, por medio de helio. Este flujo generalmente se integra con los requerimientos de protección de la zona por soldar. Si no se toman estas medidas, el plasma se expande a la atmósfera por encima de la pieza de trabajo, formando una columna luminosa.

Cuando la energía eléctrica de los capacitores se descarga dentro de la lámpara destellante, la varilla laser emite un pulso de luz muy rápido (de 1 a 10 milisegundos). Esta luz se enfoca por un sistema óptico dentro de un pequeño punto en la pieza de trabajo. Algo de esta energía se absorbe y algo se refleja.

Como la energía absorbida se convierte en calor dentro de la pieza de trabajo, algo del calor puede ser conducido a través de la pieza. Si la cantidad y el rango del calor es mayor que el rango de conducción, el rayo puede calentar hasta el punto de fusión del material. Entonces, como el metal se funde, el punto puede empezar a absorber más energía y reflejar menos, así que se incrementa el rango de calentamiento.

Si el rango de calentamiento no se controla, el metal puede empezar a evaporarse, y por tanto, produce un agujero más que una soldadura. Es por esta razón que la forma del pulso (su duración en tiempo) reduce la energía de entrada en un punto especificado en tiempo.

Basada en estas razones, la capacidad y eficiencia de la soldadura laser, se determina por los siguientes factores:

- a) La energía de entrada y el enfoque laser.
- b) La longitud de onda de la luz emitida.
- c) La duración del pulso de energía.
- d) El control de la forma del pulso (en tiempo)

La energía de salida del laser se especifica generalmente en joules (watts por segundo). Esto debe combinarse con un factor de tiempo y el tamaño del punto del rayo a un rango dado de energía.

### 3.2.3. Materiales y sus propiedades

Las propiedades de intensidad y coherencia espacial del laser, dan un recurso de energía radiante, la cual puede ser concentrada para dar una alta y extremada densidad de potencia. Cuando es absorbida por material, esta energía puede ser suficiente para vencer las fuerzas de enlace asociadas con la estructura atómica y molecular de los materiales, haciendo que la fase de alta - - temperatura sea fácilmente afectada.

Cuando la energía radiante es enfocada por lentes, la densidad de potencia a través del punto enfocado, puede ser algunas veces representado por la siguiente relación:

$$P = \frac{4E}{\pi f^2 \theta^2 t}$$

donde:

P = densidad de potencia en el punto focal de la lente.

E = energía de salida del laser.

f = longitud focal del lente.

$\theta$  = divergencia del rayo (ángulo completo)

t = longitud del pulso del laser.

La mínima divergencia del rayo de la luz radiada es una función de la longitud de onda y del diámetro del rayo. El criterio de Rayleigh para la mínima divergencia del rayo es:

superior, puede ser alargado dependiendo de las propiedades del material, específicamente las térmicas y las ópticas.

### 3.2.3.1. Difusividad térmica

Una propiedad importante de los materiales que afecta grandemente la profundidad de la zona de fusión, es la difusividad térmica. En general, una alta difusividad de calor puede permitir la soldadura de materiales delgados. La profundidad de penetración calorífica en un material dado, puede ser estimada a partir del conocimiento de la temperatura de la superficie del material y su difusividad térmica. La ecuación diferencial para el flujo de calor es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

donde:

- T = temperatura
- x = profundidad de difusión lineal
- $\alpha$  = difusividad térmica =  $K/\rho C$  en donde K = conductividad térmica,  $\rho$  = densidad y C = calor específico.
- t = tiempo de difusión a una profundidad x.

La temperatura de la superficie  $T_s$  a  $x = 0$  está dada por:

$$T_s = \frac{2F}{K} \left( \frac{\alpha t}{\pi} \right)^{1/2}$$

$$\theta \text{ min} = \frac{1.22 \lambda}{R}$$

donde:

$\lambda$  = longitud de onda

R = radio del rayo o abertura

Con la alta energía de los lasers disponibles, hoy es posible aproximar en un factor de dos a tres, el valor mínimo de la divergencia del rayo que predice el criterio de Rayleigh. En sistemas laser pulsados de alta potencia, la divergencia del rayo puede encontrarse en un rango de 2 a 10 miliradianes en niveles de salida superiores a la concentración mínima.

En sistemas típicos de laser pulsado, el tamaño del punto enfocado S puede estar adecuadamente aproximado por la ecuación:  $S = f\theta$

Los metales son los materiales predominantes que son usados por soldadura laser, aunque algunas veces es posible soldar termoplásticos. El tamaño físico y la geometría de las partes que componen la soldadura, pueden presentar restricciones de categoría de pequeña escala desde escalas microminiaturas (circuitos integrados y películas muy delgadas) hasta el límite superior, relacionado a la función de la profundidad de penetración. Este límite

F = flujo de calor de la superficie del material, debido a la absorción de la energía del laser y que es proporcional a P.

Los materiales con alta difusividad térmica aceptan y conducen la energía térmica muy rápidamente, y no producen rompimientos por choque térmico. La Tabla No.2 enlista las difusividades térmicas de algunos metales y aleaciones. El estudio de otras propiedades de la pieza de trabajo puede ayudar grandemente a entender la manera en la cual los laser son usados para soldadura y otros procesos térmicos. Las categorías generales que deben considerarse incluyen propiedades térmicas, físicas, mecánicas, condiciones de superficie, metalúrgicas y químicas. El conocimiento de las propiedades térmicas (calor específico, conductividad térmica, temperaturas de fusión y vaporización, calor latente, capacidad térmica), se muestra para el cálculo de los progresos en las fronteras de fusión y en la distribución de temperaturas en la fusión y solidificación de materiales para ciertos modelos simplificados de transferencia de calor. La Tabla No.3 muestra los resultados de algunos cálculos de transferencia de calor tomados del análisis de Cohen y Epperson, cuya ecuación para la máxima profundidad de la penetración laser anterior a la vaporización de la superficie es:

$$S \text{ máx} = \frac{0.16}{cLH} (H^2 t_b - H^2 t_m)$$

donde:

$S_{\text{máx.}}$  = profundidad de penetración

$\rho$  = densidad

$L$  = calor latente de fusión

$H$  = flujo de calor

$t_m$  = tiempo al cual la superficie comienza a vaporizar.

$t_b$  = tiempo al cual la superficie comienza a fundirse.

Las propiedades mecánicas y termomecánicas como esfuerzos y expansiones térmicas, sólo se toman en cuenta en aplicaciones particulares.

Durante la soldadura laser, la química involucrada en las reacciones de la superficie, puede influir en la integridad de la soldadura. Usualmente las condiciones normales atmosféricas no son determinantes en la soldadura. Sin embargo, los contaminantes de la superficie del material y la absorción de gases interfieren con los resultados de la soldadura.

### 3.2.3.2. Reflectividad

La mayoría de los metales reflejan una gran porción del rayo laser. Por lo tanto, se requiere del uso de rayos de alta potencia para la mayoría de los procesos de soldadura.

TABLA 2

<u>M A T E R I A L</u>	<u>Difusividad Térmica</u> <u><math>\alpha</math> (<math>\times 10^{-4}</math> m<sup>2</sup>/5)</u>
<b>Metales (comercialmente puros)</b>	
Aluminio	0.91
Berilio	0.42
Cromo	0.20
Cobre	1.14
Oro	1.18
Hierro	0.21
Molibdeno	0.51
Nickel	0.24
Paladio	0.24
Platino	0.24
Silicon	0.53
Plata	1.71
Tántalo	0.23
Estaño	0.38
Titanio	0.082
Tungsteno	0.62
Zinc	0.41
<b>Aleaciones</b>	
Latón (70:30)	0.38
Bronce fosforado (5% Sn)	0.21
Cupro nickel (30% Ni)	0.087
Berilio cobre (2% Be)	0.29
Inconel (76% Ni, 16% Cr, 8% Fe)	0.039
Acero inoxidable tipo 304	0.041
Aleación de aluminio 6061	0.64

T A B L A 3

DATOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA VARIOS METALES

	TM (°C)	Tb (°C)	H <sup>2</sup> tm (x10 <sup>8</sup> J <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> .S)	H <sup>2</sup> tb (x10 <sup>8</sup> J <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> .S)	S1 (x10 <sup>-2</sup> mm)	S5 (x10 <sup>-2</sup> mm)
Cromo	1,875	2,665	5.59	13.0	3.6	7.9
Cobre	1,083	2,595	12.03	84.8	23.2	51.5
Oro	1,063	2,970	6.52	60.7	27.7	61.6
Hierro	1,536	3,000	4.79	19.2	9.1	20.3
Molibdeno	2,610	5,560	21.51	119.4	13.7	30.4
Niquel	1,453	2,730	5.76	26.0	7.6	17.2
Platino	1,769	4,530	4.93	38.2	11.2	25.2
Plata	961	2,210	6.85	45.2	27.2	60.5
Tántalo	2,996	5,425	8.58	34.4	7.4	16.2
Tungsteno	3,410	5,930	29.24	117.0	10.4	24.4

Sin embargo, las superficies de la mayoría de los metales, reflejan la luz durante sólo una pequeña porción del pulso laser.

Como la reflectividad de la mayoría de los metales incrementa con la longitud de onda, se requerirá de mayor energía de salida en un laser con una longitud de onda larga que en uno que utiliza una longitud de onda corta. Cuando un rayo laser de baja potencia es pulsado sobre una muestra de metal pulido, no se alcanza a fundir debido a que la luz se refleja en su mayoría. Para que se produzca una fusión y/o vaporización de una parte de la superficie, debe incrementarse la energía de pulso. Sin embargo, un incremento repentino en la absorción de la luz, dificulta el control de la soldadura de algunos materiales.

El acabado de la superficie a trabajar puede afectar el rango de aceptación o reflexión de la luz en un 20 a 90%. Una superficie de apariencia rugosa, no es necesariamente una superficie buena para absorber luz y puede ser una superficie que disperse la luz reflejada. No obstante, para el caso de una lámina de cobre brillante, la reflectividad a  $0.6943 \mu\text{m}$ , la luz del laser se redujo desde aproximadamente 95% a menos del 20%, mediante la oxidación de la superficie.

El acabado de la superficie puede también afectar la absorción de la luz cuando el tamaño de las asperezas son del orden de la longitud de onda de la luz.

### 3.2.3.3. Absorción

Cuando se dirige la luz laser hacia la superficie de un material, una porción de la luz es absorbida y convertida en energía térmica, mientras que el resto se refleja.

Esto concuerda con las teorías de muchos investigadores en donde se propone que la absorción de la energía lumínica por los materiales, se lleva a cabo a una profundidad aproximada mediante el camino que trazan los electrones de valencia. La ecuación:

$$I_x = I_0 e^{-Kx}$$

es lo suficientemente exacta para describir la atenuación de la intensidad de la luz por la profundidad. En esta ecuación:

$x$  = profundidad de la penetración de la luz de intensidad  $I_x$ .

$I_0$  = intensidad incidente.

$K$  = coeficiente de absorción.

Para la mayoría de los metales comunes, la profundidad máxima de la luz, penetra rangos de 5 a 50  $\mu\text{m}$ . A esta

profundidad, la energía convertida se transmite al interior del material mediante conducción térmica.

Para intensidades suficientemente altas de energía fotónica dirigida a la superficie, la temperatura generada será lo suficientemente alta para que el material se funda. La absorción subsecuente de luz causará una estela de material fundido que se propagará en el material a granel. Cuando se continúa elevando el nivel de potencia, ocurre una gran vaporización de partículas y material ionizado a una alta velocidad, y que se succionan hacia la superficie del material. Varios investigadores han calculado la temperatura superficial de materiales irradiados por laser mediante mediciones de la emisión iónica.

#### 3.2.4. Parámetros de soldadura laser

Cuando se consideran sistemas laser para aplicaciones en soldadura, el principal factor que debe determinarse primero, es la capacidad del sistema en cuanto a la salida de energía o poder, y en cuanto a la duración de la acción de laser. Estos parámetros básicos, junto con otros factores secundarios, se usan normalmente para caracterizar una soldadura por laser. Estos parámetros o características descriptivas de la acción de laser se pueden separar en dos grupos: un grupo primario de dos parámetros y un grupo secundario de tres.

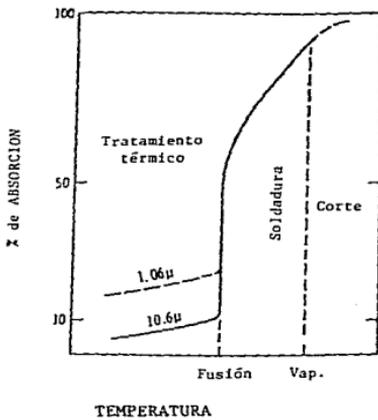


Figura 22a. Relación de la temperatura contra la absorción.

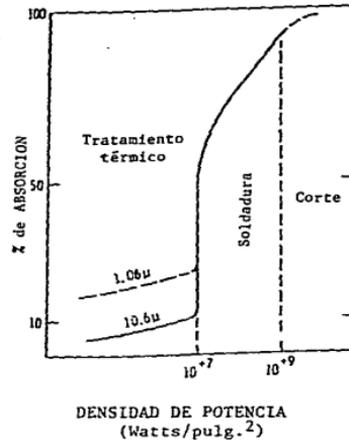


Figura 22b. Relación de la densidad de potencia contra la absorción.

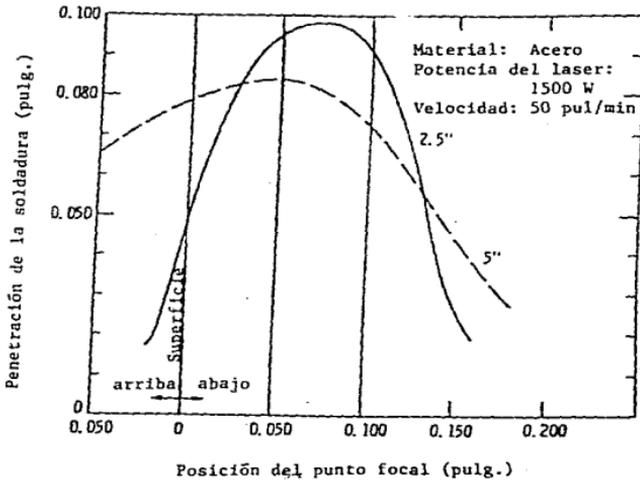


Figura 23. La penetración como una función de la posición del lente.

### 3.2.4.1. Grupo primario

#### 3.2.4.1.1. Energía y Potencia

La energía de salida normalmente medida en joules, es función de un voltaje (obtenido de una fuente de potencia) en un banco de capacitores (designados como la unidad de almacenamiento de energía). La energía almacenada se disipa en una lámpara de destellos de alta intensidad, la cual mediante un diseño apropiado, excita a la varilla laser por emisión estimulada.

El rubí y el neodimio en vidrio, son los dos materiales que se usan en la mayoría de los sistemas comerciales de soldadura laser. El rubí es generalmente más áspero y puede ser bombardeado duramente para producir altas potencias. En algunos casos la longitud de onda más corta del rubí, tiene ventajas sobre el neodimio en vidrio, quien tiene una más baja concentración y cuando se opera sobre un rango amplio de temperaturas (arriba de 85°F (29.4°C), pueden dar lugar a eficiencias ligeramente altas. Su conductividad térmica más baja y su susceptibilidad al daño bajo niveles de bombeo más alto, limita su habilidad para dar lugar a un alto, limitaje de potencias de salida. Sin embargo, algunos trabajos recientes en el área de la tecnología del vidrio, indican que pueden vencerse algunos de estos obstáculos.

#### 3.2.4.1.2. Longitud del pulso

La longitud de pulso, la cual diferencia un proceso de soldadura de un proceso de barrenado, se determina esencialmente mediante la cantidad de capacitancia (o grupos de capacitancia-inductancia) en el circuito de excitación. La selección apropiada de la lámpara de destellos, de acuerdo con la electrónica y la geometría de acoplamiento óptico en el cabezal laser, es de gran ayuda en la optimización de las características del pulso para una práctica efectiva de soldadura. En general, cuanto mayor es la longitud del pulso, mayor será la reacción de la pieza de trabajo durante el mecanismo de fusión de la absorción de energía, transferencia de calor, fusión, mezclado de los constituyentes y posterior solidificación. Mediante un buen control del rayo laser, pueden minimizarse la evaporación y la posible expulsión de partículas.

Los actuales sistemas comerciales, pueden llevar las longitudes de pulso a más de 10 ms con respecto a la forma del pulso. Limitados estudios de laboratorio muestran que en general, una forma de pulso que decae exponencialmente por ser opuesta a una forma de onda cuadrada, se ve favorecida para un trabajo de soldadura. Se puede ver que en una forma de pulso decreciente se tiene una intensidad alta al principio seguida de una caída. La mejor condición posible para la entrada de energía de una soldadura,

es tener la energía distribuida a una temperatura superficial constante opuesta a la entrada a intensidad constante (por ejemplo, forma de onda cuadrada).

Aunque todas estas son condiciones deseables, aún no se sabe si se ha podido llevar el control.

#### 3.2.4.2. Grupo secundario

##### 3.2.4.2.1. Densidad de potencia

Esta no es una variable independiente como los parámetros primarios. Se expresa comunmente en watts por centímetro cuadrado y es el resultado de concentrar la energía de salida a menudo mediante convergencia por lentes simples.

##### 3.2.4.2.2. Longitud de onda

La longitud de onda no es una variable, pero puede cambiarse usando aparatos como es característica para cada material, y determina qué cantidad del rayo enfocado sobre un material es absorbido y convertido en calor. La longitud de onda es también importante para determinar el punto mínimo al cual puede enfocarse el rayo.

##### 3.2.4.2.3. Enfoque

Este juega un papel importante en el abastecimiento de latitudes amplias para determinar cantidades de energía que

se proporciona al material. Para sistemas laser que utilizan rubí o Nd:vidrio, la intensidad del rayo en el plano focal, no es realmente uniforme a lo largo de el tamaño del punto de enfoque; sin embargo, depende de la distribución espacial de la intensidad fotónica. El diámetro del punto puede ser simplemente aproximado por la divergencia del rayo y la longitud focal del lente condensador que se usa. Sin embargo, la intensidad máxima normal, está en el eje del rayo y decrece gradualmente con la distancia que la separa del eje. Entonces, el tamaño del punto del rayo que se enfoca, o el diámetro, debería ser definido con respecto a algún nivel de intensidad del perfil del rayo. Cuando se opera un modo simple, el tamaño del punto se define a menudo como el doble de la distancia del eje, cuya intensidad ha caído a  $1/e^2$  del valor máximo.

Cuando se define de esta manera, el diámetro al cual el rayo laser puede ser enfocado por lentes, es proporcional a la longitud de onda del laser, y el rango de longitud focal del diámetro.

Las técnicas de desenfoque (ajustes de la superficie de trabajo a otro plano que no sea el plano focal de la unidad de enfoque de la lente del rayo), permiten un significado efectivo para obtener mayor control en la cantidad de calor generado en el área de la soldadura.

Se deben considerar otros factores que pueden alterar las características del rayo laser, como el uso de filtros, aberturas y cubiertas. Algunos parámetros que tienen que ver con soldadura laser, específicamente en capacidades de producción, son la geometría y diseño de la junta, y velocidades de soldadura. Estos parámetros de proceso son algunas veces factores decisivos en la determinación de la aplicación particular de la soldadura laser, en comparación económica con métodos convencionales existentes.

La geometría de la junta tiene influencia en el espesor que debe soldarse, y por tanto, afecta en la selección de los parámetros para la elección del laser a utilizar. Debido al pequeño tiempo del flujo del metal y la pequeña cantidad de metal fundido, el proceso casi siempre va a requerir juntas de ensambles muy cerrados.

La velocidad de soldadura es limitada por el rango de repetición de pulso del equipo disponible. Lo común para proceso de soldadura, son rangos de un pulso sobre segundo arriba de los 10 joules. Aunque el equipo actual de soldadura laser requiera de un retraso continuamente largo entre una soldadura de punto y la siguiente, un cambio en la longitud de este retardo no afecta la soldadura. Las soldaduras del laser pulsado en procesos lentos en

comparación con otras técnicas de soldaduras convencionales promedian entre 0.2 y 2 plg./min (0.5 a 5 cm/min). Por otro lado, las soldaduras laser continuas de CO<sub>2</sub> (pulsadas de 75 a 300 pulsos por segundo) tienen una potencialidad de soldadura a velocidades relativamente altas de media a 6 pulgadas por minuto (1.3 a 15 cm/min). Se pueden obtener velocidades tan altas como 50 plg./min. (130 cm/min) en lasers de alto poder de CO<sub>2</sub> pulsadas rápidamente con iones de argón y sistemas YAG.

Algunas pruebas practicadas en placa de metal, revelaron significativos parámetros de soldadura que pueden ser de ayuda para la selección de la óptica apropiada, las tolerancias óptimas de la junta y el diseño de ésta. Para estas pruebas se inyectó argón en una presión de 5 - 10 lb/plg.<sup>2</sup> (73.5 - 147 Kg/cm<sup>2</sup>) a través de una boquilla de 0.200 pulg. de diámetro (6.35 mm). Enfocando lentes hechos de ZnSe (seleniuro de zinc) y un recubrimiento antirreflejante en ambos lados.

a) La penetración como una función de la posición del lente.

Como el enfoque del lente es llevado hacia el interior del material, habrá un punto óptimo donde se lleve a cabo la máxima penetración (ver Figura No.23). Para varios metales, este punto se ha encontrado a 0.50 - 0.100 plg. (1.27 - 2.54 mm) debajo de la superficie. Como puede notarse, la longitud focal más corta del lente da una pene-

netración más profunda que al momento de separarse la lente. Sin embargo, un enfoque corto es menos tolerante a las variaciones en la posición de enfoque, así que una variación en unas cuantas milésimas de pulgada en la posición de la superficie con respecto al lente, puede dar lugar a una pérdida significativa de penetración. Por lo tanto, si el material está corrugado, para que se pueda soldar, se debe alejar la longitud focal del lente. Como el rango transversal se incrementa, el ancho de las curvas se estrecha haciendo más crítico el alineamiento axial.

b) El ancho del cordón como función de la posición del lente.

Cuando el cordón de soldadura se mide como se indica en la prueba anteriormente descrita, se ha encontrado que se produce un cordón más delgado, cuando la penetración es máxima (ver Fig. No.24). Esta información es una relación directa de las tolerancias de ensamble del tipo de soldadura, así también como las tolerancias de alineamiento transversal. La forma que adquiere generalmente el cordón de soldadura, es de una estela en V y su ancho se mide en la superficie, usando el 50% del ancho de la superficie como gufa.

Observando de nuevo la Figura No.24, el desenfoco por arriba o por debajo de la altura óptima, provoca desalineamien-

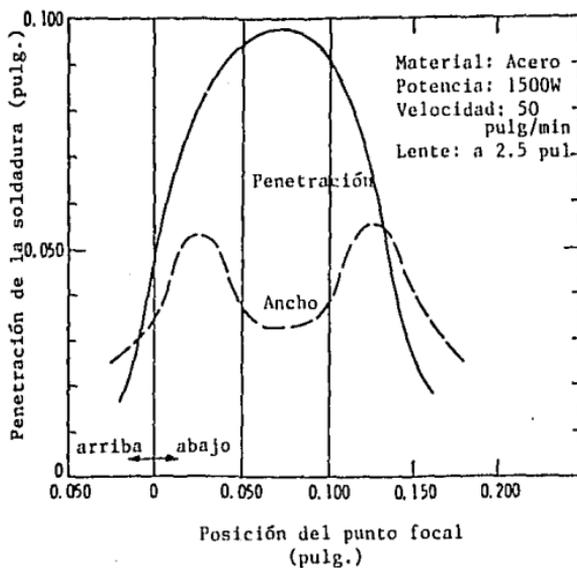


Figura 24. Relación de la penetración contra la posición del lente, para acero.

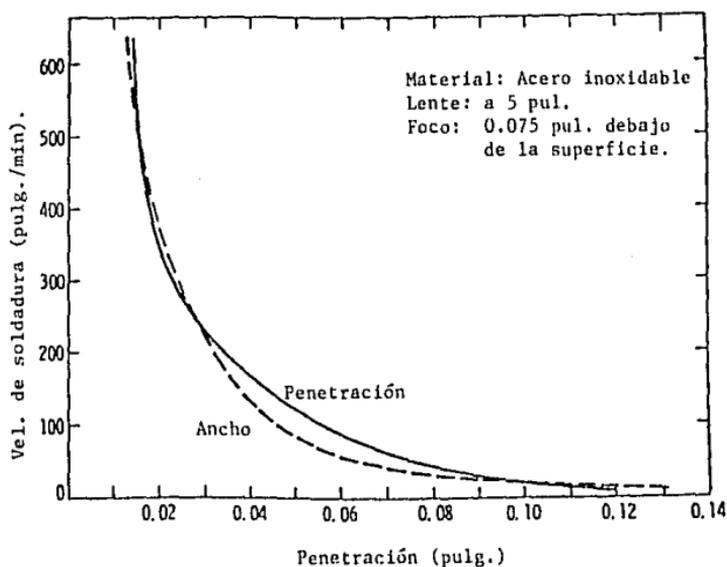


Figura 25. Relación del ancho del cordón contra penetración a diversas velocidades de soldadura.

to en la tolerancia en el ancho del cordón, teniendo pérdidas de hasta 50% en la penetración. Operando a rangos lentos de soldadura, pueden disminuirse las pérdidas en penetración en algunos grados y altos rangos de soldadura, y el cordón de soldadura se angosta, requiriendo mayores tolerancias de ensamble y herramental.

Un desenfoque mayor da lugar a una pérdida total de penetración y ancho del cordón, es decir, no se logra la soldadura debido a una densidad de potencia insuficiente al iniciar una buena absorción del rayo, y consecuentemente - tampoco se logra la función del metal.

c) La penetración como función del rango de soldadura.  
La penetración de la soldadura es inversamente proporcional al rango de soldadura (ver Figura No.25). Para el acero inoxidable tipo 302 que se muestra, 0.060 plg (1.52 mm) se soldan a 80 plg./min (2,032 mm/min.) mientras que el material de 0.030 plg. (0.762 mm) se solda acerca de 220 pulg/min (5,588 mm/min.). Por tanto, para tomar las ventajas completas de la capacidad laser de la soldadura, se pueden obtener soldaduras en calibres pequeños, substancialmente rápidas.

Los límites superiores de los rangos de soldadura son obtenidas cuando el metal es fundido y enfriado tan rápido

como sea posible para que fluya y se fusione. Cuando es ta condición se lleva a cabo, el metal fundido tiende a correr a través de la superficie de la parte que se solda rá. Para el acero inoxidable de 0.005 plg. (0.127 mm), este límite superior se encuentra a 2,000 plg/min (50,800 mm/min.).

El límite inferior se alcanza cuando debido a severas conducciones, el cordón de soldadura empieza a separarse y a seguir caminos fuera del material. En este límite, la zona de afectación del calor se incrementa substancial mente y se producen porosidades en la soldadura, debido a la parcial vaporización del metal, causada por el exceso de absorción de la potencia laser. Este problema particu lar se encuentra comunmente en controladores CNC (control numérico por computadora) en soldadura de esquinas de pe- queños radios. La solución sería reducir la potencia del laser para la porción del ciclo de soladdura.

### 3.2.5. Diseño de las juntas y ensambles

Un buen punto de partida para la soldadura laser en gene- ral, lo es la preparación y el herramental adaptable a sol dadura autógena automática. Se deben usar preparaciones fijas al vacfo para lograr juntas de mayor calidad.

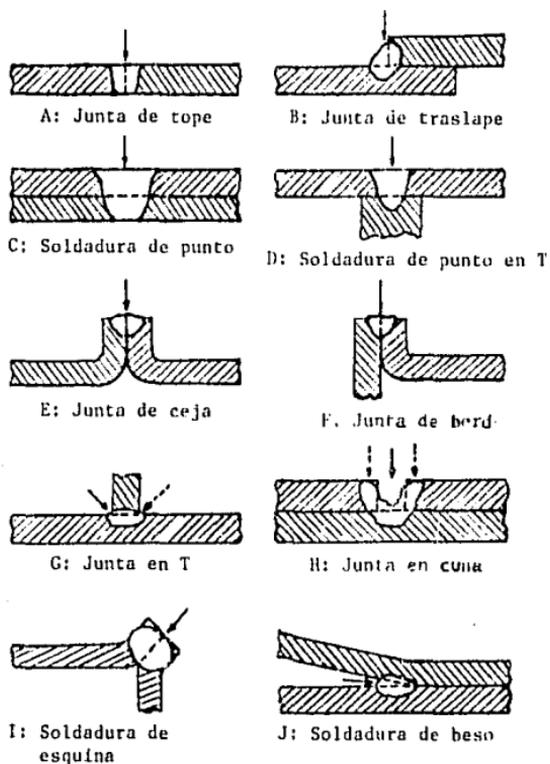
Para soldadura laser continua de aleaciones de fierro y

níquel, el espacio de las juntas de tope no debe exceder de 0.15 veces del espesor del material. Los deslizamientos verticales no deben exceder de 0.25 veces el espesor del material. Ambas tolerancias se refieren a la calibración más cerrada en la junta. Estas tolerancias en los materiales se reducen con una mayor conductividad térmica.

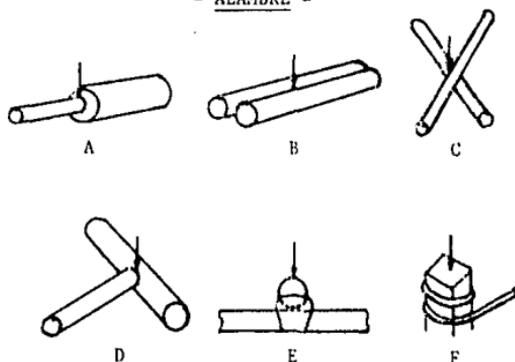
Las soldaduras de punto en juntas, de traslape, en soldador laser pulsado, requieren de tolerancias más cerradas. El espacio máximo para aleaciones de fierro y níquel, es 0.15 veces el espesor del material, y disminuye con una mayor conductividad.

El diseño de las juntas para soldaduras laser, es muy similar al diseño para las técnicas tradicionales. En la siguiente figura No.26, podemos observar estos diseños para juntas de metal y cables. La soldadura de esquinas, proporciona una junta muy rígida entre partes de metal. Con la suficiente potencia para fundir las cajas, el flujo de la estela de metal y la tensión superficial de la cama, resultan en un ensamble fijo y rígido. A menudo, es necesario enfriar las placas, siendo lo común un enfriamiento al aire. La soldadura de "beso", se llama así, porque las piezas del metal se acercan tal cual si se besaran, ofreciendo un pequeño ángulo entre las dos

Figura 26. DISEÑO DE JUNTAS PARA SOLDADURAS POR RAYO LASER  
 - PLACA METALICA -  
 (Las flechas muestran la dirección del rayo ) .



DISEÑO DE JUNTAS PARA SOLDADURAS POR RAYO LASER  
 - ALAMBRE -



partes, con lo que es posible atrapar la mayor parte de la energía del rayo laser. Para soldar, se llega a hacer necesario, de una muy pequeña presión, pero por lo general, las superficies se unen muy bien, por su propio peso. El espacio entre las piezas debe permitir que la radiación escape de entre ellas, y por este medio se han logrado juntas exitosas en láminas delgadas en soldaduras de punto.

La concentración del rayo, como en las soldaduras de beso, permiten soldaduras de penetración profunda con juntas T de un lado solamente, dando así la enorme ventaja cuando el lado opuesto de la junta T es inaccesible.

Se han desarrollado configuraciones de juntas para cables para la industria electrónica. Estas soldaduras a menudo pueden usarse en lasers pulsados de estado sólido, en donde juntas de alambre-a-alambre, deben compartir la incidencia del rayo laser. En juntas cruzadas, por ejemplo; el rayo directo del laser y la interacción de los alambres, concentran la energía.

La soldadura terminal es la mejor cuando la masa térmica del núcleo equipara a la masa térmica del alambre. Dirigiendo el rayo laser hacia el núcleo, se previenen quemaduras a través del cable. Las soldaduras laser para conexiones eléctricas, pueden estar hechas sin pelar el cable,

porque el rayo laser vaporiza el aislamiento.

La mayoría de las geometrías de la junta a soldar que se usan en procesos térmicos tradicionales de soldadura, son adecuadas para soldaduras laser. Sin embargo, uno puede imaginarse que el rayo laser es enfocado en un punto de solo algunas milésimas de pulgada, y como se ha dicho anteriormente, los requerimientos de tolerancia de ensambles y alineación, son sólo en el orden de magnitudes dimensionales. Las geometrías más frecuentemente usadas en soldadura laser son las de tope, de traslape y de caja.

a) Soldadura de tope

El bisel de los extremos del material no se requiere para soldar con laser, pudiéndose aceptar el material con bordes cuadrados y rectos. El alineamiento transversal debe ser  $\pm 0.005$  pulg. (0.127 mm).

b) Juntas de traslape

Los espacios de aire entre las piezas a ser soldadas, está limitado severamente a la penetración y/o rango de soldadura. Se recomienda utilizar un poco de compresión para mantener la separación que debe ser menor a un 25% del espesor del material. Cuando se van a soldar diferentes espesores de material, se recomienda soldar una pequeña placa delgada de material.

### 3.2.6. Comparación con otros procesos de soldadura

El criterio para comparar la soldadura laser con otros procesos de soldadura, se enlista en la Tabla No.4. Los parámetros fueron escogidos como típicos y necesarios para soldar 0.236 pulg. (6 mm) de espesor de placa, y se seleccionan velocidades y potencias extremas. Los siguientes puntos son algunas ventajas y desventajas de las soldaduras laser sobre los sistemas convencionales:

a) Las principales ventajas de las soldaduras laser sobre las de TIG y plasma, son: precisión, alta penetración, soldaduras paralelas y contiguas muy cercanas, no hay afectaciones térmicas en las zonas adyacentes.

b) Las soldaduras laser tienen un mayor potencial de alta productividad, debido a los fáciles procedimientos de manejo de la pieza de trabajo, además no necesitan trabajar en vacío como ocurre en la soldadura por rayo electrónico, ni ser parte del circuito eléctrico como ocurre en la soldadura de arco. Además, dependiendo de la aplicación, pueden obtenerse soldaduras muy profundas o muy superficiales.

c) Las distorsiones de las soldaduras laser son mínimas y requieren poco o no requieren acabado superficial.

- d) El equipo es de tamaño compacto, de diseño simple, con un espacio mínimo de piso, de fácil mantenimiento y para su uso, los operarios son fácilmente capacitados. Los controles son flexibles y los costos efectivos de electrónica, bajos, además se obtiene un máximo control de la soldadura y puede adaptarse el equipo fácilmente para la producción.
- e) Debido al montaje de bayoneta de las lámparas de destellos, se facilita su cambio, logrando así, un mantenimiento rápido y efectivo.
- f) Aunque la soldadura laser es diez años más novedosa que la soldadura por rayo electrónico, ésta se encuentra ya en la cuarta generación de equipos en servicio, y cuenta con la experiencia de 17 años en soldadura de rayo electrónico, cuyos criterios se aplican similarmente a los de la soldadura laser.

Algunas de las desventajas de la soldadura laser contra sistemas convencionales son: los equipos de soldadura TIG y arco plasma, tienen una inversión de capital más bajo y se han usado más extensivamente por muchos años, por lo cual tienen una experiencia más larga.

T A B L A 4

COMPARACION DE PROCESOS DE SOLDADURA

<u>PROCESO</u>	<u>LASER</u>	<u>T I G</u>	<u>PLASMA</u>	<u>RAYO ELECTRONICO</u>
Potencia que absorbe la pieza de trabajo.	4 KW	2 KW	4 KW	5 KW
Potencia total usada	50KW	3 KW	6 KW	6 KW
Velocidad transversal típica.	16 mm/S	2 mm/S	6-7 mm/S	40mm/S
Presición de alineación requerida	<u>± 1 mm</u>	<u>± 1 mm</u>	<u>± 1 mm</u>	<u>± 0.3 mm</u>
Energía de entrada por unidad de longitud (absorbida por la pieza de trabajo.)	250 J/mm	1000 J/mm	600 J/mm	125 J/mm
Costo de capital y disponibilidad	120 Mil U.S. dólares. Disponible en USA e Inglaterra un año después de levantar el pedido.	8 Mil U.S. dólares entrega inmediata.	10 Mil U.S. dólares. entrega inmediata.	50 Mil U.S. dólares. disponible en USA, 6 meses después del pedido.
Posibilidad de soldar en cualquier posición	SI. Es óptimo cuando la pieza está en movimiento.	Sufre cambios en las características de penetración c/la altitud.	Sufre cambios en las características de penetración c/la altitud	SI, pero requiere mecanismos para mover la pistola.

Distorsión Axial	Mínima	1 mm aprox. en placa de 5 mm	1 mm aprox. en placa de 5 mm.	mínima
Angular	Mínima	Significante en soldadura en V	Significante en soldadura en V	mínima
Defectos en el perfil de la superficie.	Líneas de flujo muy finas.	Protuberancias no deseadas, debidas a tensión en la superficie.	Protuberancias no deseadas, debidas a tensión en la superficie.	Produce virutas arrugadas en la cara posterior a la soldadura.
Requerimientos	Interruptor de seguridad contra posibles reflexiones del rayo.	Caretas para luz normal.	Caretas para luz normal.	Cambiador de vacfo. Vacfo local. Caretas para Rayos - X.

### 3.2.7. Áreas de aplicación

La contribución metalúrgica de las soldaduras laser se muestra en muy alta calidad y reproducibilidad. Estas propiedades son muchas en demanda de plantas de producción de potencia, cuyo costo de reparación es muy alto y en donde es alto también en tiempo y dinero comparadas con sistemas laser. Contra estas ventajas, el alto costo de capital de los lasers, se ha sumado a la también costosa tecnología de manejo de la pieza de trabajo. Sin embargo, las áreas de aplicación de las soldaduras laser, se encuentran en:

- a) Soldaduras de tubo a tubo (arriba de 0.787 pulg. (20 mm) de espesor de pared con un rayo de 20 KW), usado en cabezal rotatorio compuesto de una configuración tubular. Esto puede ser posible para fabricar largas longitudes de tubo, soldar tubos de distintos diámetros o soldar tubos de intercambiadores de calor a los espejos.
  
- b) En soldadura autógena TIG con atmósfera inerte de argón puro, se obtienen pérdidas altas de calor de 75%, en donde las soldaduras a tope tienen una penetración de sólo el 70%, mientras que la soldadura laser es más rápida en orden de magnitud y da una penetración completa.
  
- c) Actualmente las soldaduras TIG, MIG y de arco, realizan soldaduras de penetración profunda, usando técnica

de paso múltiple, pero en soldadura laser, el número de pasos se reduce considerablemente sin disminuir la velocidad ni la potencia.

d) La posibilidad de acceso difícil o peligroso, logra en la soldadura laser, una gran área de aplicación, lográndose asimismo, trasladar la potencia del rayo hasta una distancia de 50 m (164 ft) del generador, sin pérdidas debidas a la distancia.

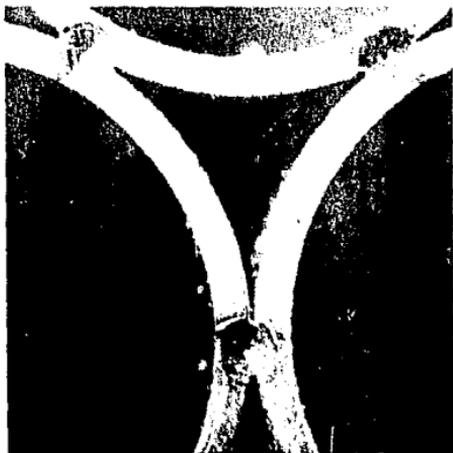
### 3.3. Aplicaciones de soldadura por radiación laser

Muchos metales diferentes pueden ser soldados satisfactoriamente por medio de rayo laser. Con sistemas pulsados, se puede soldar cobre, níquel, hierro, zirconio, tántalo, aluminio, titanio, columbio y sus aleaciones; y con sistemas continuos la mayoría de los metales, excepto las aleaciones de aluminio y cobre. Aunque el laser provee el control preciso de energía y procesos únicos de desarrollo, éste es un proceso de soldadura por fusión. Es por esto mismo, que este proceso está restringido por la habilidad del operador, y los requerimientos de compatibilidad metalúrgica, común en la mayoría de los procesos convencionales.

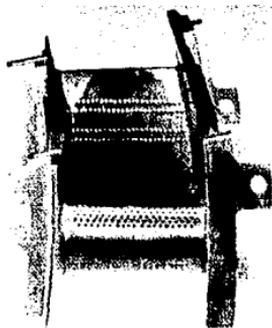
Ya que el equipo de soldadura laser es mas costoso que el equipo de soldadura convencional de potencias equivalentes, la selección de las aplicaciones debe estar basada en las ventajas y capacidades, únicas que tiene el laser. Algu

nas de estas capacidades pueden ser usadas como una gufa para la selección de la aplicación, como sigue:

1. La energía específica que penetra a la pieza de trabajo es muy pequeña, lo que significa que la pieza está exenta de afectaciones térmicas en la zona de trabajo y de cualquier daño térmico en el material adyacente al cordón de soldadura que se está formando. El enfriamiento rápido del cordón de soldadura, puede tener ventajas metalúrgicas (como por ejemplo, evitar dar tratamiento térmico para relevar esfuerzos) en algunas aplicaciones.
2. La alta densidad de potencia del rayo laser puede ser usada para hacer soldaduras difíciles. Estas pueden involucrar soldaduras entre metales de distintas compatibilidades metalúrgicas con una amplia diferencia en sus propiedades físicas, entre metales de alta resistividad eléctrica o entre partes que varían en masa y tamaño.
3. No es necesario tener un contacto eléctrico con la pieza de trabajo, debido a que el recurso de calor es la luz del rayo. Se puede llegar a soldar en lugares de difícil acceso (por medio de manerales de fibra óptica u otros recursos). Debido a la ausencia de los requerimientos del contacto eléctrico, el laser tiene un uso ideal para aplicarse en sistemas automáticos de soldadura en altas velocidades. Soldaduras de punto, pueden tener lu-



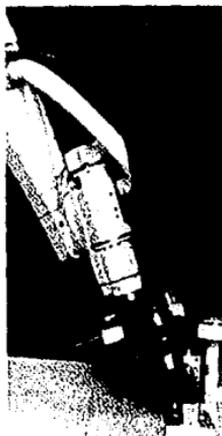
LAMINA 1  
SOLDADURAS DE PUNTO EN TUBOS DE 0.030" EN ES  
PESOR DE PARED PARA LA INDUSTRIA NUCLEAR, LI  
BRE DE OXIDO Y CON 0.1" DE PENETRACION.



LAMINA 2  
ALABE DE TURBINA PERFORADO EN LUGARES DE  
DIFICIL ACCESO Y SUPERFICIE IRREGULAR.

LAMINA 3  
SOLDADURA MICROSCOPICA PARA CIRCUITOS IMPRE-  
SOS Y MICROELECTRONICA.

LAMINA 4  
MANERAL DE FIBRA OPTICA PARA GUIAR EL RA  
YO A LUGARES DE DIFICIL ACCESO.



gar "volando" con partes en movimiento de 60 a 120 pulg/min (1,524 a 3,048 mm/min). Se pueden realizar soldaduras en delgadas láminas a velocidades superiores a 250 ft/min (76.2 m/min). Además, la pieza puede estar fija y lo que se mueva sea el rayo laser a través del cordón de soldadura, o una combinación de pieza y rayo en movimiento es también muy común. Esta flexibilidad, a menudo simplifica mucho la operación.

4. Soldaduras de precisión se pueden hacer con un punto de enfoque bien definido. El tamaño del punto de soldadura, en orden de unas cuantas milésimas de pulgada en diámetro, se obtiene con un enfoque simple.

5. La purificación de la zona de fusión ocurre bajo ciertas condiciones, durante la soldadura de aceros. Una absorción preferencial del rayo, por parte de inclusiones no metálicas, en el metal, conduce a su vaporización y remoción de la zona de soldadura.

6. La soldadura laser es idealmente aplicable en sistemas automáticos.

### 3.3.1. Operación pulsada

Como se ha visto con anterioridad, algunas configuraciones de juntas pueden ser usadas para soldar alambres con operaciones pulsadas. Estas incluyen conexiones a tope, de traslape, en T y cruzadas.

La configuración óptima para las juntas en alambres eléctricos es la junta a tope, pero juntas de traslape y cruzadas, dan una rigidez más fácilmente en diámetros pequeños. En las juntas de traslape, los dos alambres deben ser paralelos y estar en contacto directo y el rayo laser se debe de dirigir para fundir y fusionar los dos alambres juntos. Cuando se utilizan juntas de cruz, el rayo debe dirigirse al punto de contacto entre los alambres.

La soldadura de punto entre piezas traslapadas, se puede producir con un laser pulsado, ya sea por una sucesión de puntos o un cordón continuo en operación continua. Una protección de gas (atmósfera inerte), debe ser necesaria si se desea minimizar la oxidación del área de soldadura.

Una prominente área de aplicación para la soldadura laser pulsada, se encuentra en la industria electrónica. La miniaturización dicta las pautas que deben reunir las juntas y que muy a menudo no se puedan hacer mediante técnicas - convencionales de soldadura. El acceso limitado a la junta y la necesidad de aplicar la energía a manera de evitar el daño térmico de los componentes, puede encontrarse mediante la soldadura laser. Un ejemplo de este tipo de soldadura laser es la encapsulación de paquetes microelectrónicos.

Actualmente se recuperan partes debido al bajo calor que se suministra y a la baja distorsión resultante, las cuales son ideales para hacer pequeñas reparaciones de partes maquinadas. En muchas aplicaciones de reparación, se emplean de esta técnica, la adhesibilidad a un espacio muy cerrado, el control preciso de pequeñas cantidades de energía, una buena visualización de la soldadura.

### 3.3.2. Operación continua

Los sistemas laser de operación continua, principalmente el de CO<sub>2</sub>, ya no se usan tanto en aplicaciones de laboratorio, sino más bien industriales. A continuación se evalúan numerosas aplicaciones en producción.

Los laser de CO<sub>2</sub> de alta potencia, pueden generar cordones de soldadura de paso simple y penetración profunda. En algunos metales que llegan a tener un espesor de 0.75 pulg. (19.05 mm). El cordón de soldadura de doble paso muestra un tamaño de grano más pequeño que el de soldaduras de paso simple, debido a la baja energía específica de entrada y al más alto rango de enfriamiento en la zona a soldar. Un rayo de alta potencia puede producir soldaduras de punto profundo en una pieza de trabajo estacionaria que posee características similares a las de las soldaduras continuas.

Los requerimientos típicos de potencia para velocidades nominales de soldadura de 50 pulg/min (1,270 mm/min) de muchos metales, son 3.0, 6.0 y 12.0 KW para 0.125, 0.250 y 0.50 plg. (3.17, 6.3 y 12 mm) de espesor de la junta, respectivamente. Esta guía aproximada de soldadura laser, se aplica para aceros, aleaciones de titanio y níquel. Se requiere más alta potencia para aleaciones de cobre-níquel, zirconio y metales refractarios (molibdeno, tantalio, tungsteno, etc.).

Se han encontrado limitantes en las soldaduras laser para aleaciones de aluminio. Las dificultades tradicionales para soldar aluminio, se incrementan mediante el laser, debido a la alta reflectividad inicial del material. Para resolver este problema, se requiere de una alta densidad de potencia y este nivel requerido permite a menudo sobrecalentamientos en el metal de soldadura, vaporización esporádica y formación intermitente de plasma, que además producen condiciones de discontinuidad en la soldadura que se pueden disminuir por la oscilación del punto radial.

Además de la soldadura, el rayo laser puede ser rápidamente registrado sobre la superficie del metal, produciendo una delgada capa de fundido que solidifica rápidamente. A este procedimiento se le puede incorporar material de aporte o fundentes para aplicaciones superficiales.

En general, los procedimientos establecidos para las preparaciones de las juntas soldables, se aplican para soldadura la ser. Se prefiere la posición recta (bajo la mano), pero las posiciones irregulares (horizontal, sobre la cabeza, vertical ascendente, vertical descendente), de soldaduras, pueden hacerse bajo condiciones difíciles.

#### 3.4. Herramientas y accesorios

El herramental para la soldadura laser requiere aparatos de posicionamiento como lo son; tablas de posiciones x, y, xyz (tridimensionales), y su propósito es poder fijar (o mover) las piezas de trabajo con respecto al cabezal laser. - - También se cuenta con componentes de entrega que contienen toda la óptica necesaria para guiar el rayo, manerales, controles, protecciones para el operador, el ensamble de la junta y la alineación.

A diferencia de otras herramientas tradicionales, el herramental de la soldadura laser puede manejar materiales magnéticos y transparentes, lo cual es una gran ventaja en la utilización de materiales como cristal o plásticos, para poder sujetar la pieza sin que éstos sean dañados o alterados por el rayo, y además previene la formación de plasma indeseable que afecta el equipo óptico en sus propiedades.

Una cubierta de gas inerte se aplica para soldaduras de po-

tencia continua, previniendo así, daños severos en la función y protección atmosférica de metales reactivos como el titanio o el tantalio, mejorando así, el flujo y la apariencia del cordón, y eliminando el plasma encima de la soldadura.

Se deben usar circuitos cerrados de televisión para la localización o posicionamiento del rayo en la pieza de trabajo y visualización del proceso en soldaduras continuas, en donde la localización de la pieza de trabajo es controlada en forma manual por el operador.

### 3.5. Corte por radiación laser

En términos generales, el corte es hoy la operación que emplea laser más frecuentemente en la industria. Utiliza preferentemente lasers de  $\text{CO}_2$ . Por ejemplo; usando un laser de 500 Watts, es posible cortar en línea recta 1 mm de placa ordinaria de acero a 5.6 m/s (220 plg/s), o también 6 mm (0.236 plgs) a una velocidad de 0.5 m/s (19.6 plg./seg).

El rayo laser puede usarse como un recurso calorífico para hacer cortes derechos o contorneados en placas de metal, así como se ha venido haciendo con arco-plasma o con antorcha de oxiacetileno. Cuando se utilizan lasers de potencia continua, se aplica en corte, y cuando se usan lasers de potencia pulsada, se aplica en la barrenación de agujeros.

La mecánica por la cual los rayos laser pueden remover metal durante el corte, lleva una combinación de fusión y vaporización. La vaporización substancial se establece cuando suficiente metal líquido se extrae del agujero. Se requieren rayos continuos de extremadamente alta densidad de potencia y además se asiste con gas a altas velocidades para aumentar el corte.

Se han desarrollado parámetros empíricos para corte y las relaciones empíricas que se muestran, sirven de la misma manera para metales que para no metales:

$$\text{Rango de corte (mm/min)} = K \frac{P}{E.A.t.}$$

donde:

P = Incidencia de la potencia laser en la superficie ( watts ).

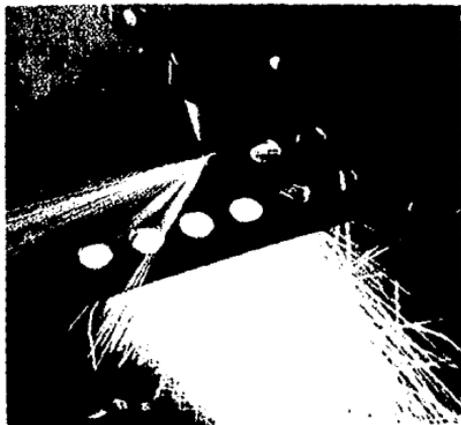
E = Energía de vaporización del material (watts/mm<sup>3</sup>).

A = Area del rayo laser en el punto focal (mm<sup>2</sup>)

t = Espesor del material (mm)

K = Constante dependiente del material y de la eficiencia de el acoplamiento de la energía laser dentro del material (mm/min.)

Por tanto, el rango de corte es inversamente proporcional al espesor del material, y directamente proporcional a la potencia de entrada por arriba de cierta concentración mínima. Esto último significa que el rango de corte se lle

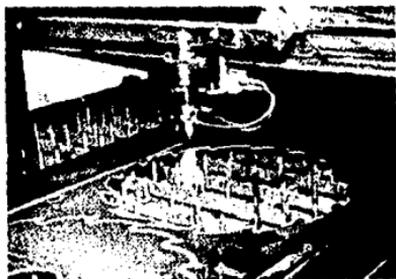


LAMINA 5

CORTE DE PEQUEÑOS ORIFICIOS EN UNA LAMINA DE ACERO DE BAJO CARBONO Y DE  $\frac{1}{8}$ " EN ESPESOR.

LAMINA 6

CORTE GUIADO POR CNC PARA FABRICAR HOJAS DE SIERRAS PARA CORTAR MADERA EN ACERO INOXIDABLE DE  $\frac{1}{8}$ " EN ESPESOR.



LAMINA 7

CON UN LASER DE  $\text{CO}_2$  DE 750 WATTS DE POTENCIA, SE PUEDEN CORTAR LAMINAS Y PLACA DE ACERO, MUCHO MAS RAPIDO Y CON MENOR TIEMPO DE AJUSTES QUE CON SISTEMAS CONVENCIONALES.



va a cabo por un rayo laser de 1,000 Watts y no puede ser igualado por dos rayos de 500 watts, o 4 de 250 watts (debido a que un rayo enfocado de 250 watts, no puede desarrollar la concentración mínima requerida).

Las figuras Nos. 27, 28, 29 y 30, son ejemplos de los rangos de corte posibles cuando el calor debido a la reacción exotérmica de esos metales con oxígeno, se suma al absorbido por la energía laser. Estos rangos de corte se pueden aumentar en un 40%, si se usa un gas inerte. El corte de aluminio asistido por rayo laser y el de aleaciones muy duras como Hastelloy, son ejemplos de corte de metales no reactivos y se muestran en las figuras Nos. 31a y 31b y que tienen usos interesantes en la industria aeronáutica.

### 3.5.1. Corte asistido por gas

Debido a que la densidad de potencia de los sistemas laser continuos es insuficiente para producir la expulsión del metal líquido y generar así el corte, se utiliza una boquilla para asistir con gas el metal fundido. En sistemas continuos de baja potencia, se utiliza oxígeno generalmente para aprovechar la reacción exotérmica de éste con el metal, y cortar de esta manera. Un comportamiento similar se da en cortes de alta potencia. Sin embargo, una gran variedad de otros gases de asistencia como aire comprimido, helio, argón, CO<sub>2</sub> y nitrógeno, se usan con alta efectividad para ob

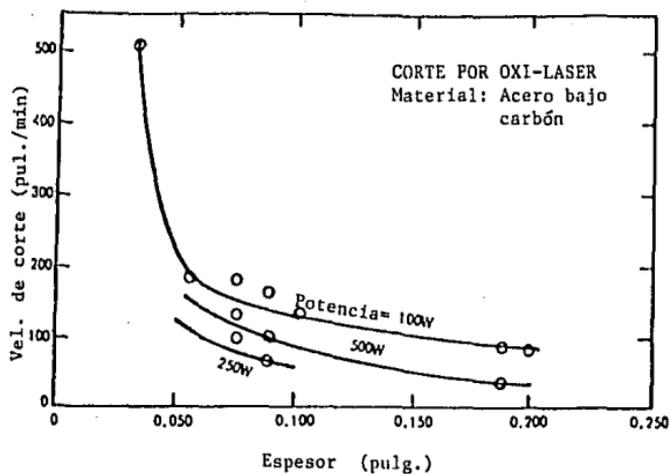


Figura 27. Relación de corte con asistencia de oxígeno, de espesor contra velocidad a distintas potencias.

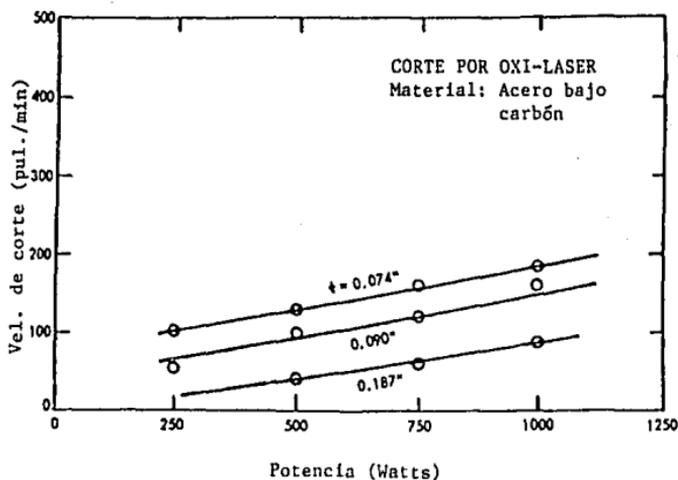


Figura 28. Relación de potencia contra velocidad de corte a diversos espesores en placas de acero de bajo contenido de carbono.

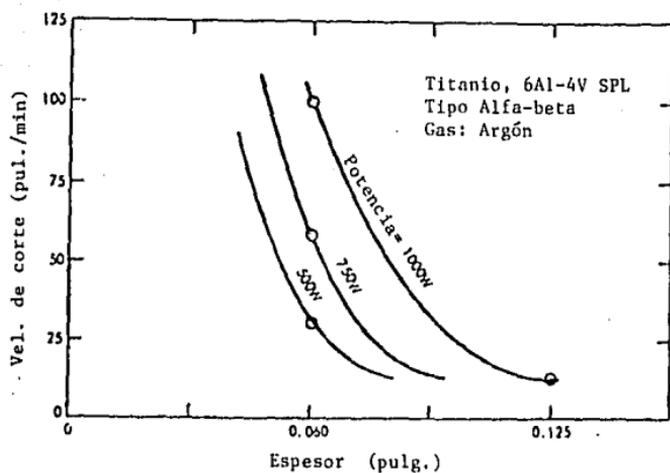


Figura 29. Relación de velocidad de corte contra espesor a distintas potencias para placas de titanio.

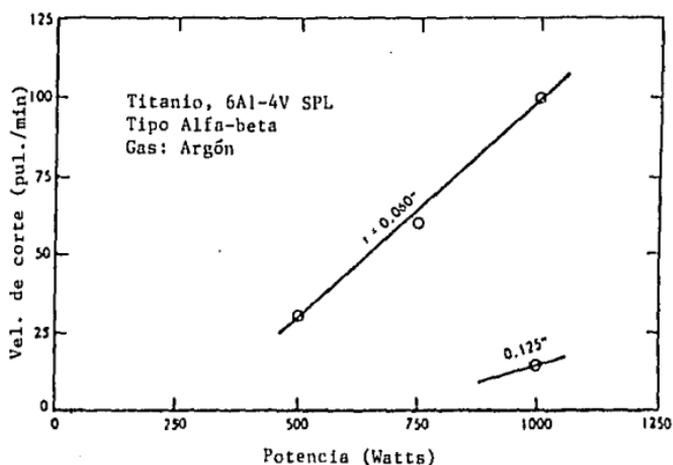


Figura 30. Relación de velocidad de corte contra potencia a distintos espesores para placas de titanio.

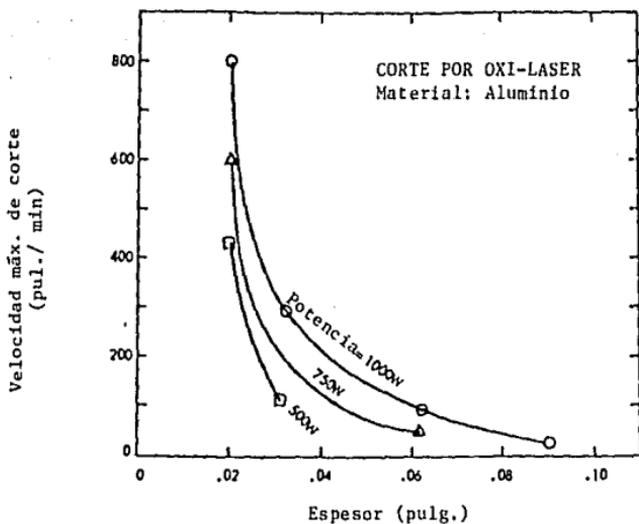


Figura 31a. Corte de aluminio (metal no reactivo) altamente reflejante.

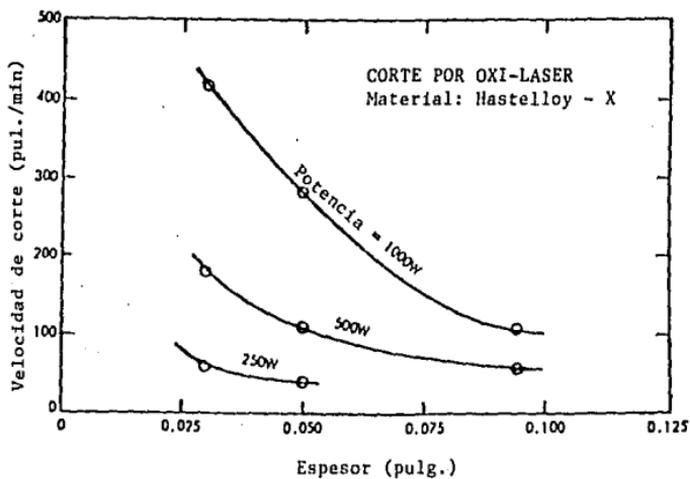


Figura 31b. Corte de Hastelloy - X (acero inoxidable de dureza muy especial) asistido con oxígeno.

tener cortes muy limpios, debidos al empleo de un gas inerte y libres de posibles oxidaciones, pero a menudo se desarrollan rebabas de borde poco tenaz. Con corte asistido por oxígeno, la rebaba es muy frágil y por tanto, fácilmente removible.

Al igual que en la soldadura de penetración profunda, la pieza de trabajo se acopla perfectamente a pesar de la alta reflectividad del metal.

Por ejemplo, 0.062 plg. (1.57 mm) de espesor de una pieza de aleación de aluminio, puede ser cortada a 300 plg/min (7,620 mm/min), con un laser de CO<sub>2</sub> de 3 KWatts, asistiéndose con aire comprimido. Solo un ligero incremento en la velocidad de corte se logra cuando la superficie se anodiza previamente a fin de lograr una mayor absorción. El ancho de corte en estas condiciones, es cerca de 0.02 plg. (0.50 mm) y la zona afectada térmicamente, se extiende sólo cerca de 0.001 plg. (0.025 mm), dentro del material base.

En la mayoría de los metales, la velocidad de corte a potencias constantes, es inversamente proporcional al espesor, como se muestra en la figura No.32, para acero inoxidable, tipo 302. Dentro de ciertos límites, la velocidad de corte es directamente proporcional a la potencia del laser, como se muestra en la figura No.33. La Tabla No.5 muestra los cortes típicos del rayo laser para algunos metales.

T A B L A 5RELACION DE CORTES TÍPICOS POR RAYO LASER

<u>Metal</u>	<u>mm (pulg.)</u>	<u>KW</u>	<u>Velocidad de corte cm/min.</u>
Acero	1.295 (0.051)	0.5	360.68
	1.600 (0.063)	0.5	248.92
	2.286 (0.090)	0.6	117.80
	3.175 (0.125)	4.0	406.40
	16.764 (0.660)	4.0	114.30
	53.975 (2.125)	6.0	33.02
Acero Inoxidable	0.304 (0.012)	0.35	439.42
	0.990 (0.039)	0.5	165.10
	2.286 (0.090)	0.6	177.80
	3.175 (0.125)	3.0	254.00
Aleaciones de Níquel.	1.498 (0.059)	0.85	228.60
	3.175 (0.125)	4.0	304.80
Titanio	1.016 (0.040)	0.23	490.22
	5.080 (0.200)	0.6	330.20
	31.75 (1.25)	3.0	127.00
Aluminio	3.175 (2.00)	4.3	50.8
	6.35 (0.250)	3.8	254.00
	12.700 (0.500)	5.7	101.60

Aunque el corte se incrementa con el poder del laser, este incremento no es directamente proporcional a su potencia.

### 3.5.2. Comparación con otros procesos de corte

Algunas de las ventajas del corte con rayo laser, comparado con cortes de gas oxiacetileno y arco-plasma, son:

- a) El generador del rayo laser no necesita acercarse demasiado a la superficie de la pieza de trabajo. Esto permite cortar o taladrar en lugares de difícil acceso.
- b) El proceso no requiere que la pieza de trabajo sea un componente del circuito eléctrico, como en el corte por arco-plasma.
- c) El rayo laser entrega una muy alta densidad de potencia en un punto muy pequeño, logrando un corte a alta velocidad muy preciso, muy delgado y sin afectaciones térmicas en las zonas adyacentes de trabajo. Estos factores logran que el corte por rayo laser se aplique excelentemente bien en sistemas automatizados de Control Numérico por Computadora, para lograr así cortar formas contorneadas o caprichosas.
- d) Las características del barreno o el orificio, se controlan muy fácilmente por medio de una apropiada selección

de lentes de Óptica de longitud focal larga para cortar o barrenar con profundidad, y obtener así orificios de diámetro muy pequeño.

e) El consumo de gas y electricidad es muy bajo, así como el tiempo preventivo de mantenimiento, y el costo de operación.

f) La operación es consistente y se monitorea continuamente por medio de circuitos de televisión.

Algunas limitaciones en la aplicación de este proceso son:

a) Los generadores de rayo laser son muy costosos comparados con equipos de corte por oxiacetileno y arco-plasma, y por lo tanto, la aplicación debe justificar la diferencia en el costo.

b) Aunque se puede cortar acero en espesores superiores a las 2 pulg. (50 mm), el proceso de corte se utiliza comúnmente en espesores de 0.5 plg. (12.7 mm), o menores.

### 3.6 Seguridad

Los peligros básicos que se asocian con la operación de un laser, son:

a) Daño ocular, incluyendo quemaduras de córnea o retina

o ambos.

b) Quemaduras de piel.

c) Daños al sistema respiratorio, debido a la evolución de materiales peligrosos durante la interacción rayo-pieza de trabajo.

d) Choque eléctrico.

d) Peligros por agentes químicos.

e) Enfriamientos criogénicos.

De todos estos daños, el óptico se asocia comunmente con los lasers. Para rayos laser que operan en longitudes de onda de luz visible o cercana a la infrarroja, aún un rayo de 5 mW puede causar daño en la retina. Afortunadamente se dispone de lentes de seguridad que son substancialmente - transparentes a luz visible, pero aún opacos para la luz laser.

Además se puede disponer de filtros para sistemas de rubí y Nd-YAG. Deben tomarse precauciones para seleccionar apropiadamente los lentes protectores. Pueden usarse en estos sistemas, lentes de seguridad claros con protectores laterales, a fin de que la luz que alcance el ojo, provenga de la incandescencia de la pieza de trabajo. A altas potencias, un brillo excesivo puede suceder a la generación de un plasma que puede llegar a ahumar los lentes de protección, y -

disminuir por tanto, la visibilidad.

Las quemaduras producidas por rayos laser, pueden llegar a ser profundas y muy reuentes a la cicatrización. Se debe evitar la exposición por medio de un apropiado confinamiento del rayo; ésto es de particular importancia para raynos no visibles que no dan evidencia externa de su presencia, a menos que un sólido los intercepte.

Debido a los altos voltajes, así como a los aparatos de almacenamiento de gran capacidad que son asociados con el equipo laser, la posibilidad de un shock eléctrico letal, está -siempre presente. Las cubiertas para sistemas eléctricos deben llevar cerraduras apropiadas en todas las puertas de acceso y repuestos de bancos de capacitores de descargas, antes de la entrada, además de que el equipo debe ser apropiadamente aterrizado.

Obviamente el peligro mínimo es la interacción de la potencia del rayo en la pieza de trabajo. Por ejemplo, los materiales plásticos utilizados para prevenir quemaduras, pueden generar vapores tóxicos si se irradian en una atmósfera recargada de oxígeno. En soldaduras de penetración profunda, se pueden formar finos humos del metal, que en algunos casos pueden ser carcinogénicos. También las formaciones severas de plasma pueden producir ozono ( $O_3$ ), consecuente-

mente se debe de tener una adecuada ventilación y extracción de aire para áreas en donde se trabaja con laser.

Los fabricantes de equipos laser requieren de la aprobación calificada del Departamento de Salud Radiológica de los Estados Unidos (U.S. Bureau of Radiological Health, B.R.H.). Los componentes eléctricos deben encontrarse dentro de los estándares NEMA (National Electric Manufacturers Association). El uso de estos equipos está regido por los requerimientos de OSHA (\*).

En todos los casos, el Estandar Nacional Americano Z136.1 "Seguridad en el uso de los Lasers" (última Edición), debe seguirse en el Estándar No.21 CFR, Capitulo No.1, Subcapitulo J.

(\*) Asociación Ocupacional de Seguridad y Salud (Occupational Safety and Health Association).

C A P I T U L O 4

SELECCION DE EQUIPO

## CAPITULO 4 - SELECCION DE EQUIPO

### 4.1. Introducción

No es simple la selección del equipo ideal para cualquier prueba, ya que ésto implica la paciencia de un análisis cuidadoso de nuestros requerimientos y la sección de varias alternativas disponibles. Los factores dados en este capítulo, son algunos de los más importantes, pero ciertamente, no los únicos a considerar. La calidad de la superficie cortada o soldada, al tamaño y capacidad del equipo, los costos de adquisición, mantenimiento, operación, etc., y muchos otros factores, son de suma importancia para la determinación del equipo más adecuado para cada aplicación.

Como el objeto de esta tesis no es el análisis económico del equipo, ni su diseño, se optó por considerar sólo algunos de los factores más significativos para un estudio comparativo con procesos tradicionales en soldadura y corte.

### 4.2. Determinación de la aplicación

El laser puede intervenir en una empresa a tres niveles distintos. Puede ser agente directo de la transformación deseada, puede participar en un proceso ya en desarrollo, introduciendo una simplificación en sus etapas, o puede apor-

tar medios de afinado o acabado. Esto significa que los laser no solamente originan nuevos procedimientos y nuevos productos, sino que también pueden introducirse en muchos procedimientos ya existentes. No obstante, conviene no olvidar, en cada aplicación específica del laser, la cuidadosa comparación del tratamiento por laser con las técnicas alternativas de sistemas convencionales, es decir, que es posible que usar un laser industrial en ciertos procesos, sea en lugar de una ayuda de la producción, un gasto muy elevado contra un proceso quizá más económico o eficiente.

De todas las aplicaciones hasta ahora expuestas, solo algunas se hallan actualmente trabajando en fase industrial. En Francia a finales de enero de 1986, se contaban 78 lasers industriales, de los cuales 44 se empleaban para operaciones de corte, 4 para taladro, 16 para soldadura, 5 para marcado y 2 para tratamientos térmicos. A nivel mundial (excluyendo los países del Este), en 1985 se vendieron (1) 332, 355 y 22 lasers para el corte, la soldadura y el tratamiento térmico de metales, más 275, 660 y 37 lasers para el marcado, el corte-taladro y la soldadura de no metales (plásticos, textiles, semiconductores).

(1) Tomado de "El laser útil industrial", Instituto de Información y documentación en Ciencia y Tecnología, La Recherche, Francia. (1985)

Esto representa una inversión de 83.6 millones de dólares para los laser tan sólo, o 232.9 millones de dólares para los sistemas completos (laser, robots, controladores, bancadas, tablas posicionadoras, manerales ópticos, etc.)

Teniendo en cuenta todos los parámetros que intervienen en los procesos descritos, es evidente que el rendimiento energético total del sistema (energía absorbida en el material y energía total eléctrica suministrada al sistema) es pequeño, alrededor de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$ . Para el usuario esto implica la necesidad, al menos idealmente de utilizar lo mejor posible la energía útil y recuperar toda o parte de la energía excedente, garantizando al mismo tiempo, la seguridad de la utilización.

Actualmente, por muchos conceptos, las aplicaciones del laser anteceden a la comprensión fundamental de los mecanismos de la interacción laser-materia. Esto se debe simplemente a que estos mecanismos implican el conocimiento de muchas disciplinas que hasta ahora, parecían mantenerse desconocidas o sin profundidad de estudio: absorción óptica, termodinámica de las transiciones de fase, difusión del calor, materia en desequilibrio, etc.. Sin embargo, todo tratamiento por laser se basa en estas disciplinas a la vez, y su combinación podría dar lugar a nuevos efectos.

#### 4.3. Selección del tipo de laser a emplear

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, existen muchos tipos de laser como son: rubí, neodimio en vidrio, neodimio en YAG, Helio-Neón, He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, argón, kryptón, nitrógeno puro, neón, CO<sub>2</sub> y GaAs, pero de todos éstos, solamente dos tienen verdadera importancia y aplicación en soldadura y corte: los de CO<sub>2</sub> y los de Nd-YAG. La longitud de onda del rayo laser tiene una gran influencia en la absorción de esta energía en el tamaño mínimo del punto enfocado. Así el laser Nd-YAG que opera cerca del infrarrojo, se usa principalmente para trabajos de metal-mecánica y el laser de CO<sub>2</sub> que opera en los límites del infrarrojo, se utiliza para soldar y cortar no-metales y metales ferrosos.

Para poder lograr una mejor selección, se muestra la Tabla No. 1 en donde se pueden apreciar las aplicaciones de algunos lasers industriales, aunque vale la pena mencionar, que la selección del tipo de laser a emplear, siempre depende de la aplicación específica a la que se desee implantar el sistema, y para lo cual es necesario siempre contar con la opinión de un experto que tenga la suficiente práctica de campo para la determinación del laser.

También cabe hacer mención, que en la práctica y por razones de economía, es muy aconsejable tratar de acoplarse a

sistemas de producción estándar que los proveedores de laser tienen a disposición, con todo un equipo de ingeniería del producto que está capacitado para poder hacer las modificaciones necesarias al equipo base, para la particularidad del proceso deseado.

#### 4.4. Selección del Sistema

Un sistema de tratamiento por laser puede dividirse en cuatro subsistemas, algunas veces interconectados:

1. Sistema haz-laser-muestra (circuito óptico)
2. Circuito eléctrico.
3. Circuito de refrigeración y
4. Elementos secundarios (gas inerte o gas reactivo, etc.)

Estos circuitos se pueden apreciar en la Figura No.34. Para optimizar el circuito óptico, es necesario, evidentemente, dirigir el haz laser con precisión al lugar útil. Esto requiere una óptica apropiada (lentes, espejos), flexible y controlable a voluntad. Con este fin se han puesto a punto "robots-laser" que generan el haz laser, su posicionado y una electrónica de control. Un robot laser de la empresa francesa "Laser Technique" y con estas características, se utiliza en la casa Reydel (proveedor de la empresa francesa Renault), para el corte de tableros de a bordo del automóvil Renault 11. Merced a dos ejes de desplaza-

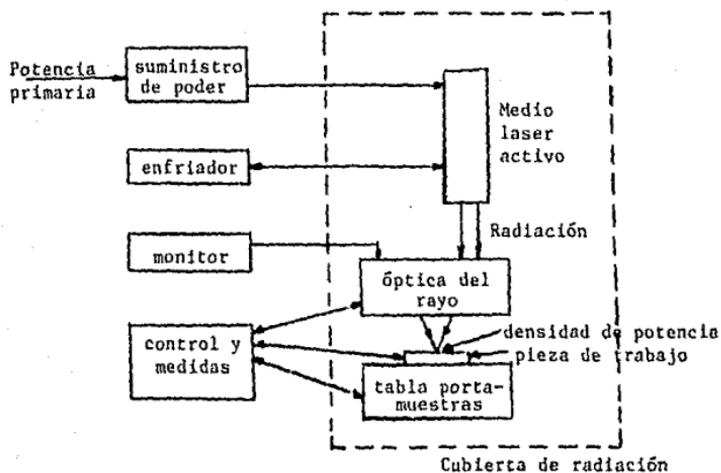


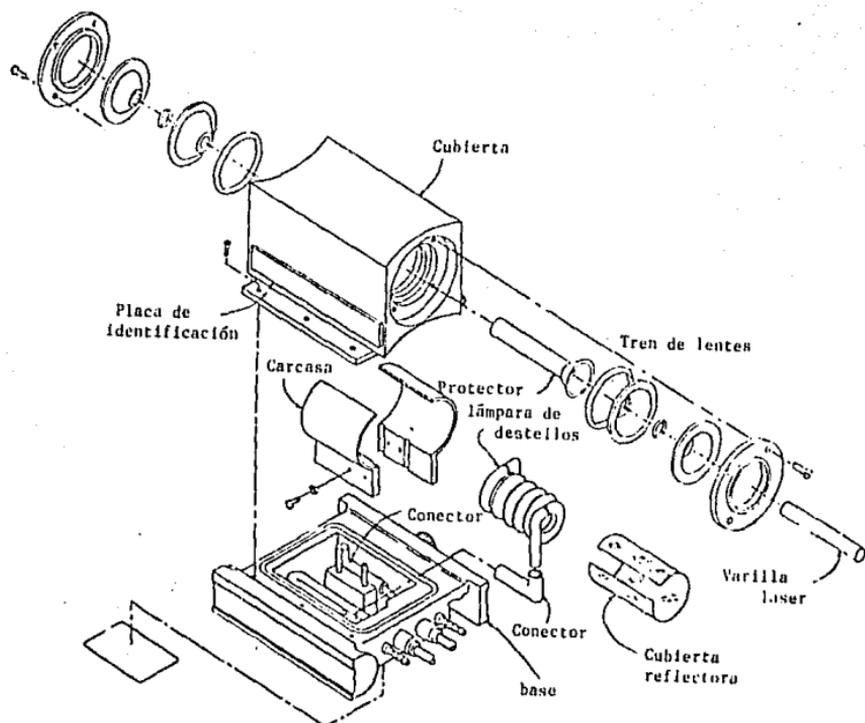
Figura 34. Sistema de tratamiento por rayo laser donde se muestran los cuatro subsistemas interconectados que son: 1. sistema haz-laser-muestra, 2. circuito eléctrico, 3. circuito de refrigeración, y 4. elementos secundarios.

miento lineal y tres circulares, este robot a una rapidez y precisión al corte en tres dimensiones. Dirigido por control numérico por computadora (CNC), es relativamente fácil cambiar su programación para adaptarla a un modelo distinto.

El tipo de robot laser más generalizado posee un brazo articulado que contiene un sistema de espejos para el transporte del haz. Sin embargo, una técnica muy prometedora es la que consiste en guiar por fibra óptica la luz de un laser YAG hasta una distancia de 25 metros. El interés de esta nueva técnica es doble. Por una parte permite instalar el laser propiamente dicho, lejos de la mesa de trabajo; y por otra, el robot laser de fibra óptica, libre de los sistemas de espejos, puede efectuar en el espacio movimientos más complejos.

#### 4.4.1. Sistema haz-laser-muestra

Las Figuras Nos. 35 y 36, muestran respectivamente un cabezal de rayo laser y un tren de lentes y espejos que junto con las tablas porta-muestra, configuran este sistema. Estos no son sino algunos de los ejemplos de los múltiples circuitos que se pueden formar, dependiendo de la aplicación que se desee tomar. En las especificaciones de equipo, deben incluirse la estabilidad del pulso, la divergencia del rayo y la distancia nominal a la que debe es



Figuras 35 y 36. Componentes del sistema haz-laser-muestra, en donde se muestran el cabezal del rayo laser y el tren de lentes de espejos.

tar el resonador laser para su utilización, por lo menos para poder seleccionar el sistema haz, laser, muestra.

#### 4.4.2. Circuito eléctrico

El circuito eléctrico alimenta al laser, pero también al robot y al sistema de refrigeración. El mayor consumidor suele ser el laser propiamente dicho. Un laser típico de CO<sub>2</sub> de 1 kW, consume alrededor de 20 kW de electricidad. El suministro de potencia se encuentra especificado por NEMA (National Electric Manufacturers Association) Asociación Nacional de Fabricantes de Equipo Eléctrico, en el estándar No. 12.

Estos circuitos no requieren de enfriamiento y tienen acceso por medio de dos puertas abatibles frontales de la cabina donde se encuentran instalados, haciendo fácil el acceso a mantenimiento y operación. En estos circuitos se deben de especificar la potencia de entrada, el voltaje de entrada, el número de fases, la conexión (delta o estrella) la frecuencia y la corriente de entrada.

#### 4.4.3. Circuito de refrigeración

El sistema de refrigeración debe ser eficaz. Generalmente, la refrigeración se hace por agua (debido a que utili

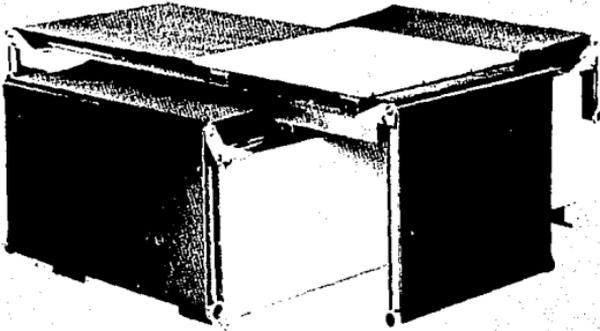
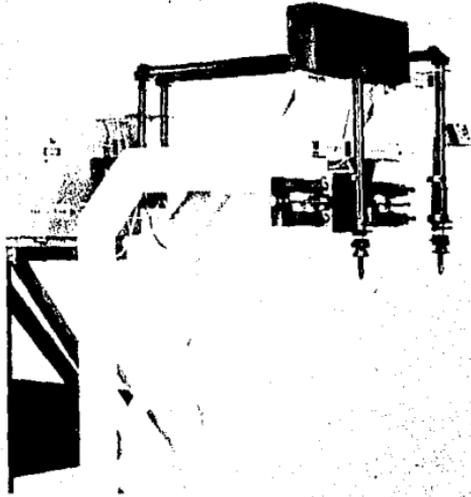
zan refrigerantes o aceites y es mucho más costoso), cuyo consumo es pues, importante. En una instalación optimizada, la energía térmica recuperada en un circuito de refrigeración puede servir para precalentar el blanco (si procede) y, de manera más práctica, contribuir a la calefacción del local, por ejemplo. Por su rendimiento energético, el laser es, sin duda alguna, una buena fuente de calefacción central.

#### 4.4.4. Elementos secundarios

Es evidente que el laser no puede trabajar sólo y que hay que prever una gama completa de componentes periféricos que dependen de la aplicación deseada.

##### 4.4.4.1. Tablas posicionadoras X-Y

El diseño de estas tablas permite altas velocidades de posicionamiento con cargas pesadas. Están fabricadas con una base hecha completamente de acero, con barrenos para porta-muestras que sujeten la pieza en cuestión, y cuyo diseño está calculado para soportar el alto calor generado por el laser. Se montan las bases en rieles que aseguran una larga vida y una oscilación mínima. Cada eje es del tipo volado, con estructura metálica que le da una alta rigidez, baja inercia y baja amortiguación. Están -



LAMINA 8

LA FIGURA SUPERIOR MUESTRA UN BASTIDOR DE SOPORTE PARA UN SISTEMA COMPOUND Y LA INFERIOR UNA TABLA POSICIONADORA X-Y, PARA SUJETAR LA PIEZA A LA MESA DE TRABAJO.

fabricadas con aparatos de medición de alta precisión de alineación. Utilizan tornillos gafa de contrapeso con precisiones de  $\pm 0.0005$  plg./pie ( $\pm 0.0416$  mm/m). Las especificaciones de la tabla posicionadora X-Y de Laser Machining, Inc., Mod. LMI T-150, son las siguientes:

+ Precisión	$\pm 0.0020$ plg/pie ( $\pm 0.1666$ mm/m)
+ Velocidad	600 plg/min-max. (40-200 plg/min-promedio) (15.240 mm/min max. ( 1016-5,080 mm/min promedio).
+ Capacidad de carga	250 a 500 lb (113 a 226 Kg)
+ Base portamuestras	36 plg x 36 plg con 20 agujeros de 1/4 plg. (914 mm x 914 mm) (6.3mm) roscados y 1 plg (25.4mm) de distancia entre centros.
+ Altura de la base	34 plg por encima del suelo - std. (864 mm)
+ Opciones	Altura de la base Cubiertas de gafas contra polvo o abrasivos. Controles y motores: CD o CA servo o motor escalonado disponible en CNC.

#### 4.4.4.2. Componentes de entrega del rayo laser

Estos componentes tienen el objeto de guiar el rayo laser del cabezal a la pieza de trabajo y son los siguientes:

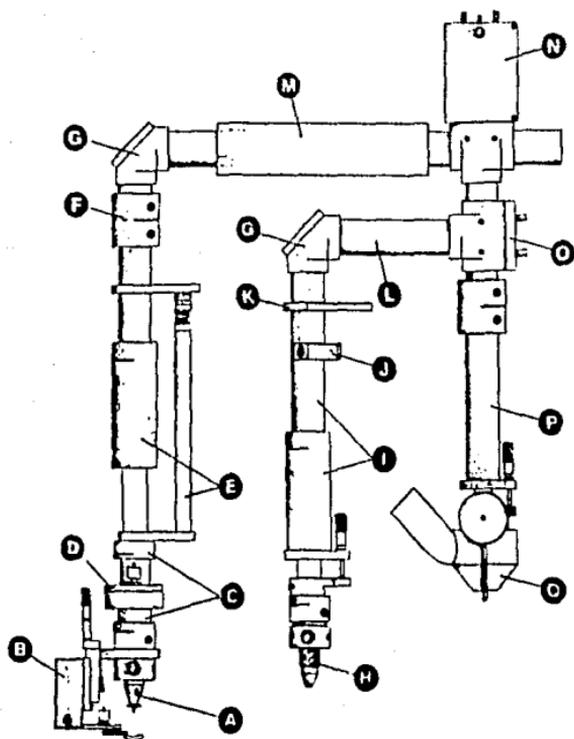


Figura 37. Componentes de entrega del rayo laser.

- a) ensamble de la boquilla de gas jet.
- b) auto-enfoque por medio de motor.
- c) adaptador para asegurador laser.
- d) asegurador de arranque.
- e) eje Z - calibrador de 12 plg.de viaje (305 mm)
- f) tubo acoplador
- g) doblador de rayo.
- h) protector del lente.
- i) enfoque fino/ancho (en 12 plg.en viaje) (305 mm)
- j) tubo de enfoque con agarradera.
- k) 1.980 plg.de diam. exterior de tubo de abrazadera (50.2 mm)
- l) tubo de entrega del rayo
- m) colimador 2:1/filtro especial
- n) interruptor del rayo.
- o) divisor compuesto
- p) enfoque fino/ancho (6 plg.en viaje) (152 mm).
- q) ensamble del cono coaxial de salida.

#### 4.4.4.3. Bastidores de soporte para la entrega del rayo laser.

Estos bastidores se diseñan de acuerdo a una configuración universal para montaje de sistemas simples o duales de entrega del rayo, con una estructura rígida que minimiza la vibración y que se apegan a las necesidades del cliente. Están fabricados de estructuras tubulares de acero de -

3 x 3 plg. y 3 x 8 plg., y diseñadas para cualquier tipo y tamaño de laser (76 x 76 mm) (76 x 203 mm).

#### 4.4.4.4. Fibras Ópticas

Se han desarrollado manerales completos a base de fibras ópticas como técnicas complementarias para la entrega del rayo laser. Utilizando esta tecnología se pueden obtener los siguientes beneficios:

- ° Separación del laser del proceso: el laser puede ser localizado remotamente de la estación de trabajo en situaciones donde el espacio es restringido.
- ° Manipulación robótica de la fibra: elimina la necesidad de utilizar máquinas complejas de multi-ejes.
- ° Reducción de los tiempos de operación: las soldaduras pueden ser desarrolladas en diferentes orientaciones y posiciones sin necesidad de reposicionar la pieza de trabajo.
- ° Eliminación de distorsión de soldadura: las producciones de soldaduras pueden ser simétricamente compuestas sin necesidad de alineamientos de energía por técnicas especiales.

- ° La fibra homogeniza el rayo para producir una alta uniformidad y soldaduras reproducibles.

#### 4.4.5. Controles

Para estos procesos de avanzada tecnología se utilizan sistemas de control también de avanzada tecnología como lo son los ordenadores, micro y macroprocesadores de CNC (Control Numérico por Computadora) y hasta sistemas CAD/CAM (Diseño asistido por computadora y Manufactura asistida por computadora), que simplifican la integración con equipos de proceso automático.

#### 4.5. Especificaciones estándar de equipos de soldadura y corte.

A continuación se especificarán algunos de los equipos comerciales existentes y en funcionamiento en el mercado de la manufactura de soldadura y corte:

##### 1. Sistema Laser YAG SS550 RAYTHEON

De este sistema laser se encuentran cerca de 150 unidades operando actualmente en el campo.

##### a) Especificaciones:

Tipo de laser:                      Neodimio-YAG

Modo de operación:	pulsado
Porcentaje de potencia:	Variable: de 0 a 400 watts.
Potencia pico:	12 KW
Pulsos por segundo:	variable de 0 a 200
Duración del pulso:	0.13 a 10 milisegundos
Energía del pulso:	50 joules máximo

b) Servicios Requeridos:

Electricidad:	480 Volts de corriente alterna, 3 fases, 60 ciclos por segundo, 60 amps. por fase de corriente nominal.
Agua:	7 galones/min. a 30 lb/plg. <sup>2</sup> di- ferenciales y 80°F. (1,589lt/min a 2.11 Kg/cm <sup>2</sup> ) y (26.6°C).

c) Aplicaciones:

Soldadura de metales ferrosos.

Soldadura de metales no-ferrosos.

Corte de metales ferrosos y no-ferrosos.

Barrenado de cerámicos, metales ferrosos y no - ferrosos

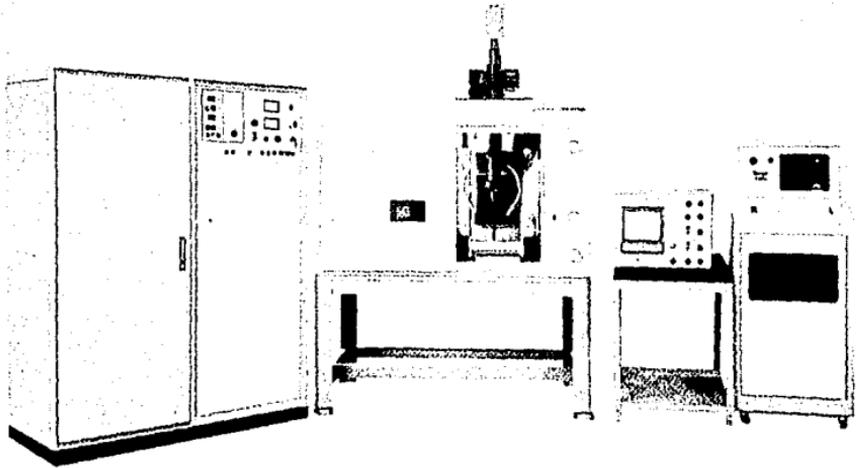
Maquinado laser a través de materiales ópticos.

d) Beneficios:

Fácil entrenamiento del operario.

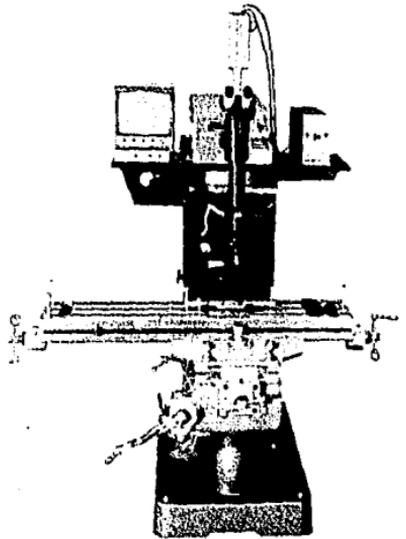
Cuarta generación de diseño (cientos de unidades idénticas en operación actualmente).

Bajos costos de operación.



LAMINA 9 SISTEMA LASER YAG SS550 RAYTHEON

LAMINA 10  
SISTEMA LASER DE CO<sub>2</sub> GS1200  
RAYTHEON



Máximo control de la soldadura

Solda, corta y perfora varios materiales.

Se adapta fácilmente a equipos de operación.

Se pueden cambiar rápidamente las lámparas de destellos.

e) Controles:

Panel de control CNC e interruptor electrónico de pulso.

2. SISTEMA LASER CO<sub>2</sub> GS1200 RAYTHEON

a) Especificaciones:

Tipo de laser:	CO <sub>2</sub> flujo axial rápido.
Longitud de onda:	10.6 micrones
Potencia de salida:	
Rango de salida:	0 a 1200 watts en multimodo
Estabilidad de salida:	$\pm 2\%$
Definición del rayo:	
Diámetro:	17 mm max. (0.67 plg.)max.
Divergencia:	1.5 miliradianes
Estabilidad del punto:	0.2 miliradianes
Potencia pico:	3 kilowatts.
Duración del Pulso:	100 microsegundos en onda continua
Frecuencia de repetición:	5000 Hertz en onda continua.

b) Servicios requeridos:

Electricidad:	440-480 volts de corriente alterna. 3 fases (Delta o Estrella), 60 ciclos, 30 amp. por fase.
Potencia de entrada:	26 KVA max.
Agua de enfriamiento:	4 gal/min. (908 lt/min) a 60°F (15.5°C) y de 60 a 80 lbs/plg <sup>2</sup> (4.22 a 5.63 kg/cm <sup>2</sup> )
Aire comprimido:	Como necesidad del ciclo a 60 lb/plg <sup>2</sup> (4.22 Kg/cm <sup>2</sup> ).
Consumo de Gas:	6.8 SCFH (194 lt/hr) a 85% de salida máx. (a 4).
Helio:	4.5 SCFH 60 lb/plg <sup>2</sup> (128 lt/hr) a 4.22 Kg/cm <sup>2</sup> )
N <sub>2</sub> :	2 SCFH 60 lbs/plg. <sup>2</sup> (57 lt/hr) a 4.22 Kg/cm <sup>2</sup> ) Grado Industrial (99.7% de pureza)
O <sub>2</sub> :	0.3 SCFH 60 lb/plg. <sup>2</sup> Grado industrial (99% de pureza) (8.57 lt/hr) a 4.22 Kg/cm <sup>2</sup> )

c) Aplicaciones:

- Soldadura de alta penetración en metales.
- Soldadura de metales ferrosos y algunos no-ferrosos.
- Corte de metales ferrosos, no-ferrosos y no-metales.
- Maquinado y grabado de cerámicos.
- Endurecimiento superficial.

d) Beneficios:

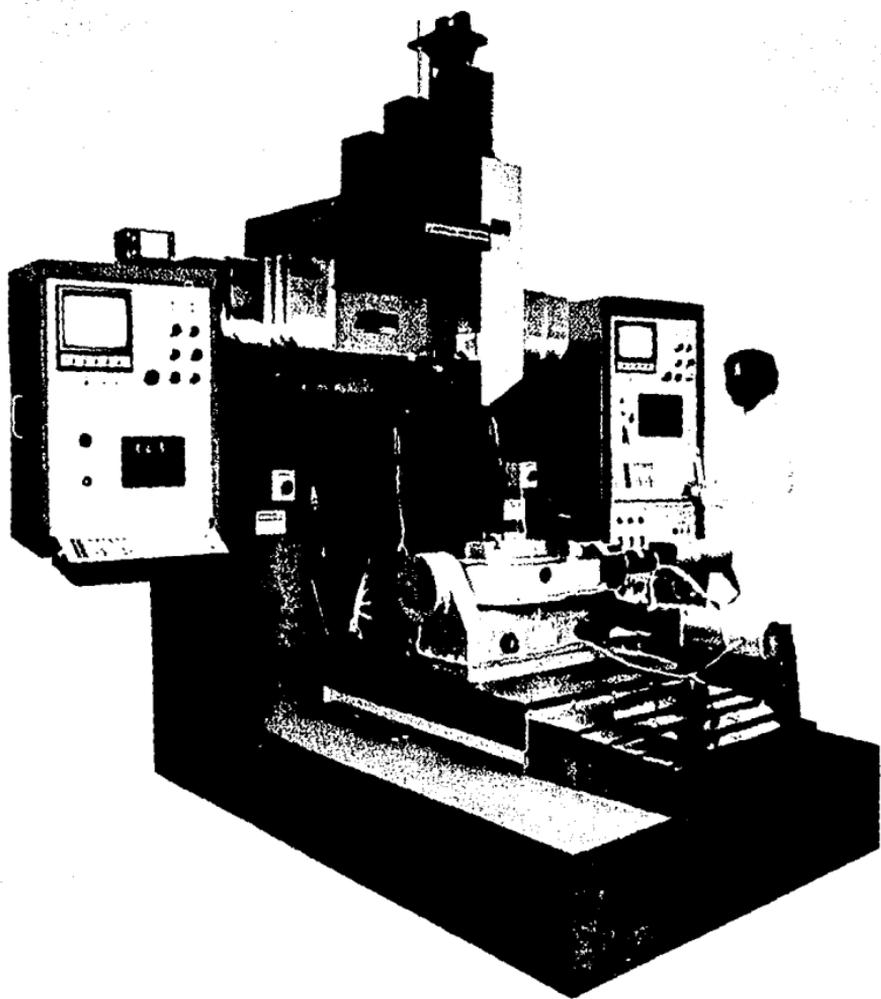
Bajos costos de operación.  
 Espacio mínimo de piso.  
 Salida estable de potencia.  
 Adaptación sencilla a equipos de producción.  
 Calentamiento mínimo de la pieza de trabajo.  
 Operación consistente.  
 Convertible fácilmente a operaciones de corte.  
 Fácil entrenamiento del operario.

e) Controles:

Controlable por ordenador CNC de panel remoto a  
 150 watts máx.

3. LASER INDUSTRIAL DE FLUJO AXIAL RAPIDO PHOTON VFA 2500a) Especificaciones:

Tipo de laser:	CO <sub>2</sub> flujo axial rápido.
Longitud de onda:	10.6 micrones.
Potencia de salida:	2500 watts en onda continua.
Estabilidad de salida:	± 2%
Estabilidad del punto:	± 0.15 miliradianes
Rango de pulsación:	1 kHz
Duración del pulso:	500 microsegundos en onda continua.
Diámetro del rayo:	20 mm máximo
Divergencia:	menor de 3 miliradianes.
Distancia nominal del resonador.	3.0 ms. (120 plg).



LAMINA 11

LA FIGURA MUESTRA EL LASER INDUSTRIAL DE FLUJO AXIAL RAPIDO, PHOTON VFA 2500, QUE TIENE UNA POTENCIA SUPERIOR A LOS 2,500 WATTS. ESTE EQUIPO ES CAPAZ DE SOLDAR PIEZAS MUY PEQUEÑAS DE DIFICIL ACCESO Y - HASTA CORTAR PIEZAS DE DIMENSIONES MUY GRANDES.

b) Servicios requeridos:

Electricidad:	380 volts de corriente alterna a 50 ciclos, 3 fases, 5 hilos en estrella o 460 volts a 60 ciclos, 3 fases, 5 hilos en estrella.
Potencia de entrada:	40 KVA máx.
Corriente de entrada:	48 Amp. nominales por fase a 380 Volts y 50 ciclos y 40 Amp. nominales por fase a 460 volts y 60 ciclos.
Consumo de Helio:	100 lts/hr. (3.5 SCFH) máx.
Consumo de nitrógeno:	45 lts/hr. (1.6 SCFH) máx.
Consumo de CO <sub>2</sub> :	6 lts/hr. (0.2 SCFH) máx.
Temperatura del agua de entrada:	15°C (60°F) máx.
Rango de presión de entrada de agua:	3.3 Bar (50lbs/plg. <sup>2</sup> ) min. y 5 Bar (75 lb/plg. <sup>2</sup> ) máx.
Rango de flujo de agua:	2,840 lts/hr. a 3 Bar (1,080 gal/hora a 50 lbs/plg. <sup>2</sup> ).
Rango de temperatura desarrollada:	10 a 40°C (50 a 104°F).

4.7. Requerimientos de instalación

Las dimensiones y peso promedio de un equipo para soldadura y corte estándar son: 3 pies x 11 pies x 7 pies (0.91 m. x 3.35 m. x 2.13 m) y de 5,000 a 7,000 lb (2,267 Kg a 3,174 Kg). Para este equipo, no se requiere de una cimentación

especial, basta con minimizar la vibración y evitar cargas de prensas por cilindros neumáticos.

Se sugiere dejar un mínimo de 5 pies (1.51 m) en el frente y 3 pies (0.91 m) en la parte posterior para el acceso del equipo.

La carga térmica del lugar debe ser menor al 20% del nivel medio de salida de la potencia suministrada, ésto es, normalmente menor a 6,000 btu/hr.

Se deben instalar equipos para el suministro de potencia, agua de enfriamiento, derenaje, aire comprimido y extracción de aire ambiental, de acuerdo a los estándares de seguridad, cuidando de aterrizar perfectamente el equipo.

#### 4.8. Entrenamiento al Operador

Aunque en realidad no se requiera de personal altamente calificado para la operación de este equipo, es conveniente tener una persona que domine el CNC (Control Numérico por Computadora), y maneje el tren de óptica de entrega del rayo, debido a que el ajuste en el enfoque de éste es lo que logra la mayor o menor absorción del rayo en la pieza de trabajo.

#### 4.9. Mantenimiento

Los problemas de mantenimiento en equipos de soldadura laser, son mínimos. El principal problema lo constituye la reposición de la lámpara de destellos que por lo normal, es una refacción que se vende y encuentra fácilmente. La lámpara de destellos, la cual excita la acción del laser, es relativamente fácil de reemplazar, debido a que está instalada en unos tubos de línea recta de tipo anular y helicoidal, que rodean la varilla del sólido que genera el laser. Tanto la lámpara como la varilla, se instalan paralelas una de la otra, en una cubierta elíptica, recubierta con oro, en uno de los puntos focales de la elipse.

Este arreglo logra una concentración completa del destello, y alinearla es un problema muy simple por medio del uso de dos tornillos micrométricos que alinean los espejos a la cavidad laser.

Otro tipo de mantenimiento involucra el cuidado de la - limpieza de los lentes ópticos y la remoción de cualquier acumulación de material vaporizado proveniente de la soldadura. - Para ello, se han instituido programas de mantenimiento preventivo. -

Quizá el mantenimiento más grande que deba proporcionar-

se a la operación laser, se refiere a suministros periféricos como lo son el gas, el agua de enfriamiento, la energía eléctrica, el apropiado acondicionamiento del ambiente, y la limpieza del área, pero todos éstos gastos de mantenimiento son siempre menores en sistemas laser que en cualquier otro sistema de soldadura y corte convencionales.

#### 4.10. Problemas más comunmente encontrados

Quizás debido a la novedad del laser como herramienta de manufactura, y a que casi todos los metales pueden ser soldados por métodos tradicionales, y son metalúrgicamente compatibles, ya que el laser es solo un recurso de calor usado para fundir el metal, mucha gente cree que la aplicación de éste no es útil.

El problema más común en la soldadura de campo, es la desalineación óptica de los componentes externos y del hermental del sistema laser. Varios cientos de watts en el desalineamiento de la potencia laser, son suficientes para calentar los lentes y los espejos, causando así, distoriones físicas que pueden romper estos elementos ópticos. Tales eventos catastróficos pueden solo causar daños térmicos y destrucción de los elementos ópticos. Una alineación deficiente en las boquillas de suministro de gas, provocan calentamientos no deseables en la pieza de trabajo y si la densidad de potencia para fundir la superficie

del metal no se presenta por cualquier razón, el metal puede reflejar porcentajes substanciales del rayo laser, causando daños térmicos a las lentes o dispositivos de entrega del rayo. Estos daños ocurren en una fracción de segundo, mucho más rápidamente de lo que el operador puede reaccionar para prevenirlos.

Se han encontrado algunos problemas en soldaduras, en el suministro de los gases. En la práctica, el flujo de gas se suministra coaxialmente al rayo laser enfocado, a través de una boquilla cónica relativamente larga de 0.250 plg. de diam. (6.3 mm). El rango de flujo es generalmente de 10 a 15 SCFH (0.35 a 0.52 Hs/hr.)

Este gas tiene dos propósitos: proteger a la lente y separar el gas de la atmósfera para prevenir oxidaciones, y se incrementa el rango de flujo, se pueden provocar salpicaduras de metal fundido, y si se decreta el rango de flujo, puede permitirse la formación de vapores y humos del metal, que se depositan en las lentes de enfoque, lo cual incrementa la absorción de energía en la lente, y por lo tanto, su destrucción. Este problema se puede prevenir colocando interruptores en las llaves de flujo del gas.

Otros problemas de soldadura se han encontrado en lo que significa manejo de material. Las tablas posicionadoras y accesorios de sujeción para soldadura TIG y de arco, no son aplicables a soldadoras laser, debido a las tolerancias de ensamble y la precisión del posicionado, ya que por supuesto no se necesitan construir las tablas y elementos de sujeción de acero inoxidable, lo que disminuye en parte, el costo y aumenta la versatilidad del equipo, además que elimina los posibles enfriamientos por agua a este equipo.

## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

A sus 27 años, el laser ocupa un lugar relativamente modesto en la industria Mexicana, pero se revela ya como una herramienta irremplazable para efectuar ciertas tareas que, sin embargo, se pueden efectuar por otras técnicas.

En solo algunos años, la soldadura y el corte por laser, han saltado del laboratorio a las aplicaciones comerciales, y han logrado establecerse como herramientas competitivas en producción y costos con métodos convencionales y tradicionales. Las siguientes son algunas de las conclusiones que se han tenido en el desarrollo del estudio de estas aplicaciones:

- ° El laser resuelve el problema de producir enormes cantidades de energía en forma de radiación, debido a dos características: coherencia y homogeneidad.
  
- ° De la gran variedad de tipos de lasers que se han descubierto hasta ahora, sólo los de  $CO_2$  y los Nd:YAG, han encontrado gran aplicación industrial.

- ° Resulta evidente la limitación más grande en la aplicación del laser para soldar y cortar: los materiales altamente reflejantes como el aluminio, no resultan fácilmente soldables con el laser, debido a que la superficie del metal refleja la mayor parte de la energía radiante emitida por el laser.
  
- ° La limpieza a que son sometidos los metales antes de proceder a su soldadura, hace su superficie más reflectante todavía.
  
- ° Si la duración del impulso no se mantiene cuidadosamente en unas milésimas de segundo, el rayo laser puede perforar el metal en vez de producir la deseada soldadura.
  
- ° El impulso ideal de laser para soldar, parece ser aquél que posee una subida rápida hasta la máxima potencia, - acabando con una bajada también de pendiente elevada.
  
- ° La calidad de la soldadura depende también de ciertas características del metal a soldar, tales como la conductividad y difusividad térmica, su reflectividad y absorción, etc..
  
- ° Aunque se pueden lograr sistemas automatizados de soldadura laser, la habilidad del operador para ajustar los

parámetros de soldadura como lo son el enfoque y la longitud del pulso, es determinante como en cualquier otro proceso convencional.

° Todos los procesos de soldadura tienen sus problemas y limitaciones, pero los equipos de soldar con rayo laser deben hacer frente a una dificultad de la que no participan los otros dispositivos: se genera más calor en la máquina de soldar que en la zona de trabajo.

° La conclusión anterior nos lleva a afirmar que los equipos lasers son máquinas con eficiencias tan bajas que sólo el 6% de la potencia suministrada se transfiere a la zona de trabajo.

° Esto mismo implica el hecho de tener que contar con equipos de suministro de agua de enfriamiento, implicando un aumento en los costos de operación y mantenimiento.

° Los equipos de soldadura y corte son más costosos que los equipos de procesos convencionales, es por esto que para seleccionar un laser para estas aplicaciones, se deben considerar las propiedades únicas del laser.

- ° No existen daños térmicos en la zona a tratar ni en sus adyacentes, por lo cual se obtienen muchas ventajas, tanto físicas como metalúrgicas. El enfriamiento se produce rápidamente, lo que significa que la energía suministrada se concentra en un punto muy pequeño.
  
- ° Se pueden soldar en materiales muy reactivos sin necesidad de utilizar atmósfera inerte. Además de poder soldar materiales de propiedades y tamaños muy diferentes.
  
- ° Se puede soldar y cortar con laser en lugares muy pequeños y de difícil acceso, así como a muy altas velocidades y a penetraciones profundas y completas.
  
- ° El corte por laser se hace casi imprescindible en materiales difíciles de maquinar, por medios convencionales, donde la precisión del corte se logra fácilmente por medio de una alineación sencilla de los lentes de entrega del rayo.
  
- ° Los costos de operación y mantenimiento son mínimos y tanto la instalación como el entrenamiento son sencillos.
  
- ° Los procesos de soldadura y corte por laser son ideales para operaciones totalmente automáticas, obteniéndose así, soldaduras de alta calidad y muy bajo costo.

° La eliminación de formación de plasma es un problema que se está minimizando con la asistencia de gases inertes para prevenir la precipitación de carburos y formación de óxidos.

Aunque las aplicaciones de laser en procesos de manufactura aún son muy limitadas, se le predice un futuro - - comparable al del transistor en el momento de su invención.

## BIBLIOGRAFIA

B I B L I O G R A F I A

1. Ready, John F., Editor. LASERS IN MODERN INDUSTRY.  
Published by: Society of Manufacturing Engineers.  
SME Marketing Services Department., P.O.Box 930.  
Dearborn, Michigan. U.S.A. (1985).
  
2. Schwartz, Melvin M., Editor. SOURCE BOOK ON  
ELECTRON BEAM AND LASER WELDING.,  
Published by: American Society for Metal ASM  
Engineering Bookshelf., Metals Park, Ohio. U.S.A.  
p.p. 247 - 392. (1982)
  
3. Weisman, Charlotte., Editor. WELDING HANDBOOK  
Seventh Edition, Volume I, FUNDAMENTALS OF WELDING.  
Published by: American Welding Society AWS,  
Chapter 6, LASER BEAM WELDING AND CUTTING.,  
Miami, Florida, U.S.A., p.p. 217-237. (1983).
  
4. Kaminow, Ivan P. and Siegman, Anthony E.,  
LASER DEVICES AND APPLICATIONS.  
Published by: The Institute of Electrical and  
Electronics Engineers IEEE., New York, N.Y. U.S.A.  
p.p. 383 - 426. (1973)

5. Jordan, Edward C. and Balmain, Keith G., ONDAS ELECTROMAGNETICAS Y SISTEMAS RADIANTES. Tercera Edición., Editorial Paraninfo, Madrid. p.p. 211 - 223. (1983)
6. Young, Hugh D. FUNDAMENTOS DE OPTICA Y FISICA MODERNA. Editorial Mc.Graw-Hill. Primera Edición. Boulder, Colorado. p.p. 125 - 128. (1973).
7. Beiser, Arthur. CONCEPTOS DE FISICA MODERNA, Editorial McGraw-Hill. Segunda Edición. Boulder, Colorado. p.p. 313 - 316. (1978).
8. McKelvey, John P. y Grotch, Howard. FISICA PARA CIENCIAS E INGENIERIA. Editorial Harla. Primera Edición. Nueva York, N.Y. p.p. 973, 1087 - 1088, 1232 (1981).
9. The Lincoln Electric Company. PROCEDURE HANDBOOK OF ARC WELDING DESIGN AND PRACTICE. Eleventh Edition. Cleveland, Ohio. p.p. 4.79 - 4.100 (1957).

10. Gaxiola A., José Ma. y Maya G. Vicente.  
CURSO DE CAPACITACION EN SOLDADURA., Editorial  
Limusa. Primera Edición. México. (1983)
11. Pender, James A. SOLDADURA. Centro Regional de  
Ayuda Técnica. Editorial McGraw-Hill. Colombia,  
Tenn. p.p. 435-690 (1971).
12. La Rocca, Aldo V. LASER APPLICATIONS IN MANUFAC-  
TURING. Scientific American. Volume 246, No.3.  
March 1982.) p.p. 80 - 87.
13. Shiner William. LASERS IMPROVE AUTOMANUFACTURING  
PRODUCTIVITY. Automotive Engineering. Edited  
by SAE (Society for Automotive Engineers) Volume 94,  
No.5. p.p. 62 - 68. (May 1986.)
14. Boraiko, Allen A. and O'Rear, Charles. "A SPLENDID  
LIGHT". LASERS. National Geographic Society.  
Volume 165, No.3. p.p. 348-352 (March 1984).
15. Wautelet, Michel & Laude, Lucien. EL LASER, UTIL  
INDUSTRIAL. Mundo Científico. La Recherche,  
Versión en Castellano. Vol. 4, No.52. p.p. 1140-  
1155. (Abril, 1986).

16. Gregory Stephen A. LASER PARA ALINEACION.  
Sheffco Instruments. Vol. 4. No.2. p.p. 32 - 33.  
(Febrero, 1987).
17. Bolin, Steve. CUTTING WITH MEDIUM POWER LASERS.  
Laser and Applications. p.p. 15 - 25. (Aug.,1983).
18. Bolin, Stephen R. SPOT WELDING WITH LASERS.  
Production Magazine. p.p. 97 - 104.  
(November, 1983).
19. Bolin, Steve. LASERS LIGHT THE WAY TO LOW-COST  
DRILLING AND CUTTING. Manufacturing Engineering.  
p.o. 40-46 (December, 1981).

Publicaciones comerciales no registradas:

20. PHOTON VFA 600. PHOTON VFA 1200. PHOTON VFA 2500  
JK700 SERIES LASER. MULTIFLEX. Lumonics Technical  
paper. (1987).
21. LASER DRILLING: THEORY AND APPLICATION. Laser  
Industries. Tech. Note No.101. Mod. 10 LDS. Laser  
Industries. Product Bulletin.

22. T-100 LASER SYSTEM. T-300 LASER CUTTER. T-100 XY POSITIONING TABLE. BDS-1 BEAM DELIVERY SUPPORT STAND. BEAM DELIVERY COMPONENTS. T-150 XY POSITIONING TABLE SS-HI DUAL PURPOSE LASER SUPPORT. LASER PROCESSED MATERIALS. Laser Machining, Inc. Technical papers. (1987).
23. GS600 CO<sub>2</sub> LASER. GS1200 CO<sub>2</sub> LASER. SS550 YAG LASER. SS525 YAG LASER. PD-460 LASER DRILLING SYSTEM. RAYTHEON FLEXI-LASE. ENDURAMARK. RAYTHEON'S LMC-24 LASER MACHINING CENTER. Raytheon Company Laser Center. Technical Papers. (1987).
24. ENGINEERING PRACTICAL SOLUTIONS TO MANUFACTURING PROBLEMS THROUGH LASER TECHNOLOGY. U.S. Laser Corporation. Technical Note. (1987).
25. MODEL PLW-2 LASER WELDER. Metals Joining Corp. Technical Papers. (1967).
26. MOOREHEAD, A. J. LASER WELDING AND DRILLING APPLICATION. Welding Journal. Volume 50, No. 2 pp. 97 - 106. (February, 1971).
27. Schwartz, M.M. LASER WELDING AND CUTTING. Welding Research Council. Bulletin No.167. New York. (November, 1979).