



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“PROCESOS DE MAQUINADO NO CONVENCIONALES”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

JAIME MARTÍNEZ GÓMEZ

ASESOR: M.en I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO.

2013



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 esta 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.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más, A mi madre por ser la persona que me ha acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida, a mi familia quienes han velado por mí durante este arduo camino para convertirme en una profesional. A mi padre quien con sus consejos han sabido guiarme para culminar mi carrera profesional. A mis amigos y amigas, que gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino. A mis profesores, gracias por su tiempo, por su apoyo así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

ÍNDICE

	PAG.
OBJETIVOS _____	1
INTRODUCCION _____	2

CAPITULO 1

LOS PROCESO DE CORTE DE MATERIALES Y SU EVOLUCIÓN

1.1.-Introduccion _____	4
1.2.-La Herramienta de corte _____	5
1.3.- Formación de viruta _____	7
1.4.-Temperatura de corte _____	7
1.5.- Máquina herramienta _____	8
1.5.1.-Torno _____	10
1.5.2.-Fresadora _____	16
1.5.3.-Taladro _____	21

CAPITULO 2

MAQUINADO CON RAYO LASER

2.1.-Introduccion _____	27
2.2.-Historia _____	27
2.3.- Generación del Rayo Láser _____	29
2.4.- Principios y características del proceso _____	31
2.4.1.-Corte _____	32
2.4.2.-Perforacion _____	34
2.5.- Tipos de láseres _____	36
2.6.- Interacciones del láser y el material _____	37
2.7.- Equipos _____	39
2.7.1.-Laseres de CO ₂ _____	41
2.7.2.-Laseres de YAG _____	43
2.7.3.-Otros Tipos _____	45

CAPITULO 3

CORTE CON CHORRO DE AGUA

3.1.-Introduccion	47
3.2.-Historia	49
3.3.-Usos y ventajas	50
3.4.-Limitaciones	52
3.5.-Fundamentos	53
3.5.1.-Corte con chorro de agua	54
3.5.2.-Corte con chorro de agua abrasivo	55
3.6.-Variaciones del Proceso	57
3.7.-Equipo	59
3.7.1.-Consumibles	60
3.7.2.-Accesorios	60
3.7.3.-Costos	61
3.8.-Seguridad	61

CAPITULO 4

MAQUINADO MEDIANTE ELECTRODESCARGA

4.1.-Introducción	62
4.2.-Historia de la electro erosión	63
4.3.-Partes de un EDM	66
4.3.1.-Sistema de ejes de un EDM	67
4.3.2.-Armazón	67
4.3.3.-El cabezal	68
4.3.4.-La mesa de trabajo -	69
4.3.5.-Unidad de filtrado	69
4.3.6.-CNC	69
4.4.-El generador	70
4.4.1.-Generador de relajación	70
4.4.2.-Generador de impulso transitorio	72
4.4.3.-Tipos de generador	73
4.5.-Principios de mecanizado por electro erosión	74

4.5.1.-Explicación del fenómeno de erosión por chispa_____	74
4.5.2.-Análisis de desarrollo de la descarga eléctrica_____	75
4.6.-Tipos de mecanizado por electro erosión _____	78
4.6.1.-Electro erosión por penetración _____	79
4.6.2.-Corte por electro erosión por hilo _____	79
4.6.3.-Rectificado por electro erosión _____	81
4.7.-Materiales para electrodos_____	81
4.7.1.-Propiedades de los materiales de los electrodos_____	82
4.7.2.-Clasificación de los materiales_____	84
4.7.3.-Cobre electrolítico _____	84
4.7.4.-Cobre al plomo _____	87
4.7.5.-Cuprotungsteno_____	87
4.7.6.-Aleación de aluminio _____	88
4.7.7.-Latón _____	88
4.7.8.-Acero _____	88
4.7.9.-Grafito _____	88

CAPITULO 5

CORTE CON PLASMA

5.1.-Introducción _____	92
5.2.-El plasma como estado de la materia _____	93
5.2.1.-Plasmas cotidianos _____	95
5.3.-Equipo PAC _____	96
5.3.1.-Soplete_____	97
5.3.2.-Fuentes de potencia_____	98
5.3.3.-Controles de corte_____	99
5.3.4.-Equipos de desplazamiento_____	99
5.3.5.-Controles ambientales_____	99
5.4.-Aplicaciones del PAC _____	100
5.5.-Sistemas de plasma convencional de oxígeno y nitrógeno _____	102
5.5.1.-Capacidades de corte de plasma convencional _____	104
5.5.2.-Otros factores que afectan el proceso de plasma _____	104

5.6.-Plasma de alta definición	105
5.6.1.-Tecnología de protección	106
5.6.2.-Intervalo libre de rebaba	107
5.6.3.-Anillo de circulación de alto rendimiento	107
5.6.4.-El incremento de la densidad de energía	108
5.6.5.-Capacidades de corte de la alta definición	108
CONCLUSIONES	111
BIBLIOGRAFIA	113

OBJETIVOS

- Tener un panorama general de los antecedentes de los procesos de maquinado tanto convencionales como no convencionales
- Mostrar las generalidades de los procesos de maquinado de materiales no convencionales más usados hoy en día.
- Mostrar algunos equipos y aplicaciones prácticas de los procesos de maquinado no convencionales que se utilizan dentro de la industria actual

INTRODUCCIÓN

La manufactura es una actividad humana que se difunde en todas las fases de nuestra vida cuyos productos se encuentran por doquier. El maquinado es parte de la manufactura y tiene como objetivo generar la forma de la pieza de trabajo, partiendo de un cuerpo sólido, mejorar las tolerancias o el acabado superficial. Los más comunes o conocidos son los procesos de maquinado convencionales (eje: torneado, taladrado, fresado, cepillado, etc.) los cuales usan una herramienta de corte afilada para la remoción de material.

Sin embargo existen situaciones en la que los procesos de maquinado convencionales no son satisfactorios, económicos o incluso posibles, esto ha llevado a la búsqueda de nuevas tecnologías. Surgiendo así los procesos de maquinado no convencionales, los cuales utilizan altas temperatura para fundir materiales, maquinado con rayos laser, con arco de plasma o con chorro de agua, los cuales tienen como característica importante, que la dureza del material de la pieza de trabajo no importa, desde el punto de vista del maquinado, porque no aumenta el desgaste de la herramienta, ni reduce la rapidez de remoción de materiales.

El maquinado por electro descarga (EDM) es un proceso de remoción de control de erosión producido por una serie de chispas eléctricas, donde la frecuencia del destello se encuentra en el rango de 50 a 500 kHz con un voltaje de 50 a 250 V. Este proceso se ocupó por primera vez durante la Segunda Guerra Mundial, así mismo al integrarse a equipos CNC para regular la descarga se ha vuelto muy popular. El proceso con corte con plasma (PAC) separa metal empleando un arco centrado para fundir y eliminar el material derretido con un chorro de gas ionizante. Por lo regular opera a temperatura de 10000 a 14000° C. El PAC se inventó a mediados de la década de los 50's del siglo anterior y su capacidad para cortar cualquier materia conductor de electricidad, lo hizo atractivo para el corte de materiales no ferrosos.

El maquinado por rayo láser está basado en la conversión de energía eléctrica en energía luminosa y térmica. Cuando el haz láser enfocado golpea la pieza de trabajo, se calienta el material de modo extremadamente que se funde o incluso se vaporiza. La mayoría de las

máquinas de corte por láser encontradas en los talleres de fabricación en metal son impulsadas por un resonador de CO₂ y su potencia va de 1.5 kW a 6 kW.

El maquinado con chorro de agua o hidrodinámico corta una amplia variedad de materiales tanto metales como no metales. Cuando se trata de metales, el corte por chorro de agua es popular porque produce un corte sin zona afectada por el calor. El material no se distorsiona alrededor del corte, por lo que el resultado final es un muy buen acabado superficial. El corte por chorro de agua se basa en una bomba de agua de alta presión (207 a 414 MPa) para empujar agua a través de una boquilla de 0.004 a 0.024 plg de diámetro hecho de un zafiro artificial y alcanzando una velocidad desde 520 hasta 914 m/s. Siendo estos cuatro métodos los más usados en la industria ya sea por su eficiencia, cuidado de en materiales o su uso indispensable en algunos procesos.

CAPITULO 1

LOS PROCESOS DE CORTE DE MATERIALES Y SU EVOLUCIÓN

1.1. Introducción

El proceso de dar forma a un producto mediante la eliminación de material es común a todo proceso de manufactura, donde solo varían las técnicas para eliminar material. Todo proceso se basa en una operación de corte, que es la separación de moléculas del material de las moléculas adyacentes mediante la aplicación de una fuerza.

La base del corte es la aplicación de una fuerza concentrada en una pequeña área por medio de una herramienta o cuchilla. Las operaciones de maquinado se pueden dividir en dos categorías: en una la pieza de trabajo se mueve mientras que la herramienta esta fija (torneado) y en el otro ocurre todo lo contrario.

Hay muchas clases de operaciones en los procesos de corte cada uno de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial siendo los más comunes: torneado, taladrado, fresado, etc.

Tabla 1.1. Principales operaciones de realizadas con máquinas herramienta.

Operación	Características
Torneado	De torneado y refrentado en todos los tipos de materiales, utilizan herramientas de una sola punta o de forma
Mandrinado	Superficies o perfiles internos con características similares al torneado es importante la rigidez de la barra al mandrinar para evitar traqueteo
Taladrado	Orificios redondos de varios tamaños y profundidades, alta velocidad de producción
Fresado	Gran variedad de formas que comprenden contornos, superficies planas y ranuras versátiles
Planeado	Superficies planas y perfiles de contorno rectos en piezas de trabajo relativamente pequeñas, producción de bajas cantidades
Cepillado de mesa fija	Superficies planas y perfiles de contorno rectos en piezas de trabajo relativamente pequeñas
Brochado	Superficies internas y externas, ranuras y contornos; herramientas costosas; alta velocidad de producción
Aserrado	Cortes rectos y de contornos en formas planas o estructurales; no adecuado para materiales duros a menos que la sierra tenga dientes de carburo o estén recubiertos con diamante

Fuente: propia

1.2. La herramienta de corte

Una herramienta de corte es el elemento utilizado en las máquinas herramienta para extraer material de una pieza cuando se quiere llevar a cabo un proceso de mecanizado. Los hay de muchos tipos para cada máquina, pero todas se basan en un proceso de arranque de viruta. Es decir, al haber una elevada diferencia de velocidades entre la herramienta y la pieza, al entrar en contacto la arista de corte con la pieza, se arranca material y se desprende la viruta.

Hay diferentes tipos de herramientas de corte, en función de su uso. Se pueden clasificar en dos categorías: herramienta hecha de un único material (generalmente acero), y herramienta con plaquetas de corte. La principal diferencia es que la punta de las segundas está hecha de otro material con mejores propiedades (como acero al carbono). Esta punta puede ir soldada o atornillada. Las herramientas con la punta de otro material, son más duras, lo que permite que corten materiales más duros, a más altas temperaturas y más altas velocidades, sin incrementar demasiado el coste de la herramienta.

Las plaquetas también se pueden fijar a la herramienta por medio de un tornillo. Están hechas de diferentes materiales duros como el acero al carbono o cerámicas, de forma que aguanten elevadas temperaturas. Tienen la ventaja de que cuando la arista de corte se desgasta, se puede sacar el tornillo, girar la plaqueta por una cara nueva y volverla a utilizar. Finalmente cuando todas las caras se desgastan, se puede poner una nueva plaqueta sin tener que cambiar la herramienta. Esta es una manera económica de tener las herramientas con aristas siempre afiladas.

Para una buena herramienta de corte, los materiales que la forman deben tener las siguientes características:

- Dureza: Debe tener dureza para aguantar la elevada temperatura y fuerza de fricción cuando está en contacto con la pieza.
- Resistencia: Debe tener resistencia porque las herramientas no se agrieten o se fracturen.
- Resistencia al desgaste: Debe tener una duración aceptable, ya que no interesa que tenga que cambiar muy a menudo y detener la fabricación.

En la tabla 1.2. Se describen diferentes materiales utilizado para fabricar herramientas de corte o plaquetas:

Tabla 1.2. Materiales para herramienta

Material de la herramienta	Propiedades
Acero no aleado	Es un acero con entre 0,5 a 1,5% de contenido de carbono. Para temperaturas de unos 250 ° C pierde su dureza, por lo tanto es inapropiado para grandes velocidades de corte y no se utiliza, salvo casos excepcionales, para la fabricación de herramientas de turno. Estos aceros se denominan usualmente aceros al carbono o aceros para hacer herramientas (WS).
Acero aleado	Contiene como elementos aleatorios, además del carbono, adiciones de wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros. Hay aceros débilmente aleados y aceros fuertemente aleado. El acero rápido (SS) es un acero fuertemente aleado. Tiene una elevada resistencia al desgaste. No pierde la dureza hasta llegar a los 600 ° C. Esta resistencia en caliente, que es debida sobre todo al alto contenido de wolframio, hace posible el torneado con velocidades de corte elevadas. Como el acero rápido es un material caro, la herramienta usualmente sólo lleva la parte cortante hecha de este material. La parte cortante o placa van soldadas a un mango de acero de las máquinas.
Carburos sinterizados	Los carburos hacen posible un gran aumento de la capacidad de corte de la herramienta. Los componentes principales de un metal duro son el tungsteno y el molibdeno, además del cobalto y el carbono. El carburo es caro y se suelda en forma de plaquetas normalizadas sobre los mangos de la herramienta que pueden ser de acero barato. Con temperaturas de corte de 900 ° aunque tienen buenas propiedades de corte y se puede trabajar a grandes velocidades. Con ello se reduce el tiempo de trabajo y además la gran velocidad de corte ayuda a que la pieza con la que se trabaja resulte lisa. Es necesario escoger siempre para el trabajo de los diferentes materiales la clase de metal duro que sea más adecuada.
Cerámicos	Estable. Moderadamente barato. Químicamente inerte, muy resistente al calor y se fijan convenientemente en soportes adecuados. Las cerámicas son generalmente deseables en aplicaciones de alta velocidad, el único inconveniente es su alta fragilidad. Cerámica se consideran impredecibles en condiciones desfavorables. Los materiales cerámicos más comunes se basan en alúmina (óxido de aluminio), nitruro de silicio y carburo de silicio. Se utiliza casi exclusivamente en plaquetas de corte. Con dureza de hasta aproximadamente 93 HRC. Se deben evitar los bordes afilados de corte y ángulos de desprendimiento positivo.
Cermet	Estable. Moderadamente caro. Otro material cementado basado en carburo de titanio (TiC). El aglutinante es usualmente níquel. Proporciona una mayor resistencia a la abrasión en comparación con carburo de tungsteno, a expensas de alguna resistencia. También es mucho más químicamente inerte de lo que. Altísima resistencia a la abrasión. Se utiliza principalmente en convertir los bits de la herramienta, aunque se está investigando en la producción de otras herramientas de corte. Dureza de hasta aproximadamente 93 HRC. No se recomiendan los bordes afilados generalmente.
Diamante	Estable. Muy Caro. La sustancia más dura conocida hasta la fecha. Superior resistencia a la abrasión, pero también alta afinidad química con el hierro que da como resultado no ser apropiado para el mecanizado de acero. Se utiliza en materiales abrasivos usaría cualquier otra cosa. Extremadamente frágil. Se utiliza casi exclusivamente en convertir los bits de la herramienta, aunque puede ser usado como un revestimiento sobre muchos tipos de herramientas. Se utilizan sobre todo para trabajos muy finos en máquinas especiales. Los bordes afilados generalmente no se recomiendan. El diamante es muy duro y no se desgasta.

Fuente: Propia.

1.3. Formación de viruta

En la formación de viruta existen dos métodos uno es el corte ortogonal que es un modelo ideal al desprendimiento de la viruta y el segundo es el llamado real debiendo observar la diferencia entre ambos:

- a) En el ortogonal ocurre sobre un plano por ende ocurre instantáneamente y en el proceso real no es sobre un plano lo que ocasiona que sea en periodos de tiempo finitos
- b) En la formación real ocurre un corte adicional resultado de la fricción entre la viruta y la herramienta al deslizarse a lo largo de la cara inclinada de la herramienta. su efecto aumenta con el incremento de la fricción entre la herramienta y la viruta.
- c) La viruta depende del tipo de material que se máquina y de las condiciones de corte de la operación existiendo tres tipos básicos: viruta discontinua, continua y continua con acumulación en el borde

1.4. Temperatura de corte

En su mayoría la energía que se consume en los procesos de corte (aproximadamente el 98%) es convertida en calor.

Este calor puede hacer que las temperaturas sean muy altas en la interface herramienta-viruta; las temperaturas de más de 1000° f no son inusuales. La energía restante se retiene como energía elástica en la viruta.

Métodos analíticos

Hay varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte. El método Cook se derivó de un análisis dimensional usando datos experimentales para varios materiales de trabajo a fin de establecer los valores de los parámetros de la ecuación resultante. Esta se puede usar para predecir la elevación de la temperatura en la interface herramienta-viruta durante el maquinado.

$$T = 0.4 \frac{U}{pC} \left(\frac{vto}{K} \right)^{0.333} \dots\dots\dots (1.1)$$

Medición de la temperatura de corte

Se han desarrollado métodos experimentales para la medición de temperaturas. Las temperaturas de medición más frecuentes usadas son los termopares herramienta-viruta. Este toma a la herramienta y la viruta como dos metales diferentes que forman una junta de termopar. Conectando apropiadamente las terminales eléctricas ala herramienta ya la parte de trabajo, se puede registrar la diferencia de potencial generada por la interface durante el corte mediante un potenciómetro registrador u otro dispositivo colector de datos apropiado. La diferencia de potencial resultante del termopar se puede convertir al valor de temperatura correspondiente mediante ecuaciones de calibración para la combinación particular herramienta trabajo.

$$T = Kv^m \dots\dots\dots (1.2)$$

Los resultados empíricos tienden a apoyar la validez general de la ecuación de Cook.

1.5. Máquinas herramienta

Se usa una máquina herramienta para sostener la parte de trabajo para poner en posición la herramienta con respecto al trabajo y para proporcionar la potencia para el proceso de maquinado a la velocidad, avance y profundidad que se han establecido. El control de la herramienta de las condiciones de corte, del trabajo, y de la máquina herramienta permite fabricar partes con grandes precisiones.

El termino máquina herramienta se aplica a cualquier maquina accionada por fuerza motriz que realice operaciones de maquinado. Usando tradicionalmente las siguientes

- Taladro: La pieza es fijada sobre la mesa del taladro, la herramienta, llamada broca, realiza el movimiento de corte giratorio y de avance lineal, realizando el mecanizado de un agujero o taladro teóricamente del mismo diámetro que la broca y de la profundidad deseada.

- Cepillo de codo o limadora: realiza el maquinado con una cuchilla montada sobre la porta herramientas del carnero, que realiza un movimiento lineal de corte, sobre una pieza fijada a la mesa, que tiene el movimiento de avance perpendicular al movimiento de corte.
- Mortajadora: máquina que arranca material linealmente del interior de un agujero. El movimiento de corte lo efectúa la herramienta y el de avance la mesa donde se monta la pieza a mecanizar.
- Cepilladora: de mayor tamaño que la limadora, tiene una mesa deslizante sobre la que se fija la pieza y que realiza el movimiento de corte deslizándose longitudinalmente, la cuchilla montada sobre un puente sobre la mesa se desplaza transversalmente en el movimiento de avance.
- Torno: el torno es la máquina herramienta donde la pieza se fija en el plato del torno, que realiza el movimiento de corte girando sobre su eje, la cuchilla realiza el movimiento de avance eliminando el material en los sitios precisos.
- Fresadora: en la fresadora el movimiento de corte lo tiene la herramienta; que se denomina fresa, girando sobre su eje, el movimiento de avance lo tiene la pieza, fijada sobre la mesa de la fresadora que realiza este movimiento. Es junto al torno la máquina herramienta más universal y versátil.

Las máquinas herramientas convencionales son manejadas usualmente por un trabajador. Aunque las máquinas herramienta moderna están frecuentemente diseñadas para realizar sus procesos con un alto grado de automatización generalmente llamado control numérico CNC.

Las máquinas controladas numéricamente (máquinas CNC), se diseñaron para adaptar las variaciones en la configuración de los productos figura 1.1. Su principal aplicación se centra en volúmenes de producción medios de piezas sencillas y en volúmenes de producción medios y bajos de piezas complejas. El primer desarrollo en el área del control numérico lo realizó el inventor norteamericano John T. Parsons (Detroit 1913-2007), junto con su empleado Frank L.

Stulen, en la década de 1940. El concepto de control numérico implicaba el uso de datos en un sistema de referencia para definir las superficies de contorno de las hélices de un helicóptero.



Fuente: 3.bp.blogspot.com

Figura 1.1. Centro de maquinado CNC

1.5.1. Torno

Se denomina torno a un conjunto de máquinas y herramientas que permiten mecanizar piezas de forma geométrica de revolución. Estas máquinas-herramienta operan haciendo girar la pieza a mecanizar mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas.

La herramienta de corte va montada sobre un carro que se desplaza sobre unas guías o rieles paralelos al eje de giro de la pieza que se tornea, llamado eje Z; sobre este carro hay otro que se mueve según el eje X, en dirección radial a la pieza que se tornea, y puede haber un tercer carro que se puede inclinar, para hacer conos, y donde se apoya la torreta portaherramientas. Cuando el carro principal desplaza la herramienta a lo largo del eje de rotación, produce el cilindrado de la pieza, y cuando el carro transversal se desplaza de forma perpendicular al eje de simetría de la pieza se realiza la operación denominada refrentada.

Por lo general se le considerara la máquina herramienta más antigua. Aunque los tornos para trabajo en madera se desarrollaron durante el periodo del 1001 a 1000 a.c. En el siglo XIII se inventó el torno de pedal y pértiga flexible, que tenía la ventaja de ser accionado con el pie en

vez de con las manos, con lo cual estas quedaban libres para otras tareas. En el siglo XV surgieron otras dos mejoras: la transmisión por correa y el mecanismo de biela-manivela.

Al comenzar la Revolución industrial en Inglaterra, durante el siglo XVII, se desarrollaron tornos capaces de dar forma a una pieza metálica. Lo cual hizo posible la producción en serie de piezas de precisión. En 1780: Jacques de Vaucanson construye un torno con portaherramientas deslizante. Henry Maudslay y David Wilkinson mejoran el invento de Vaucanson permitiendo que la herramienta de corte pueda avanzar con velocidad constante en el año de 1789.

Fue J.G. Bodmer quien tuvo la idea de construir tornos verticales. A finales del siglo XIX, este tipo de tornos eran fabricados en distintos tamaños y pesos. En 1890 de la caja de Norton, incorporada a los tornos paralelos, dio solución al cambio manual de engranajes para fijar los pasos de las piezas a roscar, figura 1.2.

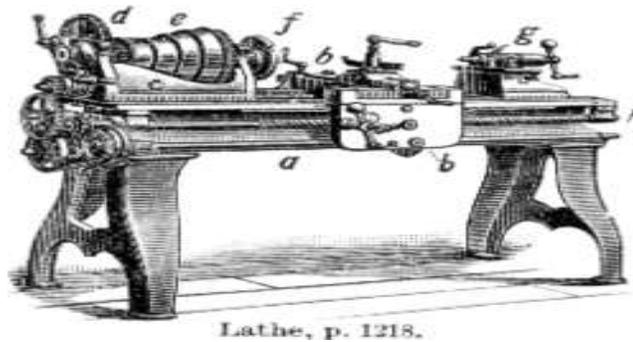


Figura 1.2. Torno paralelo de 1911

Fuente: es.wikipedia.org/wiki/torno

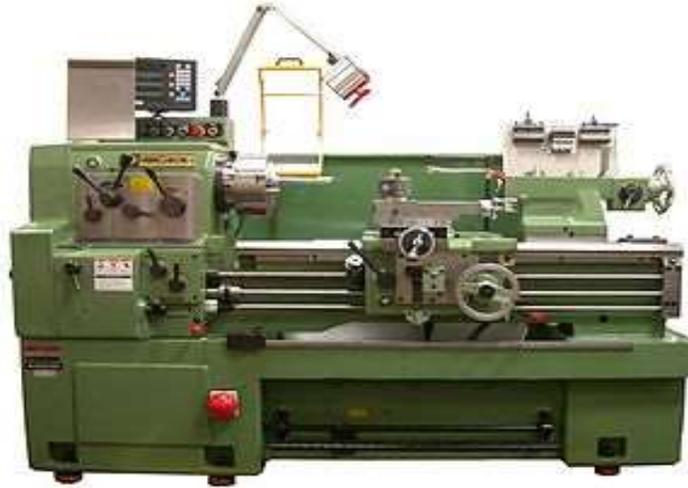
Tipos de tornos

Actualmente se utilizan en la industria del mecanizado varios tipos de tornos, cuya aplicación depende de la cantidad de piezas a mecanizar por serie, de la complejidad de las piezas y de la envergadura de las piezas.

Torno paralelo

El torno paralelo o básico es un torno típico para cortar metales. Este torno exige un operador experimentado cuya calidad de trabajo depende de su cuidado y atención. Para trabajo en producción es conveniente eliminar la posibilidad de variación y error y para este fin se ajustan

topes mecánicos a los movimientos del carro para compensar el retorno a su posición, y también para retornar la herramienta en el carro transversal cuando se haya completado el corte deseado.



Fuente: es.wikipedia.org/wiki/torno

Figura 1.3. Torno paralelo

Torno copiator

Se llama torno copiator a un tipo de torno que operando con un dispositivo hidráulico y electrónico permite el torneado de piezas, de acuerdo a las características de la misma, siguiendo el perfil de una plantilla.

Este tipo de tornos se utiliza para el torneado de aquellas piezas que tienen diferentes escalones de diámetros, que han sido previamente forjadas o fundidas y que tienen poco material excedente. Las condiciones tecnológicas del mecanizado son comunes a las de los demás tornos, solamente hay que prever una herramienta que permita bien la evacuación de la viruta y un sistema de lubricación y refrigeración eficaz del filo de corte de las herramientas mediante abundante aceite de corte.



Fuente:www.demquinasyherramientas.com

Figura 1.4. Torno copiator

Torno revólver

El torno revólver es una variedad de torno diseñado para mecanizar piezas sobre las que sea posible el trabajo simultáneo de varias herramientas con el fin de disminuir el tiempo total de mecanizado. Las piezas que presentan esa condición son aquellas que, partiendo de barras, tienen una forma final de casquillo o similar. Una vez que la barra queda bien sujeta mediante pinzas o con un plato de garras, se va taladrando, mandrinado, roscando o escariando la parte interior mecanizada y a la vez se puede ir cilindrando, refrentado, ranurando, roscando y cortando con herramientas de torneado exterior. El torno revólver lleva un carro con una torreta giratoria en la que se insertan las diferentes herramientas que realizan el mecanizado de la pieza.



Fuente: antango.quebarato.com

Figura 1.5. Torno revolver

Torno automático

Se llama torno automático a un tipo de torno cuyo proceso de trabajo está enteramente automatizado. La alimentación de la barra necesaria para cada pieza se hace también de forma automática, a partir de una barra larga que se inserta por un tubo que tiene el cabezal y se sujeta mediante pinzas de apriete hidráulico.

Estos tornos pueden ser de un solo husillo o de varios husillos:

- Los de un solo husillo se emplean básicamente para el mecanizado de piezas pequeñas que requieran grandes series de producción.

- Cuando se trata de mecanizar piezas de dimensiones mayores se utilizan los tornos automáticos multihusillos donde de forma programada en cada husillo se va realizando una parte del mecanizado de la pieza.

La puesta a punto de estos tornos es muy laboriosa y por eso se utilizan principalmente para grandes series de producción. El movimiento de todas las herramientas está automatizado por un sistema de excéntricas y reguladores electrónicos que regulan el ciclo y los toques de final de carrera.

Un tipo de torno automático es el conocido como "tipo suizo", capaz de mecanizar piezas muy pequeñas con tolerancias muy estrechas.

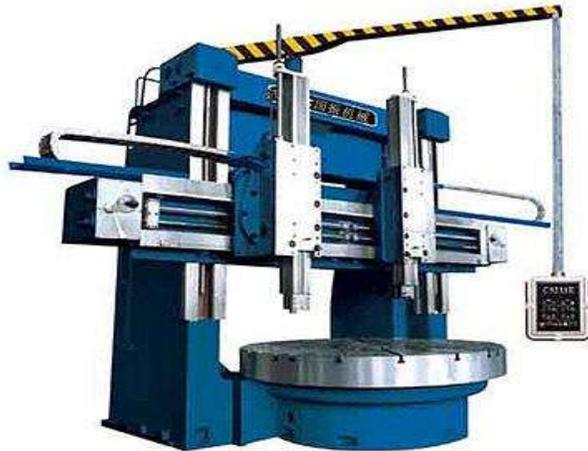


*Fuente: www.accesorios-carpinteria.com
Figura 1.6. Torno automático*

Torno vertical

El torno vertical es una variedad de torno, de eje vertical, diseñado para mecanizar piezas de gran tamaño, que van sujetas al plato de garras u otros operadores y que por sus dimensiones o peso harían difícil su fijación en un torno horizontal.

Los tornos verticales no tienen contrapunto sino que el único punto de sujeción de las piezas es el plato horizontal sobre el cual van apoyadas. La manipulación de las piezas para fijarlas en el plato se hace mediante grúas de puente o polipastos.



Fuente: 1.bp.blogspot.com

Figura 1.7. Torno vertical

Torno CNC

El torno CNC es un torno dirigido por control numérico por computadora. Ofrece una gran capacidad de producción y precisión en el mecanizado por su estructura funcional y porque la trayectoria de la herramienta de torneado es controlada por un ordenador que lleva incorporado, el cual procesa las órdenes de ejecución contenidas en un software que previamente ha confeccionado un programador conocedor de la tecnología de mecanizado en torno. Es una máquina que resulta rentable para el mecanizado de grandes series de piezas sencillas, sobre todo piezas de revolución, y permite mecanizar con precisión superficies curvas coordinando los movimientos axial y radial para el avance de la herramienta.

La velocidad de giro de cabezal porta piezas, el avance de los carros longitudinal y transversal y las cotas de ejecución de la pieza están programadas y, por tanto, exentas de fallos imputables al operario de la máquina



*Fuente: www.machinerychina.es/1-lathe
Figura 1.8. Torno CNC*

1.5.2. Fresadora

Una fresadora es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa. En las fresadoras tradicionales, la pieza se desplaza acercando las zonas a mecanizar a la herramienta, permitiendo obtener formas diversas, desde superficies planas a otras más complejas.

Inventadas a principios del siglo XIX, las fresadoras se han convertido en máquinas básicas en el sector del mecanizado. Gracias a la incorporación del control numérico, son las máquinas herramientas más polivalentes por la variedad de mecanizados que pueden realizar y la flexibilidad que permiten en el proceso de fabricación. La diversidad de procesos mecánicos y el aumento de la competitividad global han dado lugar a una amplia variedad de fresadoras que, aunque tienen una base común, se diferencian notablemente según el sector industrial en el que se utilicen. Asimismo, los progresos técnicos de diseño y calidad que se han realizado en las herramientas de fresar, han hecho posible el empleo de parámetros de corte muy altos, lo que conlleva una reducción drástica de los tiempos de mecanizado. El empleo de estas máquinas, con elementos móviles y cortantes, así como líquidos tóxicos para la refrigeración y lubricación del corte, requiere unas condiciones de trabajo que preserven la seguridad y salud de los trabajadores y eviten daños a las máquinas, a las instalaciones y a los productos finales o semi-elaborados.

Clasificación de las fresadoras

Las fresadoras pueden clasificarse según varios aspectos, como la orientación de eje de giro o el número de ejes de operación, tal y como se describe a continuación:

Fresadoras según la orientación de la herramienta

Dependiendo de la orientación del eje de giro de la herramienta de corte, se distinguen tres tipos de fresadoras: horizontales, verticales y universales. Una fresadora horizontal utiliza fresas cilíndricas que se montan sobre un eje horizontal accionado por el cabezal de la máquina y apoyado por un extremo sobre dicho cabezal y por el otro sobre un rodamiento situado en el puente deslizante llamado carnero. Esta máquina permite realizar principalmente trabajos de ranurado, con diferentes perfiles o formas de las ranuras. Cuando las operaciones a realizar lo permiten, principalmente al realizar varias ranuras paralelas, puede aumentarse la productividad montando en el eje portaherramientas varias fresas conjuntamente formando un tren de fresado. La profundidad máxima de una ranura está limitada por la diferencia entre el radio exterior de la fresa y el radio exterior de los casquillos de separación que la sujetan al eje porta fresas.



Figura 1.9. Fresadora horizontal

Fuente: es.madeinchina.com

Fresadora vertical.

En una fresadora vertical, el eje del husillo está orientado verticalmente, perpendicular a la mesa de trabajo. Las fresas de corte se montan en el husillo y giran sobre su eje. En general, puede desplazarse verticalmente, bien el husillo, o bien la mesa, lo que permite profundizar el corte.

Hay dos tipos de fresadoras verticales: las fresadoras de banco fijo o de bancada y las fresadoras de torreta o de consola. En una fresadora de torreta, el husillo permanece estacionario durante

las operaciones de corte y la mesa se mueve tanto horizontalmente como verticalmente. En las fresadoras de banco fijo, sin embargo, la mesa se mueve sólo perpendicularmente al husillo, mientras que el husillo en sí se mueve paralelamente a su propio eje. Una fresadora universal tiene un husillo principal para el acoplamiento de ejes portaherramientas horizontales y un cabezal que se acopla a dicho husillo y que convierte la máquina en una fresadora vertical. Su ámbito de aplicación está limitado principalmente por el costo y por el tamaño de las piezas que se pueden trabajar. En las fresadoras universales, al igual que en las horizontales, el puente es deslizante conocido en el argot como carnero, puede desplazarse de delante a detrás y viceversa sobre unas guías.



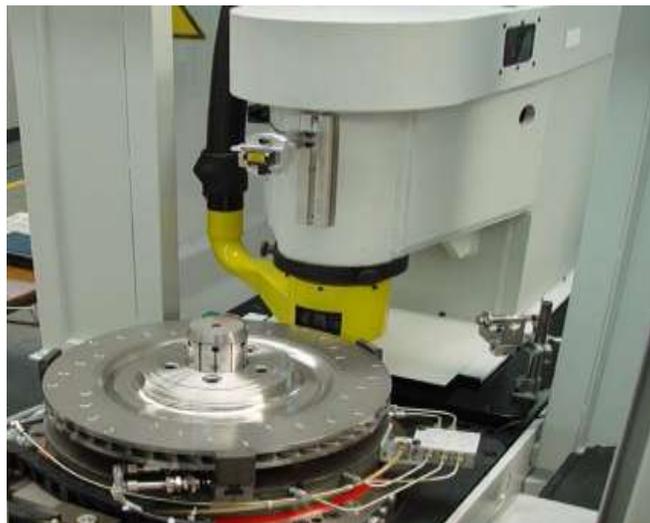
Fuente:es.madeinchina.com

Figura 1.10. Fresadora vertical

Fresadoras especiales

Además de las fresadoras tradicionales, existen otras fresadoras con características especiales que pueden clasificarse en determinados grupos. Sin embargo, las formas constructivas de estas máquinas varían sustancialmente de unas a otras dentro de cada grupo, debido a las necesidades de cada proceso de fabricación. Las fresadoras circulares tienen una amplia mesa circular giratoria, por encima de la cual se desplaza el carro portaherramientas, que puede tener uno o varios cabezales verticales, por ejemplo, uno para operaciones de desbaste y otro para operaciones de acabado. Además pueden montarse y desmontarse piezas en una parte de la mesa mientras se mecanizan piezas en el otro lado. Las fresadoras copiadoras disponen de dos mesas:

una de trabajo sobre la que se sujeta la pieza a mecanizar y otra auxiliar sobre la que se coloca un modelo. El eje vertical de la herramienta está suspendido de un mecanismo con forma de pantógrafo que está conectado también a un palpador sobre la mesa auxiliar. Al seguir con el palpador el contorno del modelo, se define el movimiento de la herramienta que mecaniza la pieza. Otras fresadoras copiadoras utilizan, en lugar de un sistema mecánico de seguimiento, sistemas hidráulicos, electro-hidráulicos o electrónicos. En las fresadoras de pórtico, también conocidas como fresadoras de puente, el cabezal portaherramientas vertical se halla sobre una estructura con dos columnas situadas en lados opuestos de la mesa. La herramienta puede moverse verticalmente y transversalmente y la pieza puede moverse longitudinalmente. Algunas de estas fresadoras disponen también a cada lado de la mesa sendos cabezales horizontales que pueden desplazarse verticalmente en sus respectivas columnas, además de poder prolongar sus ejes de trabajo horizontalmente. Se utilizan para mecanizar piezas de grandes dimensiones. En las fresadoras de puente móvil, en lugar de moverse la mesa, se mueve la herramienta en una estructura similar a un puente grúa. Se utilizan principalmente para mecanizar piezas de grandes dimensiones. Una fresadora para madera es una máquina portátil que utiliza una herramienta rotativa para realizar fresados en superficies planas de madera. Son empleadas en bricolaje y ebanistería para realizar ranurados, como juntas de cola de milano o machihembrados; cajeados, como los necesarios para alojar cerraduras o bisagras en las puertas; y perfiles, como molduras. Las herramientas de corte que utilizan son fresas para madera, con dientes mayores y más espaciados que los que tienen las fresas para metal.



Fuente: www.hofmam-equilibrade.es

Figura 1.11. Fresadora circular

Fresadoras según el número de ejes

Fresadora CNC de cinco ejes con cabezal y mesa giratoria. Las fresadoras pueden clasificarse en función del número de grados de libertad que pueden variarse durante la operación de arranque de viruta.

- Fresadora de tres ejes. Puede controlarse el movimiento relativo entre pieza y herramienta en los tres ejes de un sistema cartesiano.



Fuente: www.tecnoedu.com.

Figura 1.12. Fresadora CNC de 3 ejes

- Fresadora de cuatro ejes. Además del movimiento relativo entre pieza y herramienta en tres ejes, se puede controlar el giro de la pieza sobre un eje, como con un mecanismo divisor o un plato giratorio. Se utilizan para generar superficies con un patrón cilíndrico, como engranajes o ejes estriados.



Fuente: www.directindustry.es

Figura 1.13. Fresadora CNC de 4 ejes

- Fresadora de cinco ejes. Además del movimiento relativo entre pieza y herramienta en tres ejes, se puede controlar o bien el giro de la pieza sobre dos ejes, uno perpendicular al eje de la herramienta y otro paralelo a ella (como con un mecanismo divisor y un plato giratorio en una fresadora vertical); o bien el giro de la pieza sobre un eje horizontal y la inclinación de la herramienta alrededor de un eje perpendicular al anterior. Se utilizan para generar formas complejas, como el rodete de una turbina Francis.



Fuente: www.semapre.com.mx/equiposcnc

Figura 1.14. Fresadora CNC de 5 ejes

Ejes principales de una fresadora

Eje Z de movimiento:

En este eje, que es el que posee la potencia de corte, va montada la herramienta cortante y puede adoptar distintas posiciones según las posibilidades del cabezal.

Eje X de movimiento:

Este eje es horizontal y paralelo a la superficie de sujeción de la pieza.

Eje Y de movimiento:

Este eje forma con los ejes Z y X un triedro de sentido directo.

1.5.3. Taladro

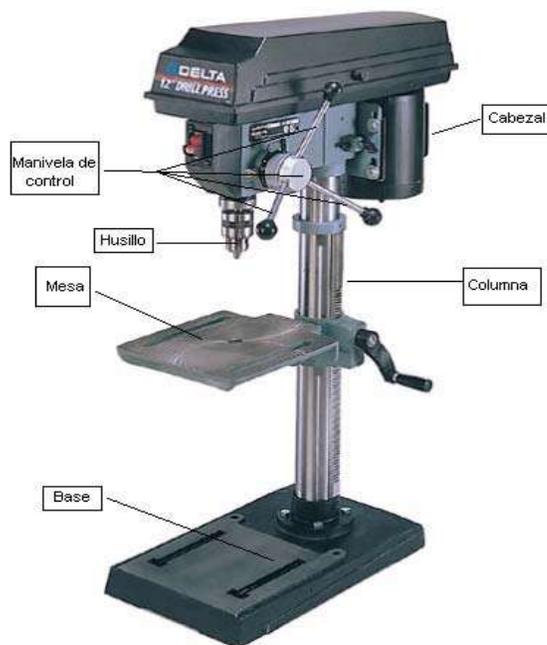
El principio de la operación es perforar o hacer un agujero en una pieza de cualquier material. Nosotros nos concentraremos en la perforación de los metales. En el taladrado se producen virutas en grandes cantidades que deben manejarse con seguridad, lo más importante es

familiarizarse con el funcionamiento y las partes principales. Por la gran potencia que ejercen los taladros, tienen que emplearse dispositivos especiales para la sujeción de la pieza de trabajo. Al taladrar metales se produce una fricción muy grande y por esta razón es recomendable refrigerar con taladrina (al igual que en la fresadora). Este es un líquido refrigerante compuesto de agua, aceite, antioxidantes y antiespumantes, entre otros.

Tipos de taladros

Existen diferentes tipos de taladros:

- Taladros de banco: Es el más sencillo y común, el dispositivo del avance manual de la herramienta es el que permite al operario sentir el efecto del corte en la pieza a trabajar.



Fuente:propia

Figura 1.15. Partes de un taladro de banco

- Taladros de pedestal: Se diferencia del taladro de banco en que se utiliza para trabajo pesado, permite hacer agujeros más grandes y colocar piezas más grandes en su mesa.
- Taladro con husillos múltiples: Este taladro está equipado con una cabeza taladradora. Esta tiene varios husillos que se pueden ubicar para taladrar cierto número de agujeros en un lugar preciso de la pieza y al mismo tiempo.



Fuente: www.woodworkmaichini.com

Figura 1.16. Taladro con husillos múltiples

- Taladro múltiple: Es una serie de husillos colocados en una mesa larga y común. Está dedicada a la producción en serie y realiza operaciones secuenciales sobre una pieza ya que va avanzando de operación en operación a través de todos los husillos. En cada uno de estos husillos se hace una operación diferente, pero sobre la misma pieza.



Fuente: www.torneiro.com

Figura 1.17. Taladro múltiple

- Mandrinadora: Taladro tipo pedestal de alta precisión en el cual la pieza se puede colocar, gracia a la mesa de coordenadas, en cualquier posición debajo del husillo. De esta forma se pueden ejecutar huecos en cualquier posición sobre la pieza y de diámetros adecuados, cuando se utiliza un alesador en vez de una broca.



Fuente: www.hellopro.es

Figura 1.18. Mandrinadora

- Taladro radial: A diferencia de los taladros anteriores, el taladro radial tiene la mesa de trabajo en la parte inferior, ya que está diseñada para acomodar piezas grandes. Es una máquina de gran tamaño que mueve su cabezal, su mesa de trabajo y el husillo principal con motores independientes. El husillo se puede colocar para taladrar en cualquier lugar dentro del alcance de la máquina por medio de los movimientos proporcionados por la cabeza, el brazo y la rotación del brazo alrededor de la columna.



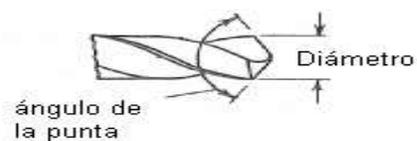
Fuente: www.famasa.com

Figura 1.19. Taladro Radial

Descripción y partes de la herramienta

Las brocas constan de tres partes: el vástago, el cuerpo y la punta.

- El vástago: Es la parte que se coloca en el husillo y se hace girar. Estos pueden ser rectos o cónicos.
- Cuerpo: Es la parte cilíndrica que va desde el vástago hasta la punta. Este en su recorrido tiene unas flautas cuya función es la de dejar entrar el fluido refrigerante y dejar escapar la viruta.
- Punta: Se encuentra en todo el extremo cortante o filo cónico de la broca. La forma y condiciones de la punta son muy importantes para la acción cortante de la broca.



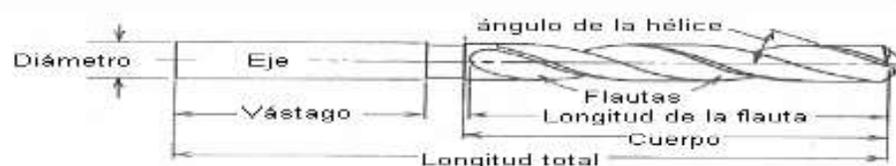
Fuente: Principios de ingeniería de manufactura

Figura 1.20. Punta de una broca

Es importante utilizar la broca adecuada para cada material, ya que el resultado de la operación se verá reflejado en el tipo de broca que se utilice. Con una broca de pared o de madera no se puede trabajar el metal pero con una de metal si podemos taladrar madera pero no pared.

Las brocas, al igual que las fresas, deben estar en constante lubricación a medida que están en operación para evitar el calentamiento de la herramienta y cualquier daño de esta.

Esta lubricación se puede realizar desde la parte interior de la broca o desde la parte exterior de la misma. Las brocas que tienen conductos refrigerantes, a medida que van taladrando van expulsando la taladrina por los canales internos; las brocas generales están expuestas a un chorro externo de taladrina.



Fuente: Principios de ingeniería de manufactura

Figura 1.21. Partes de una broca

Calidad de las herramientas

Las brocas están hechas de acero rápido (HSS), pero la calidad de cada broca puede variar según la aleación y según el método y calidad de fabricación.

Existen principalmente las siguientes calidades:

- HSS laminada. Es la más económica de las brocas de metal. Es de uso general en metales y plásticos en los que no se requiera precisión. No es de gran duración.
 - HSS titanio rectificada. Están recubiertas de una aleación de titanio que permite taladrar metales con la máxima precisión, incluyendo materiales difíciles como el acero inoxidable. Se puede aumentar la velocidad de corte y son de extraordinaria duración.
 - HSS cobalto rectificada. Son las brocas de máxima calidad, y están recomendadas para taladrar metales de todo tipo incluyendo los muy duros y los aceros inoxidables. Tienen una especial resistencia a la temperatura, de forma que se pueden utilizar sin refrigerante.
-
-

CAPITULO 2

MAQUINADO CON RAYO LASER

2.1. Introducción

La palabra LASER es un acrónimo de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” que en español quiere decir “amplificación luminosa de emisión de radiación estimulada”. Desde la invención del rayo láser estos se han usado para diversas aplicaciones industriales que incluyen el tratamiento térmico, la soldadura y la medición así como los procesos de maquinado los cuales describiremos después.

Un láser es traductor óptico que convierte energía eléctrica en un haz luminoso altamente coherente. Un rayo láser tiene varias propiedades que lo distinguen de otras formas de luz. Es monocromático y muy alineado lo cual le permite enfocar la luz generada por un láser mediante lentes ópticos convencionales, sobre un punto muy pequeño, produciendo densidades muy potentes. Esto permite que el material de la pieza a maquinar se funda y evapora de manera controlada y no solo se utiliza para el maquinado de metales sino también de no metales.

El nombre y el color del láser dependen del tipo de material especial que se utilice:

- Gas argón emite un rayo de luz azul-verde
- Gas criptón emite un rayo de luz roja o amarilla
- YAG (itrio aluminio granate) emite un rayo de luz infrarroja invisible
- Diodo emite un rayo de luz infrarroja no visible
- Excímer: emite en el rayo ultravioleta

2.2. Historia

En 1916, Albert Einstein estableció los fundamentos para el desarrollo de los láseres y de sus predecesores, los máseres (que emiten microondas), utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación.

En 1928 Rudolf Landenburg informó haber obtenido la primera evidencia del fenómeno de emisión estimulada de radiación, aunque no pasó de ser una curiosidad de laboratorio, por lo

que la teoría fue olvidada hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando fue demostrada definitivamente por Willis Eugene Lamb y R. C. Rutherford.

En 1953, Charles H. Townes y los estudiantes de postgrado James P. Gordon y Herbert J. Zeiger construyeron el primer máser: un dispositivo que funcionaba con los mismos principios físicos que el láser pero que produce un haz coherente de microondas. El máser de Townes era incapaz de funcionar en continuo. Nikolái Bášov y Aleksandr Prójorov de la Unión Soviética trabajaron independientemente en el oscilador cuántico y resolvieron el problema de obtener un máser de salida de luz continua, utilizando sistemas con más de dos niveles de energía. Townes, Bášov y Prójorov compartieron el Premio Nobel de Física en 1964 por "los trabajos fundamentales en el campo de la electrónica cuántica", los cuales condujeron a la construcción de osciladores y amplificadores basados en los principios del máser-láser.

El primer láser fue uno de rubí y funcionó por primera vez el 16 de mayo de 1960. Fue construido por Theodore Maiman. El hecho de que sus resultados se publicaran con algún retraso en Nature, dio tiempo a la puesta en marcha de otros desarrollos paralelos. Por este motivo, Townes y Arthur Leonard Schawlow también son considerados inventores del láser, el cual patentaron en 1960. Dos años después, Robert Hall inventa el láser generado por semiconductor. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos y, al año siguiente Gordon Gould patenta otras muchas aplicaciones prácticas para el láser.

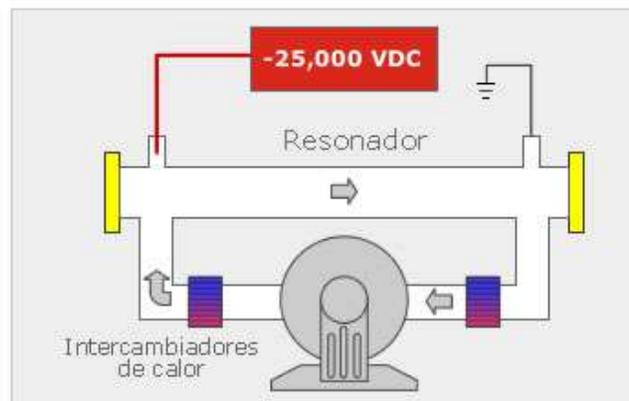
El 16 de mayo de 1980, un grupo de físicos de la Universidad de Hull liderados por Geoffrey Pret registran la primera emisión láser en el rango de los rayos X. Pocos meses después se comienza a comercializar el disco compacto, donde un haz láser de baja potencia "lee" los datos codificados en forma de pequeños orificios (puntos y rayas) sobre un disco óptico con una cara reflectante. Posteriormente esa secuencia de datos digital se transforma en una señal analógica permitiendo la escucha de los archivos musicales. En 1984, la tecnología desarrollada comienza a usarse en el campo del almacenamiento masivo de datos. En 1994 en el Reino Unido, se utiliza por primera vez la tecnología láser en cinemómetros para detectar conductores con exceso de velocidad. Posteriormente se extiende su uso por todo el mundo.

Ya en el siglo XXI, científicos de la Universidad de St. Andrews crean un láser que puede manipular objetos muy pequeños. Al mismo tiempo, científicos japoneses crean objetos del tamaño de un glóbulo rojo utilizando el láser. En 2002, científicos australianos "teletransportan" con éxito un haz de luz láser de un lugar a otro. Dos años después el escáner láser permite al Museo Británico efectuar exhibiciones virtuales. En 2006, científicos de la compañía Intel descubren la forma de trabajar con un chip láser hecho con silicio abriendo las puertas para el desarrollo de redes de comunicaciones mucho más rápidas y eficientes.

2.3. Generación del rayo láser

Los láseres de CO₂ son comúnmente utilizados en aplicaciones de corte.

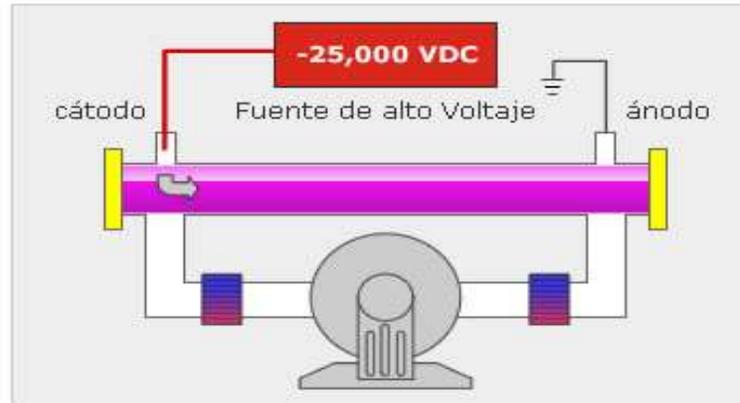
1. Medio interno – Dióxido de carbono: El compresor hace circular la mezcla de gas laser a través del resonador y los intercambiadores de calor. Estos últimos tienen a su vez la función de enfriar el gas laser con el fin de mantener la potencia de salida y eficiencia.



Fuente: www.lgdlaser.com

Figura 2.1. Medio interno

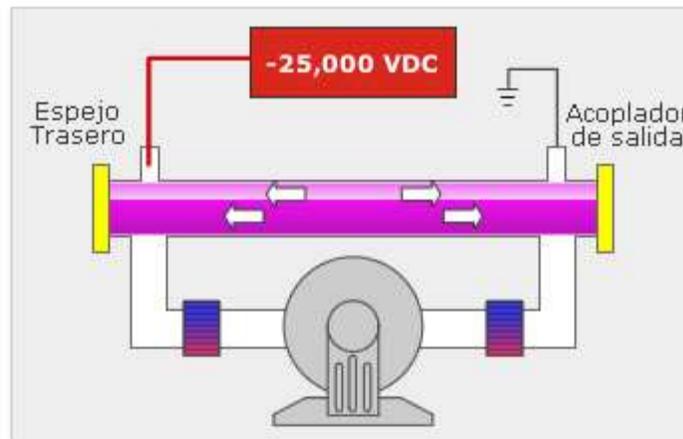
2. Fuente de excitación – corriente DC: Un alto voltaje DC se aplica al gas laser, causando un resplandor y un estado de plasma en la descarga.



Fuente:www.lgdlaser.com

Figura 2.2. Fuente de excitación

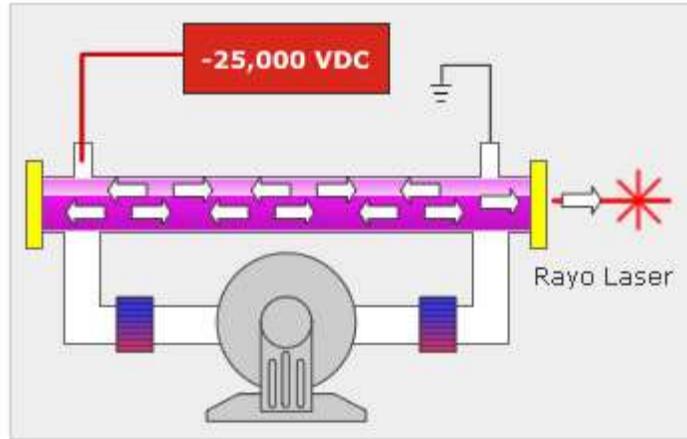
3. Amplificación Óptica – Resonador laser: La corriente DC excita las moléculas de CO₂ a un estado de energía más alto, estimulándolas a emitir fotones o unidades de energía luminosa



Fuente:www.lgdlaser.com

Figura 2.3. Amplificación óptica

4. Rayo láser dentro de la cavidad del resonador laser Los fotones se mueven de un lado hacia otro debido a que se reflejan en los espejos que hay en los extremos del resonador, mientras estimulan la emisión de más fotones. Un porcentaje de los fotones emitidos “pasan” a través de un elemento óptico parcialmente transmisor denominado Acoplador de Salida.



Fuente: www.lgdlaser.com

Figura 2.4. Rayo láser dentro de la cavidad del resonador laser

2.4. Principios y características del proceso

El corte con rayo láser y la perforación con rayo láser son dos procesos completamente distintos de eliminación de material. Ambos procesos pueden utilizar láseres de pulsos o continuos como fuentes de primera energía. Son muchos factores que intervienen en el corte y la perforación con láser como puede verse en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Factores que influyen en los procesos de perforación y corte con laser

1.Tipo de laser		
Estado sólido		Gas
YAG(pulsado y cw)		Dióxido de carbono(pulsado y cw)
		Excimer(pulsado)
2.- Ópticos		
Rayo puro	Óptica para enfocar	Rayo enfocado
Potencia	Lente o reflejante	Distancia focal
Divergencia	Calidad	Diámetro del rayo
Longitud de onda	Distancia focal	Modo óptico
Estructura modal	Material óptico	Longitud de onda
Polarización	Abertura	Densidad de potencia
Tamaño		Profundidad de foco
3.-Material		
Superficie		Volumen
Condición		Espesor
Reflectividad		Densidad
		Calor de fusión
Absorbencia		Calor de vaporización
		Difusividad
4.-Chorro de gas auxiliar		
Gas inerte		Gas exotérmico
Presion		Presion
Tamaño del orificio		Tamaño del orificio
Contorno del orificio		Contorno del orificio
Impulso		Impulso
Profundidad del corte		Profundidad del corte
Alejamiento		Flujo másico
Tipo		Tipo
Aditivo(agua)		Aditivo(agua)

Fuente: Manual de soldadura tomo II

2.4.1 Corte

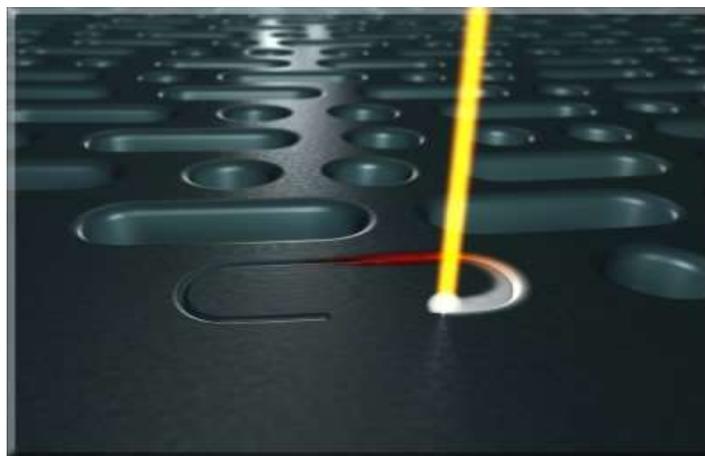
El proceso de corte con rayo láser puede describirse de manera simple. Requiere la acción simultánea de un rayo láser enfocado con una densidad de potencia mayor que 10^4 W/mm^2 ($6.5 \times 10^6 \text{ W/mm}^2$) y un chorro de gas auxiliar, que juntos producen un área de material eliminado en la pieza de trabajo. Este funciona como una fuente de calor lineal que produce un agujero calado una vez que las condiciones iniciales transitorias alcanzan un estado estable. El gas auxiliar expulsa el material fundido del agujero por la raíz de corte. En ciertos casos, en ciertos casos

puede usarse un gas activo para mejorar la eficiencia de corte mediante una reacción química exotérmica. En la tabla 2.2 se enlistan los gases auxiliares más comunes

Tabla 2.2. Factores que influyen en los procesos de perforación y corte con laser

Gas auxiliar	Material	Comentarios
Aire	Aluminio	Buen resultado hasta 1.5mm
	Plástico	
	Madera	
	Compuestos	
	Alúmina	Todos los gases reaccionan de manera similar ;el aire es el menos costos
	Vidrio	
	Cuarzo	
Oxigeno	Acero al carbono	Buen acabado, alta velocidad, capa de óxido en la superficie
	Acero inoxidable	Capa gruesa de óxido en la superficie
	Cobre	Buena superficie hasta 3mm
Nitrógeno	Acero inoxidable	
	Aluminio	Bordes limpios libres de óxido hasta 3mm
	Aleaciones de níquel	
Argón	Titanio	Se requiere gas auxiliar inerte para producir corte satisfactorios en diverso materiales

Fuente: Manual de soldadura tomo II



Fuente: cortemetalmechanico.blogspot.com

Figura2.5. Equipos de corte con laser

Las ventajas del proceso de corte con láser con respecto a otros procesos son:

- Ancho del corte pequeño
- Zona afectada por el calor angosta
- Altas velocidades de corte
- Buena calidad
- Adaptabilidad a la automatización
- No hay contacto mecánico entre la pieza de trabajo y el dispositivo de corte
- En comparación con los procesos convencionales el ruido, la vibración los humos producidos son de niveles bajos
- Útil para estudios de prototipos

2.4.2. Perforación

El proceso de perforación con láser solo requiere un láser de pulsos con el rayo enfocado a densidades de potencia de 10^5W/mm^2 ($6.5 \times 10^7 \text{W/mm}^2$). Cuando el rayo enfocado incide en una superficie, el material se funde y volatiliza, luego es expulsado violentamente, formando un agujero. El proceso produce agujeros limpios con capas de refundido muy delgadas. Cuando se requieren agujeros grandes se emplea una técnica de trepanación cortando con el rayo láser un círculo de diámetro requerido.

Los diámetros de los agujeros producidos por perforación con perforación con rayo láser por lo regular están entre 0.0025 a 1.5mm. Las profundidades alcanzadas casi siempre son menores a 25mm debido a las limitaciones del enfocado del rayo por tanto es posible que se requieran múltiples pulsos para penetra por completo el espesor del material aun que recientemente se han logrado perforar materiales con un espesor de 25mm en la modalidad de pulsos.



Fuente: img.alibaba.com/533352561/

Figura 2.6. Equipo de perforación con laser

Las ventajas de la perforación con rayo láser son muy similares a las del corte en las que se incluyen:

- Tiempos de perforación muy cortos
- Adaptabilidad a la automatización
- Capacidad de penetrar materiales de difícil perforación
- Ausencia de contacto mecánico
- En comparación con los procesos convencionales el ruido, la vibración los humos producidos son de niveles bajos
- Útil para estudios de prototipos
- Buena calidad
- Zona afectada por el calor angosta

Aunque los dos aspectos que más han dificultado la popularización del procesamiento de materiales con láser han sido el alto costo del equipo y la intimidación que experimentan los trabajadores frente a un proceso de alta tecnología que requiere un buen conocimiento entre la interacción del láser y el material.

2.5 Tipos de láseres

El corte y la perforación con láser requieren un rayo láser coherente enfocado con precisión. Para estas aplicaciones se emplean predominantemente dos fuentes primarias de rayos laser, el láser de YAG pulsado que opera a una longitud de onda de 1.06micras y el láser de CO₂ que opera en forma pulsada o continua. En la tabla 2.3 se describen los mecanismos de corte básicos y el láser que se emplea en cada caso.

Tabla 2.3. Mecanismo de corte básico

A.-laser de estado sólido YAG	
Evaporación	Eliminación del material por volatilización a $>10^5 \text{W/mm}^2$
	Solo de pulso
B.-laser de gas CO₂	
Fusión	La mayor parte del material se elimina en estado líquido con ayuda de un gas inerte, a intensidad de rayo de 10^4W/mm^2
Exotérmico	La mayor parte del material se elimina en estado líquido a intensidades de rayo de 10^4W/mm^2
	El oxígeno como gas auxiliar aporta energía adicional
C.- laser de Excimer	
Foto ablación	El material se elimina por foto ablación cuando se emplea con polímeros cuyas energías de enlace están por debajo del nivel energético de los fotones del Excimer

Fuente: Manual de soldadura tomo II

En ambos procesos (corte y perforación) es necesario que se alcancen densidades de potencia de 10^4 a 10^6W/mm^2 . Esto se logra enfocando el rayo ya sea con lentes o mediante óptica de reflexión, dependiendo del tipo láser y de la longitud de onda. En todos los casos el diámetro puntual del rayo se define de la misma manera y estado por la relación 2.1

$$d=2.44KF/D.....(2.1)$$

Donde:

- d= diámetro del punto enfocado en $\mu \text{ mm}$
- K= constante que depende de la modalidad de haz óptico

- F =distancia focal del lente o espejo en mm
- D =diámetro de abertura del rayo en el espejo enfocado en mm
- λ = longitud de onda óptica del láser en μ mm

Los valores de K se dan en la tala 2.4 que dependen de la estructura modal del haz óptico y de su divergencia, para tres de los rayos más comunes

Tabla 2.4. Efecto de la modalidad de rayo sobre la colimabilidad

Tipo de láser	K
Frente de onda uniforme	1.0
Rayo gaussiano	0.86
Resonador inestable*	
a. $M=2^{**}$	4.0
b. $M=4$	3.5
*Amplificación M más utilizada	
** M razón de amplificación de un rayo anular = D.E. del rayo/D.I. del rayo	

Fuente: Manual de soldadura tomo II

En el casos de la perforación, se emplean lentes de distancia focal corta para enfocar los haces ópticos con alta potencia pico de los láseres pulsados a tamaño de punto del orden de 0.6mm para así obtener niveles de densidad de potencia por arriba de los 10^5W/mm^2 . En estas condiciones el material se volatiza y sale despedido de la pieza de trabajo, dejando un agujero parcialmente perforado. Se requieren múltiples pulsos para lograr la penetración completa.

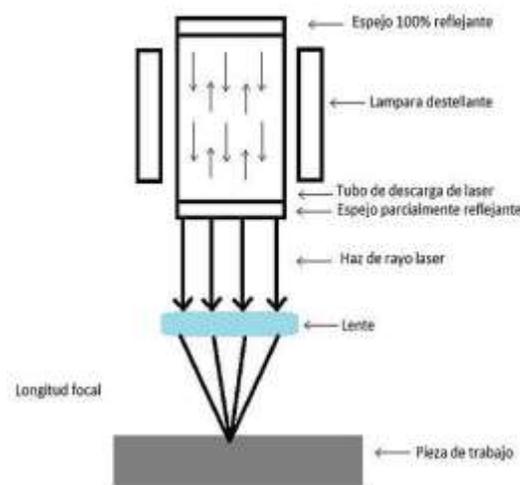
En casi todas las aplicaciones de corte es del tipo continuo y trabaja aniveles de potencia de entre 400 y 1500W un poco por debajo de las potencias pico de los láseres de pulso. En consecuencia las densidades de potencia requerida son menores y generalmente están entre los 10^4 y los 10^5W/mm^2 . Esto requiere tamaños de punto del orden de 1mm a la longitud de onda de laser de CO_2 para alcanzar las densidades requeridas.

2.6 Interacciones del láser y el material

Una característica importante es la interacción del rayo láser con el material. El lente o espejo enfoca el rayo láser original a un punto cuyo diámetro está dado por la ecuación 2.1. La ubicación (generalmente dirigida al interior del espesor de la pieza de trabajo) del plano focal en

relación con la superficie de la pieza de trabajo depende de varios factores, todos regidos por las relaciones antes mencionadas. En la práctica la ubicación exacta se determina por experimentación, adecuándola a la aplicación.

Dado que casi todos los metales son reflejantes a longitudes de láseres considerados, el acoplamiento del rayo y la pieza de trabajo son muy ineficientes y la absorción es baja. Sin embargo el coeficiente de absorción varía con la temperatura del material, la cual cambia durante la fase transitoria del proceso.



Fuente: es.wikipedia.org/wiki/corte_com_l%C3%A1ser

Figura 2.7. Operación de corte con láser

La absorción inicial débil en la superficie de la pieza de trabajo comienza a llevar a la temperatura de esta última directamente bajo el haz óptico, y esto hace que se disminuya con bastante rapidez la reflectividad. La temperatura y la absorción aumentan hasta alcanzar las temperaturas de fusión y de vaporización. Esto permite la formación de un agujero calado o trampa de radiación. A partir de este momento, el rayo láser actúa como fuente de calor lineal energética dentro del material y forma un charco fundido. Cuando el charco recibe el impacto de un chorro de gas a alta presión, el metal líquido sale despedido por la raíz de la pieza de trabajo, produciéndose el corte.

Para que se inicie el proceso de corte de agujero calado, es indispensable que la densidad de potencia sea suficiente para vencer la barrera de la reflexión. En adelante la profundidad del

corte depende de la relación de fusión y vaporización. A niveles de densidad de potencia por debajo de $5 \times 10^3 \text{W/mm}^2$, solo se logra una fusión superficial. Para obtener un agujero calado se requieren densidades de potencia de 10^4 a 10^5W/mm^2 . Dentro del intervalo de agujero calado, ocurre tanto la fusión como la vaporización. La vaporización total requerida para la perforación se logra al rebasar este intervalo.

2.7 Equipos

Para poder cortar, el láser debe estar integrado a un mecanismo que aplique el rayo y pueda manipular la pieza de trabajo. El tipo de control para estos equipos es por medio de CNC. La cabeza de corte, que consiste en un lente enfocador y un mecanismo de gas auxiliar, debe mantenerse a cierta distancia de la pieza por corte. Estos componentes están encerrados en un paquete llamado sistema de corte por láser a fin de evitar peligros para el personal.

Estos sistemas son de diseños muy variados. Existen maquinas estándar para trabajos como el corte de contornos en metal laminado perforación de alabes de turbina, pero pueden obtenerse unidades especiales para tareas como la ranuración de materiales laminados en líneas de producción.

Para obtener cortes de calidad óptima, el sistema óptico debe permanecer inmóvil ya que cualquier vibración o falta de alineación del sistema de aplicación del rayo puede producir cortes inexactos o de baja calidad. Lo cual ocasiona que sea la pieza la que se mueva y esto dificulta el trabajo ya que el área de piso del rayo debe de ser cuatro veces mayor a la pieza de trabajo.

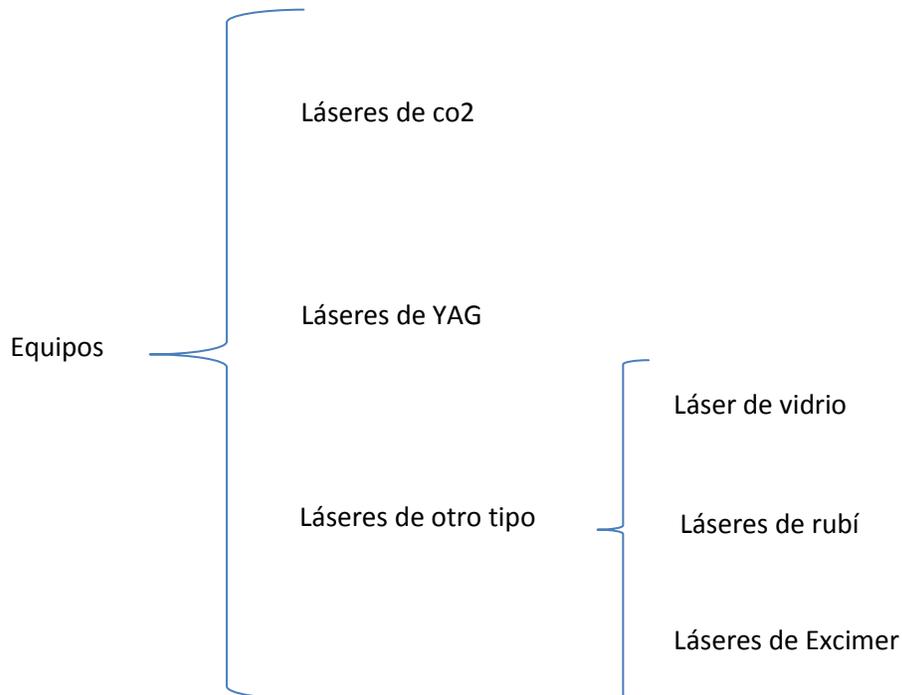
Mas sin embargo en los sistemas de rayo móvil solo se mueve la pieza de trabajo cuando se carga o se descarga la pieza de la mesa de corte. La filosofía del rayo móvil llevada al extremo está representada por el robot de grúa corrediza de 6 ejes. Los problemas de ingeniería que implica la fabricación de una grúa corrediza son similares a las de un rayo móvil pero más graves. Sin embargo la capacidad de las grúas para cortar contornos complejos hace que el esfuerzo valga la pena. En la figura 2.8 se puede ver un robot grúa de soldadura y corte por láser ocupado en la industria automotriz.



Fuente: img.directindustry.es/images.di

Figura 2.8. Robot de soldadura y corte por láser

Aunque la forma más común para clasificar los equipos es en base a su tipo de láser los cuales se describen en el esquema 2.1 clasificación de equipos por tipo de láser



Fuente: Propia.

Esquema 2.1 Clasificación de equipos por tipo de láser

2.7.1 Láseres de CO₂

El láser de dióxido de carbono (CO₂) es la fuente estándar para aplicaciones de corte de contorno. Esto se debe a que se le tipo de laser más potente y confiable de uso general.

El láser CO₂ es un dispositivo de descarga de gas que opera haciendo pasar una corriente eléctrica por un gas. En los láseres industriales se obtiene una eficiencia elevada empleando una mezcla de helio, nitrógeno y dióxido de carbono. La energía eléctrica se acopla a los gases mediante el establecimiento de una descarga luminiscente en el nitrógeno. El nitrógeno trasmite esta energía a las moléculas de CO₂ por colisiones, haciendo que un alto porcentaje de dichas moléculas alcancen un nivel energético superior.

Cuando las moléculas caen a un nivel intermedio se produce una emisión de laser a 10.6 micras en la zona de infrarrojo. Las colisiones con helio hacen que las moléculas de CO₂ vuelvan al nivel energético basal, donde el proceso pueda recomenzar. Por lo general el gas se pasa por un intercambiador de calor donde se enfría antes de reciclarlo.

Características generales

Los láseres de CO₂ pueden operar por onda continua o en diversos modos de pulsos. La frecuencia de pulsos puede ser de hasta 10khz. Los tipos más comunes de pulsaciones se denominan obturados y realzados. En el modo obturado, el láser opera a un nivel de potencia pico que está dentro de su intervalo normal de onda continua. La salida se modula para generar un ciclo de trabajo reducido. Los pulsos obturados pueden tener cualquier longitud que sea compatible con la velocidad de repetición elegida. Los láseres capaces de producir pulsos realzados tienen potencias pico varias veces mayores que su especificación de onda continua. Los pulsos realzados suelen durar unos 100 microsegundos independientemente de la velocidad de repetición.

Características especiales

La baja densidad y la elevada difusividad térmica de un medio laser gaseoso reducen su tendencia a distorsionar la luz que lo atraviesa. Esto hace posible que incluso los láseres de CO₂ de alta potencia tengan buenas cualidades ópticas. Los rayos de muchos láseres con salidas de hasta 1500watts se aproximan bastante al modo gaussiano fundamental TEM₀₀. Tales rayos se

pueden enfocar hasta el límite fijado por la difracción de la luz y no ah problemas para obtener puntos de 0.1mm de diámetro lentes de enfoque normales en láseres de CO₂.

Otra propiedad de los rayos TEM₀₀ es su baja divergencia término que describe el ángulo con el que el rayo láser se va abriendo conforme se propaga. Los valores típicos son del orden de 1 milirrandia lo que ofrece una gran flexibilidad en el diseño de máquinas ya que el láser puede situarse lejos del lente de enfoque.



Powered by DIYTrade.com

Fuente: www.drytrade.com

Figura2.9. Cortadora de laser de CO₂

Costo de operación de un láser de CO₂

En la tabla 2.5 se muestran los costos de consumibles típicos para un sistema de láseres de CO₂ que opera a 1500watss. Los costos del gas se basan en valores medidos de diferentes partes de estados unidos. Dependiendo de los materiales cortados, los costos de operación van desde 9.89 a 25.04 dólares por hora.

Tabla 2.5 Costos típicos de corte con rayo láser para un sistema de CO₂ que trabaja a 1500watts

Consumibles	Costo por hora
Electricidad	2.10
Óptica interna del láser *	2.06
Gas del laser	1.03
Lente colimador*	1.10
Gas auxiliar	
O₂ para acero al carbón 10 gauge	3.60
N₂ para acero inox de 0.060 pulg	3.60
Ar para titanio de 0.060 pulg.	18.75
*costo basado en la estimación de la vida útil de estos componentes hecha por el fabricante	

Fuente: Manual de soldadura tomo II

2.7.2. Láseres de YAG

El láser de YAG (cuyo nombre correcto es laser de granate de itrio y aluminio contaminado con neodimio) es el láser de perforación estándar en la industria, aunque por sus características también es adecuado para algunos cortes de contorno

Principio de funcionamiento

El láser de YAG contiene una barra cristalina rodeada por lámpara de xenón o criptón. El cristal es un granate de itrio y aluminio (YAG) que ha sido contaminado con neodimio. La luz de la lámpara empuja los átomos de neodimio hasta un estado excitado, desde el cual emite luz con una longitud de onda de 1.06µm. El agua que fluye alrededor de la barra enfría los átomos y los vuelve al estado basal.

Características temporales

Los láser de YAG industriales generalmente operan en modo pulsado para cortar o taladrar. La velocidad de repetición normalmente es de menos de 200 Hz. Mediante el control de la potencia alimentada a las lámparas se puede ajustar la forma y duración de los pulsos de láser. El medio

de láser sólido tiene una alta concentración de átomos emisores de luz, por lo que la potencia pico puede ser muy alto. Los pulsos de alta energía y corta duración eliminan el material cortado o taladrado.

Características especiales

Las barras de láser generan calor en el centro y se enfrían externamente. Siempre que se produce una potencia apreciable, aparece un gradiente de temperatura a lo largo del diámetro de la barra. Ese gradiente induce cambios en el índice de refracción de la barra, lo que degrada el rendimiento óptico del láser. Los láseres de YAG de alta potencia tienen salidas multimodales de alta divergencia, lo que limita la capacidad del sistema para enfocar el rayo aun punto pequeño y requiere que la cabeza del láser está cerca del área de trabajo.



Fuente: www.uslasercorp.com

Figura 2.10. Láser de YAG

Costo de operación de un sistema con perforación con láser YAG

El costo primario en la mayor parte de los procesos YAG es el recambio de las lámparas de destello. Las alamparas duran entre 1 y 10 millones de pulsos, dependiendo de la potencia empleada. En la tabla 2.6 se muestra un análisis de costos para un láser YAG que perfora a 20 pps.

Tabla 2.6 costos de operación típicos para un sistema de perforación con láser YAG

Consumibles	Costo por hora
Electricidad	.75
Óptica del láser*	1.00
Lámparas de destello*	2.00
Gas auxiliar	4.00
*costo basado en la estimación de la vida útil de estos componentes hecho por el fabricante.	

Fuente: Manual de soldadura tomo II

2.7.3. Otros tipos

Vidrio

Los láser de vidrio son muy similares a los de YAG. La barra del láser se fabrica con vidrio contaminado con neodimio, en vez de granete. Cuando se usa vidrio en vez de YAG como matriz, es posible incorporar en la barra una concentración más alta de átomos de neodimio. Esto permite a los láseres de vidrio pulsos más intensos que los láseres de YAG, haciéndolos más apropiados para el taladro profundo. Las desventajas del vidrio es que su baja conductividad térmica limita la velocidad de repetición de los pulsos a 1 pps aproximadamente, de modo que no sirve para cortar contornos.

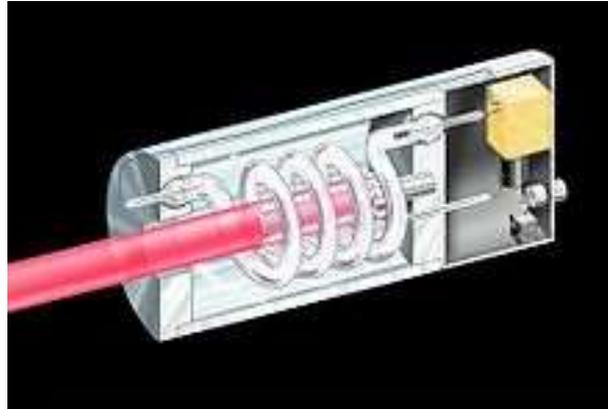


Fuente: www.xjroutter.es

Figura 2. 11. Laser de vidrio

Rubí

El rubí fue el primer material en el que se observó emisión láser. El láser de rubí es un dispositivo de estado sólido impulsado por lámpara de destello similar a los láseres de vidrio y YAG, pero emite luz visible. Aunque en gran medida ha sido sustituido por otros tipos, todavía resulta apropiado para taladrar, pues cuenta con características similares a los láseres de vidrio-neodimio.



Fuente: es.wikipedia/wiki/rubylaser

Figura 2. 12. Láser de rubí

Láseres de Excimer.

Los láseres de Excimer son láseres de gas de alta presión pulsados que emiten a longitudes de onda dentro de la banda del ultravioleta. El término Excimer es una contracción de las palabras dímico excitado. Un dímico es básicamente una molécula que existe solo en el estado excitado, como el fluoruro de criptón. Estas moléculas se forman cuando la mezcla de gases apropiada (por lo regular un gas noble y un halógeno) se excita en una descarga eléctrica pulsada. La emisión láser ocurre cuando la molécula excitada cae al estado inferior.



Fuente: www.clinicaeurolaser.es

Figura. 2.13. Laser de Excimer

CAPITULO 3

CORTE CON CHORRO DE AGUA

3.1. Introducción

El maquinado con un chorro de agua, conocido también como maquinado hidrodinámico, corta una amplia variedad de materiales, tanto metales como no metales, empleando un chorro de agua de alta velocidad.

El chorro se forma haciendo pasar el agua a alta presión de 30000 a 60000 psi por un orificio de 0.1 a 0.6mm de diámetro hecho en un zafiro artificial. La velocidad del chorro va desde 520 hasta 914 m/s. A estas velocidades y presiones, el agua erosiona muchos materiales, actuando como una sierra.

La corriente de agua, con una velocidad de flujo de 0.4 a 19l/min por lo regular se controla por un sistema de robot o de grúa corrediza, pero las piezas de trabajo pequeñas pueden hacerse pasar a mano por un chorro de agua estacionario. El intervalo típico de distancias entre la boquilla y el trabajo es de 0.25 o 25mm, prefiriéndose las distancias inferiores a los 6.4mm.



Fuente: www.empresasantalucia.com

Figura 3.1. Corte de metal con chorro de agua

Los metales y otros materiales se cortan añadiendo un abrasivo pulverizado al chorro de agua. Con este método, llamado maquinado Hidro-abrasivo o maquinado con chorro abrasivo, las partículas abrasivas (frecuentemente granate) son aceleradas por el agua y realizan la mayor

parte de la acción de corte. Se requieren velocidades de flujo de agua más alta para acelerar las partículas abrasivas.

Los materiales se cortan limpiamente, sin bordes raídos (a menos que la velocidad transversal sea demasiado alta), sin calor, y generalmente con mayor rapidez que con una sierra de banda. Se produce un corte angosto y terso. No hay problemas técnicos, de des laminación o de deformación cuando se aplica correctamente. Tampoco se produce polvo.

Los sistemas de chorro de agua y de chorro de agua abrasivo compiten con procesos como las sierras de banda, la cuchilla recíprocantes y el corte con flama, plasma y laser. Pueden procesar materiales que sufren daños por el calor de procesos térmicos o que atascan las herramientas de corte mecánicas. En algunos casos, pueden sustituirse con efectividad de los costos a tres operaciones:

- Desbastado
- Maquinado
- Eliminación de piezas contorneadas

La gama tan amplia de materiales que se pueden cortar con los sistemas de chorro de agua y chorro de agua abrasivo pueden verse en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Velocidades de corte con chorro de agua para diversos materiales

Materiales	Espesor		Velocidad de recorrido	
	pulg	mm	Pulg/min	mm/s
Plástico ABS	0.080	2.0	80	34
Cartón	0.055	1.4	240	102
Cartón corrugado	0.250	6.4	120	51
Tarjeta de circuitos	0.103	2.6	100	423
Cuero	0.063	1.6	3800	1600
Plexiglás	0.118	3.0	35	15
Hule	0.050	1.3	3600	1500
Alfombra con respaldo de hule	0.375	9.5	6000	2500
Madera	0.125	3.2	40	17

Fuente: Manual de soldadura tomo II

Muchas veces se piensa que en el maquinado con chorro de agua y abrasivo como un sistema de procesamiento de materiales en láminas, pero no solo sirve para esto. Como ejemplos de cortes que ponen a prueba los límites del proceso están el acero al carbono de 190mm de espesor, aluminio 7075 T-6 de 75 mm de espesor, grafito/epoxi de 64mm de espesor con 470 capas y titanio de 250mm de espesor

3.2 Historia

Los antiguos egipcios usaban arena combinada con agua para operaciones de minería y limpieza. Las lijadoras de arena de este siglo emplean una corriente a presión (500psi) para limpiar y quitar pintura. En 1968 Franze patentó la idea de un sistema de corte de chorro de agua a muy alta presión. Su patente para producir un flujo coherente que cortara implicaba la adición de un polímero líquido de cadena larga a la corriente de agua para evitar que se disgregara al salir por el orificio de la cámara a presión.

Antes de su aplicación como herramienta de corte en la industria, el agua a alta presión se usó para cortar tanto en silvicultura como en minería. En la década de los 70 se desarrolló tecnología de corte con chorro de agua de alta presión (30000 a 55000 psi) para cortar no metales.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.2. Equipos de corte con chorro de agua de los años 40

El primer sistema comercial de corte con chorro de agua se vendió en 1971, para cortar piezas de muebles de bloques de papel laminado que las sierras de banda, las sierras reciprocantes y los enrutadores no podían manejar bien.

En 1983 se modificó el proceso por adición de abrasivos como partículas de sílica y granate al chorro para cortar metales, compuestos y otros materiales. Hoy en día el corte con chorro de agua es usado en muchos aspectos y ha cambiado la forma en que muchos productos se fabrican. Muchos tipos de chorros de agua existen en la actualidad, incluyendo jets de agua corriente y chorros de agua abrasivo.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.3. Equipos de corte con chorro de agua moderno

3.3. Usos y ventajas

La gran variedad de aplicaciones y la ausencia de calor son las ventajas del corte con chorro de agua. La versatilidad del proceso queda demostrada por el corte simultáneo de acero al carbón, latón, cobre, aluminio y acero inoxidable.

Los chorros abrasivos son especialmente ventajosos para cortar laminados de diferentes materiales, incluido emparedados de metales y no metales. Puesto que el chorro abrasivo puede penetrar en casi cualquier material, no se requiere perforado previo para iniciar el corte, y este puede ser omnidireccional.

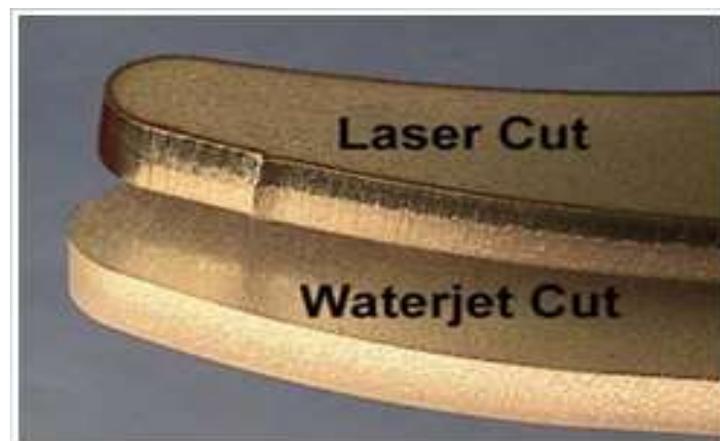
Se puede anidar y cortar múltiples figuras dependiendo de los límites del sistema de control y del tamaño de la pieza de trabajo. El ahusamiento del corte generalmente no representa un problema a menos que la velocidad del corte sea demasiado alta, las piezas de trabajo sean demasiado gruesas o se usen boquillas desgastadas. Se requiere muy poca o ninguna eliminación de rebabas y el proceso se adapta con facilidad al control robótico.

No hay herramientas que se desgasten, aparte del orificio y la boquilla, aunque puede haber algún desgaste del mecanismo de robot. Se generan fuerzas laterales mínima, lo que simplifica la accessorización.

Las tolerancias dependen del equipo y del material espesor de la pieza de trabajo, pero pueden ser tan exactas como $+0.1$ mm en las dimensiones y $+ 50$ mm en la colocación. Con láser se obtienen tolerancias más estrechas. Los acabados presentan amplias variaciones. Se tiene resultados de acabados de chorro de agua en componentes aeroespaciales en el intervalo de 63 a 250 μ pulg.

En el corte con chorro de agua simple, el ancho del corte suele ser de 0.13mm o más; en el corte con chorro de agua abrasiva suele ser de 0.8mm o más. El chorro de agua tiende a abrirse al salir de la boquilla, por lo que el corte es más ancho en la parte baja que en la alta. La divergencia del corte puede reducirse agregando al agua polímeros de cadena larga, como el óxido de polietileno, o reduciendo la velocidad del corte.

Con excepción de los sistemas avanzados para aplicaciones aeroespaciales, la mayor parte de los sistemas de chorro de agua y abrasivo controlados por CNC son relativamente fáciles de programar.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.4. Comparación de acabados de laser con chorro de agua

3.4. Limitaciones

Las velocidades de corte relativamente bajas son la principal limitación del sistema de corte con chorro de agua en la tabla 3.2 se presentan las velocidades corte típicas.

Tabla 3.2. Velocidades de corte de diversos materiales con chorro de agua abrasivo

Materiales	Espesor		Velocidad de recorrido	
	Pulg	mm	Pulg/min	mm/s
Aluminio	0.125	3.2	40	17
Aluminio	0.50	12.7	18	8
Aluminio	0.75	19	5	2
Latón	0.125	3.2	20	8.5
Latón	0.425	10.8	5	2
Bronce	1	25.4	1	0.5
Cobre	0.063	1.6	35	15
Cobre	0.625	15.9	8	3
Plomo	2.0	50.8	8	3
Acero al carbón	0.75	19.1	8	3
Hierro colado	1.5	38.1	1	0.5
Acero inoxidable	0.1	2.5	25	25
Acero inoxidable	1	25.4	4	2
Acero inoxidable	4	101.6	1	0.5
Placa blindada	0.75	19.1	10	4
Inconel	0.625	15.9	8	3
Inconel 718	1.25	31.8	1	0.5
Titanio	0.025	0.6	60	25
Titanio	0.5	12.7	12	5
Acero de herramienta	0.25	6.4	10	4
Cerámica(96% de aluminio)	0.25	0.6	6	2.5
Fibra de vidrio	0.1	2.5	200	85
Fibra de vidrio	0.25	6.4	100	42
Vidrio	0.25	6.4	100	42
Vidrio	0.75	19.1	40	17
Grafito/epoxy	0.25	6.4	80	34
Grafito/epoxy	1	25.4	15	6
Kevlar	0.375	9.5	40	17
Kevlar	1	25.4	3	1.3
Lexano	0.5	12.7	12	5
Compuesto con matriz metálica	0.125	3.2	30	13
Resina fenolica	0.5	12.7	10	4
Plexiglás	0.175	4.4	50	21
Correa de hule	0.300	7.6	200	85

Fuente: Manual de soldadura tomo II

Otra limitación es que debe contarse con un dispositivo para recolectarse el líquido del chorro de corte. Los costos de capital iniciales son elevados debido a las bombas y la cámara de presión requeridas para impulsar y dirigir el chorro de agua.

El material cortado debe ser más blando que el abrasivo utilizado. Los metales dúctiles tienden a sufrir esfuerzos de flexión por el chorro de abrasivo y presentan rebabas de salida. Los materiales cerámicos cortados con chorro de agua presentan una reducción en su resistencia.

Las boquillas deben ser remplazadas cada dos o cuatro horas en los sistemas de chorro de agua con abrasivo. Las partículas desgastan las boquillas de carburo hasta que pierden su circularidad, y el chorro pierde su simetría, haciendo que se deteriore la calidad del corte.

El agua que se suministra al equipo debe de ser filtrada con un micraje de 0.5, con el fin de que el mantenimiento al equipo se haga menor. En algunos casos el agua puede ser tomada de la llave siempre y cuando la dureza del agua no sea demasiado alta.

La vida sin fatiga de los bordes cortados con chorro de agua en estructuras aeroespaciales críticas puede ser menor que la de los bordes cizallados crudos sin las partículas abrasivas utilizadas son gruesas.

3.5. Fundamentos

El agua de entrada pasa primero por una bomba elevadora para aumentar su presión a cerca de 190 psi y filtrarla. Luego, una bomba intensificadora la cual es una bomba reciprocante de doble acción de impulso hidráulico se encarga de crear una presión de agua de 30000 a 60000 psi con una velocidad de flujo de hasta 13.3 l/min. El agua es forzada a pasar por un orificio de zafiro, formando el chorro. La velocidad del chorro depende de la presión del agua.

Los abrasivos secos se pueden alimentar desde una tolva a una cámara de mezclado, donde el agua acelera las partículas hasta velocidades supersónicas. La suspensión de velocidad se enfoca y sale por la boquilla en un flujo de 0.5 a 2.3mm de diámetro. Pueden obtenerse chorros de agua de hasta 80µmm, adecuados para cortar papel. Los chorros abrasivos por lo general no tienen diámetros menores que 0.23mm.

Dependiendo de las propiedades del material para cortar el corte real es un resultado de la erosión, el cizallamiento o el vencimiento bajo la acción de campos de esfuerzos localizados que cambian rápidamente. Los procesos no producen distorsiones térmicas ni mecánicas, aunque en los metales hay un ligero endurecimiento en la superficie de corte. Corriente abajo del corte, el agua o el flujo de agua y abrasivo se recoge en un tanque o colector.

3.5.1. Corte con chorro de agua

El corte por chorro de agua pura es el método original de corte por agua. Las primeras aplicaciones comerciales se desarrollaron entre principios y mediados de la década de 1970, con el corte de cartón corrugado.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.5. Corte con chorro de agua pura

Los mayores usos del corte por chorro de agua pura son los pañales descartables, el papel tisú y los interiores de automóviles. En los casos del papel tisú y de los pañales descartables, el proceso de chorro de agua genera menor humedad en el material que la causada al tocarlo o respirar sobre él.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.6. Boquilla para corte de chorro de agua pura

Atributos del chorro de agua pura

- Chorro muy delgado (de 0,004 a 0,010 pulgada de diámetro es el rango común)
- Geometría sumamente detallada
- Muy poca pérdida de material debida al corte
- Corte no térmico
- Corte de materiales muy gruesos
- Corte de materiales muy finos
- Por lo general corta muy rápidamente
- Puede cortar materiales blandos y ligeros
- Fuerzas de corte sumamente bajas
- Aparejamiento sencillo
- Operación las 24 horas del día

3.5.2. Corte con chorro de agua abrasivo

El chorro de agua abrasivo difiere del chorro de agua pura sólo en algunos aspectos. En el chorro de agua pura, el chorro supersónico erosiona el material. En el chorro de agua abrasivo, el chorro de agua acelera las partículas abrasivas y estas partículas, no el agua, erosionan el material.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.7. Boquilla corte con chorro de agua abrasivo

El chorro de agua abrasivo es cientos, si no miles de veces más potente que el chorro de agua pura. Tanto el chorro de agua como el chorro de agua abrasivo tienen sus aplicaciones. Mientras

que el chorro de agua pura corta materiales blandos, el chorro de agua abrasivo corta materiales duros, tales como metales, piedra, materiales compuestos y cerámica.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.8. Corte con chorro de agua abrasivo

Los chorros de agua abrasivos que utilizan parámetros estándar pueden cortar materiales hasta una dureza igual y ligeramente superior a la cerámica de óxido de aluminio.

Atributos del chorro de agua abrasivo

- Extremadamente versátil
- No se ve afectado por el calor
- Fácil de programar
- Geometría sumamente detallada
- Corte de material delgado
- Corte de grosores de 10 pulgadas
- Corte en pila
- Poca pérdida de material debida al corte
- Fácil de aparejar
- Fuerzas de corte reducidas (menos de 1 libra durante el corte)
- Una configuración de chorro para casi todos los proyectos con chorro abrasivo
- Se cambia fácilmente del uso con un solo cabezal a varios cabezales
- Cambie rápidamente de chorro de agua pura a chorro de agua abrasivo

3.6. Variaciones del proceso

La profundidad del corte y sus características superficiales tiene las siguientes variables:

1. Presion y diámetro del chorro de agua
2. Tamaño, tipo y velocidad de flujo del material abrasivo
3. Velocidad transversal
4. Angulo de corte
5. Número de pasadas

Si se aumenta la presion y el diámetro de chorro de agua y se reduce la velocidad transversal, será posible cortar con el chorro de agua piezas de trabajo de mayor espesor y densidad. Al aumentar la velocidad de flujo del agua, el abrasivo, o ambos, y al aumentar el tamaño del abrasivo, aumenta la velocidad de un corte de chorro abrasivo. El empleo de partículas de abrasivo más pequeñas y velocidades más bajas mejoran la calidad del borde en los cortes.

En el corte con chorro abrasivo, un aumento de presion de agua permite cortar placas de mayor espesor, pues las partículas adquieren mayor velocidad. La presion óptima tiende a permanecer dentro del intervalo de 30000 a 45000 psi, ya que las presiones más elevadas implican mayores costos de mantenimiento del equipo con beneficios de poca monta para el proceso.



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.9. Angulo de corte

Las partículas de abrasivo finas, por debajo de la malla de 150, son relativamente ineficaces; el tamaño más efectivo de aplicación general para el corte de metales es la malla de 60 u 80. En el caso de cerámicas muy duras, en ocasiones se emplea carburo de boro como abrasivo.



Fuente: en.made-in-china-com

Figura 3.10. Carburo de boro

Las velocidades de flujo de abrasivo altas resultantes en costos de corte elevados: una velocidad de flujo nominal de 1 kg/min a 0.24 dólares/kg resulta en un costo por hora de 14.40 dólares, sin incluir los costos de limpieza y manejo posterior. Esto representa una fracción considerable del costo por hora total. Estas velocidades de flujo tan altas también ocasionan un rápido desgaste de las boquillas mezcladoras.

Aunque muchas operaciones se completan con una sola pasada, el corte óptimo de metales gruesos puede requerir varias pasadas a una velocidad transversal óptima. En cada pasada, la distancia de separación será mayor, por lo que se requiere una velocidad transversal más lenta.

3.7. Equipo

Los componentes claves del equipo para un sistema de chorro de agua o de chorro abrasivo son:

1. Bomba o intensificador
2. Tubería y tanque o unidad colectora
3. Grúa corrediza, robot o unidad de aplicación de chorro de agua
4. Boquilla



Fuente: www.flowwaterjet.com

Figura 3.11. Bomba intensificadora

En el caso de los chorros de agua con abrasivo, hay un sistema de alimentación del abrasivo que incluye una tolva, una válvula medidora y unidad de mezclado, que incorpore las partículas de abrasivo al chorro de agua. El equipo puede adquirirse desde componentes individuales hasta maquinas herramientas acabadas. Los sistemas como los robots de 5 ejes por lo regular se construyen a la medida.



Fuente: www.cnwaterjet.es

Figura 3.12. Robot multiejes para corte chorro de agua

3.7.1. Consumibles

El principal componente de desgaste del equipo es el orificio de zafiro y, en sistemas de abrasivo, la boquilla de carburo para el abrasivo. En los sistemas de chorro de agua pura, un zafiro artificial puede durar hasta 200 horas. En los sistemas de abrasivos, las boquillas de carburo duran apenas de dos a cuatro horas. Otros consumibles son el agua, el abrasivo y la electricidad. Las partículas de abrasivo se gastan a razón de 0.1 a 1.4kg por minuto.

3.7.2. Accesorios

Puede usarse equipo auxiliar para cargar y descargar las piezas de trabajo, como grúas, robot de grúa corrediza o robots de pedestal. Este equipo para manejo del material no suele formar parte del sistema, robótico o de otro tipo, que impulsa la cabeza de corte por chorro de agua.

Para el corte de contornos en cinco ejes puede ser necesario instalar un dispositivo recolector especial para detener el chorro de agua y disipar su energía. El agua dura puede requerir un sistema de tratamiento de aguas.

Una operación indispensable es la limpieza periódica de la mesa de agua para retirar las partículas de abrasivo y metal generadas durante el corte.

3.7.3. Costo

El costo total de operar un sistema de chorro de agua con abrasivo cuyo costo de capital de inversión fue de 200,000 dólares asciéndase 27 dólares/hora. Esto incluye mantenimiento, electricidad, aditivo abrasivo y desgaste de boquillas. Los costos de mano de obra serian adicionales.

3.8. Seguridad

El chorro de agua o el chorro de agua abrasivo pueden cortar con facilidad la carne o el hueso, el operador debe protegerse. El ruido generado durante el corte suele ser del orden de 80 a 90 decibeles, pero puede alcanzar los 120 decibeles. Los recintos de seguridad provistos para proteger al operador de la operación de corte están diseñados para absorber el sonido, pero se recomienda que el operador utilice protección adicional para los oídos.

El personal de mantenimiento debe estar capacitado para manejar el equipo y las tuberías de agua de alta presión. La instalación de corte debe diseñarse de modo que proteja contra una descarga de agua a alta presión en caso de ruptura de alguno de los tubos. Se utilizan sensores de presión para apagar el sistema cuando se presenta una falla en la tubería.

CAPITULO 4

MAQUINADO POR ELÉCTRODESCARGA

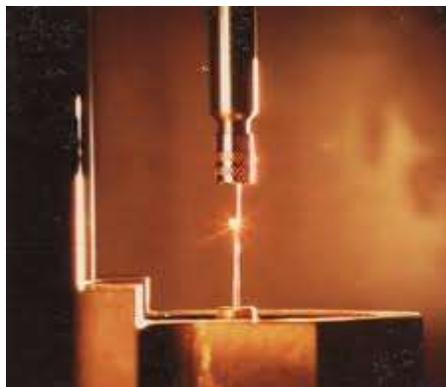
4.1. Introducción

El maquinado por electro descarga, conocido también como EDM por sus siglas en inglés, Se podría definir como el método de arranque de material por medio de descargas eléctricas controladas, que saltan, en un medio dieléctrico, entre un electrodo (herramienta de trabajo) y la pieza a mecanizar.

La duración de la chispa es muy corta, pues suele variar desde 1 ó 2 microsegundos a 2 milisegundos, según los regímenes de mecanizado, y va acompañada de un gran aumento de temperatura, que suele alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados.

Esto supone una concentración del efecto térmico en un volumen muy reducido de material, ya que la rapidez de la chispa no es favorable a la propagación del calor por conducción a través de todo el volumen de la pieza, dando como resultado la fusión e incluso evaporación de dicho volumen de material.

Al añadir a esto los efectos dinámicos de la propia descarga y del medio dieléctrico, se obtiene en la pieza un cráter de forma semiesférica, cuyo volumen depende de factores tan diversos como la energía y la duración de la descarga, la naturaleza del dieléctrico y, las propiedades físicas, la polaridad y la naturaleza del material del electrodo y de la pieza.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.1. Descarga de un EDM.

4.2. Historia de la electroerosión

Desde que la electricidad comenzó a dar sus primeros pasos, se observó el efecto destructivo producido por la chispa eléctrica al saltar entre dos contactos en el momento de su separación. Este efecto incitó a numerosos científicos a profundizar en su investigación, con el fin de evitarlo, y ello, unido a una necesidad de la época de buscar un método nuevo de mecanizado diferente a los convencionales que utilizaban herramientas mecánicas, llevó a la idea de utilizar el citado efecto destructivo como método de reproducción de formas. En 1943, en plena Segunda Guerra Mundial, y dada la escasez de oro y cobre, los científicos soviéticos B.R. y N.I. Lazarenko establecieron un plan de pruebas para comprobar la influencia de determinados parámetros en el desgaste de los contactos mediante descargas de condensadores.

Si bien su mayor interés investigador era cómo minimizar el efecto de las descargas, se percataron de que bajo ciertas condiciones el desgaste se maximiza, lo que les llevó a pensar en utilizar esta técnica como una nueva tecnología para el arranque de material.

Para ello, pusieron a punto el primer circuito generador de descargas erosivas, también conocido como "circuito Lazarenko", y desde entonces se ha denominado con la palabra "**electroerosión**" a esta nueva técnica de mecanización de los metales.

La característica más importante de la electroerosión es la posibilidad de erosionar cualquier tipo de material conductor, independientemente de su dureza, ya que los factores que influyen en los resultados no son los puramente mecánicos como dureza, tenacidad, etc. sino los térmicos como conductividad térmica, temperatura de fusión, etc.

Junto a esta característica, hay que citar la capacidad de reproducir la forma del electrodo-herramienta, que en adelante serán llamados tan sólo "electrodo", lo cual supone una gran ventaja para el caso de piezas de formas complicadas.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.2. Primera máquina ONA de electroerosión (1956)

De este modo, parece ser que no sería muy descabellado hablar de “revoluciones tecnológicas” o “grandes hitos tecnológicos” cuando se haga referencia a tales avances de la electroerosión. Las primeras máquinas de electroerosión que aparecieron hacia los años 1948-1950, eran básicamente máquinas-herramienta convencionales, tales como taladros, etc. que habían sido transformadas parcialmente para las necesidades de la electroerosión, adaptándoles un generador, un tanque de trabajo, etc.

Pero fue a mediados de la década de los 50 cuando aparecieron en el mercado las primeras máquinas de electroerosión concebidas como tales, siendo alguna de sus aplicaciones iniciales la destrucción de brocas y machos rotos en piezas.

Los primeros generadores que existieron, denominados de relajación, producían un gran desgaste de los electrodos, del orden del 100% en volumen, pero esto no fue impedimento para que los sectores industriales se fijasen en la naciente tecnología.

Al igual que los avances de la electrónica tuvieron su influencia en otras áreas de la tecnología, el poder sustituir los generadores de relajación por los transistorizados, supuso para la electroerosión el segundo gran hito, cosa que ocurrió hacia inicios de los 60. De hecho, la

reducción de los índices de desgaste de los electrodos a niveles del 0'5% en volumen, consecuencia directa del uso de los generadores transistorizados, abrió las grandes puertas de la industria del molde, matricería, forja, etc.

Hasta esas épocas, la única electroerosión conocida era la penetración, y su aplicabilidad en el mercado era un hecho real y ampliamente aceptado.

Hacia finales de los 60 y comienzos de los 70, surge la idea de desarrollar la tecnología de las máquinas de electroerosión por hilo, hecho que debería ser considerado como el tercer gran hito de la electroerosión. Si bien la electroerosión por hilo se ha desarrollado gracias a la evolución de la electrónica y, más concretamente, a los controles numéricos, estos desarrollos tecnológicos también han tenido su influencia en la electroerosión por penetración. En efecto, puede cifrarse en los inicios de la década de los 80 el comienzo del cuarto gran hito de la electroerosión que es el que liga a la tecnología de los CNC con la electroerosión por penetración.

Un factor importante para la electroerosión por penetración es la aplicación de la función orbital, que consiste en desplazar a la pieza paralelamente a sí misma a lo largo de una circunferencia en cuyo centro se encuentra el electrodo, el cual o bien está quieto en su posición o bien está animado de un movimiento según el eje Z.

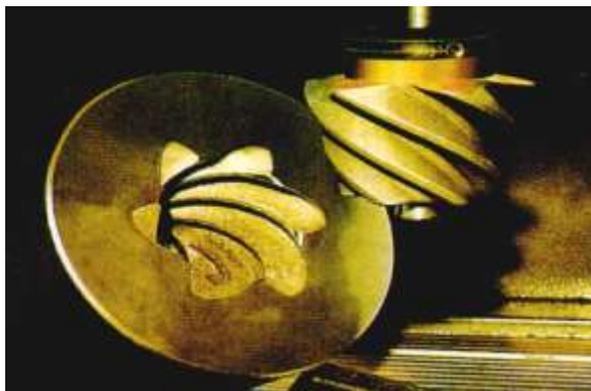
Al igual que en la máquinas de hilo, la revolución tecnológica de los CNC en las de penetración supone más un nuevo modo de trabajar que un avance puntual, y la evolución, que este avance ha supuesto en las máquinas de electroerosión por penetración, fue tan importante que al cabo de poco más de una década (a comienzos de los 90) prácticamente la totalidad de las máquinas producidas por los fabricantes de primera línea ya eran de control numérico.

Este cuarto gran hito de la electroerosión ha permitido aparecer en el mercado un nuevo concepto de máquina, el centro de erosionado, que representa a la máquina totalmente automatizada, y equipada de sistemas de intercambio de electrodos y piezas para permitir largos periodos de trabajo en modo in atendido. Pero, por otra parte, la evolución tecnológica ha aportado nuevos materiales, tales como los diamantes poli cristalinos, las cerámicas, los composites de matriz metálica, etc., cuyo mecanizado por electroerosión puede abrir nuevos e interesantes campos de aplicación

4.3. Partes de un EDM

Cuando aparecieron las primeras máquinas de electroerosión eran todas de penetración, pero la evolución tecnológica permitió que a finales de los setenta apareciesen las primeras máquinas de hilo, gracias al gran desarrollo que desde esas fechas ha experimentado la tecnología de los controles numéricos.

La diferencia fundamental que identifica a ambos tipos de máquina es que en las de penetración el electrodo tiene una forma tridimensional y en una operación de erosión con movimiento de un eje, consigue realizar en la pieza una cavidad tridimensional; en tanto que en las de hilo el electrodo tiene forma de un alambre que va cortando la pieza de acuerdo al programa de interpolación que va ejecutando el control numérico asociado.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.3. Electrodo y pieza mecanizada.

Esta diferencia funcional hace que tanto la estructura de la máquina como el número de ejes e incluso el dieléctrico sean diferentes en ambas ramas de la tecnología de la electroerosión.

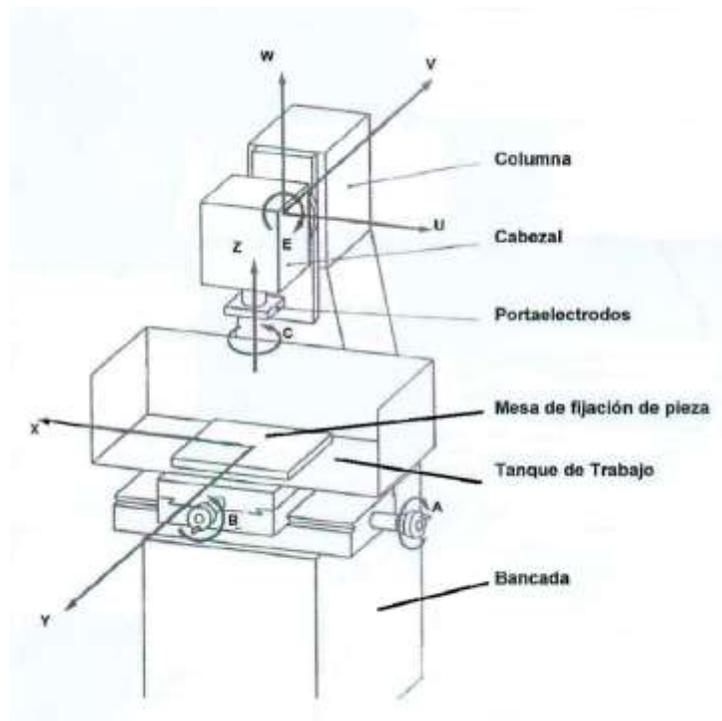
No obstante, los elementos básicos de ambos tipos de máquina son los mismos. Las partes fundamentales de un edm son las siguientes:

- Una bancada o armazón, que sirve de base para los demás elementos.
- La mesa de trabajo.
- La unidad de filtrado, con el sistema de circulación de dicho líquido, su filtrado, enfriamiento, etc.
- El generador de impulsos, que puede estar incorporado en la bancada, pero que generalmente se halla en un armario aparte, y se sitúa al lado de la máquina.

- Una unidad de CNC, que permite unos muy elevados niveles de automatización, aunque tales unidades pueden no estar incorporadas en todas las máquinas.

4.3.1. Sistema de ejes de un EDM

Dados los diferentes conceptos constructivos de máquina que existen, además de las dos tipologías básicas de penetración e hilo, y de las numerosas variantes que pueden ser utilizadas para dar solución al amplio abanico de aplicaciones de la electroerosión, la asociación alemana VDI desarrolló la norma VDI 3402 en la que se definían los diferentes ejes de cualquier máquina de electroerosión.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.4. Partes de un EDM y ejes de trabajo

4.3.2. Armazón

Constituye el esqueleto de la máquina que, aunque puede tener formas diversas ha de estar concebido para servir de base de sujeción a todos los elementos y dispositivos necesarios para el proceso de electroerosión, tales como los dedicados al accionamiento del sistema porta electrodos, en las de penetración, al sistema de movimiento y guiado del hilo, en las de hilo, y a la mesa de trabajo con el tanque de dieléctrico por otra.

Además, estos dispositivos deben estar dispuestos de forma que sean fáciles las maniobras en ellos, tales como el cambio de electrodos o la puesta a punto de las piezas a mecanizar. En máquinas pequeñas, normalmente, en la construcción del armazón se adopta la forma de cuello de cisne.

4.3.3. El cabezal (máquinas de penetración)

El cabezal de una máquina de electroerosión es un elemento esencial de la misma, ya que lleva consigo todo el complejo sistema de mecanizado automático.

Su parte principal es el servo sistema de control que actúa sobre el porta electrodos asegurando un desplazamiento vertical del electrodo, siempre sobre el mismo eje. La rigidez de estos elementos ha de ser muy cuidada.

El servo sistema de control es el encargado de mantener el gap constante. En el proceso de electroerosión se van desgastando ambos electrodos, lo cual daría como consecuencia su separación en el momento en que el gap se hubiera agrandado. La velocidad de arranque de material y el desgaste dependen de la intensidad de la descarga y del tiempo de impulso.

Según sean las dimensiones del electrodo, ambos polos tenderán a separarse en un tiempo más o menos corto. Por ello el servo sistema de control ha de tener gran velocidad de respuesta para acercar el electrodo a la pieza y un avance muy preciso.

Asimismo hay casos en los que el electrodo y la pieza entran en contacto directamente, produciéndose un cortocircuito. En este caso el servo sistema de control debe de separarlos automáticamente con gran rapidez.

Este movimiento automático se realiza aprovechando la relación que existe entre la tensión media entre electrodos y su distancia. Toda variación de esta distancia se traduce automáticamente en una variación y en el mismo sentido de dicha tensión. Midiendo con la ayuda de un dispositivo apropiado la desviación de dicha tensión como señal de error, es posible regular automáticamente el avance y mantener constante la distancia entre electrodos.

En el caso de cortocircuitos, una de las causas que los provoca es un avance excesivamente rápido del electrodo y otra es el exceso de partículas en el gap. Por ello el servo sistema de control debe de regular el avance con una respuesta muy rápida y precisa.

Asimismo el cabezal comporta una serie de órganos que sirven para parar la máquina automáticamente al final del trabajo y para la lectura de la posición del electrodo.

4.3.4. La mesa de trabajo

La mesa de trabajo es la unidad en la que se fija la pieza para su mecanización.

Según sea el concepto constructivo de la máquina, el sistema de coordenadas que permite los desplazamientos relativos entre la pieza y el electrodo puede hacer que sea éste o bien la mesa el elemento móvil.

Las máquinas de Electroerosión se pueden considerar como semi puntea dotas, lo que indica que la precisión del recorrido del porta electrodos es de algunas micras en el total de su carrera y la precisión de desplazamiento relativo entre la mesa y el electrodo es del orden de 0,01 mm. En carreras de unos 350 mm.

Envolviendo a la mesa de trabajo se halla el tanque de trabajo, que se llena de líquido dieléctrico, y es donde se efectúa el mecanizado. El volumen de dicho tanque depende del tamaño de la pieza y de la potencia del generador.

4.3.5. Unidad de filtrado

Esta unidad es la encargada de extraer del líquido dieléctrico los residuos del material arrancado durante el proceso de electroerosión.

Además de los elementos necesarios para la función de filtración, esta unidad incluye los dispositivos necesarios para asegurar el envío del líquido hacia el tanque de trabajo y poder ejecutar los diferentes tipos de limpieza de la zona de trabajo.

4.3.6. Control Numérico (CNC)

La evolución tecnológica de la electrónica ha permitido que desde comienzos de la década de los ochenta comenzase la incorporación de los controles numéricos a las máquinas de electroerosión.

De este modo, en el plazo de veinte años, la práctica totalidad de las máquinas de electroerosión ya iban equipadas con unidades CNC, que permitían la realización de una muy variada gama de funciones, las cuales, en conjunción con la programabilidad de los regímenes de potencia de los generadores, el control del estado del proceso y los sistemas automáticos de intercambio de electrodos y piezas, han supuesto, desde entonces, un muy elevado grado de automatización y la posibilidad de trabajar en modo in atendido durante largos períodos de tiempo.

4.4. El Generador

El generador es uno de los elementos fundamentales de la máquina de electroerosión. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando diversos tipos. Principalmente se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Generadores de relajación.
- Generadores de impulsos transistorizados.

La tensión de mantenimiento de las descargas cebadas es característica de cada pareja de metales electrodo-pieza y es independiente de la corriente de la descarga.

Así pues, el generador que proporciona los impulsos o descargas erosivas tiene como fundamento el proporcionar la tensión necesaria para el cebado o encendido de la descarga así como para su mantenimiento. Además, tiene que limitar la corriente de las descargas así como imponer su duración en el tiempo y la frecuencia de sucesión de las descargas.

4.4.1 Generadores de Relajación

Inicialmente, el primer circuito generador de descargas eléctricas para la electroerosión, fue el denominado “Circuito Lazarenko” que recibe el nombre por los investigadores que lo desarrollaron.

El circuito Lazarenko es de gran simplicidad y su elemento más característico es un condensador que es alimentado por medio de una fuente de corriente a través de una resistencia

El condensador está conectado en paralelo al electrodo y la pieza, de forma que cuando la tensión en bornes del condensador supere a la tensión de ruptura del dieléctrico, situado entre electrodo y pieza, éste se ionizará y la energía almacenada en el condensador se descargará bruscamente por el canal de descarga abierto en el dieléctrico, en la zona de erosión.

Pero este circuito tiene un inconveniente y es que el circuito de descarga del condensador actúa como un circuito oscilante al comportarse el cable de dicho circuito como una autoinducción. Debido a esta oscilación, se produce una inversión periódica de la tensión y la corriente hasta que la energía acumulada en el condensador se haya agotado.

Está claro que la duración de la descarga vendrá impuesta por el período de oscilación, con lo que es evidente que la energía, la corriente y la duración de la descarga están ligadas y no pueden ser independientemente variadas.

Además, dicha oscilación produce una inversión periódica de la polaridad durante la descarga, lo cual impone una limitación en la elección de los materiales de los electrodos, al tener que soportar alternativamente las dos polaridades.

Aunque se haya hablado de una resistencia y un condensador, estos generadores van equipados por sendas baterías de resistencias y condensadores que permiten una relativamente extensa gama de frecuencias de descarga.

Para poder aumentar las frecuencias de trabajo, se evolucionó añadiendo una bobina de autoinducción tras la resistencia con lo cual el período de carga del condensador era inferior.

Pero esto traía consigo otro problema y es que parte de la energía del condensador pasaba a la autoinducción, con lo cual la tensión en bornes del condensador variaba continuamente y, en consecuencia, variaba la energía de las descargas, que es proporcional al cuadrado de la tensión

Además, la variación de la energía de las descargas suponía grandes diferencias en el estado de rugosidad de las piezas obtenidas y las variaciones de tensión suponían, a su vez, continuas variaciones del gap.

Para evitar estos problemas se conectó en paralelo a la resistencia y a la bobina, un diodo destinado a cortar las crestas de la tensión de carga a partir de un determinado valor, lo cual permitía una constancia del gap y de la rugosidad.

Así pues, los circuitos de relajación presentan como ventajas la simplicidad, la robustez y un campo relativamente extenso de energías de descarga.

Como inconvenientes hay que citar el elevado desgaste que afecta a los electrodos, la interdependencia de parámetros como la corriente de la descarga, su duración y su energía, y la limitación que implica para la elección de los materiales de los electrodos.

Hoy en día, todavía se emplea este tipo de generadores en campos como el de súper acabado y el de algún micro mecanizados que exigen muy bajas energías y elevadas frecuencias.

Pero intentando aumentar la capacidad de arranque, se llegó a una limitación pues era preciso aumentar la corriente de la descarga, y a partir de un cierto valor desaparece el fenómeno de relajación, y se produce un arco continuo pues el canal no se des ioniza y al no apagarse la descarga, toda la energía de la fuente alimenta directamente al arco.

Esto llevó a la idea de interrumpir exteriormente la corriente de carga, justo tras la descarga, para poder asegurar una eficaz des ionización del canal.

4.4.2 Generadores de impulsos transistorizados

Todo lo expuesto anteriormente llevó a la idea de pulsar la corriente de descarga.

Por ello se pensó en los generadores de impulsos impuestos y es en 1959 cuando se presenta en París el primer generador de impulsos transistorizado, en el cual las variables como son el tiempo de impulso (t_i), tiempo de pausa (t_o) y la intensidad del impulso (i_f) pueden ser variados independientemente unos de otros.

No se entrará aquí en el estudio de los circuitos electrónicos que los componen, pues no es objeto del presente trabajo.

Pero se ha de saber claramente que estos generadores toman corriente de la red normal alterna, trifásica a 220 ó 380 V, y la salida es un tren de impulsos consecutivos, en los que se pueden variar independientemente las variables antes mencionadas. Dicha salida se aplica directamente a los electrodos.

Entre los dos polos (electrodo y pieza) se establece una tensión (U_o) llamada tensión de vacío. Durante un tiempo muy corto (t_d), llamado tiempo de encendido, que oscila entre 0,5 y 2 μ s, se inicia la descarga a través del líquido dieléctrico.

Entonces la tensión entre los polos baja mucho, hasta un valor U_f , llamado tensión de descarga. Se crea entonces el impulso de intensidad que es de forma rectangular y de duración t_f .

En estos generadores, el electrodo es uno de los polos (normalmente el ánodo) y la pieza el otro.

4.4.3 Tipos de generadores

Los generadores transistorizados que se encuentran en el mercado pueden ser divididos en dos grupos genéricos:

- Generadores isoenergéticos.
- Generadores isofrecuenciales.

4.4.3.1 Generadores isoenergéticos.

Su funcionamiento se basa en la obtención de impulsos de energía constante tras el total encendido de la descarga. Presentan como característica principal la constancia de la rugosidad, derivada de la igualdad de la energía de los impulsos.

Como inconveniente tiene que al producirse las descargas tras el encendido, sin importar el tiempo que se emplee en conseguirlo, las pausas entre cada dos impulsos pueden llegar a ser muy grandes, lo cual provoca, según la dependencia de principio, desgastes superiores del electrodo.

Además, al aumentar el tiempo de duración de las pausas disminuye la frecuencia, con lo cual disminuye ligeramente la capacidad de arranque.

4.4.3.2 Generadores isofrecuenciales.

Estos generadores se caracterizan por mantener una frecuencia constante de chispeo, sin que la duración de las pausas vaya influenciada por el retardo del encendido de las descargas.

- Generadores isofrecuenciales de baja tensión de encendido.

Como generador isofrecuencial que es, presenta como característica principal la constancia de la frecuencia de chispeo. Como inconvenientes presenta que todo retardo en el encendido de la descarga, supone una pérdida de energía, con lo que algunas descargas serán de menor potencia con lo cual no habrá constancia en la rugosidad de la pieza.

- Generadores isofrecuenciales de alta tensión de encendido.

Se les puede situar a medio camino de los dos casos anteriores pues goza de las características de los isofrecuenciales, y además, gracias a la alta tensión de encendido, éste será más rápido,

con lo que se aproxima al trabajo de tipo isoenergéticos, y dada la alta tensión de encendido, el gap es mayor, lo cual facilita el sistema de arrastre de las partículas erosionadas.

4.5. Principios de mecanizado por electroerosión

Este procedimiento de mecanizado se distingue principalmente por dos de sus propiedades.

- Dado que en este proceso el arranque de material no depende de las características mecánicas (dureza, etc.) del material a trabajar sino de sus características térmicas y eléctricas, hay que destacar su gran aptitud para mecanizar aceros, metales o aleaciones duras o refractarias, poco aptas para ser mecanizadas por procedimientos convencionales de arranque de viruta. Ello permite el mecanizado de los aceros templados y en general, de materiales de baja maquinabilidad siempre y cuando sean suficientemente conductores.
- Otra propiedad fundamental es su gran aptitud para realizar formas complejas, tanto pasantes como ciegas. Fabricando por medios convencionales, u otros, el electrodo que suele ser de cobre o grafito normalmente, se puede realizar la pieza, adaptándose en el mecanizado de ésta a la forma de aquél.

4.5.1. Explicación del fenómeno de erosión por chispa

Como ya se ha indicado, el mecanizado por electroerosión se efectúa mediante el salto de descargas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergida en un medio dieléctrico.

Los diversos fenómenos que entran en juego en el momento de la descarga y el consiguiente arranque del material de la pieza son de gran complejidad ya que las circunstancias que concurren en su observación son muy críticas.

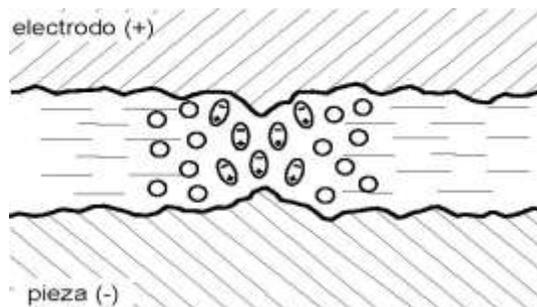
En efecto, el tiempo de duración varía, tal y como ya se ha indicado, entre microsegundos y milisegundos, y las distancias interelectródicas son del orden de unas centésimas o quizás alguna décima de milímetro.

Pero para poder comprender mejor el desarrollo de la descarga eléctrica, es preciso situarse en el nivel microscópico en que esto se produce. Teniendo en cuenta el reducido espacio entre electrodo y pieza, las variaciones de cota de las superficies de los electrodos, debidas a la rugosidad natural de los materiales, representan variaciones de aproximación del orden de un 20% a un 40% respecto del plano medio de dichas superficies.

En este tiempo y, debido a la intensidad del campo eléctrico en los dos puntos de máxima proximidad entre electrodo y pieza, se llegará a un momento en que se supere la tensión de disrupción del dieléctrico que los separa, iniciándose la formación de un canal de elevada conductividad.

4.5.2. Análisis del desarrollo de la descarga eléctrica

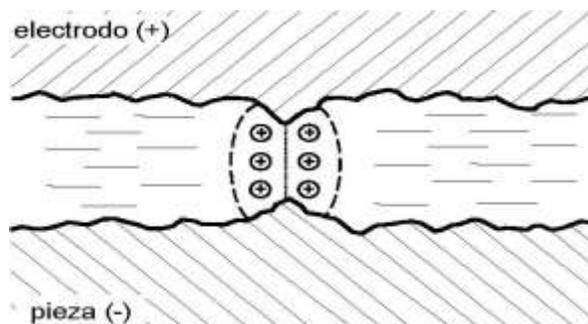
La concentración e intensificación del campo eléctrico tiene como efecto la ionización del dieléctrico y la polarización de las partículas e iones. Los iones son, por definición, partículas polarizadas.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.5. Ionización del dieléctrico.

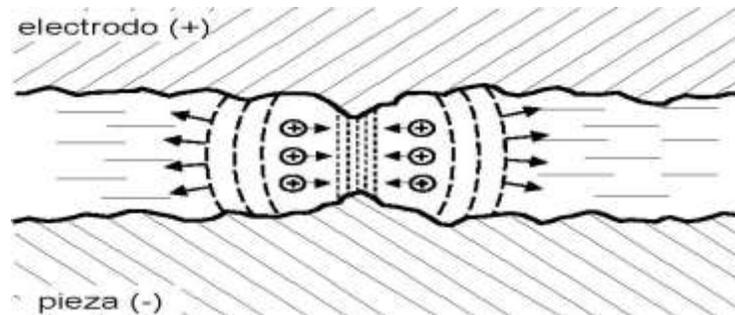
De esta forma se da lugar a la formación del canal de la descarga, que queda rodeado por los iones positivos que comprimen y aíslan del medio circundante, reduciendo así su sección



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.6. Iniciación del canal de descarga

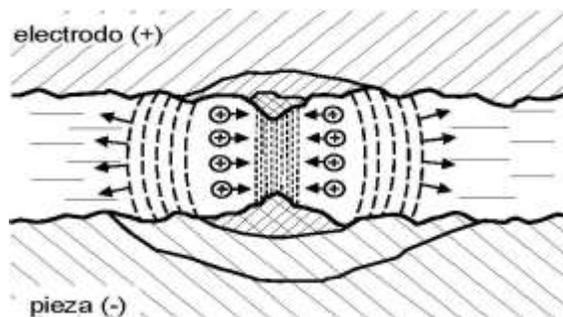
La brusca caída de la resistencia del canal permite que la corriente alcance valores elevados y su paso masivo origine un aumento de la ionización que, a su vez, crea un potente campo magnético que comprime aún más el canal de la descarga produciendo su calentamiento.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.7. Paso masivo de la corriente por el canal de descarga.

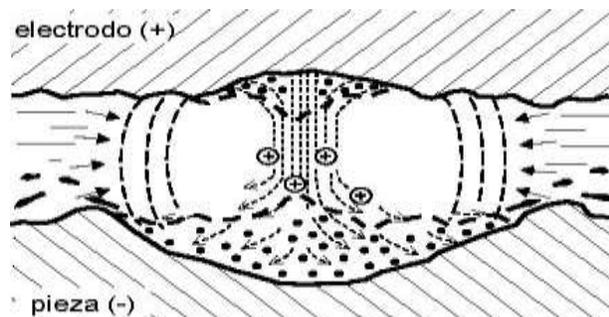
La velocidad de aumento de la corriente se cifra en unos 10 a 100 millones de amperes por segundo, alcanzándose temperaturas del orden de hasta decenas de miles de grados en un tiempo de 2 a 4 microsegundos.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.8. Efecto del paso masivo de la corriente por el canal de descarga

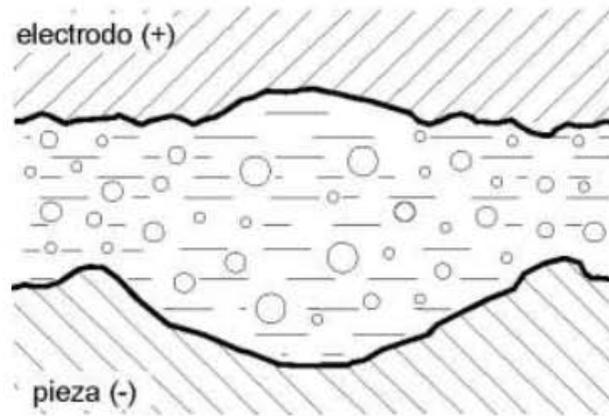
El resultado de tan intensa acción térmica es la fusión, e incluso evaporación, de un reducido volumen de material tanto en pieza como electrodo. Incluso se generan residuos como consecuencia de la ruptura del dieléctrico.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.9. Arranque de material producido por la descarga.

Mediante la utilización de cámaras fotográficas de alta velocidad se ha podido constatar la existencia de una burbuja de gas alrededor del canal, cuyo volumen es superior al de éste.

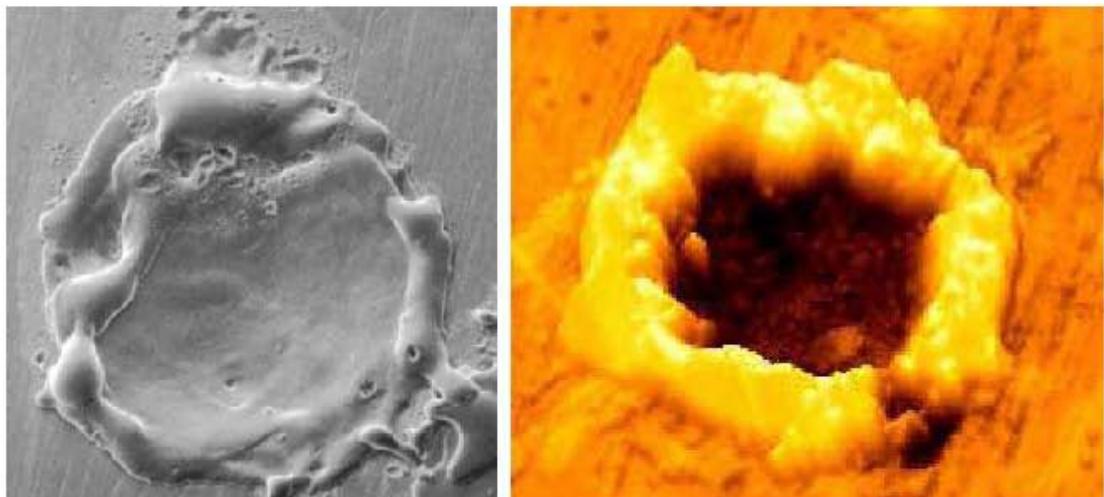


Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.10. Estado final del Cráter

Paralelamente a la acción térmica de la descarga hay que considerar su efecto dinámico, que produce la eyección a gran velocidad del material fundido y que, junto al efecto térmico confiere a los cráteres su forma peculiar.

Esta forma de los cráteres es análoga a la obtenida por el choque de un proyectil lanzado a gran velocidad.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.11. Cráteres producidos por un EDM

Al final de la descarga, la presión del interior de la burbuja cae bruscamente, a consecuencia de lo cual se genera una depresión de manera que el dieléctrico arrastra los residuos existentes en el cráter recién formado, a la vez que enfría su superficie, impidiendo la conducción del calor hacia el interior del metal. Al agotarse por completo la energía de la descarga, el ciclo ha llegado a su fin.

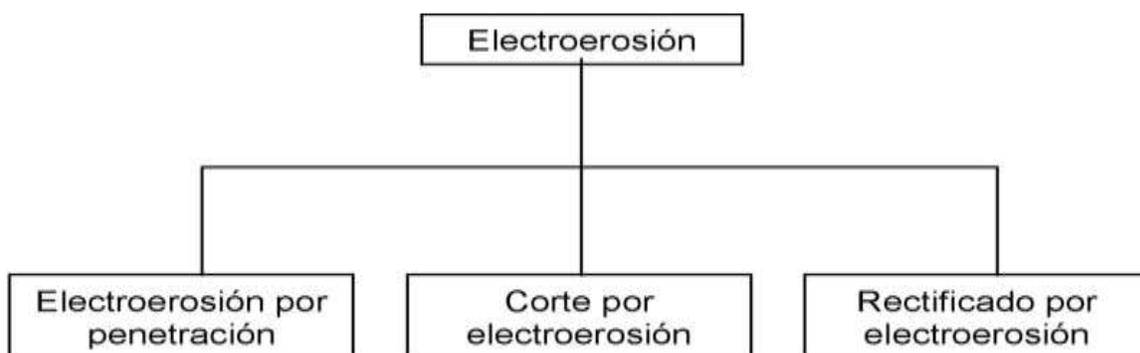
El canal de conductividad eléctrica se cierra al des ionizarse el dieléctrico y recobrar de nuevo su rigidez dieléctrica, pudiendo así comenzar ya el ciclo correspondiente a la siguiente descarga, que se dará entre los dos puntos de máxima aproximación entre electrodo y pieza. El tiempo de pausa entre cada dos descargas es fundamental para el correcto desarrollo del proceso. Si este tiempo no existiera o fuese insuficiente, la chispa se colapsaría, dando lugar a un arco.

La acumulación de residuos en la cavidad también puede llegar a producir este efecto.

Resumiendo, se puede decir que durante el proceso de electroerosión se va efectuando en la pieza un proceso de copiado, a nivel microscópico, de la forma del electrodo, lo que dará lugar a la obtención de un negativo exacto de éste, salvando claro está la longitud de las chispas o distancia de chispeo, conocido como GAP, medida que habrá que tener en cuenta en el momento de la fabricación de los electrodos.

4.6. Tipos de mecanizado por electroerosión

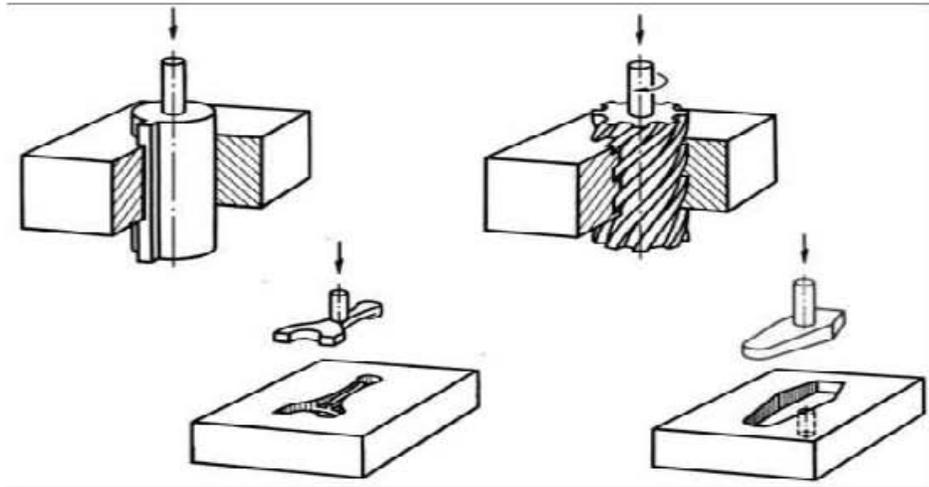
Distinguiendo según la forma del electrodo y según el movimiento relativo de éste con relación a la pieza, se pueden hacer varias subdivisiones dentro del concepto general de mecanizado por electroerosión, tal y como se muestra en el esquema 4.1 a continuación:



4.1. Esquema de los tipos de mecanizado por electroerosión

4.6.1 Electroerosión por penetración

Esta forma de electroerosión es la más universal. Se basa en el avance continuo, y servo controlado de un electrodo-herramienta que penetra en el electrodo-pieza en presencia de un líquido dieléctrico como se muestra en la figura 4.12.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.12. Electroerosión por penetración

Según la forma del electrodo y según la profundidad que se dé a las formas erosionadas en la pieza, se podrán obtener tanto formas pasantes como formas ciegas de geometrías complicadas. El líquido dieléctrico utilizado en penetración hoy en día es aceite mineral especial para erosión, aunque se pueden encontrar ciertas máquinas que funcionan con agua u otros líquidos especiales.

4.6.2 Corte por electroerosión por hilo

La diferencia básica entre el corte por electroerosión y la electroerosión por penetración es que la forma del electrodo no influye directamente en la forma de la pieza a obtener, ya que lo único que se pretende es el realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo.

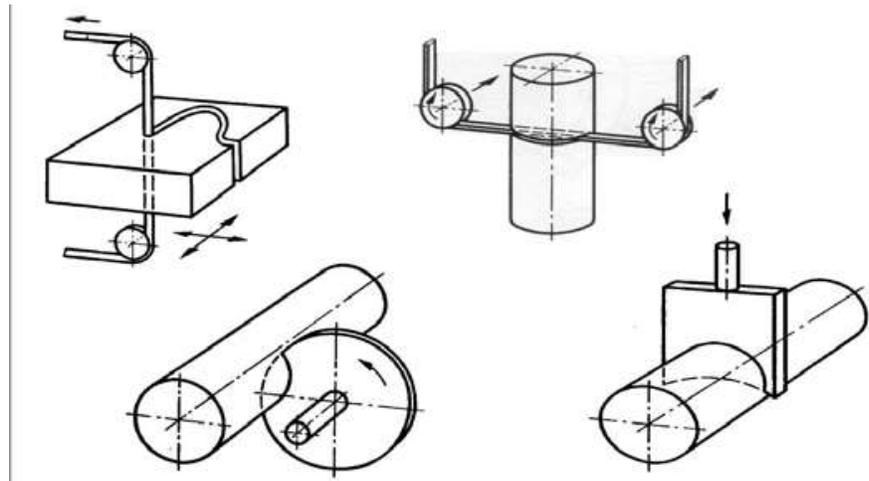
Todo ello presupone, por tanto, que el costo del electrodo se reduzca considerablemente al tener una forma característica que lo hace muy asequible ya que se puede comprar en el mercado listo para la utilización.

En este tipo de electroerosión hay que destacar el caso en que el electrodo tiene forma de hilo (electroerosión por hilo) que representa la práctica totalidad de las aplicaciones.

En la electroerosión por hilo, un CNC controla el movimiento relativo entre el hilo y pieza.

El hilo es de diámetro pequeño, normalmente de 0,25 o 0,3 mm., aunque los diámetros pueden reducirse hasta valores de 0,025 mm. En aplicaciones de micro mecánica.

En este tipo de electroerosión, el líquido dieléctrico habitualmente utilizado es el agua des ionizada, aunque también existe alguna máquina que funciona con aceite (fig. 4.13).

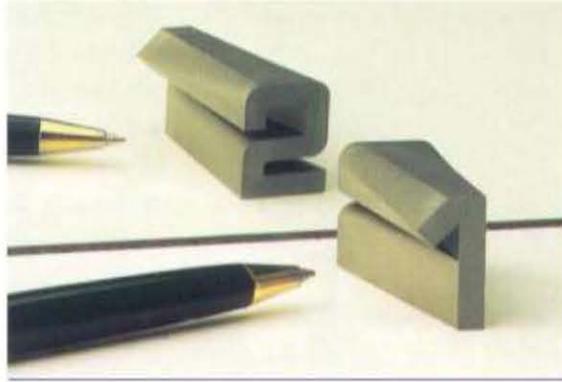
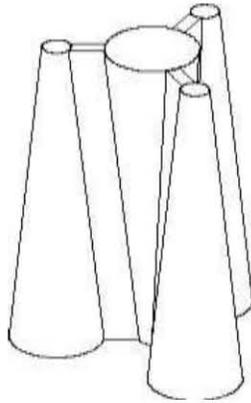


Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.13. Corte por electroerosión por hilo

Debe tenerse en cuenta que la WEDM permite únicamente producir geometrías pasantes. Así mismo, es posible realizar el corte en vertical o en cónico por medio de un descentramiento, controlado por el CNC, de la guía superior con respecto a la guía inferior. De este modo se pueden realizar formas con cortes cónicos que pueden ser de gran complejidad (Fig. 4.14).

Las ventajas de la electroerosión por hilo se pueden resumir en: rapidez, ya que no es necesario mecanizar el electrodo, y la no influencia del desgaste del hilo sobre la precisión de las piezas, al estar el hilo animado de un movimiento de desplazamiento que permite que la zona ya desgastada vaya reponiéndose en modo continuo.

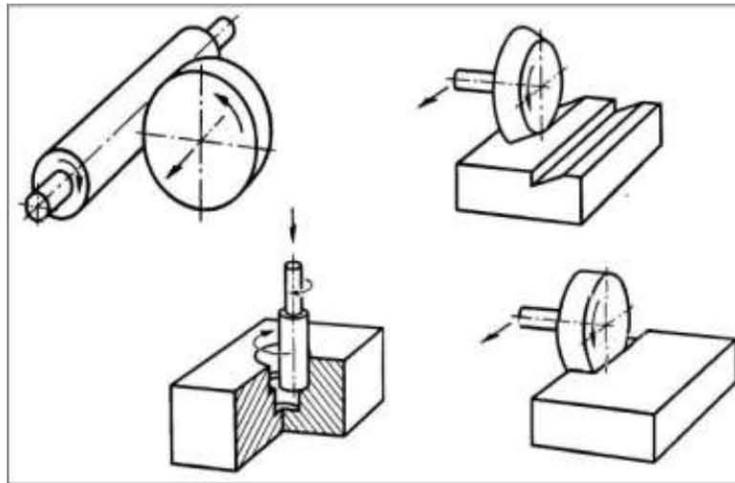


Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.14. Ejemplos de corte cónico.

4.6.3 Rectificado por electroerosión

En esta forma de electroerosión se da un movimiento de rotación del electrodo, con lo que el comportamiento se asemeja a una operación de rectificado convencional, pero el arranque de material se realiza mediante descargas eléctricas, sin contacto directo entre electrodo y pieza. (fig. 15.) El campo de aplicación de este tipo de máquina es muy reducido.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.15. Rectificado por electroerosión.

4.7. Materiales para electrodos

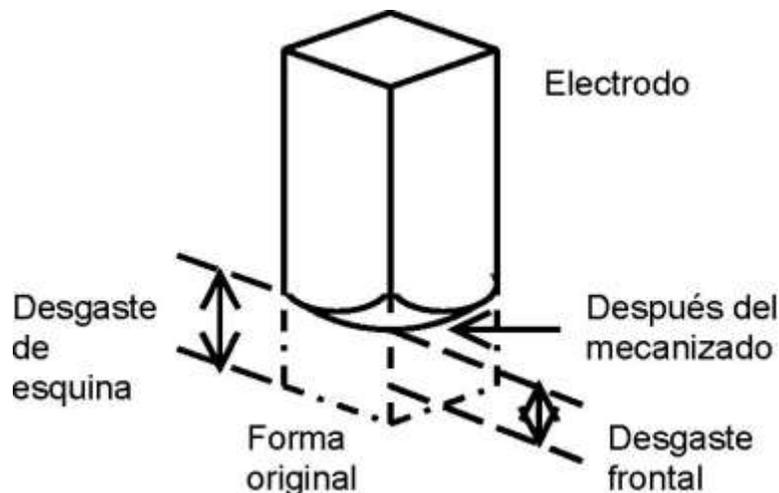
Aunque al principio cualquier material conductor puede ser fabricado para fabricar electrodos, la experiencia demuestra que hay materiales más idóneos que otros, según el material de que

esté constituida la pieza, el tipo de generador que se emplee y principalmente según los resultados que se quieran obtener.

Hay diversos materiales que dan buenos resultados como se verá más adelante. Y se ha de tener en cuenta que en el coste de una matriz o molde realizados por electroerosión, el precio del electrodo puede representar el 55 ó 60% del precio total. Por ello se han de elegir con cuidado tanto los materiales como el método de fabricación de los electrodos.

4.7.1 Propiedades de los materiales de electrodos

El problema principal de los electrodos es su desgaste. Como ya se ha dicho la erosión se da en ambos polos (electrodo y pieza) pero existe una gran diferencia entre lo que se desgasta uno y otro polo. Por ello se define la erosión en el electrodo como desgaste (fig.4.16) y se mide porcentual mente con respecto a la erosión de la pieza.



Fuente: www.etitudela.com

Figura 4.16. Desgaste de un electrodo.

Es aconsejable siempre que este desgaste sea mínimo. Y para ello el material debe de tener las siguientes propiedades físicas:

- Alto punto de fusión.

El material del electrodo se desgastará menos cuanto más alto sea su punto de fusión. Dado que este proceso es de tipo térmico, se alcanza en cada impulso, en puntos muy locales, altas temperaturas, que funden pequeñas partículas de ambos electrodos y que luego son arrastrados

por el líquido dieléctrico. Es lógico pensar que cuanto más alto sea el punto de fusión del material del electrodo, menos cantidad de él se fundirá y por tanto se desgastará menos.

- Buena conductividad térmica

Los materiales de los electrodos han de ser buenos conductores del calor, o lo que es lo mismo de la electricidad. Deben de tener buena conductividad térmica o baja resistividad eléctrica.

Como el calor se da muy locamente y en tiempos muy cortos, una buena conductividad hará que el calor, que la descarga ha concentrado en un punto, se difunda rápidamente por el resto del electrodo. De esta forma no se eleva tanto la temperatura y por tanto se fundirá menos cantidad de electrodo.

Las dos propiedades citadas definen la aptitud de un material para ser empleado como electrodo en este proceso. Otro aspecto a tener en cuenta son las propiedades mecánicas de estos materiales, que a continuación se citan:

- a) Deben de ser fácilmente mecanizables, ya que muy a menudo son construidos por métodos convencionales (torneado, fresado, etc.). Esta propiedad se tendrá muy en cuenta cuando se vaya a elegir el material del electrodo.
- b) Deben de tener su coeficiente de dilatación lo más pequeño posible. Dado que los electrodos se calientan durante el proceso, si el material tuviera un alto coeficiente de dilatación, aumentarían las medidas del electrodo, con lo cual aumentarían automáticamente las dimensiones de la pieza.
- c) Los materiales para electrodos deben de tener bajo peso específico, ya que a veces el volumen del electrodo a emplear es grande.
- d) Deben de tener estos materiales buena estabilidad dimensional. Algunos materiales, debido a los tratamientos y procesos físicos que sufren hasta su salida al mercado en formas diversas, quedan afectados de tensiones internas. Estas tensiones se liberan normalmente al calentar dichos materiales, y ello trae consigo normalmente cambios en sus dimensiones, que en el proceso de electroerosión son perjudiciales, ya que el cambio de forma en el electrodo trae consigo automáticamente el mismo cambio en la pieza.

La elección final del material del electrodo se realizará teniendo en cuenta las propiedades físicas y mecánicas. Relacionadas con estas propiedades se encuentran otros factores como la forma a realizar, el número de electrodos a mecanizar, dimensiones del electrodo, etc., intervendrán en la elección.

Será importante también el precio y la facilidad de adquisición en el mercado.

4.7.2 Clasificación de los materiales

Dichos materiales se pueden dividir en dos grupos principales:

- Materiales metálicos
- Materiales no metálicos

Entre los primeros se encuentran los siguientes:

- Cobre electrolítico.
- Cobre al plomo.
- Cuprotugstenos.
- Aluminio y aleaciones.
- Latón.
- Acero.
- Cuprografitos.

En el segundo grupo se puede considerar al grafito y todas sus variedades.

4.7.3 Cobre electrolítico

Es tal vez el material más empleado en electroerosión para fabricar electrodos. Su pureza debe ser del 99.9 por 100. Sus propiedades físicas son:

- Temperatura de fusión: 1.083 °C (baja).
- Resistividad eléctrica: $0.017 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ (muy buena).

En cuanto a sus propiedades mecánicas se puede decir que:

- No es fácilmente mecanizables.

- Tiene un coeficiente de dilatación lineal ($16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$) que puede ser considerado alto con respecto al del grafito, pero suficiente para el empleo en electroerosión.
- Tiene alto peso específico (8.95 Kg/dm^3), por lo que no sirve para electrodos voluminosos.

4.7.3.1 Métodos de fabricación de electrodos de cobre

El cobre electrolítico se emplea como material de fabricación de electrodos, además de las propiedades citadas, porque se presta a muchas alternativas de fabricación. Dichos electrodos se pueden fabricar por deformación en frío y caliente, por extrusión, por fundición, por procedimientos químicos como lo es la galvanoplastia, por medio de procedimientos (con arranque de viruta) y por ataque con ácido.

En el caso de deformación por prensa, se pueden dar los casos de deformación en frío o caliente, pero se ha de disponer de moldes apropiados para realizar las operaciones. La mayor pega de estos casos suele estar en las tensiones interiores que quedan en el electrodo debido al proceso de deformación. Por ello se ha de recocer el electrodo. Por este procedimiento se obtienen electrodos con tolerancias bastante estrechas. Por procedimientos de extrusión se obtienen electrodos de perfil constante y de formas muy diversas.

En muchos casos se puede fabricar el electrodo por medio de máquinas-herramienta convencionales. En torneado, planeado y fresado es importante la lubricación a base de taladrina o aceite. El rectificado es difícil, pero se consigue con abrasivo de Carborundum y alta velocidad de la muela abrasiva.

Reducción de los electrodos de cobre de ácido

Es un procedimiento económico de obtención de electrodos de desbaste a partir de los electrodos de acabado. El método consiste en introducir en una solución de ácido nítrico diluido y a cierta temperatura, la parte del electrodo que se quiera reducir de dimensiones.

Cuanto más concentrada es la solución, más rápidamente se produce el ataque, sobre todo en aristas y ángulos vivos en los cuales el ataque se acentúa más. No obstante este inconveniente

no tiene importancia en los electrodos de desbaste. Si hubiese que tratar con ácido los electrodos de afinado debe de hacerse con soluciones muy diluidas.

El ácido nítrico utilizado normalmente suele ser del 65% de concentración y se mezcla con agua con proporciones aproximadamente iguales. La velocidad de ataque de esta solución a unos 40 °C de temperatura, da una reducción diametral de aproximadamente 5 centésimas en un minuto.

4.7.3.2 Comportamiento del cobre en Electroerosión

De las tablas y gráficos de tecnología se pueden extraer las conclusiones siguientes:

En condiciones de trabajo normales se llega a desgastes volumétricos inferiores al 0,5%, en operaciones con intensidades menores a 80 A.

Para intensidades de unos 18 A, se llegan a conseguir también desgastes inferiores al 0,5%, pero a costa de una disminución de la capacidad de arranque. En intensidades de acabado, los desgastes son mayores, situándose entre el 1 y el 5%.

En cuanto a los procesos de desbaste los arranques no son tan altos como en el caso del grafito, pero sin embargo las rugosidades son mucho más bajas en los procesos de acabado. Por ello a veces este material se quedará prácticamente como único elegible en el caso que se necesite una rugosidad baja de acabado.

Además este material no es caro y se adquiere en el mercado bajo muchas formas diferentes. El ácido nítrico es muy peligroso y por ello se han de tener las precauciones siguientes:

- a) En la preparación de la solución no se debe de verter nunca el ácido sobre el agua, sino al revés.
- b) Se debe de evitar de respirar los vapores emanados de la reacción.
- c) Si el ácido o vapor de nítrico mancha la piel de una persona, se ha de lavar la piel con agua muy abundante durante al menos 20 minutos.
- d) Se deben de llevar gafas protectoras y guantes.

Con respecto a las máquinas se han de tomar los cuidados siguientes:

- a) Realizar la reducción lejos de la máquina para que los vapores de ácido no le dañen.

- b) Como se ha de medir continuamente, se ha de tomar la precaución de lavar con cuidado el electrodo con el fin de no estropear los instrumentos de medida.

4.7.4 Cobre al plomo

La aleación de cobre con una pequeña cantidad de plomo, cromo o telurio (1-2%), tiene como finalidad mejorar mucho la maquinabilidad del cobre. No obstante baja el rendimiento, subiendo el desgaste y bajando el arranque. Se puede reducir por ácido.

4.7.5 Cuprotungsteno

Es un material muy interesante para la realización de piezas de gran precisión, empleándose en la erosión de micro orificios en la industria de aviación, y en general en aquellos casos en que se han de hacer orificios profundos.

Existen tres calidades más utilizadas:

- El tungsteno-cobre con 75-25 por 100 respectivamente.
- El cobre-tungsteno, con gran proporción de cobre.
- El tungsteno-plata, con pequeña proporción de plata.

Las ventajas más destacables son:

1. Rendimiento (alta relación arranque/desgaste), (ver tablas).
2. Estabilidad dimensional.
3. Solidez.
4. Muy bajo desgaste (ver tablas).
5. Posibilidad de fabricación de electrodos por procedimientos galvánicos.
6. Es apto para erosionar piezas con acabados muy finos (ver tablas)

Sus inconvenientes son:

- a) Precio muy elevado
- b) Peso específico elevado (15-20 Kg/dm³).
- c) Dimensiones muy reducidas de material en el mercado.
- d) No pueden ser fabricados por estampación.

4.7.6 Aleaciones de aluminio

Se utilizan solamente en casos de electrodos muy grandes que se han de fabricar por fundición. Da como resultado superficies muy rugosas, grandes desgastes y pequeños arranques.

4.7.7 Latón

No se utiliza apenas. Tiene muy buena maquinabilidad, pero da muy bajos rendimientos; altos desgastes y bajos arranques de material.

4.7.8 Acero

Se utiliza solamente en casos límite. Observando las tablas de Tecnología y comparando con el caso de cobre se llega a las conclusiones siguientes:

- Bajo rendimiento (relación arranque / desgaste).
- Altos desgastes.
- Rugosidades muy altas

Además tiene un alto peso específico (7,8 Kg/dm³) y muy poca estabilidad dimensional.

4.7.9 Grafito

Es también uno de los materiales más empleados como material para los electrodos. En realidad no existe un solo grafito, sino muchos tipos de grafito que se utilizan en electroerosión. La naturaleza y propiedades de las materias primas y la granulometría de las mismas, así como la técnica empleada en el proceso de fabricación, tienen gran influencia sobre las propiedades físicas y el rendimiento del grafito durante el proceso erosivo.

Sus propiedades físicas son:

- Temperatura de sublimación: 3.600- 3.700° C, (alta).
- Resistividad eléctrica: 12-16 Ω mm³/m (muy alta).

Se pueden observar dos puntos:

- a. No se da un sólo valor para cada característica, pues éstas varían con el tipo o calidad del grafito.

- b. Se da la temperatura de sublimación. Ello es debido a que el grafito no se funde, sino que se sublima, es decir, pasa del estado sólido directamente a vapor.

Sus propiedades mecánicas son:

- a) Es muy fácilmente mecanizable.
- b) Tienen un coeficiente de dilatación lineal de $3-4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$. De 4 a 5 veces menos que el cobre.
- c) El peso específico es bajo. De 1.75 a 1.85 Kg/dm³, por lo que sirve para electrodos de gran volumen.
- d) Tiene gran estabilidad dimensional.

La gran diferencia con el cobre, es que los electrodos de grafito sólo pueden ser obtenidos por mecanización en máquinas-herramienta, aunque con altas velocidades de mecanizado.

4.7.9.1 Comportamiento del grafito ante el mecanizado

Se ha tener mucha precaución, dado el carácter frágil del grafito, con la presión de sujeción en las máquinas. Se ha de procurar que dicha presión se reparta lo más posible por la superficie que se sujeta. Las recomendaciones dicen que el empleo del plato universal con tres mordazas tan sólo es aceptable para piezas que tengan un espesor de pared superior al décimo del diámetro y un grosor mínimo de 10 mm.

El grafito se puede mecanizar con tolerancias muy estrechas con herramientas de acero rápido. Por lo general es mecanizado en seco, aunque puede ser beneficioso el lubricado con el mismo líquido que se vaya a utilizar en el proceso de electroerosión.

La viruta de grafito es polvo, por lo que es necesario utilizar dispositivos de aspiración, a fin de asegurar un máximo de limpieza. Este polvo es muy corrosivo por lo que se ha de limpiar bien las guías de las máquinas en los días que se trabaje, ya que si no puede llegar a desgastarlas con el tiempo. Además con el aceite de las guías en polvo de grafito llega a formar una pasta que se va endureciendo, lo cual hace perder precisión en el trabajo.

Sin embargo una gran ventaja es la de poder fabricar grandes y complicados electrodos para moldes con fresado copiado, con fresas de acero rápido. En este caso las velocidades de corte suelen ser más bajas, con el fin de que el desgaste de las fresas sea mínimo y por tanto la reproducción más perfecta. En este caso la velocidad de corte suele ser de 10 a 15 m/min. Para herramienta de acero rápido. Y además es preferible trabajarlo en húmedo con el mismo líquido dieléctrico que se vaya a utilizar en el proceso de electroerosión.

4.7.9.2 Comportamiento del grafito ante la electroerosión.

Ya se ha indicado que según sea el tipo o calidad del grafito, será su comportamiento en el proceso. Y su calidad depende del tamaño de grano y de compacidad, lo cual a su vez depende del proceso de fabricación.

Normalmente la densidad del grafito se va incrementando a medida que disminuye el tamaño de las partículas que lo componen. El tamaño de las partículas oscila entre 10 y 40 μm .

El grafito denso y el grano fino son el que menos desgaste tiene y por tanto el que mayor reproduce las formas. Cuanto menor es la densidad del grafito mayor es su capacidad corrosiva. Y cuanto más fino sea el grano el acabado superficial es mejor.

En general, las casas comerciales ofrecen gamas de tipos de grafito lo suficientemente extensas como para poder realizar una buena elección de la calidad necesaria. Pero no cabe duda de que esta cualidad se pueda convertir en un inconveniente, en el caso de que no se pueda disponer de datos referentes a las diversas calidades.

Cara a la electroerosión además presenta las siguientes cualidades:

- a) No se puede utilizar con generadores de Relajación sino solamente con generadores de impulsos.
- b) La polaridad del grafito normalmente es positiva si el desgaste ha de ser pequeño. En casos en que éste pueda ser grande como pueda ser el caso de agujeros pasantes, y no importe el gasto de grafito la polaridad puede ser negativa, con gran velocidad de arranque, pero también con gran desgaste.
- c) Con grafito el riesgo de descargas anormales, principalmente cortocircuitos es mayor que con electrodos metálicos; por lo que se ha de cuidar más la limpieza.

- d) La rugosidad mínima que se puede alcanzar con el grafito es del orden de Nr: 27-30, es decir que este material da piezas más rugosas que el cobre. Por ello no sirve como material de electrodo si se quiere obtener superficies muy finas.
- e) Por último se puede decir que su precio no es muy alto, aunque es más caro que el cobre. Además es fácil de adquirir en el mercado, bajo diversas formas.

4.7.9.3 Cuprografitos

Una impregnación con polvo de cobre que se introduce en los poros del grafito suele ser ventajosa, ya que se mejora la resistividad eléctrica y se obtienen electrodos menos frágiles que el grafito. Por lo demás, se mantienen aproximadamente las características del grafito en el proceso.

CAPITULO 5

CORTE CON PLASMA

5.1. Introducción

El corte con arco abarca un grupo de procesos térmicos de corte que separan o eliminan metal derritiendo con el calor de un arco entre un electrodo y la pieza de trabajo.

Esta definición abarca varios procesos que se utilizan o han sido utilizados para cortar o acanalar metales. Incluye:

- Corte con arco de plasma (PAC)
- Corte con arco de carbono y aire (CAC-A)
- Corte con arco de metal protegido (SMAC)
- Corte con arco de metal y gas (GMAC)
- Corte con arco de Tungsteno y gas (GTAC)
- Corte con arco de oxígeno (AOC)
- Corte con arco de carbono (CAC)

Cada uno de estos procesos ofrece al usuario ciertas ventajas y desventajas. Para seleccionar un proceso, hay que tener en cuenta los costos relacionados con el volumen de corte, el equipo requerido y la capacitación que debe tener el operador. Siendo el corte con arco de plasma el de mayor uso en la industria.

El proceso de corte con arco de plasma separa el metal empleando un arco constreñido para fundir un área localizada de la pieza de trabajo, que al mismo tiempo elimine el material derretido con un chorro de alta velocidad de gas ionizado que sale por el orificio de constricción. El gas ionizado es un plasma que por lo regular opera a temperaturas de 10000° a 14000°C.

El PAC se inventó a mediados de la década de 1950 y alcanzó éxito comercial poco después de su introducción a la industria. En un principio se le utilizó para cortar acero inox y aluminio

pero al irse desarrollando el proceso se vio que presentaba ventajas respecto a otros procesos de corte para cortar acero al carbono además de metales no ferrosos.

Las maquinas PAC han evolucionado en los últimos años donde se pueden tener incluso maquinas portátiles hasta maquinas controladas por CNC (fig.5.1).



Fuente: spanish.alibaba.com

Figura 5.1. Maquina CNC de PAC

5.2. El Plasma como estado de la materia.

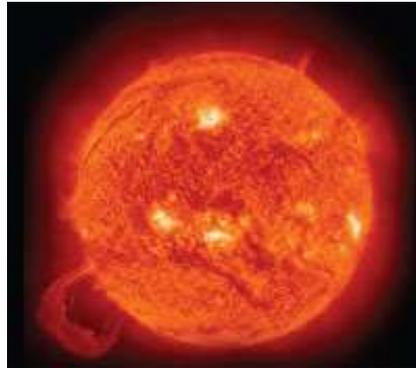
El plasma como cuarto estado de la materia se puede definir como un gas constituido por partículas con cargas libres, las cuales posee una dinámica de interacciones electromagnética de largo alcance entre sí mismas. Lo que quiere decir que sus átomos estas parcialmente ionizados lo cual hace que el plasma reaccione fuertemente a campos eléctricos y magnéticos como se pueden ver en la fig. 5.2.



Fuente: ooche813.blogspot.com

Figura 5.2. Campo eléctrico de un plasma

El plasma es un gas que está constituido por cationes (es decir, átomos con carga eléctrica positiva porque han perdido algunos de sus electrones), electrones y neutrones. Se trata, pues, de un manajo de partículas que se mueven sin ningún orden. Para limitar un plasma en un espacio se aplican campos magnéticos. El plasma es el estado en el que se encuentra la materia que constituye los elementos que conforman el universo como las estrellas, el sol (fig.5.3) el fuego y casi cualquier expresión luminosa.



Fuente: www.portaeureka.com

Figura 5.3. El Sol compuesto de plasma

El plasma al tener cationes libres también tiene que igualar sus cargas con neutrones y protones lo cual se pudiese decir que el plasma es casi neutral; lo cual produce que el plasma sea capaz de generar campos magnéticos y eléctricos, con los cuales a su vez puede reaccionar, su composición está en una forma ionizada. También el plasma lo podemos dividir en algunos grupos para su clasificación como los siguientes enunciados:

- Plasma común: las capas de electrones de los átomos son parcialmente deterioradas (debido a una alta temperatura o presión). Los electrones libres son responsables de las características plasmáticas de la sustancia en cuestión.
- Plasma termonuclear: Las capas electrónicas de los átomos no existen, la sustancia es una mezcla de núcleos “pelados” y electrones libres. En éste estado se encuentran el plasma en los núcleos de las estrellas, donde se da lugar la síntesis TN.
- Plasma de nucleones: Debido a muy altas temperaturas o presiones, los mismos núcleos atómicos son despedazados. La materia es una mezcla de electrones, protones y neutrones. Los plasmas nucleónicos se manifestaron a los 10^{-5} s después del comienzo

del Universo, donde los quarks crearon los primeros protones y neutrones. Encontramos también este tipo de plasma en las capas exteriores de una supernova explotando, donde su comienzo desarrolla una onda de choque de gas presionado. En ésta capa por un corto tiempo se dan lugar disturbios en las reacciones termonucleares, que dan lugar a elementos pesados.

- Plasma de Quarks-gluones: en altas energías los nucleones mismos se desmenuzan en sus constituyentes: los quarks y los gluones. En ese estado se encontraba la materia quizá hasta el primer décimo de microsegundo después del comienzo del Universo y artificialmente se logró reproducir este estado de la materia en el CERN en el año 2000

5.2.1. Plasmas cotidianos

Los plasmas conducen la corriente eléctrica, característica que el hombre ha aprovechado para desarrollar aplicaciones relacionadas con la producción de energía eléctrica. Las lámparas o tubos fluorescentes contienen una pequeña cantidad de vapor de mercurio y un gas inerte (que no reacciona con nada) que acostumbra a ser argón. Al encender un fluorescente, el argón se ioniza (pierde electrones) formando así un plasma que excita a los átomos de mercurio. Como consecuencia de esta excitación, los átomos de mercurio emiten luz visible y ultravioleta. Dentro del tubo fluorescente (fig. 5.4.) existe un revestimiento que se encarga de filtrar la luz ultravioleta, de forma que sólo recibimos la radiación del visible. Las lámparas fluorescentes presentan una eficiencia energética considerablemente superior a la de una bombilla estándar. Los carteles de neón y el alumbrado urbano usan un principio similar.



Fuente: es.123rf.com

Figura 5.4. Lámparas de luz de plasma

No sería atrevido decir que si algo ha hecho famoso al plasma por todas partes, no son ni los tubos fluorescentes ni los carteles de neón, sino las denominadas televisiones de plasma que lucen en los escaparates de las tiendas de electrónica y en un buen puñado de hogares. En el interior de una televisión de plasma se encuentran gases inertes (xenón y neón) en forma de plasma que reaccionan con el fósforo de cada subpíxel de la pantalla para producir luz coloreada. Las televisiones de plasma (figura 5.5) presentan una resolución superior a las televisiones convencionales, si bien hay que recordar que la duración de una pantalla de plasma no es indefinida y oscilaría entre doce y diecisiete años.



Fuente: www.lgblog.el

Figura 5.5. Televisión de plasma

5.3. Equipo PAC

El equipo que se ocupa para el corte con arco de plasma se encuentra compuesto por los siguientes elementos:

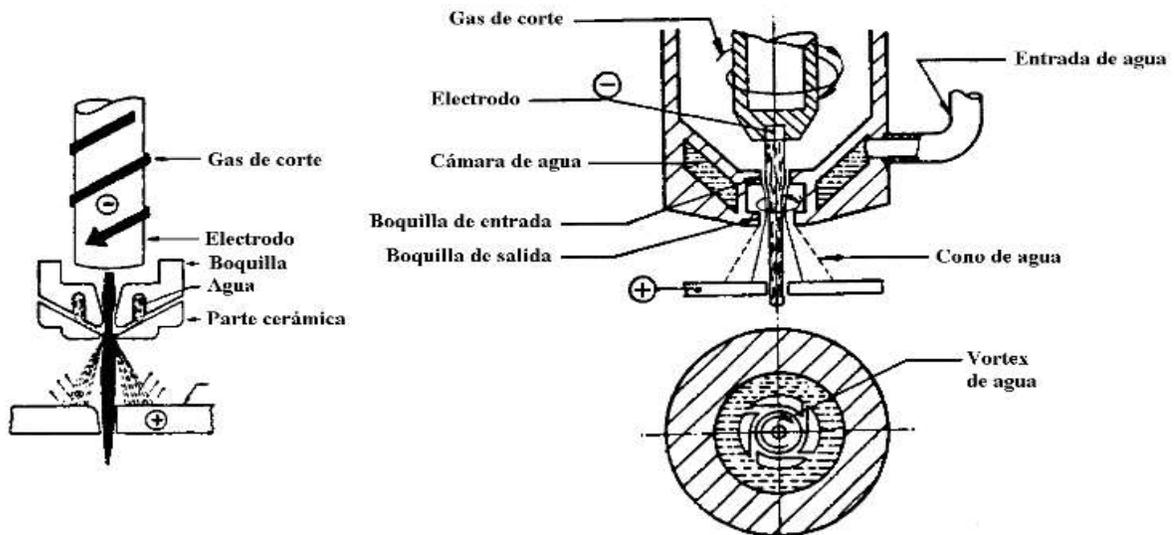
- Sopletes
- Fuentes de potencia
- Controles de corte
- Equipo de desplazamiento
- Controles ambientales

Todos estos elementos descritos serán descritos a continuación.

5.3.1. Soplete

El proceso de corte con plasma emplea un soplete de mano o uno montado mecánicamente. Hay varios tipos y tamaños de ambos, dependiendo del espesor del metal que se va a cortar. Algunos sopletes pueden arrastrarse en contacto directo con la pieza de trabajo, mientras otras requieren que se mantenga una separación entre la punta del soplete y la pieza.

Los sopletes mecánicos pueden montarse, ya sea en un tractor o en una máquina de corte controlada por computadora o robot. Y podemos ver sus componentes en la fig.5.6. Por lo regular se mantiene una separación entre la punta del soplete y la pieza de trabajo para obtener cortes de calidad óptima. La distancia de separación debe mantenerse dentro de tolerancias bastante estrechas para lograr resultados uniformes. Algunos sopletes mecanizados están equipados con un dispositivo de control automático de la separación para mantener una distancia final entre el soplete y la pieza de trabajo. En otros casos se emplean seguidores mecánicos para este fin.



Fuente: www.atmosferis.com

Figura 5.6. Composición de un soplete de PAC

Los sopletes de PAC trabajan a temperaturas extremadamente altas, y muchas de sus partes deben considerarse como consumibles. La punta y el electrodo son los más vulnerables al desgaste durante el corte, y el rendimiento casi siempre se deteriora conforme se van

desgastando. El remplazo oportuno de los componentes consumibles es indispensable para obtener cortes de buena calidad.

Los sopletes de plasma modernos tienen componentes consumibles con auto alineación y auto ajuste.

5.3.2. Fuentes de potencia

El PAC requiere una fuente de potencia de corriente continua, de relativamente alto voltaje, con una característica volt-ampere de corriente constante o de caída. Para que el arco se inicie siempre de manera satisfactoria, el voltaje de circuito abierto de la fuente de potencia generalmente es casi el doble de voltaje de operación del soplete. Los voltajes de operación van desde 50 o 60 V hasta más de 200 V, por lo que las fuentes de potencia para PAC tendrán voltajes de circuito abierto entre unos 150 y más de 400 V (figura 5.7).

Existen varios tipos de fuentes de potencia para PAC, siendo los más simples los de salida fija que consiste en un transformador y un rectificador. El transformador de uno de estos dispositivos se devana con una característica de caída de modo que el voltaje de salida siga conforme aumenta la corriente de corte.



Fuente: www.fronius.com

Figura 5.7. Fuente de poder de un PAC

En algunos casos, una sola fuente de potencia puede suministrar varias salidas gracias a un sistema de conmutación, el cual permite seleccionar una de las derivaciones provistas en el transformador o reactor de la fuente de potencia.

5.3.3. Controles de corte

Los controles de PAC son relativamente simples. La mayor parte de los sopletes manuales se controla mediante un interruptor de gatillo, el cual se oprime para iniciar el arco de corte y se suelta para suspender el corte.

En el caso del corte mecanizado, el encendido y apagado del arco de corte pueden efectuarse manualmente con un botón pulsador o automáticamente mediante los controles de movimiento del sistema. Los controles de corte también pueden hacer que la operación completa siga una secuencia que incluya variaciones en el flujo de gas y en el nivel de potencia si es necesario.

El PAC normalmente incluye varias trabas automáticas. Si el soplete se opera sin un suministro adecuado de gas, puede dañarse por la formación de arcos internos. Por eso el circuito incluye un interruptor de presión de gas para asegurar que exista una presión de gas adecuada antes de operar. O en su defecto apaga el soplete en caso de interrumpir la alimentación de gas.

5.3.4. Equipos de desplazamiento

Existen muy diversos equipos de desplazamiento para utilizarse con sopletes de corte con plasma. Estos van desde tractores en línea recta hasta máquinas controladas numéricamente o directamente por computadora con capacidades de anidamiento de componentes, etc. El equipo de corte con plasma también puede adaptarse a accionadores robóticos para cortar objetos distintos de las placas planas.

5.3.5. Controles Ambientales

El PAC es por naturaleza ruidoso y genera emisiones. Existen varios dispositivos y técnicas diferentes para controlar estos peligros. Una estrategia que se usa comúnmente para reducir el ruido y las emisiones es cortar sobre una mesa de agua y rodear el arco con un capuchón de agua. Este método requiere una mesa de corte llena con agua hasta la superficie de apoyo del trabajo, un aditamento de capuchón de agua que rodee al soplete y una bomba recirculante para extraer

agua de la mesa de agua y bombearla a través del capuchón. En este caso se emplea un flujo de agua relativamente alto.

Las mesas para el corte con plasma mecanizado o manual suelen estar equipos con un sistema de escape de tiro descendente, en algunos casos con salida al exterior, aunque es posible que se requieran dispositivos de eliminación o filtrado de humos para cumplir con las disposiciones de control de la contaminación atmosférica.

5.4. Aplicaciones del PAC

La primera aplicación comercial del corte con arco de plasma fue el corte mecanizado de escotillas de acceso en carros tanque de aluminio para ferrocarriles. Desde entonces el proceso se ha utilizado en diversas aplicaciones con aluminio. La tabla 5.1 muestra las condiciones típicas para el corte mecanizado de placas de aluminio.

Tabla 5.1. Condiciones típicas para cortar aleaciones de aluminio con arco de plasma.

ESPESOR		VELOCIDAD		DIAM. ORIFICIO		CORR .A	POT.
Pulg.	mm	Pulg/min	mm/s	Pulg	Mm	A	kW
¼	6	300	127	1/8	3.2	300	60
½	13	200	86	1/8	3.2	250	50
1	25	90	38	5/32	4.0	400	80
2	51	20	9	5/32	4.0	400	80
3	76	15	6	3/16	4.8	450	90
4	102	12	5	3/16	4.8	450	90
6	152	8	3	¼	6.4	750	170

***Las tasas de flujo de gas del plasma varían con el diámetro del orificio y con el gas usado desde unos 47 l/min para un orificio de 6.4mm. Los gases empleados son nitrógeno y argón con adiciones de hidrogeno desde 0 hasta 35%. Se recomienda consultar al fabricante del equipo para cada aplicación.**

Fuente: Manual de soldadura tomo II

Las condiciones típicas para el corte mecanizado de placas de acero inoxidable se muestran en la tabla 5.2

Tabla 5.2. Condiciones típicas para cortar acero inox con PAC.

ESPESOR		VELOCIDAD		DIAM. ORIFICIO		CORR .A	POT.
Pulg.	Mm	Pulg/min	mm/s	Pulg	Mm	A	kW
¼	6	200	86	1/8	3.2	300	60
½	13	100	42	1/8	3.2	300	60
1	25	50	21	5/32	4.0	400	80
2	51	20	9	3/16	4.8	500	100
3	76	16	7	3/16	4.8	500	100
4	102	8	3	3/16	4.8	500	100

***Las tasas de flujo de gas del plasma varían con el diámetro del orificio y con el gas usado desde unos 47 l/min para un orificio de 3.2 mm hasta unos 94 L/min para un orificio de 4.8mm. Los gases empleados son usualmente aire comprimido, nitrógeno con adiciones de hasta 10% de hidrogeno o nitrógeno con oxígeno agregado corriente abajo del electrodo. Se recomienda consultar al fabricante del equipo para cada aplicación.**

Fuente: Manual de soldadura tomo II

El corte manual con PAC se utiliza ampliamente en la reparación de carrocerías de automóviles para cortar acero de baja aleación de alta resistencia (HSLA). El arranque instantáneo y las altas velocidades de recorrido reducen la transferencia de calor al acero HSLA y ayuda a mantener su resistencia. El corte mecanizado con PAC de placas de acero al carbono se da en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Condiciones típicas para cortar acero al carbono con PAC.

ESPESOR		VELOCIDAD		DIAM. ORIFICIO		CORR	POT.
Pulg.	mm	Pulg/min	mm/s	Pulg	Mm	.A	Kw
¼	6	200	86	1/8	3.2	275	55
½	13	100	42	1/8	3.2	275	55
1	25	50	21	5/32	4.0	425	85
2	51	25	11	3/16	4.8	550	110

***Las tasas de flujo de gas del plasma varían con el diámetro del orificio y con el gas usado desde unos 94 l/min para un orificio de 3.2 mm hasta unos 134 L/min para un orificio de 4.8mm. Los gases empleados son usualmente aire comprimido, nitrógeno con adiciones de hasta 10% de hidrogeno o nitrógeno con oxígeno agregado corriente abajo del electrodo. Se recomienda consultar al fabricante del equipo para cada aplicación.**

Fuente: Manual de soldadura tomo II

El proceso de plasma ha sido utilizado para el corte de acero al carbono, acero inoxidable y aluminio en apilados. De preferencia, las placas que se van a cortar en apilados se debe sujetar con abrazaderas.

El biselado de los bordes de placas y tubos se realiza usando de uno a tres sopletes de PAC dependiendo de la preparación que requiera la unión.

5.5. Sistemas de plasma convencionales de oxígeno y nitrógeno.

El corte por plasma es un proceso que utiliza un orificio de boquilla de alta precisión para estrangular un gas ionizado a alta temperatura con el propósito de que éste pueda ser usado para fundir y cortar secciones de metales conductores de electricidad. La densidad de energía causada por una torcha de plasma es determinada por la proporción de la circulación de corriente eléctrica a través de la boquilla.

Esta densidad de energía puede ser medida como los amperes por pulgada al cuadrado. Los sistemas convencionales de plasma con nitrógeno, tienen una densidad de energía en un rango de 12,000 a 20,000 A/pulg²

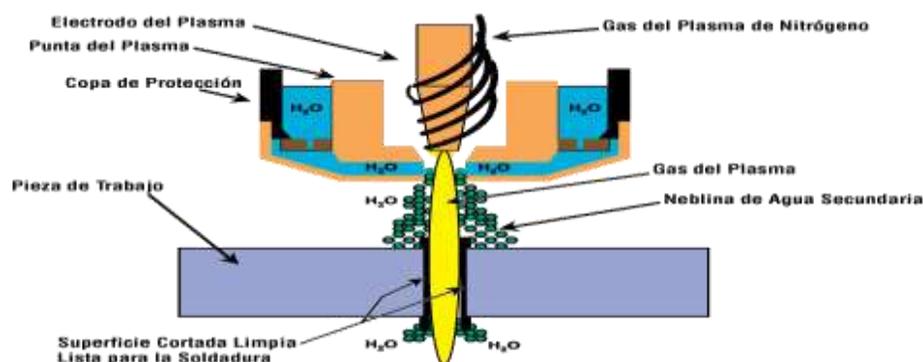
Esta densidad de energía ha sido típicamente determinada por factores económicos. En otras palabras, si se incrementa la densidad de energía cambiando el amperaje con respecto a la proporción de orificio de boquilla, el electrodo y la boquilla (artículos de consumo) se gastarán de un modo inaceptable, incrementando por lo tanto el coste del proceso.

A comienzos de los 80, el oxígeno fue presentado como un gas de plasma para cortar con gran calidad y en grandes espesores, que permitió que compitiera productivamente con el nitrógeno.

El canto cortado con oxígeno era más recto y la formación de rebaba era mínima. El corte con oxígeno también proveyó de un canto más limpio metalúrgicamente hablando, que permitía mejores soldaduras debido a la desaparición de los nitruros.

Desafortunadamente, este progreso en la tecnología creó la reducción de la vida de los consumibles debido a la reacción del oxígeno sobre el electrodo dentro de la torcha. Los primeros sistemas de plasma (nitrógeno) convencionales eran capaces de perforar hasta 500 o 600 veces antes de que la calidad del consumible afectara seriamente a la calidad del corte. Los sistemas de oxígeno, cortando el mismo material y con las mismas velocidades, requerían nuevos consumibles después de 100 o 150 perforaciones.

Los sistemas de oxígeno causaron un coste mayor por metro cortado, pero cuando la mejor calidad del corte, al mismo tiempo que la eliminación de operaciones secundarias se impusieron, el proceso de corte por oxígeno fue una alternativa aceptable a los sistemas de nitrógeno convencionales. Evidentemente el proceso de plasma con oxígeno sería bien recibido, si la vida de los consumibles mejorara.



Fuente: www.thefabricator.com

Figura 5.8. Partes de un soplete con gas de plasma de oxígeno y nitrógeno

5.5.1. Capacidades de corte del plasma convencional.

Ambos sistemas, de plasma de oxígeno y nitrógeno cuando se operan apropiadamente son capaces de cortar materiales (aceros al carbono, aluminio, y aceros inoxidable) de 9.5 mm. Hasta 40 mm. Con un rango de ángulo de corte de 1 a 4 °. Generalmente, cuanto mayor es el espesor a cortar, mayor es la perpendicularidad del canto cortado. Cuando se cortan materiales de menos de 10 mm. Es esperado que el ángulo cortado aumente. Estos ángulos en el corte, han sido aceptados por los usuarios de plasma, debido a la alta productividad (metros por hora cortados) de estos sistemas en general.

La capacidad de cortar un mayor espesor en sistemas de plasma convencionales varía dependiendo del fabricante del sistema y niveles de potencia. En términos generales, los sistemas de plasma son capaces de cortar aluminio de 150 mm. De grosor, acero inoxidable de 125 mm. De grosor, y aceros al carbono de 32 mm de grosor. Indudablemente es posible cortar secciones más gruesas de acero al carbono, pero el proceso no es económicamente ventajoso cuando se compara con el proceso de oxicorte.

5.5.2. Otros factores que afectan el proceso de plasma.

El arco doble es un problema muy común que afecta el proceso de plasma. En los términos simples, un arco doble es un arco que encuentra su camino desde el negativo (electrodo) al positivo (chapa) a través de una pequeña parte de cobre de la boquilla. Un arco se genera del electrodo al interior de la boquilla, y el segundo arco del exterior de la boquilla a la chapa. Cuando esto ocurre, el orificio de la boquilla se daña.

Este daño afecta a la constricción del arco, causando una reducción seria en la calidad de corte. También incrementa la suciedad sobre el electrodo necesitando la sustitución de la boquilla más frecuentemente. El arco doble debe ser controlado para que cualquier proceso de plasma sea económico y fiable. Este podría ser causado por algunos factores:

1. Perforar demasiada cerca de la chapa.
2. Arrastrar la boquilla sobre la chapa; durante el proceso de corte.
3. Una circulación de gas impropia o malos ajustes de corriente, en relación al orificio de boquilla.

La concentricidad en el soplete puede ser definida de dos maneras; concentricidad mecánica de alineación, y concentricidad de circulación de gas. Es imperativo que los consumibles; electrodo, boquilla y anillo remolino, estén realizados a máquina con una exactitud casi perfecta.

Esto asegura que el arco esta apropiadamente estrechado para producir cortes rectos. La fabricación de los consumibles debe de ser controlada en las tolerancias más estrictas para el rendimiento óptimo de la torcha.

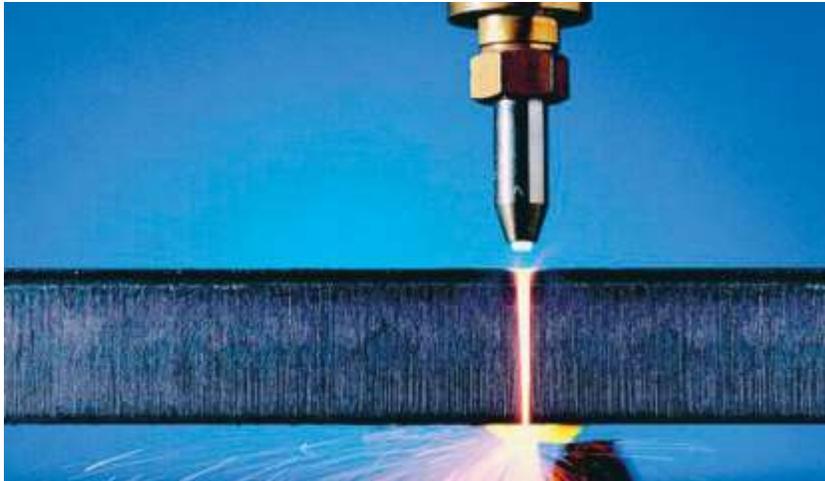
El intervalo libre de escoria, es un término usado para describir la velocidad que se debe suministrar para una mejor calidad de corte sobre un determinado espesor de material.

Un intervalo libre de escoria más amplio es deseado siempre que la velocidad de corte pueda variar con pequeños efectos sobre la formación de rebaba. Esto permite la aceleración y la desaceleración necesarias en los dispositivos de control de movimiento.

En resumen, hay varios factores críticos que afectan el rendimiento de los sistemas de plasma. El buen diseño, la fabricación de precisión y la ingeniería optimizada, son necesarios para superar estos desafíos y ofrecer plasmas de gran rendimiento y calidad.

5.6. Plasma alta definición.

El plasma de alta definición es un proceso que mejora la calidad del corte y escuadra el canto de materiales de menos de 10 mm. Los ingenieros de plasma han sabido durante años que para mejorar la calidad de corte sobre materiales finos, debería ser necesario incrementar la densidad de energía de un arco de plasma en 40,000 o 60,000 A/pulg². Esto es un aumento muy importante sobre la densidad de energía de plasma convencional de 12,000 a 20,000 A/pulg². Los progresos recientes en la tecnología de plasma convencional con oxígeno y nitrógeno han permitido el desarrollo de sistemas de plasma de alta definición, que causan mejoras drásticas sobre los sistemas convencionales cortando materiales finos.



Fuente: www.alcedemexico.com

Figura 5.9. Corte con PAC de alta definición

5.6.1. Tecnología de protección

Este desarrollo, permite que las torchas de plasma de mano corten con la boquilla tocando directamente en la chapa. Se ha eliminado el problema de doble arco que afecta la vida de la boquilla y a la calidad de corte. Esta tecnología incluye un escudo de cobre fino y aislado eléctricamente que protege la boquilla de la chapa. Esta tecnología de revestimiento, incrementa la vida de la boquilla enormemente y aumenta la capacidad de perforación.



Fuente: spanish.alibaba.com

Figura 5.10. Boquillas para PAC de alta definición

Uno de los desarrollos más importantes en los plasmas modernos, es admitir las ventajas del corte con plasma por oxígeno, obteniendo mayor durabilidad en los consumibles.

Durante el proceso de corte con oxígeno, el material interno del electrodo (hafnium) queda en un estado fundido. Al final de cada ciclo cortado, pequeñas partes de este material fundido se eyectan desde la punta del electrodo, bien a la parte interior de la boquilla o bien salen al exterior por su orificio. Esta pérdida de material crea un hoyo en la punta del electrodo que al final (después de 100 a 150 perforaciones) produce un cambio en la calidad de corte. La boquilla está también afectada por las proyecciones depositadas en el interior, que causan una circulación de gas incorrecta. Las nuevas tecnologías incluyen un microprocesador que controla simultáneamente durante todo el proceso la corriente eléctrica y la circulación del gas.

Este control minimiza la reacción química y térmica al principio de cada corte, y re solidifica el material del electrodo al final de cada ciclo, causando un incremento en la vida de los consumibles de 600 a 1200 perforaciones, sin afectar a la calidad de corte.

5.6.2. Intervalo libre de rebaba

Los sistemas de alta definición incluyen un colector mezclador de gas que crea un gas de revestimiento que incrementa el rango de velocidad libre de rebaba. Esto elimina la rebaba prácticamente sobre la mayoría de los materiales y espesores.

5.6.3. Anillo de circulación de alto rendimiento

Es importante crear un torbellino poderoso del gas alrededor de la superficie del electrodo en orden a mantener un punto de incidencia del arco exacto. Este torbellino es originado soplando el gas de plasma alrededor del electrodo, que crea un dibujo de circulación del gas similar a un "Tornado". Debido al pequeño diámetro de orificio requerido para estrangular apropiadamente el arco de alta definición, existe una gran dificultad para generar suficiente fuerza de soplado; no hay suficientemente circulación de gas.

Los nuevos anillos torbellino fueron desarrollados para admitir una circulación de gas relativamente alta, mientras aliviaban la presión dentro de la torcha antes de que el arco fuera definitivamente estrangulado.

Estos anillos de alta circulación solventaron el problema de una circulación de gas estrecha y permitió que con el arco correcto, se mantuviera la vida de las piezas.

5.6.4. El incremento de la densidad de energía

Las innovaciones arriba indicadas, fueron combinadas para permitir la densidad de energía creciente de los sistemas de alta definición, y así alcanzar los rangos requeridos de 40,000 a 60,000 A/pulg². Esto ha producido una duración de vida del consumible de entre 600 a 1.200 perforaciones. Este proceso elimina los problemas de calidad en el corte que han atormentado a los procesos de plasma por debajo de los 10 milímetros de espesor.

Antes del lanzamiento a producción de los sistemas de alta definición, era necesario llevar a cabo pruebas de laboratorio extensivas tanto a la vida de consumibles como a la calidad de corte. Típicamente, el desgaste de consumibles en sistemas de plasma convencionales resulta de una degradación bastante lineal en la calidad de corte, hasta el punto de que ésta deja de ser aceptable. El desgaste de los consumibles, produce pérdida en la perpendicularidad, y la formación de más rebaba. Sería necesario cambiar los parámetros de corte para compensar este uso

Los resultados de las pruebas con plasma de alta definición, han mostrado que el desgaste del consumible no tiene ese efecto de calidad lineal sobre las piezas cortadas. A decir verdad, la calidad del corte es relativamente constante durante toda la extensión de vida del consumible, permitiendo mucha mejor repetitividad en las tolerancias de las piezas cortadas. Las boquillas y los electrodos se desgastaron en base uno a uno, haciendo el stockaje más sencillo.

Muchos usuarios de la alta definición han informado sobre periodos de vida más largos que los reales, y eso es indudablemente positivo.

5.6.5. Capacidades de corte de la alta definición

La alta definición, al igual que los demás sistemas de plasma, produce la mejor calidad de corte dentro de ciertos grosores y tipos de material. Es también importante recordar que no es posible producir cortes sin rebaba y de buena calidad, si el dispositivo de control de movimiento es inadecuado.

El control de movimiento debe tener unas características de aceleración / desaceleración excelentes, gran fluidez en los desplazamientos, libre de vibraciones en los contornos, junto con especificaciones de exactitud y de repetitividad que superen a los dispositivos convencionales. Los parámetros como velocidad, altura de corte, las presiones de gas y la pureza deben ser mantenidos de acuerdo a las especificaciones para aprovechar por completo las cualidades de la alta definición.

Los equipos de alta definición se han integrado a nuevas tecnologías como lo es el cnc como se ve en la fig. 5.12



Fuente: www.deleomaq.com

Figura 5.12. Equipo CNC de PAC de alta definición

Los aceros al carbono en espesores de entre 0.9 mm. Hasta 25 mm. Pueden ser cortados con los sistemas de alta definición. La apariencia del corte en acero al carbono de menos de 8 mm. Es suave y perpendicular, sin redondeos en la parte superior de las piezas. Sobre acero laminado en frío prácticamente la rebaba es inexistente, mientras que sobre acero laminado en caliente puede haber un poco de rebaba fácil de quitar. Estos cortes son muy similares en apariencia a cortes con láser, con la excepción de una sangría más ancha. En estos términos, la perpendicularidad en el corte es casi perfecta (de entre 0 y 2 grados). El aluminio se corta muy bien con el sistema de alta definición, usando aire como gas plasmógeno y aire o metano como gas de protección.

Aunque los costos son mayores, el metano proporciona un canto increíblemente suave sobre el aluminio. Se debe de tener cuidado al programar y cortar agujeros pequeños. Debido a que el plasma es un proceso de arco transferido, a veces se produce una muesca pequeña al final de un corte en el momento de cruzar por encima de la sangría que genera la entrada al contorno.

CONCLUSIONES

Después del trabajo realizado se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- Los procesos de maquinado no convencional han tenido una mayor aceptación en la industria en los últimos años por la gran cantidad de ventajas que tiene en comparación con los procesos de maquinado convencionales.
- La gran ventaja que ofrecen los procesos de maquinado no convencionales ante los convencionales es que estos no generaran altas temperaturas durante el proceso de maquinado lo cual no ocasiona una alteración a las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que puedan ser maquinados.
- Los procesos de maquinado no convencional han tenido grandes avances tecnológicos y mejoras en sus procesos gracias a la integración de sistemas de CNC o CAD/CAM los cuales les permiten tener una mejor repetitividad, mejores acabados y maquinados complejos.
- Las máquinas de corte láser son opciones muy en los talleres de maquinado porque éstas cambian de un metal a otro realmente rápido y pueden manejar varios espesores con un simple cambio en el ajuste del foco. Los láseres tienen además una zona afectada por el calor muy pequeña debido a que el láser puede enfocarse muy estrechamente.
- El corte por chorro de agua es adecuado para aquellos talleres que desean cortar una variedad de materiales, no sólo metales. Los chorros de agua pueden usarse para cortar materiales tan diversos como vidrio y hule.
- Los maquinados por electro descarga es de los procesos que permiten mejor acabado de la pieza de trabajo ya que no deja rebaba de material además que puede maquinar cualquier metal conductor cual sea su dureza y no ocasiona un esfuerzo en la pieza ya que el electrodo nunca entra en contacto con la pieza de trabajo.

- El maquinado con corte con plasma es el proceso de maquinado no convencional más rápido de los analizados lo cual le permite tener un gran uso en la industria automotriz actual.
- En general los procesos de corte no convencional tienden a presentar mayor uso en la industria por su fácil adaptación a tecnologías nuevas y el cuidado que se le da a los materiales a maquinar. Además de que los procesos de maquinado no convencional se puede adaptar a energías alternas. Y versatilidad con materiales nuevos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Principios de ingeniería de manufactura

Black, C. Stewart, Chiles, Vic, Lissaman, A. J., Martin, S. J.,
Editorial CECSA. Mexico. 1999.

2. Procesos de manufactura

Jon a Schey.
Editorial Mc. Graw Hill. 2000

3. Manufactura, ingeniería y tecnología

S. Kalpakjian, S. R. Schmid.
Editorial Pearson. 2008

4. Manual de soldadura tomo II

American Welding Society.
Prentice-Hall. Hispanoamericana.1996

5. Manufacturing Engines Handbook

SAE
Editorial Mc. Graw Hill. EUA. 1976

6. Fundamentals of modern manufacturing

Mikell P. Groover
Editorial Wiley. 2007

7. Fundamentals of manufacturing processes

G.K. Lal, S.K. Chouchury
Editorial Alpha Science International Ltd. 2005

8. Ingeniería de manufactura

Ulrich Scharer Sauberli

Editorial Continental, 1984

9. Materials and processes in Manufacturing.

E. Paul Deyarmo, J.T. Black,

Prentice Hall, 1997

10. Entendiendo las tecnologías de corte de metal

<http://www.thefabricator.com/article/lasercutting/entendiendo-las-tecnologias-de-corte-de-metal>

24 de agosto del 2012

11. Laser de corte y perforación laser

<http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-cutting.htm> 24 de agosto del 2012

12. Corte por plasma

<http://www.vier-electronica.com/amp/mas.pdf> 13 de abril del 2013