



## TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES QUE TRANSFORMAN ENERGÍA ELÉCTRICA A ENERGÍA TÉRMICA PARA CORTE DE METALES: UNA REVISIÓN

### UNCONVENTIONAL TECHNOLOGIES TRANSFORMING ELECTRICAL ENERGY INTO THERMAL ENERGY FOR CUTTING METALS: A REVIEW

<sup>1</sup> Fabián Leonardo Rodríguez Guerrero, <sup>2</sup> Ph.D Albert Miyer Suarez Castrillon  
<sup>1,2</sup> Programa de Ingeniería Industrial  
<sup>1,3</sup> Universidad de Pamplona

#### RESUMEN

Las tecnologías de mecanizado no convencional UCM, son aquellas que utilizan energías diferentes a la energía mecánica para realizar mecanizados complejos, y en las cuales la herramienta de corte no llega a toca el material que se quiere cortar. Las tecnologías de mecanizado no convencional de tipo termoelectrico hacen parte de las UCM y se caracterizan por transformar energía eléctrica en energía térmica por una diferencia de potencial, por la ionización de sustancias dieléctricas para crear chispas con elevadas temperaturas y con la amplificación de luz. Este artículo presenta una revisión bibliográfica de la aplicación de las tecnologías no convencionales de fabricación que transforman energía eléctrica a térmica de mayor relevancia, con el fin de exponer aquellos que son más conveniente para cortar metales de mayor uso en la industria, así como sus beneficios y retos más sobresalientes. Diferentes estudios experimentales evidenciaron las ventajas de este tipo de mecanizado frente al tradicional, brindando soluciones para el corte de distintos tipos de metales como las súper-aleaciones y acero. Se pudo concluir que a pesar de que la UMC de tipo térmico consume mayor energía, es más costoso de implementar y presenta algunos retos como la generación de capa de refundición y daño por calor, también ofrece mejores beneficios a las industrias más exigentes en cuanto a calidad y tiempo de mecanizado.

**PALABRAS CLAVE:** Mecanizado no convencional, electroerosión, láser, plasma, haz de electrones, metales

#### ABSTRACT

UCM unconventional machining technologies are those that use energies other than mechanical energy to perform complex machining, and in which the cutting tool does not touch the material to be cut. Non-conventional thermoelectric machining technologies are part of the UCM and are characterized by transforming electrical energy into thermal energy by a difference in potential, by ionization of dielectric substances to create sparks at high temperatures and with the amplification of light. This article presents a bibliographic review of the application of non-conventional manufacturing technologies that convert electrical energy to thermal energy of greater relevance, in order to expose those that are most suitable for cutting metals of greater use in industry, as well as their most outstanding benefits and challenges. Different experimental studies evidenced the advantages of this type of machining as opposed to the traditional one, offering solutions for the cutting of different types of metals such as superalloys and steel. It was concluded that although the thermal type WBU consumes more energy, is more expensive to implement and presents some



challenges such as the generation of cast layer and heat damage, it also offers better benefits to the most demanding industries in terms of quality and machining time.

**KEY WORDS:** Unconventional machining, electro-erosion, laser, plasma, electron beam, metals

## I. Introducción

El mundo moderno se encuentra inmerso en una revolución tecnológica constante, lo que ha llevado a aumentar la necesidad en las industrias de mejorar sus procesos de fabricación para acoplarse a los requerimientos actuales de calidad e innovación. No obstante, los estudios sobre fabricación han estado a la vanguardia en muchas áreas para mejorar los procesos de mecanizado, buscando continuamente nuevas técnicas que mejoren los procesos al mismo tiempo que se optimizan los recursos. (Anwar, Abdullah, Alkahtani, Ahmad, & Alatefi, 2019; Zhang, Xu, Wang, Ni, & Ling, 2019). Los conceptos más relevantes se presentan a continuación: teoría.

1.1 PROCESOS DE MECANIZADO NO CONVENCIONALES (UCM): son operaciones de mecanizado y fabricación que tiene mayor alcance que el mecanizado convencional, ya que utiliza otro tipo de tecnología y energía para mecanizar materiales con características inusuales, operaciones que exigen mayor eficiencia y calidad, y que son más complejas de realizar con el mecanizado habitualmente utilizado, sin que exista necesariamente un contacto físico entre la herramienta de corte y el material. (Chaitanya, Babu, & Kumar, 2019; Gamage & Desilva, 2015). En la tabla siguiente se hace una comparación general entre los procesos de mecanizado convencionales y los no convencionales.

**Tabla 1.** Comparación entre los procesos convencionales y no convencionales

PROCESO CONVENCIONAL	PROCESO NO CONVENCIONAL
Contacto físico de la herramienta con la pieza	No hay necesariamente un contacto físico entre la herramienta y la pieza
Herramienta de corte con más dureza que el material a mecanizar	No es necesario que la herramienta de corte sea más dura que el material a mecanizar
Posible formación de viruta resultante de mecanizar el material	Eliminación de viruta
Por lo general se realiza un proceso mecánico	Utiliza un proceso térmico
Uso de fuerza física	No utiliza necesariamente la fuerza física

Fuente: Elaboración propia basado en (Chaitanya et al., 2019)

En la actualidad existe una variedad de tecnologías de mecanizado no convencional que han demostrado su eficiencia al ser integrados en procesos de fabricación en muchas empresas, además de las nuevas investigaciones experimentales sobre estas herramientas que surgen con el objetivo de brindar evidencias sólidas, que permitan dar solución práctica a problemas complejos de algunas industrias y enriquecer a otras con teoría para nuevos inventos y desarrollos como por ejemplo la nanotecnología y la biomecánica (Brant & Sundaram, 2016; Suchánek & Zetková, 2015). Esto debido a que han demostrado ser una opción factible para mecanizar materiales con propiedades inusuales y complejas que dificultan su realización con el método tradicional tales como; la dureza, la fragilidad, la tenacidad etc., así como también su gran adaptabilidad para ejecutar operaciones



complejos como por ejemplo el micro- mecanizado de componentes (Chaitanya et al., 2019; Gamage & Desilva, 2015)

Por otro lado grandes industrias como la automotriz, la aeronáutica, la bioingeniería y automoción, debido a las exigencias actuales, han hecho mayor énfasis en los metales especialmente las súper-aleaciones para crear componentes modernos los cuales presentan propiedades específicas y variantes como la *tenacidad, resistencia a la corrosión y a temperaturas elevadas*, esto aumenta la demanda de tecnología de mecanizado que se acople a las características de este tipo de materiales para realizar procesos de corte óptimos y de calidad. Sin embargo cortar este material con el mecanizado convencional resulta ineficaz. ( citado en Ananthakumar et al., 2019; Z. Q. Deng, Y. W. Zhu, F. Wang, X. Gu, 2017). Es por ello que se utiliza el mecanizado de tipo térmico como alternativa factible para cortar metales.

## 1.2 MECANIZADO NO CONVENCIONAL DE TIPO TÉRMICO

El mecanizado no convencional de tipo térmico es aquel que transforma la energía eléctrica en calor por medio de una diferencia de potencial. Según (Stoker, 2008) la diferencia de potencial recibe el nombre de Voltio y es la razón entre el *trabajo realizado al transportar una carga negativa (electrones) en Julios* de un potencial negativo a uno menos negativo y las unidades de carga en *coulomb (C)* quedando  $V=J/C$ . Este transporte de cargas por diferencia de potencial recibe el nombre corriente eléctrica en *Amperios (A)*. Los electrones que se transportan al realizarse trabajo por diferencia de potencial se mueven por energía cinética que a su vez se manifiesta en forma de calor por el efecto Joule que básicamente consisten en el rozamiento de estos electrones con los átomos de la pieza conductora. Este calor que se produce es el que se encarga de fundir el material que luego es evaporado. Sus elevadas temperaturas en el punto a mecanizar generalmente afecta físicamente el material dejando capas de refundido (Groover, 2011). También se utiliza la ionización de materiales para crear una chispa que alcanza temperaturas elevadas y la luz amplificadas en los láseres para conseguir fundir superficies que luego es evaporado. Muchas de las tecnologías de mecanizado de este tipo, necesitan que el material sea metálico y por ende conductor de electricidad para que de esta manera se genere un flujo en una sola dirección llamada corriente continua ya que esto permite la interacción eléctrica en el proceso.

El desarrollo del control numérico por computadora (CNC) por su parte, ha acelerado la transición del mecanizado convencional al no convencional, ya que esta tecnología permite un manejo de la herramienta de forma automatizada reduciendo considerablemente el tiempo y aumentando la calidad de corte (Biri et al., 2010). Sin embargo a pesar de contar con la tecnología no convencional, es indispensable encontrar la técnica de mecanizado adecuada para cortar diferentes tipos de metales, con el fin de disminuir los efectos negativos de fabricación como por ejemplo; el calor que surge al momento de mecanizar y la capa de refundición (Maharana, Kumar, Murty, Ramkumar, & Mondal, 2019).

Este es el caso de muchos procesos como los micro-agujeros en metales que al ser utilizado abundantemente en la fabricación de motores tanto de aviones (agujeros de enfriamiento) como automotriz (agujeros de inyección) requieren en gran medida técnicas óptimas que aseguren una calidad superior (citado en Duan et al., 2019), lo que ha provocado la realización de diversos experimentos para llegar a encontrar el mecanizado que asegure esa calidad. Por ejemplo (Guillermo Jiménez-Chavarro, Vieira-Porto Arthur José, 2016) obtuvo buenos resultados utilizando el



mecanizado EDM para micro-agujeros, teniendo en cuenta diferentes limitantes y analizados bajo el diseño de experimento de *Taguchi* con “*arreglo ortogonal L27*”, pudiendo disminuir el deterioro del electrodo y la aspereza del área de trabajo, mejorar la eliminación de material y aumentar la rapidez de maquinado. A pesar de ello, el EDM provoca un gran número de desperfectos que disminuyen la calidad y su duración. Las capas de refundición, los esfuerzos residuales, y las microgrietas son algunas de estas (citado en Zhang, Xu, Wang, Ni, & Ling, 2019).

Otra opción viable para realizar micro agujeros según (Marimuthu, Antar, & Dunleavey, 2019) es la utilización de *laser de pulsos cortos y ultra cortos*, y de milisegundos como opción alterna para algunos tipos de mecanizado, especialmente en *súper-aleaciones* en la industria espacial. Sin embargo según (Duan et al., 2019) este tipo de mecanizado tiene el inconveniente de no eliminar eficientemente la capa de refundición que resulta del material. Por lo tanto se debe analizar los estudios que demuestren que tipo de mecanizado no convencional de tipo térmico es más conveniente para cortar algunos de los metales de mayor dureza y de mayor utilización, con el fin de disminuir desperfectos por el calor y aumentar la calidad para esto es necesario identificar las variables de entrada que se deben controlar para lograr un mecanizado más óptimo.

Actualmente existen muchas investigaciones que se han centrado en encontrar las variables de entrada que se deben tener en cuenta para optimizar el mecanizado en diferentes tipos de metales. Por lo anterior (Sureban, Kulkarni, & Gaitonde, 2019) realizó una revisión sobre los parámetros a tener en cuenta para la optimización de sistemas de mecanizado no convencional y basándose en estudios experimentales creó un gran inventario de estas técnicas que permiten la mecanización con resultados mayores.

Sin embargo existen diferencias mecánicas en los diferentes tipos de metales que no permiten que un tipo de corte no convencional que funcione en un tipo de metal tenga los mismos resultados que en otro. En base a lo anterior, se debe estudiar con detenimiento, el rendimiento de corte de estos materiales con las tecnologías UCM de tipo térmico para escoger la técnica más adecuada y sus variables de entrada. (Gowthaman & Jeyakumar, 2019) resalta la importancia de las súper-aleaciones en la industria actual por diversa aplicabilidad debido a sus características como la resistencia a temperaturas de hasta 1800 °C sin afectaciones estructurales. Para ello realizó una revisión sobre el mecanizado de estos tipos de aleaciones basándose puntualmente en la electroerosión por hilo WEDM, encontrando que este método tiene grandes propiedades para mecanizar este tipo de material siempre que se proporcionen valores correctos para las variables de entrada, sin embargo resalta la falta de más investigaciones experimentales en diferentes tipos de superaleaciones para encontrar valores más óptimos y que obtengan mejores resultados, ya que la mayoría de investigaciones está centrada en aleaciones a base de Níquel.

Por otro lado (Chandra & Singh, 2015) realizó una revisión bibliográfica sobre el corte por el método EDM de aleaciones de aluminio, materiales de gran utilización especialmente en la industria aeronáutica debido a su bajo peso. En su indagación encontró las ventajas y sus limitaciones así como también modelos de optimización que mejoran el rendimiento de corte en este tipo de materiales, con las variables de entrada óptima propuesta y sustentada por diversos autores. Siguiendo esta investigación (Gangil, Pradhan, & Purohit, 2017) condensó los modelos de optimización para el EDM en un estudio de revisión. Algunos de estos modelos son; Red neuronal, Análisis relacional gris, Algoritmo genético, Colonia de abejas artificiales etc.



El láser por su parte, ha sido una tecnología que revoluciono muchos campos de la ciencia y la industria, hoy en día tiene amplias en diferentes disciplinas, entre ellas está el corte de materiales por láser. Debido a su importancia, este tipo de mecanizado ha sido foco de múltiples investigaciones experimentales. En base a eso (Nagimova & Perveen, 2019) realiza una revisión bibliográfica sobre el mecanizado laser analizando de manera crítica su funcionamiento, describiendo técnicas de corte para metales difíciles de cortar basándose en valores óptimos de entrada. También describe los retos de este tipo de UCM como la generación de las zonas afectadas por calor (HAZ).

Por su parte algunos investigadores han buscado ir más allá para la manera de crear técnicas para encontrar el tipo de UCM óptimo para diferentes tipos de metales por ejemplo (Prasad & Chakraborty, 2018) creo un *marco de orientación* en Visual Basic 6.0 que permitiera a los fabricantes tomar la decisión sobre qué tipo de UCM. El aplicativo toma en cuenta los costos, la velocidad, la geometría, los daños por calor, el tipo de material, la rugosidad etc. que aunque su aplicación es básica, impulsa la generación de futuras investigaciones más robustas, ya que de esta manera se tomaran las decisiones más acertadas que optimicen los recursos al mecanizar metales.

Es así que, basado en que no existen artículos de revisión que hablen directamente sobre el tema a tratar en este artículo, se indagará acerca de las tecnologías de tipo térmica más relevantes para corte de metales, debido a su importancia en las industrias actuales y a sus características diferenciadas, partiendo desde la idea de entender el funcionamiento básico de cada uno ellos, describiendo las características inherentes, sus principios de funcionamiento y las herramientas que lo conforman. Posteriormente, en base a diferentes investigaciones experimentales actuales, se dará un acercamiento al uso actual de este tipo de tecnología, con el fin de identificar aquellos tipos de corte no convencional que son más convenientes para cortar algunos de los materiales de mayor uso en la industria así como sus beneficios retos, limitaciones y tendencias más relevantes.

**II. Tecnologías de corte**

A continuación, se describen las diferentes tecnologías más relevantes que transforman energía eléctrica a energía térmica para cortar metales.

2.1 MECANIZADO LASER: Es un tipo de mecanizado no convencional de alta precisión. Está conformado por un emisor de luz láser cuya longitud de onda varía de acuerdo a las características del material, el cual al concentrar energía térmica funde el material y elimina la viruta por evaporización.(Wu, Zou, Yan, Cao, & Ehmann, 2019).

El funcionamiento del mecanizado laser se muestra en la **Fig. 1**. Está conformado por una lámpara flash que excita los electrones de un medio activo que puede ser un gas comúnmente CO2, estos electrones excitados pasan de una zona más alejada o de mayor energía a una zona más cercana al núcleo y de menor energía, en este salto pierden energía que es liberada en forma de fotones, estos fotones se desplazan en un ciclo constante entre los espejos reflectantes en modo rebote. Al moverse constante mente excita otros electrones aumentando la potencia, estos electrones se alinean formando un solo flujo el cual sale por un pequeño orificio del espejo parcialmente reflectante con una gran densidad de energía cuyo rayo es potenciado y regulado con una lente. Este rayo es enfocado en un solo punto de la pieza de trabajo para cortar por calor aprovechando su gran densidad.(Parmar, Kumar, Prakash, & Datta, 2019)

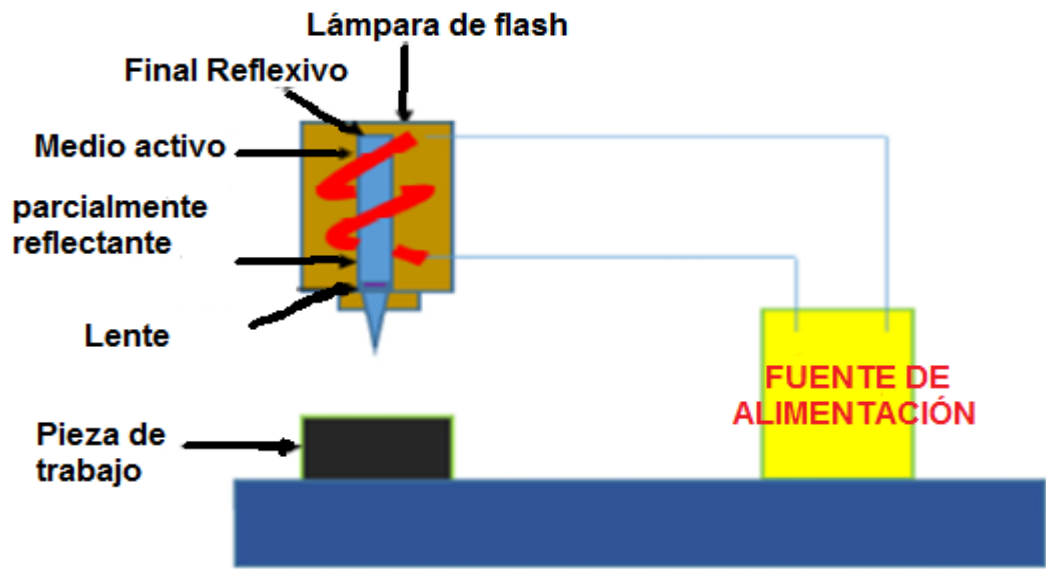


FIGURA 1. Representación gráfica del LBM  
Fuente: Tomado de (Nagimova & Perveen, 2019)

Esta cantidad de energía que se deposita en el área de corte está determinada por la ecuación (1) de la densidad de energía( $J/cm^2$ ) que es la cantidad de energía concentrada en una área específica(Guimarães et al., 2019).

$$Densidad\ de\ energia\ (J/cm^2) = \frac{P * t}{A} \tag{1}$$

En donde:

$P$ : Potencia del láser (W)  $t$ : Tiempo de irradiación (s)  $A$ : área de la superficie de irradiación ( $cm^2$ )

El mecanizado laser tiene amplia utilización en la industria debido a sus grandes ventajas, dentro de estas se resaltan el gran rendimiento que aumenta la productividad de los procesos, además su elaboración resulta más sencilla que otras y por ende es más económica. Desde el punto de vista ambiental su impacto negativo es mucho menor que otros sistemas. Además de lo anterior, el rayo laser se focaliza de manera precisa en el punto programado realizando cortes más exactos y con poca anchura. El HAZ por su parte, que es la zona afectada por el calor es angosto lo que permite que el área que rodea a la línea de corte no se agriete (Nagimova & Perveen, 2019). Los tipos de procesos laser más utilizados en la industria son, Corte con laser; Temple, Texturizado, Marcado, Microtaladro, Grabación, Abrasión, Quemado, (Ibarra, 2014)

2.2 MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN (EDM): Los tipos de mecanizado EDM son; EDM que penetra, EDM por hilo A continuación se describe cada uno de ellos.

EDM POR PENETRACIÓN: Es un tipo de mecanizado que hace uso de un electrodo, con el cual se aplica numerosas *descargas eléctricas* a una pieza con aproximadamente 10  $\mu s$  de tiempo transcurrido entre descarga. En el intermedio del electrodo y la pieza se proporciona una sustancia aislante que por lo general es un aceite o líquido no ionizado para eliminar material de dicha pieza, la cual a su vez necesita estar conectada a la C.C creándose energía termoeléctrica que *funde y evapora el material*. (Citado en Guillermo Jiménez-Chavarro, Vieira-Porto Arthur José, 2016). Este tipo de mecanizado recibe este nombre debido a que la herramienta penetra la pieza sin llegar a tocarla eliminando material a medida que avanza creándose en la pieza una copia fundida del electrón. En la **Fig.2** se ilustra el funcionamiento del EDM pudiéndose apreciar la interacción, entre sus elementos como el fluido dieléctrico, el electrodo o herramienta, el material a mecanizar, y la chispa que se crea. La distancia de separación entre el electrodo y la pieza se mantiene constante en casi 0,025 mm, para mantener esta distancia y para moverse en los 3 ejes (x,y,z) necesita ser controlado por un sistema computacional (CNC). (Velpula, Eswaraiah, & Chandramouli, 2019). También se muestra gráficamente la relación entre la Energía (J) y el Tiempo (s).

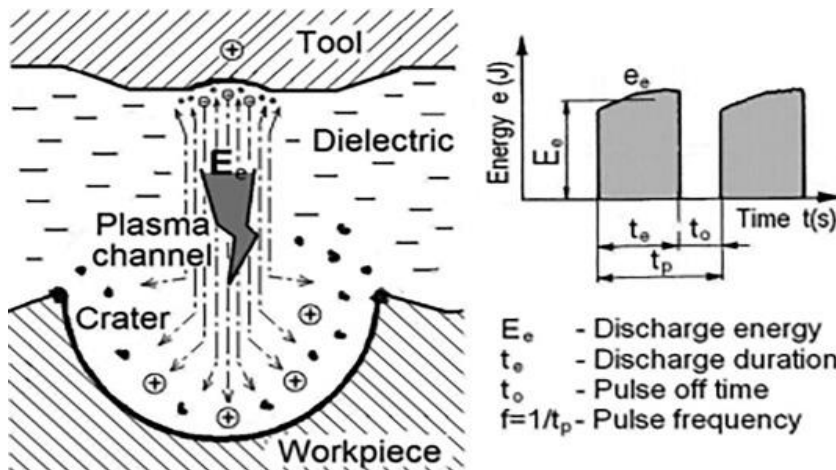
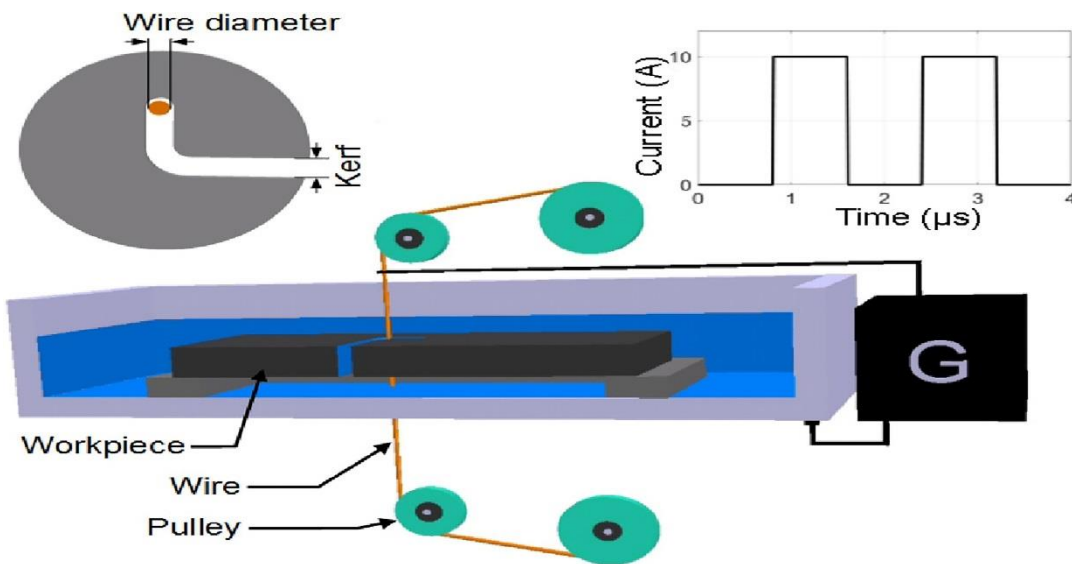


FIGURA 2. Representación gráfica del EDM por penetración.  
Fuente: Tomado de (Pant & Bharti, 2019)

Este método se ha convertido en una herramienta de gran uso en las empresas debido a que tiene las siguientes ventajas y características.(Dwivedi & Choudhury, 2016)

- Se pueden fabricar objetos con geometrías difíciles de mecanizar con el método convencional.
- Se crea una copia muy similar al electrodo utilizado.
- La dureza no es un impedimento para este tipo de mecanizado siempre que el material sea buen conductor de la electricidad
- El electrodo y el material nunca llegan a tocarse durante el mecanizado

EDM POR HILO (WEDM): Este tipo de EDM tiene el mismo principio físico que el de penetración, sin embargo en éste caso el electrodo o herramienta de corte es un hilo de material conductor comúnmente de cobre o latón el cual va enrollado a unas bobinas que giran continuamente(Katerina Mouralova et al., 2018). El movimiento del hilo es controlado por un una máquina CNC de acuerdo a la ruta predefinida a lo largo del plano, esto le permite maquinar geometrías complejas. En la **fig. 3** se muestra su funcionamiento en donde se pueden identificar las bobinas que enrollan al hilo el cual está conectado a la corriente. La pieza a su vez también está conectada a la corriente para formar un circuito. Este hilo produce una chispa por ionización del líquido dieléctrico que funde el material el cual luego es evaporado. Este líquido también se lleva consigo las partículas diminutas que se solidifican al enfriarse.(K Mouralova et al., 2018)



**FIGURA 3.** Representación gráfica del EDM por hilo.  
Fuente: Tomado de (Katerina Mouralova et al., 2018)

Este tipo de mecanizado tiene grandes ventajas que lo hace muy eficaz para cortar metales, dentro de estas ventajas está la capacidad de mecanizar cualquier material que sea conductor sin importar la dureza. Además permite mecanizar láminas y materiales blandos ya que al no existir contacto físico con el material no se afecta la estructura. El más importante, es su eficacia para maquinar cualquier tipo de geometría, y formas de tamaño diminuto siempre que el diámetro del hilo lo permita(K Mouralova et al., 2018)



2.3 CORTE POR ARCO DE PLASMA (PAC): Es un tipo de mecanizado que permite cortar material conductor por medio de un arco eléctrico(plasma), que se produce al ionizar un gas con corriente continua, para ello el electrodo posee polaridad negativa y el material necesita tener polaridad positiva para que pueda tener éxito el corte (Salonitis & Vatousianos, 2012). En la **fig.4** está representada un cabezal del PAC. Se puede observar las cámaras de gas el cual se le aplica a gran presión para que salga con rapidez por la boquilla. En la parte central se encuentra un electrodo de tungsteno, el cual proporciona una gran corriente directa al gas hasta ionizarlo creando una chispa. Este cabezal al acercarse a la pieza de trabajo que también está conectado a la corriente con polaridad contraria completa el circuito y la chispa sale del cabezal por la boquilla. Esta chispa alcanza temperaturas de hasta 16000 ° y es la responsable de fundir el material que luego es evaporado y arrastrado por gas.(Bhowmick, Basu, Majumdar, & Bandyopadhyay, 2018)

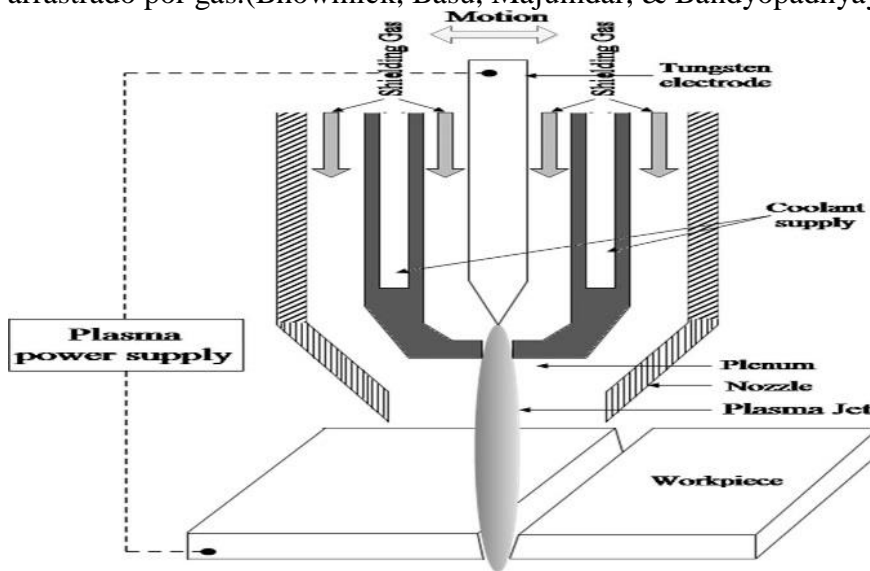


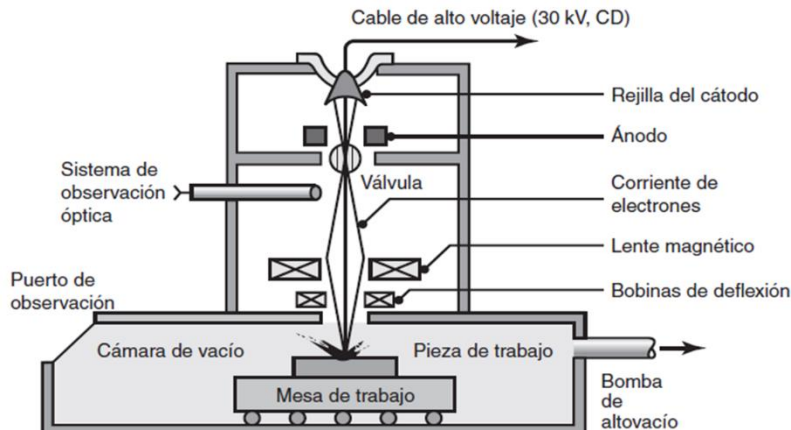
FIGURA 4. Representación gráfica del PAC.  
Fuente: Tomado de (Ananthakumar et al., 2019)

Este tipo de mecanizado se perfila como un importante herramienta de corte dado sus características de corte, compitiendo con el mecanizado laser que aunque presenta mas calidad es mas costoso. Además su facilidad de adaptación a sistemas CNC le permiten reducir diversos variables como el costo y tiempo de mecanizado y aumentar la precisión. Actualmente se considera el tipo de UMC mas versátil por la sencillez de su estructura.(Patel, Soni, Kotkunde, & Khanna, 2018). Por otro lado se debe tener en cuenta cuales son las variables de entrada que se deben de optimizar. Según (Patel, Nakum, Abhishek, & Kumar, 2018) los parametros mas importantes a tener en cuenta para optimizar el mecanizado es la altura de la llama, la tasa de eliminación de material y la presión aplicada en el gas.

2.4 MECANIZADO POR HAZ DE ELECTRONES (EBM): Este tipo de mecanizado de tipo térmico sucede en un campo al vacío, para ello se hace uso de un cátodo y un ánodo con el fin de generar por la diferencia de potencial una corriente de electrones el cual es enfocado en el área de la pieza que se va a cortar por medio de lentes magnéticas.

En la **fig. 5** se pueden observar la interacción de los componentes, el cable de alto voltaje que hace circular corriente, también se encuentra el cátodo y el ánodo que gracias a la diferencia de potencial

crean la corriente de electrones que son enfocadas por los diferentes imanes hacia un punto específico de la pieza de trabajo.



**FIGURA 5.** Representación gráfica del EBM.  
Fuente: Tomado de (v. Alderete , 2013)

Este tipo de mecanizado presenta gran riesgo para los humanos debido a la generación de rayos X. Por lo tanto para su utilización el operario tiene que estar bien capacitado. La mayoría de investigaciones están enfocadas en el maquinado de superficies, soldadura, fundición de materiales, mejoramiento de metales por medio de endurecimiento superficial, ya que el corte resulta costoso y demorado

### III. Uso de las tecnologías de corte dependiendo del material

A continuación se describe las tecnologías de corte basadas en el tipo de metal.

#### 3.1 MECANIZADO DE METALES FERROSOS

##### 3.1.1 EL ACERO

El acero, una aleación de hierro y carbono tiene grandes peculiaridades como la tenacidad y dureza, resistencia al calor y a la corrosión, lo que lo mantiene por años como una de las aleaciones más usadas por diferentes empresas. Debido a sus características, resulta un gran reto cortarlo con el mecanizado convencional. Para ello se recomienda, basado en investigaciones experimentales la utilización del **arco de plasma (PAC)** para cortar el acero ya que puede alcanzar temperaturas de hasta 16000 °C. El acero al ser muy utilizado en la fabricación de estructuras de grandes dimensiones como barcos y aviones, necesita sistemas de corte que se adapten a la forma de ésta y no al revés se. Es por esto que el PAC al ser de gran versatilidad se adapta a estos espacios para cortar diferentes tipos de acero de manera ágil. La máxima efectividad de este método se logra si se proporcionan los valores óptimos de acuerdo al tipo de acero para las variables de entrada que son la *presión del gas* que por lo general es oxígeno y la *velocidad de avance* que es la velocidad con que transcurre el cabezal sobre la pieza.

Como método alternativo muchos autores recomiendan el método de mecanizado **EDM** como tecnología potencial para cortar acero templado, gracias a sus características para cortar materiales



difíciles y a su adaptación a diferentes geometrías, siempre que se consigan valores óptimos de *tiempo de pulso*, *tiempo de pulso apagado* y *el tiempo de elevación de la herramienta* ya que son las variables que influyen directamente en la tasa de remoción de material. Sin embargo existen tipos de UMC de tipo térmico que no son muy eficientes por los problemas que presentan. Es el caso de maquinado laser (LCM) que provoca formación de *plasma inducido por láser LIP* el cual dispersa la energía emitida y por lo tanto no llega con la energía suficiente para cortar el material. También sucede por las características de material que refleja los rayos perdiéndose un gran porcentaje de energía.

## 3.1.2 HIERRO FUNDIDO

Este material tiene una gran utilización en la industria ya que las empresas lo prefieren después del acero debido a su bajo costo y sus características físicas. Está compuesto por hierro, silicio y carbono mayor al 2% lo que lo diferencia del acero. Su mecanización por el método tradicional es compleja debido a su dureza. Es por lo anterior que se recomienda la utilización de los métodos **PAC** y **EDM** debido a su conductividad eléctrica, y también porque éstos no se ven afectados por la cantidad y forma del carbón insertado en el hierro, lo que si sucede con el método de mecanizado laser (LCM) que provoca una capa de refundición debido a la re-solidificación en la superficie.

Estos métodos son efectivos para cortar hierro fundido, especialmente el PAC por su versatilidad de mecanizado en diferentes escenarios. Sin embargo si se requiere calidad de corte y formas complejas, es recomendable la utilización del EDM y WEDM ya que tienen la facilidad de maquinar casi cualquier tipo de pieza.

## 3.2 EL MECANIZADO DE METALES NO FERROSOS

### 3.2.1 ALEACIONES A BASE DE NIQUEL

Las aleaciones a base de níquel son ampliamente utilizados en diferentes campos de la industria por sus diferentes características, sin embargo su mecanización resulta compleja por el método tradicional. Por su parte la mecanización no convencional ofrece mayores garantías para mecanizar este tipo de materiales. Sin embargo debido la variedad de aleaciones se recomiendan la utilización de UMC de tipo térmico específico para cada uno de ellos basados en estudios experimentales. Algunos de estas aleaciones son; El *Inconel*, un tipo de aleación con gran resistencia a altas temperaturas lo que permite su utilización en la industrias aeroespacial y automoción, para esto se aconseja la utilización del **mecanizado laser LCM** que ofrece mayor eficiencia siempre que se tome en cuenta valores óptimos para las variables de entrada de *velocidad* y *potencia*.

Para el *Monel*, otro tipo de aleación utilizado mayormente en la industria naval por su resistencia a la corrosión marina se recomienda el mecanizado **PAC** debido a su característica portátil lo que permite que pueda acoplarse a la distribución del barco en el momento de la construcción, siendo fácil de transportarlo entre los diferentes módulos. El **EDM** por su parte ofrece grandes beneficios para cortar aleaciones *Nimonic* debido a la gran conductividad eléctrica de éste, lo que lo hace ideal para generar mecanizados EDM de calidad para lo cual se recomiendan más estudios experimentales para encontrar variables de entrada que permitan sacar el máximo provecho de esta técnica.

### 3.2.3 ALEACIONES A BASE TITANIO



Las aleaciones a base de titanio son de gran utilización en diferentes campos, especialmente en la biomedicina y bioingeniería debida a sus características como la tenacidad, sin embargo esas mismas características dificultan su corte por el mecanizado tradicional. Para mecanizar este tipo de material difícil de cortar, se recomienda la **electroerosión por hilo (WEDM)** y **EDM** que aunque deja *capa de refundición* si no se proporcionan valores óptimos de entrada, se presenta como una eficaz herramienta para cortar este tipo de aleaciones gracias a su adaptación al material ya que la dureza de este no es un limitante para cortar con éxito piezas con geometrías complejas y que exigen calidad de fabricación. Por su parte se aconseja realizar un análisis exhaustivo para poder utilizar otros tipos de mecanizado de tipo térmico, ya que algunos de ellos como el PAC no ofrece la misma precisión para piezas de dimensiones pequeñas que exigen poca tolerancia y con formas difíciles.

### 3.2.4 ALEACIONES A BASE DE ALUMINIO

Las industrias modernas como la aeronáutica han incrementado el uso de aleaciones a base de aluminio debido a su bajo peso y en la naval debido a su resistencia a la corrosión. Es por esto que se ha investigado su mecanización de manera rápida y con calidad considerable. Para mecanizar estos materiales se recomienda la utilización del **EDM** que como se ha mencionado anteriormente es un tipo de UMC de tipo teórico que se enfoca en calidad de mecanizado y por lo tanto funciona a la perfección para cortar metales a base de aluminio con destino a fabricar aviones los cuales exigen niveles mínimos de tolerancia. También se recomienda la utilización del **WEDM** ya que se presenta como una herramienta eficaz para cortar láminas de aluminio pues como se mencionó, este sistema no afecta las paredes ya que no existe un contacto mecánico entre la pieza y la herramienta. Sin embargo para mejorar los resultados se recomienda que se evalúe la *tasa de eliminación de material*, *tasa de deterioro del cable* y *el grado de fallas de la cuerda* que aunque no dejan un acabado de gran calidad, facilita su mecanizado en poco tiempo sin importar su dureza siempre que se proporcionen variables optimas de entrada como el voltaje de separación, el tiempo de pulso. Por otro lado no se aconseja utilizar el mecanizado laser ni el mecanizado por haz de electrones para este tipo de material ya que debido a sus características superficiales reflectan los rayos y por ende la energía se desvía, lo que lo vuelve ineficiente.

## IV. Idoneidad de los UCM para diferentes metales

La tabla siguiente presenta un comparativo de los tipos de UCM para diferentes tipos de metales con base en las referencias anteriores. Se clasifican en dos grupos; *idóneos* para maquinar ese tipo de material y *opcional* como segunda opción en caso de no contar con la tecnología idónea.

**Tabla 2.** Comparativo de los tipos de UCM con energía térmica

Tipo de material	NIVEL DE IDONEIDAD	
	IDONEO	OPCIONAL
Acero	PAC	EDM,WEDM
Hierro fundido	EDM,WEDM,PAC	LBM
Súper-aleaciones a base de Níquel	LCM, PAC, EDM(según materia)	WEDM
Súper-aleaciones a base de Titanio	WEDM,EDM	LBM
Súper-aleaciones a base de Aluminio	EDM,WEDM	PAC

Fuente: Elaboración propia



V. Resultado y discusión

El mecanizado no convencional (UCM) sigue teniendo un consumo de energía superior al mecanizado convencional, dado que procesos como fabricación a láser presenta un mayor *consumo de energía eléctrica* (J/cm<sup>3</sup>) por *tasa de eliminación de material*(cm<sup>3</sup>/S) que otros procesos convencionales tal y como se muestra en la **fig. 5**. Lo anterior repercute negativamente en los costos, en el ahorro de recursos y en la fabricación responsable.

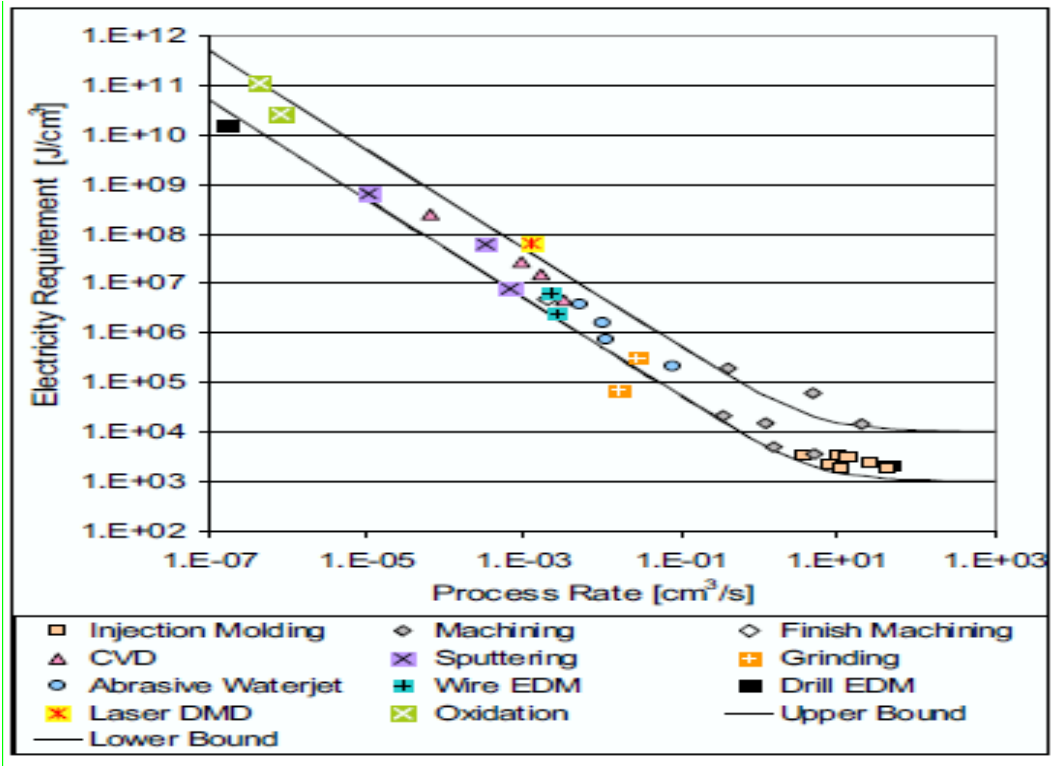


FIGURA 6. Requisitos de electricidad para procesos de fabricación comunes (traducido)  
Fuente: Tomado de (Gamage & Desilva, 2015)

Por otro lado, implementar algunos de los tipos de UMC de tipo térmico resulta costoso para algunas empresas, principalmente pequeñas y medianas, por lo que actualmente su uso por éstas es muy bajo. Sin embargo muchos procesos de producción requieren de este tipo de tecnología, como la automotriz y la industria de aviones, ya que son empresas cuyas demandas se han incrementado en los últimos, lo que crea la necesidad de utilizar tecnología que optimice la fabricación de componentes como los módulos de aviones, ya que es una de las industria con procesos de producción más complicados debido a que utiliza materiales metálicos de gran dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión y a altas temperaturas . Por otro lado, la tendencia actual de muchas industrias como la óptica, electrónica y biotecnológica, es la fabricación de micro y nano productos, lo cual exige eficiencia, eficacia y calidad en la fabricación. Por todo lo anterior es que se hace indispensable la utilización de tecnología de mecanizado no convencional para cortar metales

VI. Conclusiones

Según las fuentes consultadas, se puede concluir que; las tecnologías de mecanizado no convencional que transforman energía eléctrica a térmica pesar de que presenta algunos retos actuales como la generación de capa de refundición, daño por calor, consume una mayor cantidad



de energía y son costosas de implementar para ciertas empresas, se han convertido en herramientas de gran importancia para muchas industrias que le han apostado a la utilización de estas, especialmente la tecnología PAC y la EDM que han permitido mejorar los procesos de mecanizado al solucionar problemas que existían a raíz del uso del mecanizado convencional como las limitaciones para cortar materiales con características inusuales como las súper-aleaciones y el acero disminuyendo el desgaste de la herramienta de corte y la generación de viruta lo que aumenta la calidad y la precisión.

## Referencias

- Ananthakumar, K., Rajamani, D., Balasubramanian, E., & Davim, J. P. (2019). Measurement and optimization of multi-response characteristics in plasma arc cutting of Monel 400 TM using RSM and TOPSIS. *Measurement*, 135, 725–737. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.010>
- Anwar, S., Abdullah, F. M., Alkahtani, M. S., Ahmad, S., & Alatefi, M. (2019). Bibliometric analysis of abrasive water jet machining research. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 31(3), 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.02.002>
- Bhowmick, S., Basu, J., Majumdar, G., & Bandyopadhyay, A. (2018). Experimental study of plasma arc cutting of AISI 304 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4541–4550. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.024>
- Biri, C., Marinescu, V., Bologa, O., Breaz, R., Deac, C., & Tera, M. (2010). *Improving the Manufacturing Accuracy of the Profiling Machines*. 335–338. <https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT-3007.00077>
- Brant, A., & Sundaram, M. (2016). A Novel Electrochemical Micro Additive Manufacturing Method of Overhanging Metal Parts Without Reliance on Support Structures. *Procedia Manufacturing*, 5, 928–943. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.081>
- Chaitanya, A. K., Babu, D. K., & Kumar, K. V. N. G. (2019). Experimental study on surface roughness by using abrasive jet machine. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.343>
- Chandra, B., & Singh, H. (2015). Machining of aluminium metal matrix composites with Electrical discharge machining - A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 1665–1671. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.094>
- Duan, W., Mei, X., Fan, Z., Li, J., Wang, K., & Zhang, Y. (2019). Electrochemical corrosion assisted laser drilling of micro-hole without recast layer. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 163577. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163577>
- Dwivedi, A. P., & Choudhury, S. K. (2016). *Increasing the Performance of EDM Process Using Tool Rotation Methodology for Machining AISI D3 Steel*. 46, 131–134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.207>
- Gamage, J. R., & Desilva, A. K. M. (2015). Assessment of research needs for sustainability of unconventional machining processes. *Procedia CIRP*, 26, 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.096>
- Gangil, M., Pradhan, M. K., & Purohit, R. (2017). Review on modelling and optimization of electrical discharge machining process using modern Techniques. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2048–2057. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.050>
- Gowthaman, P. S., & Jeyakumar, S. (2019). A Review on machining of High Temperature Aeronautics Super- alloys using WEDM. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4782–4791. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.466>
- Groover, M. (2011). *fundamentos de manufactura moderna* (1ra edición).
- Guillermo Jiménez-Chavarro, Vieira-Porto Arthur José, H.-T. R. (2016). *Optimización del mecanizado de agujeros profundos de pequeño diámetro por electroerosión usando la metodología Taguchi Small deep hole drilling electro discharge machining process optimization using Taguchi method Otimização da usinagem de buracos profund.* 25(42), 111–122.
- Guimarães, B., Figueiredo, D., Fernandes, C. M., Silva, F. S., Miranda, G., & Carvalho, O. (2019). Laser machining of WC-Co green compacts for cutting tools manufacturing. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 81(February), 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.03.018>
- Ibarra, G. G. (2014). *ESTUDIO DE MAQUINABILIDAD DE 2 SUPERALEACIONES INCONEL 617 Y 718* (UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN). Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/3991/1/1080253632.pdf>
- Maharana, H. S., Kumar, R., Murty, S. V. S. N., Ramkumar, J., & Mondal, K. (2019). Surface micro-texturing of dual phase steel and copper by combining laser machining and electrochemical dissolution. *Journal of*



- Materials Processing Tech.*, 273(June), 116260. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116260>
- Marimuthu, S., Antar, M., & Dunleavy, J. (2019). Characteristics of micro-hole formation during fiber laser drilling of aerospace superalloy. *Precision Engineering*, 55(June 2018), 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.10.002>
- Mouralova, K, Kovar, J., Klakurkova, L., Bednar, J., Benes, L., & Zahradnicek, R. (2018). Analysis of surface morphology and topography of pure aluminium machined using WEDM. *Measurement*, 114(September 2017), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.040>
- Mouralova, Katerina, Klakurkova, L., Matousek, R., Prokes, T., Hrdy, R., & Kana, V. (2018). Influence of the cut direction through the semi-finished product on the occurrence of cracks for X210Cr12 steel using WEDM. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1318–1331. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.04.004>
- Nagimova, A., & Perveen, A. (2019). A review on Laser Machining of hard to cut materials. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2440–2447. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.092>
- Pant, P., & Bharti, P. S. (2019). Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.007>
- Parmar, V., Kumar, A., Prakash, G. V., & Datta, S. (2019). Investigation, modelling and validation of material separation mechanism during fiber laser machining of medical grade titanium alloy Ti6Al4V and stainless steel SS316L. *Mechanics of Materials*, 137(February), 103125. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103125>
- Patel, P., Nakum, B., Abhishek, K., & Kumar, V. R. (2018). Optimization of Surface Roughness in Plasma Arc Cutting of AISI D2 Steel Using TLBO. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18927–18932. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.242>
- Patel, P., Soni, S., Kotkunde, N., & Khanna, N. (2018). Study the effect of process parameters in plasma arc cutting on Quard-400 material using analysis of variance. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6023–6029. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.206>
- Prasad, K., & Chakraborty, S. (2018). A decision guidance framework for non-traditional machining processes selection. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(2), 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.10.013>
- Salonitis, K., & Vatousianos, S. (2012). *Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process*. 3, 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.050>
- Stoker, M. R. (2008). Electricity and magnetism. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 10(1), 62–64. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2008.11.013>
- Suchánek, L., & Zetková, I. (2015). Evaluation of the Surface Small Holes Drilled by Unconventional Methods. *Procedia Engineering*, 100, 1582–1590. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.531>
- Sureban, R., Kulkarni, V. N., & Gaitonde, V. N. (2019). Modern Optimization Techniques for Advanced Machining Processes – A Review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3034–3042. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.175>
- v. Alderete gatica. (2013). *Planeacion y manufactura de un herramental mecanico para el desprendimiento de la cascara de haba seca*. universidad Tecnologica de la mixteca.
- Velpula, S., Eswaraiah, K., & Chandramouli, S. (2019). Prediction Of Electric Discharge Machining Process Parameters Using Artificial Neural Network. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2909–2916. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.160>
- Wu, H., Zou, P., Yan, W., Cao, J., & Ehmann, K. F. (2019). MICRO WAVE PATTERNS BY VIBRATING-LENS ASSISTED LASER MACHINING. *Journal of Materials Processing Tech.*, 116424. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116424>
- Z. Q. Deng, Y. W. Zhu, F. Wang, X. Gu, D. Y. (2017). ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY OF VIBRATION SYSTEM CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC COMPOUND ELECTRICAL MACHINING. 49(1), 37–44. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9839-7>
- Zhang, Y., Xu, Z., Wang, Y., Ni, Q., & Ling, X. (2019). Surface-improvement mechanism of hybrid electrochemical discharge process using variable- amplitude pulses. *Chinese Journal of Aeronautics*, (October). <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.003>