



**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**

¹ Fabián Leonardo Rodríguez Guerrero, ² Ph.D Albert Miyer Suarez Castrillon

^{1,2} Programa de Ingeniería Industrial

^{1,3} Universidad de Pamplona

RESUMEN

Las tecnologías de mecanizado no convencional UCM son aquellas que utilizan energías diferentes a la mecánica para realizar mecanizados complejos, y en las cuales la herramienta de corte no toca el material. Lo anterior ha permitido tener mayor alcance que las convencionales en Este artículo presenta una revisión 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 convenientes para cortar metales de mayor uso en la industria, así como sus beneficios y retos más relevantes. Para ello se realizó una revisión bibliográfica, con el fin de encontrar investigaciones recientes que muestren un marco general sobre el uso actual de las tecnologías de manufactura. 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. Estas tecnologías actualmente son muy importantes para las empresas como la aeronáutica, la automotriz y la naval. 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 mechanics to perform complex machining, and in which the cutting tool does not touch the material. This article presents a review of the application of non-conventional manufacturing technologies that transform electrical energy into 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 relevant benefits and challenges. For this purpose, a bibliographic review was carried out in order to find recent research that shows a general framework on the current use of manufacturing technologies. Different experimental studies showed the advantages of this type of machining over traditional, providing solutions for cutting different types of metals such as superalloys and steel. These technologies are currently very important for companies such as aeronautics, automotive and naval. 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 et al., 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 complejas como por ejemplo el micro- mecanizado de componentes (Chaitanya, Babu, & Kumar, 2019; Gamage & Desilva, 2015)

Grandes industrias como la automotriz, la aeronáutica, la bioingeniería y automoción, debido a las exigencias actuales, han hecho mayor énfasis en 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).

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. Este calor que se produce es la 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). Muchas de las tecnologías de mecanizado de este tipo, necesitan que el material sea metálico y por ende conductor de electricidad, para permitir 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 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 micro-grietas 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 con detenimiento que tecnología no convencional de tipo térmico es más conveniente para algunos de los metales de mayor dureza y mayor utilización para cortar materiales.

Sin embargo es necesario identificar qué tipo de tecnologías de tipo térmica es más idónea para cortar diferentes tipos de metal con el fin de disminuir desperfectos por el calor y aumentar la calidad. Es así que, basado en que no existen artículos de revisión que hablen sobre el tema a tratar, se pretende indagar 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.

3.2.1 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).La cantidad de energía que se deposita en el área de corte está determinada por la ecuación de la densidad de energía(J/cm^2)(Guimarães et al., 2019). Los tipos de procesos laser mas utilizados en la industria son, Corte con laser; Temple, Texturizado, Marcado, Microtaladro, Grabación, Abrasión ,Quemado, (Ibarra, 2014)

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

En donde:

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

3.2.2 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* por intermedio de una sustancia aislante para eliminar material de una 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 debida a que la herramienta penetra la pieza sin llegar a tocarla eliminado material a medida que avanza creándose en la pieza

una copia fundida del electrón. En la Fig.1 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. También se muestra gráficamente la relación entre la Energía (J) y el Tiempo(s).

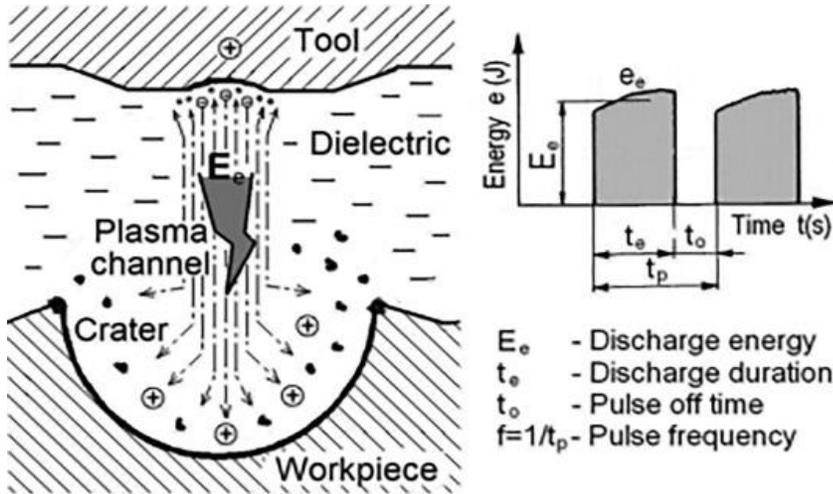


FIGURA 1. Representación gráfica del EDM por penetración.
Fuente: Tomado de (Pant & Bharti, 2019)

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 (Mouralova et al., 2018). El movimiento de la hilo es controlado por una máquina CNC de acuerdo a la ruta predefinida a lo largo del plano, esto le permite maquinarse geometrías compleja, como se muestra en la fig.3.

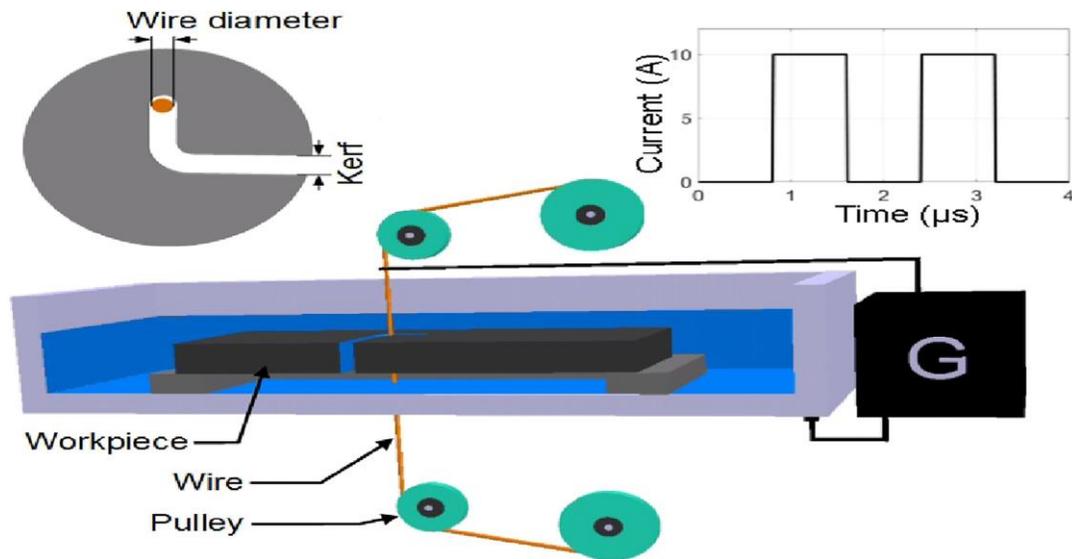


FIGURA 2. Representación gráfica del EDM por hilo.
Fuente: Tomado de (Mouralova et al., 2018)

3.2.3 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) Tal y como se ilustra gráficamente en la Fig.2

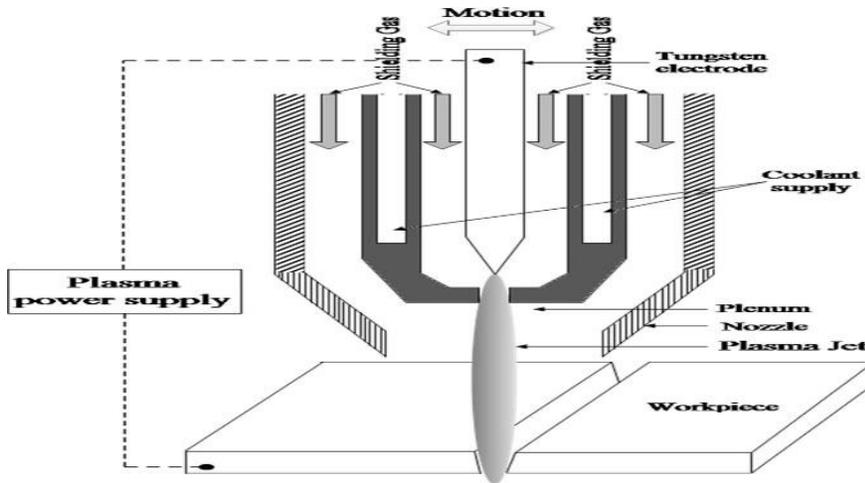


FIGURA 3. Representación gráfica del PAC.
Fuente: Tomado de (Ananthakumar, Rajamani, Balasubramanian, & Davim, 2019)

3.2.4 MECANIZADO POR HAZ DE ELECTRONES (EBM): Este tipo de mecanizado de tipo térmico sucede 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 magnéticos. Es de gran riesgo para los humanos debido a la generación de rayos X. La mayoría de investigaciones están enfocadas en el maquinado de superficies, fundición de materiales, mejoramiento de metales por medio de endurecimiento superficial, ya que el corte resulta costoso y demorado.

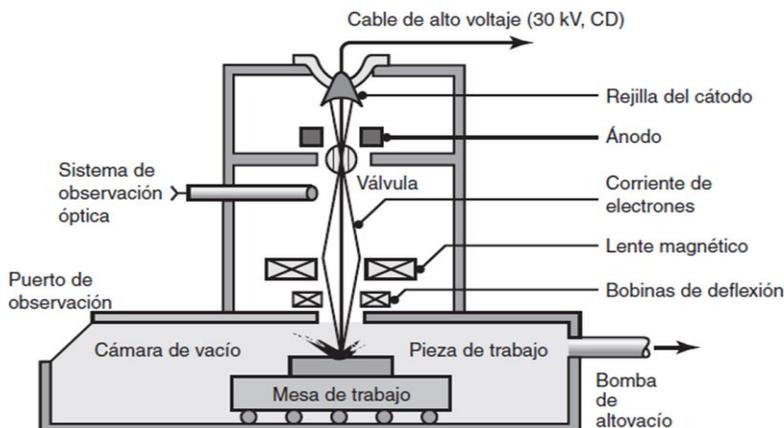


FIGURA 4. Representación gráfica del EBM.
Fuente: Tomado de (v. Alderete , 2013)

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 mantenido por años como una de las aleaciones más usadas por diferente 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. 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* y la *velocidad de avance*. Como método alternativa 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. Esto sucede por las características de material.

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 método **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.

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 él 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. El **EDM** por su parte ofrece grandes beneficios para cortar aleaciones *Nimonic* 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 ofrecen 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 y WEDM** 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 reflejan los rayos y por ende la energía se desvía.

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^3) por *tasa de eliminación de material* (cm^3/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.

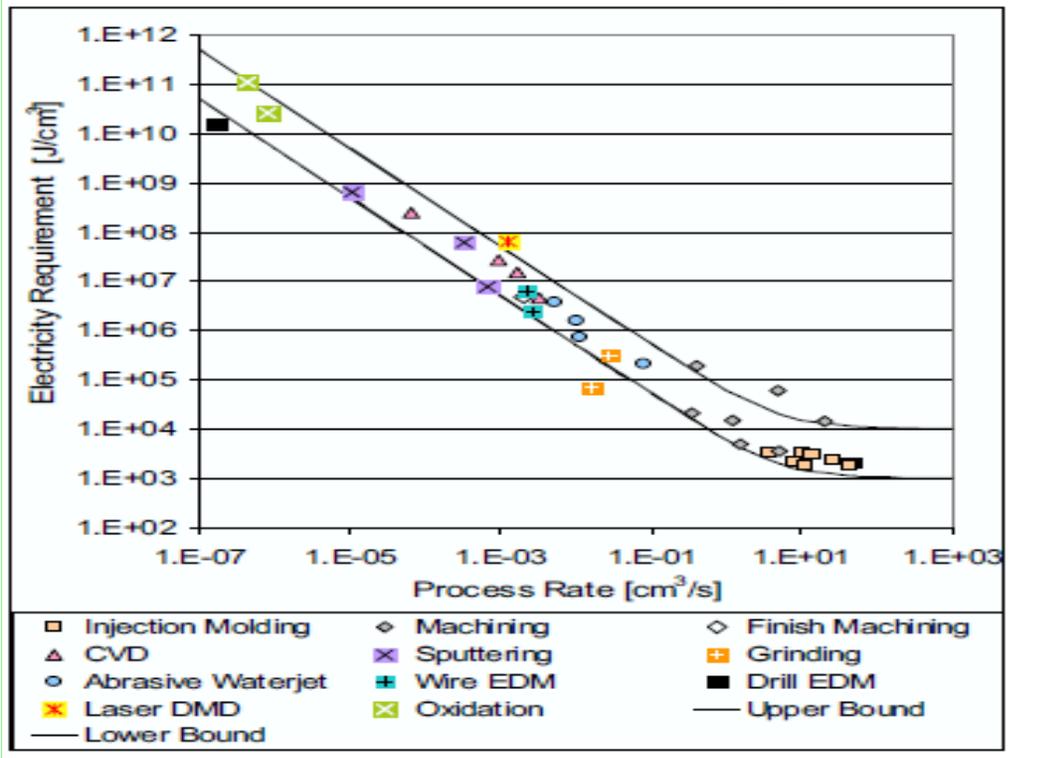


FIGURA 5. Requisitos de electricidad para procesos de fabricación comunes (traducido)
Fuente: Tomado de (Gamage & Desilva, 2015)

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>
- Chandramouli, S., & Eswaraiyah, K. (2018). Experimental investigation of EDM Process parameters in Machining of 17-4 PH Steel using Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5058–5067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.084>
- Chiang, K., Chang, F., & Tsai, D. (2007). *Modeling and analysis of the rapidly resolidified layer of SG cast iron in the EDM process through the response surface methodology*. 182(11), 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.012>
- 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>
- 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>
- Groover, M. (2011). *fundamentos de manufactura moderna* (1ra edicio).
- 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 profundos*. 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>
- Klocke, F., Welschhof, L., Herrig, T., & Klink, A. (2018). Model-based Productivity Analysis of Wire for the Manufacturing of Titanium. *Procedia CIRP*, 77, 594–597. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.209>
- Kumar, N. M., Kumaran, S. S., & Kumaraswamidhas, L. A. (2015). An investigation of mechanical properties and material removal rate , tool wear rate in EDM machining process of AL2618 alloy reinforced with Si 3 N 4 , AlN and ZrB 2 composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 650, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.292>
- M, A. K., & Gupta, K. (2019). Experimental evaluation of surface quality characteristics in laser machining of nickel-based superalloy. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 196(May), 163199. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163199>
- 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., & Dunleavey, J. (2019). Characteristics of micro-hole formation during fibre laser drilling of aerospace superalloy. *Precision Engineering*, 55(June 2018), 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.10.002>
- Mouralova, K., 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>
- 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>
- Prakash, J. U., Juliyana, S. J., Pallavi, P., & Moorthy, T. V. (2018). Optimization of Wire EDM Process Parameters for Machining Hybrid Composites (356 / B 4 C / Fly Ash) using Taguchi Technique. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7275–7283. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.395>
- Pramanik, A., & Basak, A. K. (2019). Effect of wire electric discharge machining (EDM) parameters on fatigue life of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Fatigue*, 128(May), 105186. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105186>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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>
- Xu, Z., & Wang, Y. (2019). Electrochemical machining of complex components of aero-engines : Developments , trends , and technological advances. *Chinese Journal of Aeronautics*, (October). <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.016>
- 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>