



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE EN EL
PROCESO DE ELECTROEROSIONADO POR HILO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:
EDUIN ALBERTO RAMIREZ MAYORGA**

No. CONTROL: 1828M0225

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ERENDIRA RENDON LARA**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. GUILLERMO CARBAJAL FRANCO**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, ENERO DE 2020



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México., 21/enero/2020
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-092/2020

C. EDUIN ALBERTO RAMÍREZ MAYORGA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA
PRESENTE

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado "OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIONADO POR HILO", la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

"Educación, integridad y ciencia"

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



JLGR/IMAB



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Número de registro: RPRIL-072
Fecha de inicio: 2017-04-10
Término de la certificación: 2021-04-10



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

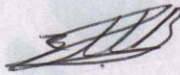
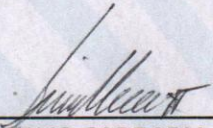

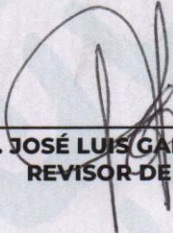
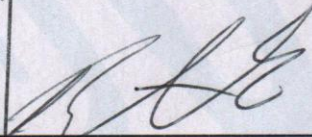
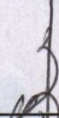
"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México., 21/enero/2020
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-091/2020

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIONADO POR HILO", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias de la Ingeniería presenta el C. Eduin Alberto Ramírez Mayorga con número de control 1828M0225 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

 _____ DRA. ERÉNDIRA RENDÓN LARA DIRECTORA DE TESIS	 _____ DR. GUILLERMO CARBAJAL FRANCO CO-DIRECTOR DE TESIS
	
 _____ DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS REVISOR DE TESIS	 _____ DR. ROBERTO ALEJO ELEUTERIO REVISOR DE TESIS
 _____ M. EN C. ITZEL MARÍA ABUNDEZ BARRERA REVISORA DE TESIS	



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Número de registro: RPrIL-072
Fecha de inicio: 2017-04-10
Término de la certificación: 2021-04-10





Dedicatorias

“El éxito parece depender en gran medida de persistir en algo después de que otros han dejado de hacerlo.”
William Feather

Esta meta que he alcanzado ha sido primordialmente gracias a mis padres, que siempre confiaron en mí, siempre estuvieron presentes en el tiempo que más lo necesite, por su apoyo y amor incondicional, estoy seguro que sin ellos no hubiese podido terminar mis estudios y formarme como el ser humano que soy.

Con todo el cariño quiero exaltar a mi madre María Mayorga, por su apoyo, amor brindado en cada momento y además ser mi fuente de inspiración; a mis hermanos Jairo Leonardo, Duvan Alexis y Luz Dary (Q.E.P.D), por los buenos momentos vividos y los demás que vendrán, juntos seremos el orgullo de nuestros padres.

EDUIN ALBERTO RAMIREZ MAYORGA.



Agradecimientos

“La disciplina es la parte más importante del éxito.”

Truman Capote

El autor expresa profundos agradecimientos a:

Dios por guiarme en cada uno de los pasos que doy en este camino, y porque hoy me permite alcanzar uno de los logros más importantes en mi vida.

A la Universidad: Instituto Tecnológico de Toluca y a la Maestría en ciencias de la ingeniería por la oportunidad de formarme como hombre de ciencia y de mejorar como ser humano.

A la Dra. Eréndira Rendón Lara, por su orientación, por sus oportunos consejos, por la confianza brindada para con mi trabajo y por el constante apoyo incluso en los momentos más difíciles, todo con el fin de lograr la culminación de esta etapa. Gracias por su soporte en todo momento.

Al Dr. Guillermo Carbajal Franco, por su colaboración y seguimiento constante al desarrollo de este proyecto, gracias por transmitirme principios tan valiosos como la responsabilidad, tenacidad, poder de decisión y fundamentalmente perseverancia.

A todos aquellos amigos que han estado presentes en los buenos y malos momentos, ayudándome a sortear los obstáculos que presenta el diario transcurrir de la vida, o simplemente complementando mi alegría con la suya en momentos como este.

A mis familiares, fuentes de infinita inspiración y cálida compañía, herramientas indispensables a la hora de alcanzar grandes metas.

“Para ser exitoso no tienes que hacer cosas extraordinarias.

Haz cosas ordinarias, extraordinariamente bien.”

Autor desconocido



RESUMEN

La eficiencia energética en los procesos de fabricación se ha convertido en un tema crítico para la industria, por lo cual se está realizando un esfuerzo mundial para mejorar la eficiencia energética en todas las actividades de fabricación. Así mismo los fabricantes están preocupados por ser competitivos en el mercado, por lo cual se requiere que haya una disminución en los tiempos de producción sin afectar la calidad del producto. Existen estudios para caracterizar la eficiencia energética y el acabado superficial que es medido como la rugosidad de la superficie, en los procesos de fabricación. Dichos estudios se han aplicado principalmente a procesos convencionales, por ejemplo, torneado, fresado, etc. Sin embargo, los estudios en procesos de fabricación no convencionales siguen ausentes, motivo por el cual en esta investigación se estudiará más detalladamente el fenómeno presente en el proceso de electroerosión o corte por hilo. Este documento presenta un enfoque estadístico para caracterizar la relación que existe entre el consumo de energía, la rugosidad y los parámetros de corte, cuando el proceso de mecanizado por electroerosión o corte por hilo (WEDM), es aplicado al Aluminio 6061 T6 y al acero O1.

Palabras clave: Parámetros de corte, procesos de manufactura no convencionales, rugosidad, electroerosión o corte por hilo, aluminio 6061 T6, acero O1.



ABSTRACT

Energy efficiency in manufacturing processes has become a critical issue for the industry, so a worldwide effort is made to improve it in all manufacturing activities. Also, manufacturers are concerned about being competitive in the market, so it is required that there be a decrease in production times without affecting the quality of the product. There are studies to characterize energy efficiency and surface finishing that is measured as the roughness of the surface, in manufacturing processes. These studies have been applied mainly to specific processes, for example, turning, milling, etc. However, studies dealing with non-conventional manufacturing processes are still absent, that's why in this research will be study more deeply the phenomena present into the process of wire electrical discharge machining. This document presents a statistical approach to characterize the relationship between energy consumption, roughness and cutting parameters, when the Wire Electrical Discharge Machining process (WEDM) is applied to Aluminum 6061 T6, and steel O1.

Key Words: Cutting parameters, non-conventional manufacturing processes, Roughness, Wire EDM, Aluminum 6061 T6, steel O1.



CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4 HIPÓTESIS	3
1.5 OBJETIVOS	4
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.5.2 OBJETIVOS PARTICULARES	4
1.6 JUSTIFICACIÓN	4
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1 INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN	6
2.1.1 TIPOS.	9
2.1.2 ELECTROEROSIÓN POR HILO.	9
2.1.3 ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.	11
2.1.4 PROCESO DE DESCARGA.	13
2.2 PARÁMETROS DE CONTROL DE IMPULSO.	17
2.2.1 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CICLO DE FUNCIONAMIENTO DURANTE UN PROCESO DE ELECTROEROSIÓN [2]:	18
2.3 COEFICIENTES DE CÁLCULO.	24
2.4 PROCESO DE EXPERIENCIAS: MÉTODO TAGUCHI.	24
2.4.1 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA TAGUCHI	25
2.4.2 ETAPAS DE UN PROCESO DE EXPERIENCIAS.	25
2.4.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL DISEÑO DE LA MATRIZ ORTOGONAL.	27
2.5 ESTADO DEL ARTE.....	31
3. METODOLOGÍA	37
3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	39
3.2 DEFINICIÓN DE LA VARIABLE DE RESPUESTA	39
3.3 DEFINICIÓN DE LOS FACTORES A CONSIDERAR Y NIVELES DE CADA UNO.....	39
3.4 REALIZACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS A USAR.....	40
3.5 NÚMERO DE RÉPLICAS.....	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS MINITAB	48
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52



REFERENCIAS..... 53

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
FIGURA	
Figura 2.1 Cigüeñal junto a la estampa utilizada para su forja. (Fab. por electroerosión) [6].....	6
Figura 2.2 Esquema básico del proceso de electroerosión [6].....	9
Figura 2.3 Esquema del corte por hilo [6].	10
Figura 2.4 Ejemplos de corte cónico [6].....	10
Figura 2.5- Principio del proceso de electroerosión [6].....	11
Figura 2.6 Electroerosión por penetración [6].	12
Figura 2.7 Tipos de electrodos de forma [6].....	13
Figura 2.8 Ionización del fluido [6].	14
Figura 2.9 Inicio de la descarga eléctrica [6].....	14
Figura 2.10 Formación del canal de plasma [6].....	14
Figura 2.11 Fusión y vaporización del material [6].....	15
Figura 2.12 Implosión de la bola de gas [6].....	15
Figura 2.13 Formación de cráteres [6].....	15
Figura 2.14 Cráteres formados por el metal fundido [6].	16
Figura 2.15 Superficie de la pieza [6].	16
Figura 2.16 Residuos formados [6].....	16
Figura 2.17 Ciclo de funcionamiento durante un proceso de electroerosión [6].....	17
Figura 2.18 Posición de las boquillas en corte cónico [2].	22
Figura 3.1 Geometría seleccionada.	38
Figura 4.1 Porcentaje de influencia factores de control en Rugosidad.....	47
Figura 4.2 Efectos principales para Means(Promedios).	49
Figura 4.3 Efectos principales para S/N Ratios(Señales de Ruido).....	50
Figura 4.4 Porcentaje de influencia factores de control en Rugosidad S/N Ratios.	51
Figura 4.5 Porcentaje de influencia factores de control en Rugosidad Means.	51



ÍNDICE DE TABLAS

	Página
TABLA	
Tabla 2.1 Ejemplo de matriz L4	28
Tabla 2.2 Datos de ejemplo para cálculo de porcentaje de influencia.....	28
Tabla 3.1 Ejemplo de matriz L9	40
Tabla 3.2 Corridas experimentales	41
Tabla 4.1 Rupturas de hilo en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in	43
Tabla 4.2 Tiempo Ideal en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in	44
Tabla 4.3 Tiempo Real en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in	44
Tabla 4.4 Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in.....	45
Tabla 4.5 Valores para cálculo de porcentaje de influencia Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in	45
Tabla 4.6 Calculo de porcentaje de influencia Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in	47
Tabla 4.8 Distribución de datos en Minitab, Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in	48

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad se puede observar la creciente inclusión de nuevas tecnologías a diferentes industrias como, por ejemplo: aeroespacial, médica, comunicaciones, y entre otras como la industria automotriz.

Una de las tecnologías con la cual se está trabajando actualmente en las industrias automotriz y aeronáutica es la electroerosión pues se ha convertido en uno de los procesos de arranque o corte de material que ha tomado más importancia en los últimos tiempos [1], dicho proceso de electroerosión ha venido fortaleciéndose en los últimos años debido a que los procesos en el campo de la metalmecánica se pueden desarrollar de una manera más eficiente y en piezas que mediante otros procesos resultarían muy complejas de realizar, o en algunos casos, serían casi imposibles de producir debido a la dificultad que representan sus geometrías.

A partir de un análisis más a fondo del proceso de electroerosión [2], donde se desglosa el proceso, se enuncia el principio físico de la electroerosión por hilo y se describe de una manera detallada las variables que forman parte del proceso y en base a su caso de estudio se recomiendan algunos valores para cada parámetro de acuerdo a la finalidad del proceso ya sea para desbaste o para acabado final.

El proceso de electroerosión se ha posicionado en diferentes industrias de una manera muy sobresaliente pues en campos de aplicación como es el caso de las industrias aeroespacial y médica, los procesos como cortes de precisión son bastante críticos debido a que se realizan en materiales muy costosos y difíciles de mecanizar, motivo por el cual se hace indispensable el uso de la electroerosión que proporciona una alta precisión y permite realizar geometrías complejas, por estos motivos se han realizado estudios acerca de otros parámetros que puedan influir en su comportamiento [3]. Como ejemplo de estos parámetros se encuentra la vibración del hilo, y posible influencia en el proceso, con la finalidad de mejorar la precisión. Por ejemplo, en el área de la metalmecánica automotriz se requiere una alta precisión en los procesos como corte, fabricación de moldes y matrices para procesos de moldeo o deformación plástica.

Los estudios que se han desarrollado en la industria, han logrado mejoras en la tecnología del proceso de electroerosión [4]. En el presente estudio se realiza la optimización del acabado superficial en el proceso WEDM utilizando el diseño de experimentos de Taguchi, lo cual conlleva a reducir costos de fabricación, costos de operación y ahorro energético cuando se le compara con otros procesos, además de la producción de piezas con geometrías especiales que antes parecían imposibles de producir.

Se sabe que, básicamente el proceso tiene dos grandes variantes, la electroerosión por electrodo de forma conocida como RAM EDM o electroerosión por penetración, que es un proceso termo-eléctrico no tradicional [5] y la electroerosión por hilo conocida como WEDM (por sus siglas en inglés: Wire Electrical Discharge Machining), estudios con análisis especializados en el proceso WEDM han sido reportados por diversos investigadores [5], en donde mediante la experimentación y conocimientos previos, se lleva a cabo la optimización del proceso de electroerosión.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente, en la industria se realizan procesos que implican el uso de la máquina de electroerosión por hilo. Dichos procesos se realizan ejecutando el código de programación generado por el software de la máquina y sin alterar los parámetros de corte que son generados a través de dicho software. A través de la realización pruebas iniciales es fácil notar que se presentan varios problemas en la funcionalidad del proceso como por ejemplo, que no se generan los acabados superficiales deseados en la pieza de trabajo (rugosidad), y a su vez dicho proceso presenta retardos respecto a los tiempos de ejecución (ideales), pues por lo general se retarda debido a que se presentan paros repentinos, ocasionados por el rompimiento del hilo que es provocado por una incorrecta combinación de los parámetros de corte generados por el software (tiempo de encendido, tiempo de apagado, servo-voltaje, velocidad del hilo, entre otras).

La consigna es encontrar los parámetros con mayor influencia en el proceso (tiempo de encendido, tiempo de apagado, servo-voltaje, velocidad del hilo), analizar las respectivas correlaciones que existen entre ellos, además de hallar la mejor combinación de dichos parámetros. Finalmente se llega a determinar el nivel más apropiado en cada uno de los parámetros de corte en el proceso de electroerosión por hilo, que permita ejecutar el proceso de

la manera más eficiente y que todo esto conlleve a optimizar el proceso. Es por eso que para la industria automotriz particularmente en la fabricación de herramientas donde los materiales comúnmente utilizados son los aceros, en nuestro caso de estudio tomaremos el aluminio 6061T6, y el acero O1, donde resulta importante investigar a fondo este proceso, y sentar las bases para que este estudio permita mejorar las prácticas que se vienen realizando.

1.3 Delimitación del problema

Para cumplir con el objetivo, parámetros como velocidad del hilo, tiempo de encendido, tiempo de apagado y servo-voltaje, serán la información de entrada a controlar, para posteriormente determinar mediante la experimentación las respuestas que se generan (tiempo real, tiempo ideal, número de veces que se rompe el hilo y acabado superficial o rugosidad-RA) y con ayuda de un método de estudio estadístico, denominado Método Taguchi, se procesarán los resultados obtenidos, se realizara el análisis correspondiente para alcanzar los resultados finales y las correspondientes conclusiones respecto a las variables con mayor influencia en el proceso, las respectivas correlaciones que existen entre ellas, además de hallar la mejor combinación y sus niveles más óptimos para de esta manera llevar a la eficiencia y confiabilidad del proceso de electroerosión por hilo.

1.4 Hipótesis

Determinar los parámetros de corte y su nivel más apropiado (velocidad del hilo, tiempo de encendido, tiempo de apagado y servo-voltaje) en el proceso de electroerosión por hilo, que permitan ejecutar el proceso de la manera más eficiente y que todo esto conlleve a optimizar el proceso (tiempo real, tiempo ideal, número de veces que se rompe el hilo y acabado superficial o rugosidad-RA). Por ende, para las aplicaciones de la industria resulta importante investigar a fondo este proceso, y sentar las bases para que este estudio permita mejorar las prácticas que se vienen realizando.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Se realizaron una serie de ensayos prácticos orientados bajo la metodología de Taguchi lo cual permitió determinar los parámetros de corte con mayor influencia y en sus niveles óptimos en el proceso de electroerosión por hilo que conllevó a mejorar la eficiencia y confiabilidad del proceso.

1.5.2 Objetivos particulares

- Se seleccionaron los parámetros de corte que serían analizados en base a nuestro caso de estudio.
- Se realizó un diseño de experimentos que permitió representar correctamente la problemática enunciada.
- Se ejecutaron una serie de experimentos en la máquina de electroerosión por hilo que permitieron la validación estadística de la metodología utilizada.
- Se analizaron y ponderaron los resultados obtenidos a través de la experimentación.
- Se seleccionaron y establecieron los parámetros de corte que tienen mayor influencia en el proceso de electroerosión por hilo además de su nivel más apropiado para obtener un mejor acabado superficial (rugosidad), mayor eficiencia y una alta confiabilidad en el proceso de electroerosión por hilo.
- Se reportaron los resultados obtenidos a través de un listado en donde se evidencian los parámetros óptimos y su correspondiente nivel.

1.6 Justificación

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad la realización de una serie de ensayos prácticos para determinar los parámetros de corte más influyentes en el proceso de electroerosión por hilo y el nivel más apropiado para cada parámetro. Se realiza un diseño de experimentos para representar de una manera más adecuada el caso de estudio, y por ende parámetros como velocidad del hilo, tiempo de encendido, tiempo de apagado y servo-voltaje, serán la información

de entrada a controlar y con que se realiza la correspondiente fase de experimentación, posteriormente con ayuda de un método de estudio estadístico, denominado Método Taguchi, se procesan los resultados obtenidos, se realiza el análisis correspondiente de los resultados finales y se enuncian las correspondientes conclusiones.

Se busca determinar los parámetros que tienen mayor influencia en el proceso de electroerosión por hilo, a partir del control de ciertos factores como por ejemplo tiempo de encendido, tiempo de apagado, servo-voltaje, velocidad del hilo, entre otros; Llegando a una selección de los parámetros óptimos de corte en el proceso de electroerosión por hilo que permitan ejecutar el proceso de la manera más eficiente y que todo esto conlleve a mejorar la confiabilidad del proceso.

Referente a los beneficios que obtendría la industria en general serán enormes [4], debido a que a través de estas pruebas se logrará que el proceso de electroerosión por hilo sea más eficiente [5], los resultados de esta investigación harán que sea más atractivo el uso de esta tecnología lo cual la hará más accesible, ya que se podrían fabricar piezas complejas, que no se pueden hacer por medio de otros procesos.

Esta tecnología se convierte en una verdadera revolución en la industria automotriz especialmente en la fabricación de utillajes en general, cubriendo sectores tales como la estampa de forja, la troquelaría, el molde de inyección de metales ligeros y de plásticos, las hileras de extrusión y estirado, los útiles para sinterizado, entre otras [6].

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se expone la teoría que fundamenta la presente investigación, se define de una manera clara los términos que aparecen en este proyecto y se detallan principalmente los términos referentes al campo estadístico, y al proceso de corte por hilo o electroerosión [2].

2.1 Introducción a la Electroerosión

Si observamos los procesos no tradicionales de mecanizado que se encuentran en la industria metal-mecánica, sin lugar a duda la electroerosión o mecanizado por descargas eléctricas que también se conoce como EDM, debido a sus siglas de su nombre en inglés: Electrical Discharge Machining [6], ocupa un lugar bastante importante debido a sus variadas aplicaciones y por el desarrollo que ha alcanzado a partir de 1970 [6].

Desde su descubrimiento esta tecnología se convirtió en una total revolución debido a que con su uso podría fabricar piezas y componentes con geometrías complejas y en materiales muy duros, esto sería útil principalmente en las industrias de fabricación de herramientas en general, abarcando campos tales como forja, troquelaría, moldes de inyección de metales ligeros y de plásticos, etc. La figura 2.1 muestra una de las estampas utilizadas para la forja de un cigüeñal, que se muestra aún con la rebaba a la izquierda [6].

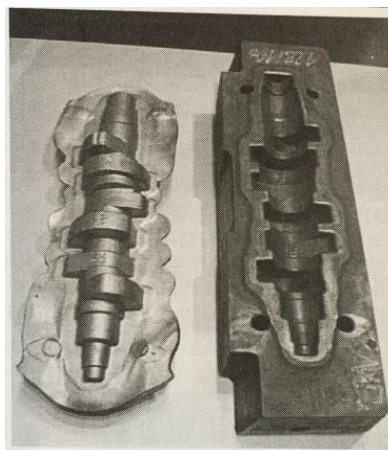


Figura 2.1 Cigüeñal junto a la estampa utilizada para su forja. (Fab. por electroerosión) [6].

Otros sectores también se ven favorecidos por las ventajas del proceso de electroerosión a la hora de realizar el mecanizado de sus componentes como se mencionaba anteriormente, en materiales de elevada dureza especialmente cuando se buscan geometrías complicadas, tolerancias ajustadas y excelentes acabados superficiales. Industrias tales como la aeronáutica y médica, a pesar de sus dudas hacia el proceso de electroerosión debido a las modificaciones que genera en la integridad superficial de la pieza, o los fabricantes de herramientas de corte en materiales extra duros, por ejemplo fabricantes de plaquitas de diamante, han encontrado en la electroerosión la tecnología idónea para sus aplicaciones [6].

“Tal y como se entiende hoy en día, la electroerosión es un proceso no convencional de mecanizado basado en la generación de descargas eléctricas controladas en presencia de un líquido denominado fluido dieléctrico entre dos elementos conductores, uno de los cuales constituye el útil de arranque y es conocido genéricamente como electrodo, y el otro es el material a conformar (pieza), ambos necesariamente conductores de la electricidad. Cada una de las descargas produce el arranque de una cierta cantidad de material tanto de la pieza como del electrodo: el arranque de material de pieza es el objetivo del proceso de mecanizado mientras que el arranque de material del electrodo se considera como desgaste y debe, por tanto, ser minimizado” [6].

El principio de remoción de material es fundamentalmente la interacción conjunta de fenómenos térmico y mecánico. *“La temperatura alcanzada en el punto de aplicación de la descarga provoca la fusión y vaporización del material de pieza, el cual es arrastrado en forma de carbonilla fuera de la zona de erosión por el fluido dieléctrico circulante”* [6].

Además, este fluido dieléctrico tiene como misión aislar de manera controlada el electrodo y la pieza, permitiendo el paso de una corriente eléctrica entre ambos, en forma de avalancha, a intervalos definidos. Estos intervalos son muy cortos, del orden de microsegundos, por lo que, aunque la cantidad de material que arranca cada descarga es muy pequeña, no obstante, el volumen arrancado al cabo de un cierto tiempo resulta apreciable. A pesar de ello, la electroerosión presenta bajas tasas de arranque de material si se compara con los procesos de mecanizado convencionales, como el torneado, fresado o taladrado, aunque por sus aplicaciones no compite directamente con ellos [6].

Debe entenderse bien el papel que juega el fluido dieléctrico. Etimológicamente la palabra dieléctrico significa aislante. Esto significa que los fluidos que se utilizan, agua desionizada en el caso del corte por hilo y aceite en el caso de erosión por penetración no son conductores de la electricidad en condiciones normales. En el caso del agua se toma directamente de la red general y se desioniza, es decir se reduce su conductividad haciéndola pasar por un lecho de resinas como se comentará más adelante. Bajo las condiciones que impone la máquina de electroerosión, estos fluidos se vuelven conductores localmente y durante un intervalo de tiempo limitado, durante el cual se produce la descarga. Tras ella se recuperan las propiedades aislantes quedando la zona de erosión preparada para una nueva descarga [6].

La figura 2.2 muestra de manera esquemática el fundamento del proceso. Un electrodo, que en este caso es cilíndrico, genera una cavidad cilíndrica en un bloque de material inicialmente macizo. Se observa que no existe contacto físico entre ellos (electrodo y pieza), sino que entre ambos se establece una distancia que normalmente se conoce como gap o brecha. La brecha está ocupada por el dieléctrico, de manera que es a través de la misma como se establecen las descargas eléctricas [6].

Si la brecha o gap no existiera se producirían situaciones de cortocircuito y el mecanizado resultaría degradado. De la misma forma si la brecha fuera demasiado grande no sería posible establecer la sucesión estable de descargas [6].

Como consecuencia, la brecha constituye un parámetro fundamental del proceso, y no sólo porque determina las condiciones de la descarga, sino porque su dimensión, que puede ir desde unas micras hasta centésimas, debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el electrodo. Por ejemplo, en el caso de la figura 2.2, el diámetro del agujero mecanizado será igual al diámetro del electrodo más dos veces el gap o brecha [6].

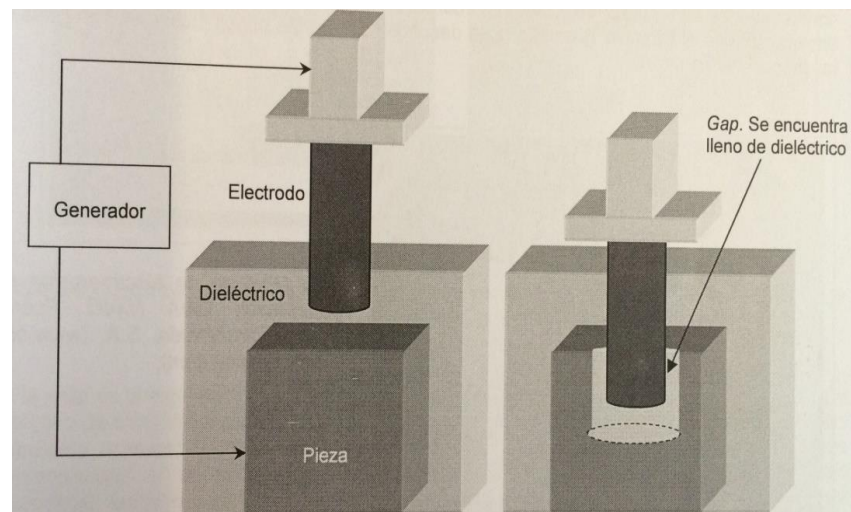


Figura 2.2 Esquema básico del proceso de electroerosión [6].

2.1.1 Tipos.

De los diferentes tipos de electroerosión, a continuación, se mencionan y se explican las características de los dos tipos más importantes de ellos:

2.1.2 Electroerosión por hilo.

El mecanizado por descargas eléctricas por hilo conductor o electroerosión por hilo es también conocido por sus siglas en inglés WEDM (Wire Electrical Discharge Machining).

En este tipo de electroerosión hay que destacar que el electrodo tiene forma de hilo por ende sus siglas WEDM o electroerosión por hilo y que representa en la práctica múltiples campos de aplicación [6].

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 micromecánica [6].

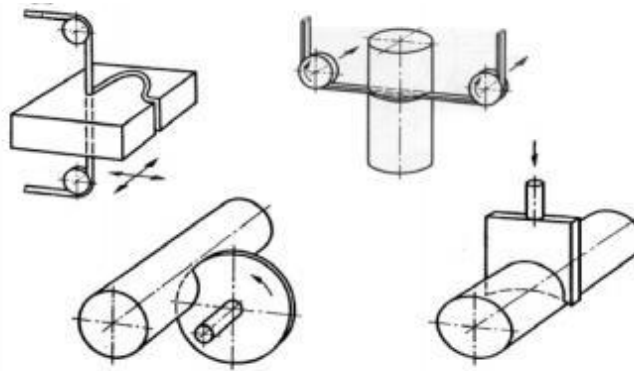


Figura 2.3 Esquema del corte por hilo [6].

Debe tenerse en cuenta que la WEDM permite únicamente producir geometrías pasantes como se muestra en la figura 2.3. 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 (figura 2.4) [6].

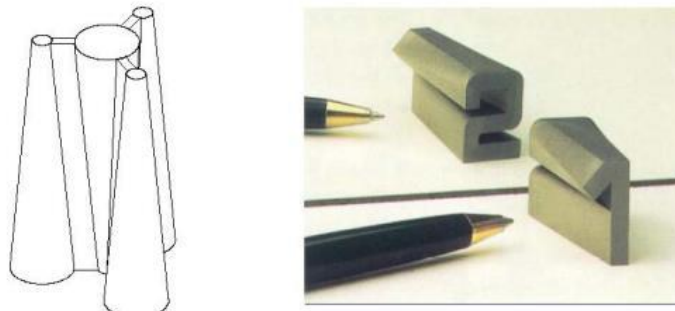


Figura 2.4 Ejemplos de corte cónico [6].

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 [6].

“La electroerosión por hilo es uno de los nuevos procesos de arranque de material que más importancia ha tomado en los últimos tiempos. Esta evolución se debe a que el mecanizado

puede realizarse en piezas que con otros métodos sería mucho más difícil, y en otros casos, resultaría imposible de realizar debido a la complejidad de dichas piezas” [6].

Por estas razones, la electroerosión se ha situado en una posición importante en los sectores, cada vez más numerosos, de su campo de aplicación. Por ejemplo: Se puede citar el agujereado de las boquillas de los inyectores en la industria automotriz, así como en la fabricación de moldes y matrices para procesos de moldeo o deformación plástica [6].

La diferencia básica entre el corte de electroerosión por hilo 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 realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo [6].

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 [6].

El proceso (figura 2.5) consiste en la generación de un arco eléctrico entre un electrodo y una pieza, ambos inmersos en un medio dieléctrico. Se producirá una reacción que ocasionará el arranque del material, reproduciendo en la pieza la forma que posee el electrodo [6].

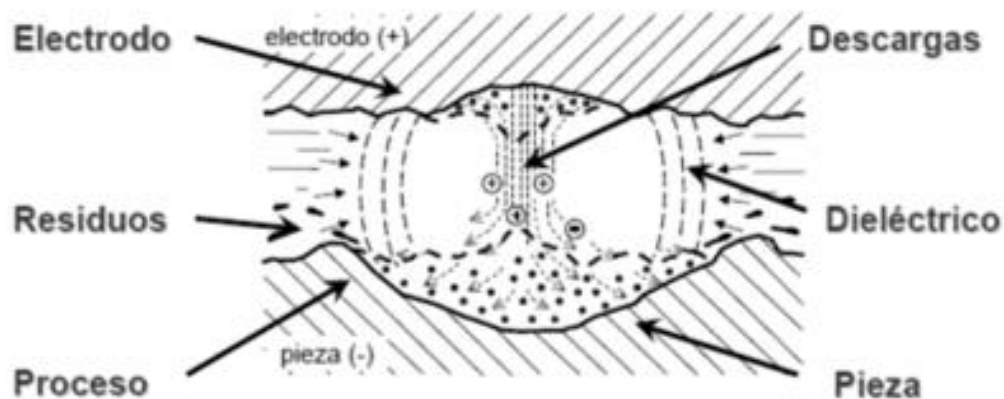


Figura 2.5- Principio del proceso de electroerosión [6].

2.1.3 Electroerosión por penetración.

La electroerosión por penetración es el tipo de electroerosión más universal y utilizado. Se basa en el avance controlado de un electrodo (al que en muchos casos también nos referiremos a él

con el nombre de herramienta), que penetra en la pieza. Tanto electrodo como pieza, estarán sumergidos en un fluido dieléctrico [6].

Esta operación puede ser repetida miles de veces hasta obtener el mecanizado y la forma de la pieza deseada. También se pueden dar casos en los que la polaridad entre pieza y herramienta puede ser invertida, aunque lo más común es que el electrodo o herramienta sea el cátodo (+), y la pieza a mecanizar el ánodo (-) [6].

El resultado del proceso será la erosión uniforme de la pieza, reproduciendo con la mayor exactitud posible la forma de electrodo en dicha pieza. Por esta razón, el electrodo se desgasta, de modo que es necesario desplazar la pieza para mantener la distancia entre ellos constante. El desgaste del electrodo también supone una pérdida en la calidad del acabado, por lo que se puede reemplazar el electrodo por otro nuevo en medio de la operación de electroerosión si fuera necesario, para poder obtener un acabado superficial dentro de las tolerancias deseadas, que normalmente serán de $\pm 0,05$ mm [6].

En la siguiente figura 2.6 se observa un ejemplo del proceso, en el que el electrodo penetra en la pieza y reproduce en ella la forma deseada, que será la misma forma que posee el electrodo [6].

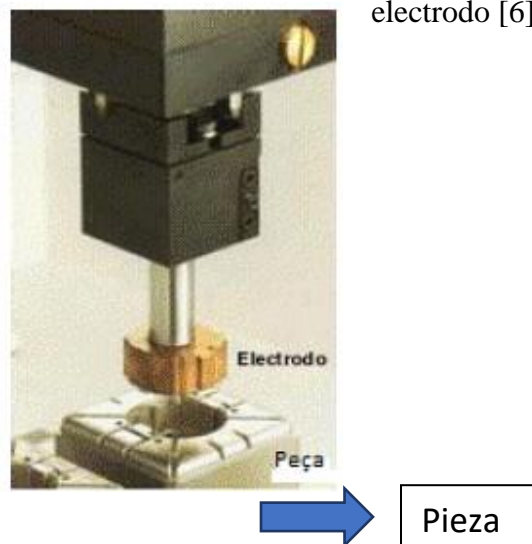


Figura 2.6 Electroerosión por penetración [6].

Los electrodos utilizados en el proceso de electroerosión por penetración también son conocidos como electrodos de forma [6].

2.1.3.1 Electrodo de forma.

Los electrodos utilizados en estos procesos de mecanizado deben poseer dos características fundamentales: Temperatura de fusión elevada y una alta resistencia al desgaste [6].

El grafito es el material más utilizado para la realización de este proceso, por ser el material que mejor cumple las dos características anteriormente expuesta [6].

Otro material muy utilizado es el cobre aunque no posea una resistencia tan elevada como el grafito, su gran conductividad eléctrica lo hace un material muy óptimo a la hora de fabricar electrodos de forma [6].

La forma de los electrodos se convierte en la gran ventaja de estos electrodos (de ahí su nombre), ya que se pueden reproducir formas muy complejas y con gran exactitud en la pieza que se desea mecanizar [6].

En la siguiente figura 2.7 se puede observar las distintas formas que pueden adquirir estos electrodos [6]:



Figura 2.7 Tipos de electrodos de forma [6].

2.1.4 Proceso de descarga.

En este apartado se explicará el proceso de electroerosión y las distintas reacciones que tienen lugar entre cátodo y ánodo [6].

El origen del mecanizado por electroerosión se inicia por el salto de chispas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergidos ambos en un líquido aislante, o líquido dieléctrico (figura 2.8) [6].

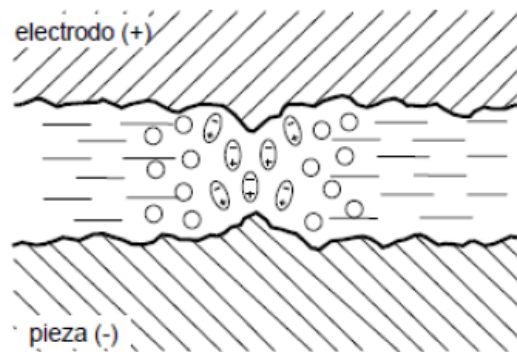


Figura 2.8 Ionización del fluido [6].

Al estar ambos electrodos en un medio dieléctrico o aislante la tensión que se aplique a ambos ha de ser suficiente como para llegar a crear un campo eléctrico mayor que la rigidez dieléctrica del líquido como se evidencia en la figura 2.9 [6].

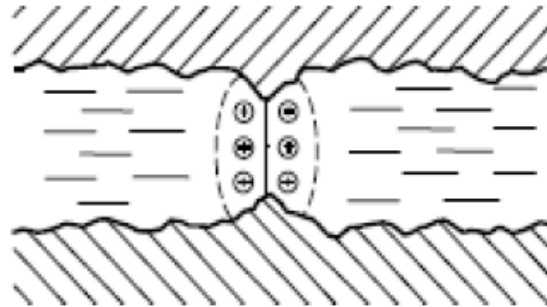


Figura 2.9 Inicio de la descarga eléctrica [6].

Bajo la acción de este campo eléctrico, iones libres positivos y electrones se encontrarán acelerados creando un canal de descarga que se vuelve conductor, y es precisamente en este punto donde salta la chispa. Ello provoca colisiones entre los iones (+) y los electrones (-). Se forma entonces un canal de plasma (figura 2.10) [6].

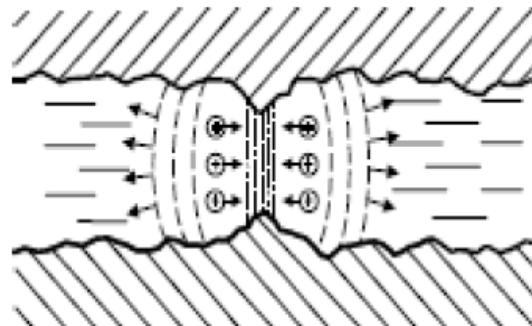


Figura 2.10 Formación del canal de plasma [6].

Bajo el efecto de los choques se crean altas temperaturas en ambos polos y alrededor del canal de plasma se forma una bola de gas que empieza a crecer. Por otro lado las altas temperaturas que

se han dado en los dos polos, van fundiendo y vaporizando parte del material de la pieza, mientras que el electrodo apenas si se desgasta muy ligeramente (figura 2.11) [6].

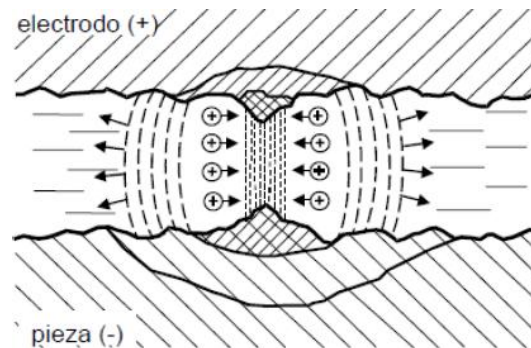


Figura 2.11 Fusión y vaporización del material [6].

En esta situación (bola de gas grande y material fundido en ambos polos), se corta la corriente eléctrica. El canal de plasma se derrumba y la chispa desaparece. El líquido dieléctrico entonces rompe la bola de gas haciéndola implosionar (explotar hacia adentro) como se evidencia en la figura 2.12 [6].

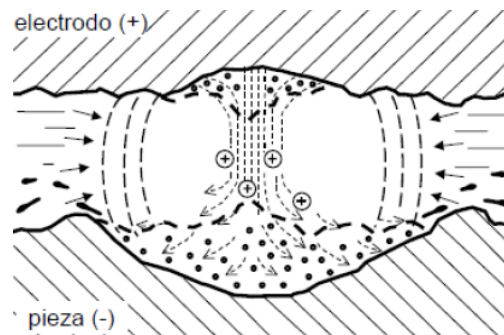


Figura 2.12 Implosión de la bola de gas [6].

Ello hace que se creen fuerzas que hacen salir el material fundido formando dos cráteres en las superficies. El material fundido se solidifica y es arrastrado en forma de bolas por el líquido dieléctrico, constituyendo lo que se puede llamar "viruta del proceso de electroerosión" (figura 2.13) [6].

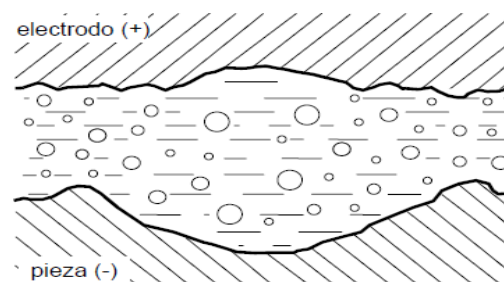


Figura 2.13 Formación de cráteres [6].

Ejemplo de cráteres formados en la pieza [6].



Figura 2.14 Cráteres formados por el metal fundido [6].

Resultados de la superficie de la pieza después del proceso de electroerosión [6].

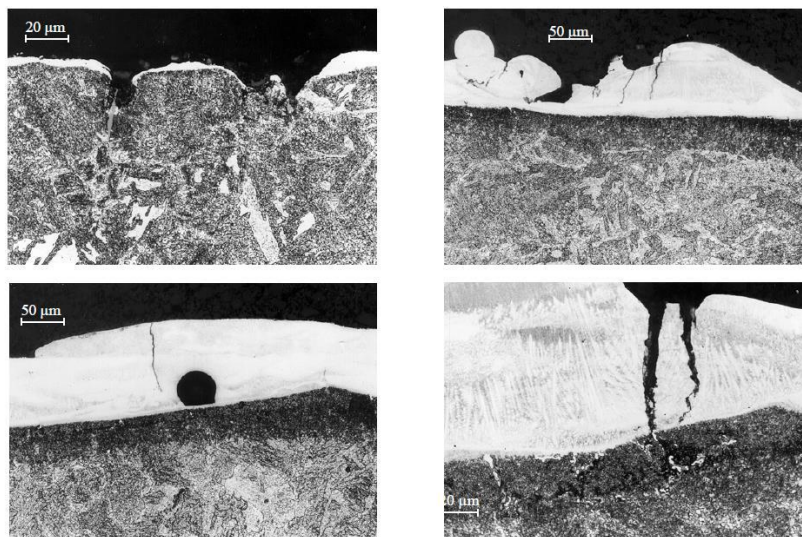


Figura 2.15 Superficie de la pieza [6].

Residuos formados durante el proceso [6]:

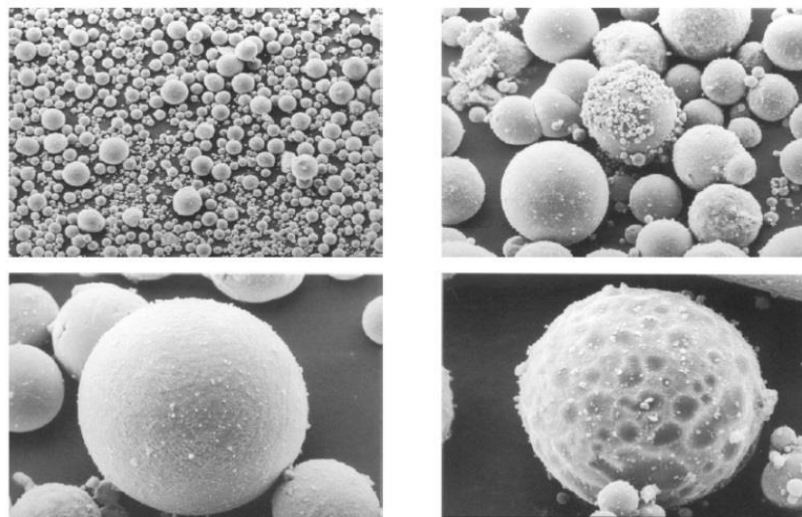


Figura 2.16 Residuos formados [6].

2.2 Parámetros de control de impulso.

En la siguiente figura se representa el ciclo de funcionamiento durante un proceso de electroerosión [6].

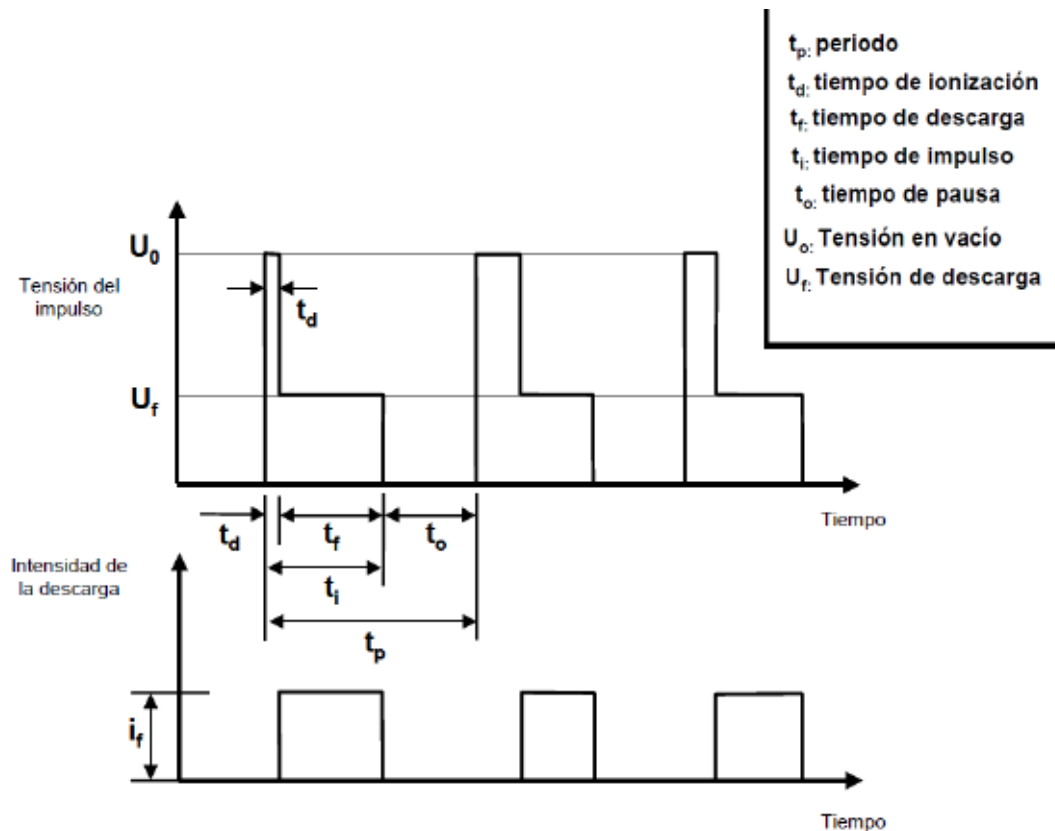


Figura 2.17 Ciclo de funcionamiento durante un proceso de electroerosión [6].

El tiempo de duración de cada ciclo, o periodo (t_p), está formado por la suma del tiempo de impulso y el tiempo de pausa. El tiempo de impulso es aquel durante el cual se aplica una tensión de descarga en el electrodo, mientras que durante el tiempo de pausa hay ausencia de tensión [6].

El tiempo de impulso puede descomponerse, a su vez, en la suma del tiempo de ionización y el tiempo de descarga, siendo el tiempo de ionización un pequeño retraso entre la aplicación de la tensión y la aparición de la intensidad de corriente deseada. Esa es la razón de la aparición de esos “picos” de tensión a los que se denomina tensión de vacío. El tiempo de descarga es por

tanto, el momento del proceso en el que se aplica la intensidad de descarga (i_f) a una determinada tensión, también llamada tensión de descarga (U_f) [6].

2.2.1 Definición de las variables que intervienen en el ciclo de funcionamiento durante un proceso de electroerosión [2]:

Período (t_p): Tiempo que pasa desde el comienzo de un impulso hasta el comienzo del impulso siguiente.

Tensión de descarga (U_f): Tensión entre electrodo y pieza después de cebada la descarga.

Tensión en vacío (U_o): Tensión entre electrodo y pieza antes de cebada la descarga, o tensión entre electrodos si no hay descarga.

Impulso de tensión: Tensión aplicada a ambos electrodos durante un tiempo determinado.

Intensidad media de corriente (I_{fm}): Valor medio de la corriente que circula por el gap durante el mecanizado. Es el valor leído en el amperímetro.

Intensidad de impulso (i_f): Intensidad que circula por el gap durante una descarga.

Tiempo de descarga (t_f): Tiempo durante el cual pasa la descarga hasta que eléctricamente se corta la corriente.

Tiempo de impulso (t_i): Tiempo que dura el impulso de erosión entre ambos electrodos.

Tiempo de pausa (t_o): Intervalo de tiempo que transcurre entre el final de un impulso y el comienzo del siguiente. Se verifica que: $t_p = t_i + t_o$

Tiempo de retraso de descarga o de ionización (t_d): Tiempo que transcurre entre la aplicación del impulso de tensión y el comienzo de descarga. Suele ser muy pequeño, del orden de 0,5 a 2 μs . Se cumple que: $t_i = t_d + t_f$

A continuación se explicará de una forma más detallada los parámetros que intervienen en el proceso de electroerosión [6]:

2.2.1.1 Temperatura del fluido dieléctrico

El fluido dieléctrico es el medio en el que están inmersos pieza y herramienta durante el proceso de electroerosión. Una de las partes en las que se compone una máquina de electroerosión es un termorregulador mediante el cual podemos variar la temperatura de dicho fluido [6].

Al variar la temperatura, ya sea para calentar o enfriar el fluido, el termorregulador necesitará un tiempo para llevar a cabo su función antes de poder empezar el propio proceso de electroerosión, lo que significa un mayor tiempo de producción y un aumento de gasto eléctrico por parte de este componente. [6].

2.2.1.2 Intensidad de corriente.

La intensidad de corriente, medida en amperios (A), es el parámetro correspondiente al flujo de carga eléctrica producida por el electrodo para que este pueda erosionar la pieza, arrancando el material, y penetrando en ella [6].

El rango de intensidad de corriente que puede abarcar una máquina de electroerosión es muy amplio, desde 0,8 amperios, hasta 5500 [6].

En un principio, una mayor intensidad de corriente significará un menor tiempo de erosión, traducido en un ahorro eléctrico, pero a su vez ocasionará un mayor desgaste de la herramienta. En casos de desgaste excesivo de los electrodos, será necesario sustituirlos en pleno proceso, aumentando el precio de los materiales usados [6].

2.2.1.3 Tiempo de descarga.

Este parámetro corresponde al tiempo en el que existe una tensión en el proceso, que ocasionará la intensidad de corriente explicada en el apartado anterior [6].

Un mayor tiempo de descarga producirá una mayor erosión en la pieza, debido a que la corriente eléctrica es la causante de la penetración del electrodo [6].

2.2.1.4 Tiempo de pausa.

Indica la separación en tiempo entre dos descargas sucesivas. Este parámetro se puede variar desde 1 a 127 microsegundos [2].

Este tiempo transcurrido entre dos ciclos, pausa, en el que no existen descargas, por lo tanto, tampoco arranque de material, se emplea en limpiar el canal de descarga del material arrancado en el ciclo anterior, refrigerar el canal y dotar al mismo de dieléctrico limpio para producir las siguientes descargas. Si este valor de pausa se disminuye excesivamente, no dando tiempo a

limpiarse el canal de descarga correctamente, se producirán descargas parásitas con el material disperso por el canal, dando lugar a numerosos micro cortocircuitos. Debido a todo esto y a la poca refrigeración entre ciclos puede producirse la rotura del hilo [2].

Conforme se disminuye el valor de la pausa menor es el tiempo entre chispas, con lo que se aumenta la velocidad de corte y se produce un incremento de la intensidad entre el hilo y la pieza. Pequeñas variaciones de la pausa no tienen influencia sobre el “gap” (distancia en erosión entre el hilo y la pieza) [2].

Durante el tiempo que dura este parámetro, la tensión se hace nula, al igual que la intensidad. No hay, por tanto, erosión en la pieza. Su principal función es el descanso y el enfriamiento entre las superficies de contacto de pieza y electrodo [6].

Un mayor tiempo de pausa prevendrá el desgaste excesivo de la herramienta, pero como lógico inconveniente, aumentará el tiempo de producción [6].

2.2.1.5 Potencia

Indica los diferentes niveles de energía que se pueden obtener del generador. Se pueden seleccionar valores del 0 al 15 [2].

Los regímenes de desbaste utilizan valores que van del 8 al 15 mientras que para repasos y acabados se utilizan niveles del 0 al 7 [2].

Cada nivel de potencia lleva asociado una intensidad media entre hilo y pieza. A mayores valores de potencia se producen mayor calor, duración y tamaño de las chispas, todo ello lleva a aumentar la intensidad entre hilo y pieza. Ello provoca mayor arranque de material y por lo tanto mayor velocidad de corte. Un aumento excesivo de la potencia puede producir roturas del hilo. La potencia está íntimamente relacionada con la rugosidad, a valores altos de potencia le corresponden valores altos de rugosidad [2].

2.2.1.6 Servo.

Indica la diferencia de tensión teórica entre hilo y pieza durante el proceso de erosión. El valor del servo controla la distancia entre el hilo y la pieza. Seleccionable desde 1 a 256 voltios [2].

A mayores valores de servo se consigue un mayor tamaño del canal de descarga, el tiempo de ionización es mayor y la tasa de arranque disminuye [2].

Disminuyendo el valor del servo, se disminuye la distancia entre el hilo y la pieza y se provoca un aumento de la velocidad de corte. En operaciones de desbaste, ajustar mucho el servo, disminuir su valor, aumenta la tasa de arranque pero aumenta el riesgo de rotura de hilo, ya que al ser el canal de descarga menor la limpieza se dificulta y puede dar lugar a cortocircuitos [2].

2.2.1.7 Velocidad máxima de corte (Vel-Limit).

Este parámetro aparece en el control como Velocidad Programada., o simplemente como Velocidad. En el manual de tecnología aparece como Limit (mm/min). Es programable hasta 240 [2]. Este parámetro limita la velocidad máxima de la erosión. Esta función tiene su principal finalidad en la realización de repasos. En los repasos debido a que existe poco material a erosionar muchas veces es necesario realizar una limitación de velocidad [2].

Otro campo de aplicación importante es al realizar erosión de láminas muy delgadas. En este caso puede utilizarse el limitador de velocidad para estabilizar la erosión [2].

2.2.1.8 Dieléctrico.

Indica el nivel de dieléctrico que circula entre hilo y pieza. Su función además de llenar el canal de descarga de dieléctrico es refrigerar el canal de descarga y arrastrar los residuos de la zona de erosión. Seleccionable desde 0 a 31 [2].

La limpieza es un factor muy importante en la velocidad de corte en los procesos de desbaste.

Por ello, se recomienda seleccionar el índice 31. Si se realiza un ajuste correcto de las boquillas se consigue una presión entre 10 y 11 kg/cm² con los que se consigue la mayor velocidad de corte. No tiene influencia sobre el tamaño del “gap”, ni sobre la rugosidad [2].

Durante el corte cónico se tienen principalmente dos inconvenientes para conseguir altas Presiones [2]:

- En posición de corte cónico, se puede observar en la figura, que las boquillas no están alineadas, con lo que el fluido no tiene camino directo al canal de descarga. Así que éste es un factor que dificulta la limpieza de dicha zona [2].

- Para grandes ángulos se deben elegir boquillas de diámetro 8 mm (grandes), lo que implica que el chorro de agua será más disperso que si la boquilla fuese de un diámetro inferior [2].

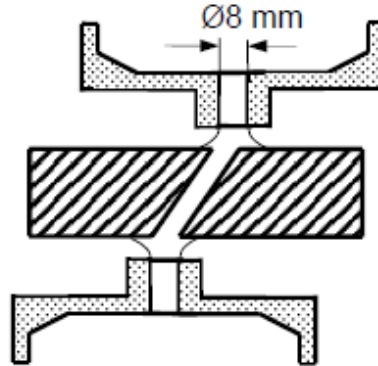


Figura 2.18 Posición de las boquillas en corte cónico [2].

Por todo ello, en el mecanizado de piezas cónicas se recomienda aumentar el valor del tiempo de pausa a fin de que no se produzcan roturas de hilo [2].

Al realizar repasos se debe tener en cuenta este parámetro de modo que hay que asegurar el chorro de agua en la zona de erosión. Valores muy altos del dieléctrico en el repaso pueden producir movimientos del hilo y la aparición de rayas en las piezas [2].

En los repasos dentro del canal erosionado se debe poner un nivel 5 de presión de dieléctrico para asegurar la limpieza a lo largo de toda la altura de la pieza. Si se está realizando un repaso a una matriz se debe seleccionar el nivel 0 o 1 [2].

2.2.1.9 Tensión.

También aparece en el presente proyecto representada por su sigla U. Este parámetro crea una diferencia de potencial entre electrodo y pieza, que a su vez origina una intensidad de corriente que ocasionará el arranque de material en la pieza [6].

Indica la diferencia de potencial durante la ionización en el “gap”. Seleccionable desde 100 a 250 voltios. Cuanto mayores son los niveles de tensión mayor es la energía en la descarga, por lo tanto, aumenta la tasa de arranque y se obtienen mayores valores de rugosidad. Aumentando este valor aumenta la intensidad entre hilo y pieza y existe un mayor riesgo de rotura de hilo [2].

2.2.1.10 Velocidad del hilo.

Velocidad de alimentación del hilo. Seleccionable del valor 0 al 15. Es la velocidad de avance del hilo por las guías [2].

Durante la erosión se produce un desgaste del hilo, debido a las sucesivas chispas que tienen lugar a lo largo de la pieza. Conforme aumenta la altura de la pieza, un mismo tramo de hilo puede chispear un mayor número de veces incrementándose el desgaste y por lo tanto aumentando el riesgo de rotura. En piezas de gran espesor se recomienda aumentar la velocidad de hilo con la finalidad de homogeneizar el desgaste [2].

La velocidad de hilo no tiene influencia sobre el “gap”, velocidad de erosión ni rugosidad, pero con valores bajos de velocidad de hilo aparecen problemas de conicidad en las piezas y aumenta el riesgo de rotura [2].

2.2.1.11 Acabado.

Parámetro que limita la energía de erosión para conseguir bajas rugosidades. Solo se aplica en regímenes de repaso. Seleccionable ON/OFF [2].

2.2.1.12 Tensión de hilo.

Tensión mecánica a la que está sometido el hilo de corte. Se puede seleccionar desde un nivel 0 al 31 [2].

Entre la boca superior e inferior, con un nivel de tensión de hilo programado de 16 debe existir alrededor de 1 kg de tensión mecánica en el hilo, en la zona anterior al freno deben existir alrededor de 300 gr [2].

El incremento de la tensión del hilo reduce la resistencia del mismo al desgaste producido por las chispas y aumenta el riesgo de rotura [2].

El valor de la tensión mecánica no tiene influencia sobre la tasa de arranque, el “gap” o la rugosidad. Se recomienda utilizar valores altos de la tensión del hilo en los procesos de repaso, en este caso el hilo está poco solicitado y se puede aumentar la tensión mecánica a fin de mejorar la verticalidad de las piezas [2].

2.2.1.13 Invers

Añade una señal contraria a la del sentido de la tensión de vacío y se produce una corriente con impulsos con efecto anti-electrólisis. ON/OFF [2].

Se recomienda su utilización en procesos en los que se quiera dejar muy buena calidad superficial y sobre todo cuando se trabaja con materiales propensos a la electrólisis como el titanio, metales duros, etc. [2].

2.3 Coeficientes de cálculo.

El objetivo es optimizar cada uno de los coeficientes, minimizándolo o maximizándolo según corresponda [6]. Obtendremos entonces un valor para cada uno de ellos, y de esa manera también podremos seleccionar los valores de los parámetros óptimos para el proceso de corte por electroerosión [6]. En nuestro caso los más importantes son los siguientes:

Velocidad de corte: Representa la longitud de material erosionado en la unidad de tiempo, este parámetro se debe llevar al máximo posible [2].

Rugosidad: Representa la aspereza producida por la chispa en la superficie mecanizada. El valor indicado esta expresado en Rugosidad Ra [μm] [2].

2.4 Proceso de experiencias: Método Taguchi.

Una vez conocidos los parámetros o variables que intervienen en el proceso de electroerosión, y los resultados que se desean calcular para obtener las conclusiones correspondientes, necesitamos un método de cálculo para llevar a cabo dicha situación. Se debe tener en cuenta que, para obtener conclusiones y resultados, es necesario variar los parámetros y relacionarlos entre sí, para poder alcanzar una hipótesis válida. El mayor problema que surge ahora es que el gran número de parámetros existentes hace que se necesiten un gran número de ensayos prácticos para verificar resultados. Este elevado número de ensayos no cumpliría con los objetivos de este proyecto, ya que el gasto, tanto eléctrico como material sería muy elevado, por lo que no compensaría su realización [6].

Se decide entonces por la utilización de un método estadístico, denominado Método Taguchi, o diseño robusto. El objetivo principal de la utilización de este método es la reducción del número de ensayos prácticos a realizar, con el correspondiente ahorro de tiempo, material, y gasto eléctrico [6].

2.4.1 Introducción a la Metodología Taguchi

Es un método de la ingeniería de calidad ideado por Genichi Taguchi a principios de los años 50. En vez de reducir las variaciones del proceso de producción (comprando mejor maquinaria, aumentando su mantenimiento, etc.) se centrará en la fase de diseño de un producto, de manera que sea insensible a las fuentes de variabilidad, es decir, robusto. Generalmente este enfoque para mejorar la calidad será considerablemente más económico. Además, buscará siempre sobrepasar las expectativas del cliente para dar importancia a aquellos parámetros que le interesen el cliente y ahorrarse dinero en otros que no le interesen. Es necesario determinar las causas que pueden provocar variaciones en un proceso ya que además determinan la capacidad (formas de procesar las piezas, calidad de la materia prima, mantenimiento, etc.), no perder de vista las causas del entorno donde se fabrica el producto (componentes humanos, condiciones ambientales) y estar atentos a los distintos parámetros interno del producto (deterioros, envejecimientos, etc.). Estas causas o factores que afectan al producto son los factores de ruido o de distorsión y los factores de control. Determinadas estas causas y obtenidos los factores de control, se diseña un nuevo producto cuyas propiedades se vean menos afectadas por estos factores de variabilidad [6].

2.4.2 Etapas de un proceso de experiencias.

A la hora de realizar el método, se deben cumplir una serie de pasos o etapas de manera ordenada. En el caso en el que una etapa no verifique los resultados o cumpla los objetivos deseados, se deberá retroceder a etapas anteriores para modificarla, y tratar de solucionar el problema [6].

Las etapas (generalmente implicadas en el método de Taguchi) que se deberán seguir, correctamente ordenadas, para realizar este proyecto son las siguientes:

1. Definir el objetivo del proceso, o más específicamente, un valor objetivo para una medida de rendimiento del proceso: Esto puede ser una velocidad de flujo, la temperatura, etc.

El objetivo de un proceso también puede ser un mínimo o máximo; Por ejemplo, el objetivo puede ser para maximizar la velocidad de flujo de salida. La desviación en la característica de rendimiento del valor objetivo se utiliza para definir la función de pérdida para el proceso [6].

2. Determinar los parámetros de diseño que afectan el proceso: Los parámetros son variables dentro del proceso que afectan a la medida de desempeño tales como temperaturas, presiones, etc., que se pueden controlar fácilmente. Se debe especificar el número de niveles que los parámetros deben ser variados [6][7].

Se denominan niveles a los diferentes valores que puede tomar un parámetro a lo largo del experimento. Si por ejemplo el parámetro correspondiente a la intensidad, toma valores de 10, 15 o 20 amperios, significa que el parámetro de la intensidad tiene 3 niveles [6][8].

Aumentar el número de niveles para variar un parámetro, incrementa el número de experimentos a realizar [6][9].

3. Crear matrices ortogonales para el diseño de parámetros que indiquen el número y las condiciones para cada experimento. La selección de matrices ortogonales se basa en el número de parámetros y los niveles de variación para cada parámetro [6].

4. Llevar a cabo los experimentos que se indican en la matriz completa para recoger datos sobre el efecto de la medida del rendimiento [6].

5. Análisis completo de datos para determinar el efecto de los diferentes parámetros en la medida de rendimiento [6].

6. Ejecutar la experiencia de confirmación. Se denomina experiencia de confirmación, a aquel ensayo práctico que se realizará con los valores óptimos de cada uno de los parámetros obtenidos. En el caso en que los resultados obtenidos después de la realización de esta última experiencia sean los deseados, se podrá confirmar que las hipótesis utilizadas son satisfactorias, por lo que se verificarán los resultados, y las conclusiones correspondientes serán aceptadas [6].

Para que la experiencia de confirmación sea válida, el coeficiente de variación, entre los resultados teóricos calculados mediante los ANOVA del Método Taguchi, y los resultados obtenidos en el ensayo práctico de confirmación, no debe ser superior al 7,5%. El rango ideal de valores es el comprendido entre 0 y 5% [6].

2.4.3 Determinación de los parámetros en el diseño de la matriz ortogonal.

El efecto de muchos parámetros diferentes, en el rendimiento de un terminado experimento, puede ser examinado a través del método de la matriz ortogonal propuesto por Taguchi. Una vez que los parámetros que afectan a un proceso controlado se han determinado, los niveles en los que estos parámetros pueden variar deben determinarse. Seleccionar cuáles son los niveles de una variable para poner a prueba requiere de un conocimiento profundo del proceso, incluido el mínimo, el máximo y el valor actual del parámetro. Si la diferencia entre el valor mínimo y el máximo de un parámetro es grande, es aconsejable incluir parámetros con un valor intermedio, lo que hace aumentar el número de niveles de los parámetros. Por ejemplo, si la temperatura de funcionamiento de una determinada máquina oscila entre 20 y 80 grados C y se sabe que la temperatura actual de funcionamiento de dicha máquina es 50 grados centígrados, tres niveles podrían ser elegidos a 20, 50, y 80 grados C. También, el costo de la realización de experimentos debe tenerse en cuenta cuando se determina el número de niveles de un parámetro para incluir en el diseño experimental. En el ejemplo anterior de la temperatura de la máquina, sería un costo prohibitivo para hacer 60 niveles en intervalos de 1 grado. Típicamente, se elige el mismo número de niveles para todos los parámetros en el diseño experimental, para ayudar en la selección de la matriz ortogonal adecuada.[10]

Conociendo el número de parámetros y el número de niveles, la matriz ortogonal apropiada puede ser seleccionada sin mayor dificultad. Utilizando la tabla que se muestra a continuación, el nombre de la matriz adecuada se encuentra buscando en la columna experimentos y última fila correspondiente al número de parámetros y el número de niveles. Una vez que el nombre ha sido determinado, el subíndice representa el número de experimentos que deben ser completadas. Por ejemplo, en una matriz L16, será necesario la realización de 16 ensayos para su posterior verificación y confirmación. Estas matrices se han creado usando un algoritmo desarrollado por Taguchi, y permite que para cada variable y configuración, puedan ser probadas igualmente [6].

Por ejemplo, cómo se puede representar en la tabla 2.1, si tenemos tres parámetros (tensión, temperatura, presión) y dos niveles (alto , bajo), la matriz adecuada es L4.

Tabla 2.1 Ejemplo de matriz L4

EXPERIMENTOS	P1	P2	P3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

En la tabla 2.1 se muestran cuatro experimentos diferentes representados de manera secuencial en la matriz. Los niveles designados como 1, 2, fueron reemplazados en la matriz con los valores del nivel real (Alto y bajo respectivamente), y P1, P2, P3 igualmente se sustituyeron por los parámetros reales (es decir, tensión, temperatura y presión).

A continuación, se empleará un ejemplo sencillo con el fin de mostrar las ecuaciones usadas para determinar el porcentaje de influencia de cada factor en la respuesta, y por este motivo se usaron los datos de la tabla 2.2, que representan un experimento con 3 factores y dos niveles por cada factor.

Tabla 2.2 Datos de ejemplo para cálculo de porcentaje de influencia

EXPERIMENTOS	FACTORES			RESPUESTA
	A	B	C	
1	1	1	1	6
2	1	2	2	8
3	2	1	2	12
4	2	2	1	10

Se aplicaron 5 pasos para realizar el cálculo del porcentaje de influencia como se muestra a continuación:

1. Encontrar el total de efectos de cada uno de los factores:

De los datos de la tabla 2.2 se tomaron los valores correspondientes a cada factor y a cada nivel de dicho factor, es decir para cada factor se tuvieron en cuenta los valores de respuesta para cada nivel y posteriormente se sumaron como se evidencia a continuación.

$$A_1 = 6 + 8 = 14$$

$$B_1 = 6 + 12 = 18$$

$$C_1 = 6 + 10 = 16$$

$$A_2 = 12 + 10 = 22$$

$$B_2 = 8 + 10 = 18$$

$$C_2 = 8 + 12 = 20$$

2. Para hallar el factor de corrección, CF se usó la siguiente ecuación:

$$CF = \frac{T^2}{N} \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.1)}$$

Donde:

$$T = \sum \text{respuestas}_i$$
$$N = \text{Numero total de experimentos}$$

Por lo tanto:

$$T = 6 + 8 + 12 + 10 = 36$$

Resolviendo la ecuación (2.1)

$$CF = \frac{T^2}{N} = \frac{36 \times 36}{4} = 324$$

3. Para hallar la suma total de cuadrados, S_T usaremos la siguiente ecuación:

$$S_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - CF \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.2)}$$

$$\text{Resolviendo la ecuación (2.2)} \quad S_T = (6^2 + 8^2 + 12^2 + 10^2) - 324 = 344 - 324$$
$$S_T = 20$$

4. Se calcula la suma de cuadrados para cada factor de la siguiente manera:

$$S_A = \frac{A_1^2}{N_{A1}} + \frac{A_2^2}{N_{A2}} - CF \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.3)}$$

Donde:

$$A_1 \text{ y } A_2 = \text{valores calculados en el paso 1}$$
$$N_{A1} = \text{Numero de veces donde se encuentra } A_1 \text{ (ver tabla 2.2)}$$
$$N_{A2} = \text{Numero de veces donde se encuentra } A_2 \text{ (ver tabla 2.2)}$$

Por lo tanto:

$$S_A = \frac{14^2}{2} + \frac{22^2}{2} - CF$$

$$\text{Resolviendo la ecuación (2.3)} \quad S_A = 98 + 242 - 324$$
$$S_A = 16$$

Para calcular S_B se usa la siguiente ecuación y el mismo procedimiento anterior.

$$S_B = \frac{B_1^2}{N_{B1}} + \frac{B_2^2}{N_{B2}} - CF \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.4)}$$

Donde:

B_1 y B_2 = valores calculados en el paso 1

N_{B1} = Numero de veces donde se encuantra B_1 (ver tabla 2.2)

N_{B2} = Numero de veces donde se encuantra B_2 (ver tabla 2.2)

Por lo tanto:

$$S_B = \frac{18^2}{2} + \frac{18^2}{2} - CF$$

Resolviendo la ecuación (2.4) $S_B = 162 + 162 - 324$

$$S_B = 0$$

Para calcular S_C se usa la siguiente ecuación y el mismo procedimiento anterior.

$$S_C = \frac{C_1^2}{N_{C1}} + \frac{C_2^2}{N_{C2}} - CF \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.5)}$$

Donde:

C_1 y C_2 = valores calculados en el paso 1

N_{C1} = Numero de veces donde se encuantra C_1 (ver tabla 2.2)

N_{C2} = Numero de veces donde se encuantra C_2 (ver tabla 2.2)

Por lo tanto:

$$S_C = \frac{16^2}{2} + \frac{20^2}{2} - CF$$

Resolviendo la ecuación (2.5) $S_B = 128 + 200 - 324$

$$S_B = 4$$

5. Finalmente se obtiene el porcentaje de influencia de cada factor en la respuesta usando la siguiente ecuación:

$$P_A = \frac{S_A}{S_T} \times 100 \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.6)}$$

Usando la ecuación 2.6 se procede a calcular el porcentaje de influencia del factor P_A .

Resolviendo la ecuación (2.6) $P_A = \frac{16}{20} \times 100$

$$P_A = 80\%$$

Se realiza el mismo procedimiento anterior para calcular el porcentaje de influencia del próximo factor, P_B usando la ecuación 2.6.1:

$$P_B = \frac{S_B}{s_T} \times 100 \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.6.1)}$$

Resolviendo la ecuación (2.6.1) $P_B = \frac{0}{20} \times 100$

$$P_B = 0\%$$

Finalmente se realiza el mismo procedimiento anterior para calcular el porcentaje de influencia del factor restante, P_C usando la ecuación 2.6.2:

$$P_C = \frac{S_C}{s_T} \times 100 \quad [6][11] \quad \text{ecuación (2.6.2)}$$

Resolviendo la ecuación (2.6.2) $P_C = \frac{4}{20} \times 100$

$$P_C = 20\%$$

Al realizar la suma de los valores de $P_A + P_B + P_C = 100\%$ lo que permite tener como conclusión que el factor A tiene el mayor efecto o influencia en la respuesta, el factor B no tiene ningún impacto en la respuesta y el factor C cuenta con un efecto mínimo en la respuesta de nuestro ejemplo.

2.5 Estado del arte

El maquinado por descargas eléctricas o (EDM) se ha convertido en una opción de maquinado para las industrias que requieren realizar la manufactura de componentes conformados por una geometría compleja y con materiales duros, componentes que serían extremadamente difíciles de maquinar mediante un proceso convencional de manufactura. La técnica de manufactura de no contacto ha ido evolucionando constantemente desde su descubrimiento, esta técnica ha pasado de ser una herramienta exclusiva para el proceso de fabricación de matrices y dados de forja, y se ha transformado en una herramienta que se emplea como alternativa de mecanizado en aplicaciones a microescala y a su vez atrae un gran interés por parte de los investigadores.[12]

K. Ho et al. [7], en su investigación encontraron que en los últimos años, los investigadores han explorado una serie de formas de mejorar la eficacia de las chispas en el proceso de maquinado por descargas eléctricas, incluidos algunos conceptos experimentales únicos que se apartan del fenómeno de chispas tradicionales de EDM. A pesar de una variedad de enfoques diferentes, esta investigación comparte los mismos objetivos de lograr una eliminación de material más eficiente junto con una reducción en el desgaste de la herramienta en este caso hilo conductor y una mejor calidad de en el acabado superficial de la pieza de trabajo.[13]

Uno de los tipos de electroerosión con mayores aplicaciones es el maquinado por descargas eléctricas a través de un hilo conductor o (Wire-EDM), esto debido a que con la implementación de este proceso no se está limitado a la forma del electrodo como es el caso de la electroerosión por penetración, pues en este caso el hilo conductor mediante el control numérico computarizado (CNC), puede realizar las trayectorias que han sido programadas en un diseño previo dándole mayor aplicabilidad y facilidad a la hora de ejecutar los procesos de manufactura mediante este tipo de electroerosión. [14]

En [3], N. Mohri et al., consideran que en el maquinado por descargas eléctricas a través de un hilo conductor (electroerosión por hilo), es muy importante restringir la vibración de la herramienta (electrodo de hilo) para mejorar la precisión del mecanizado. En su trabajo, la investigación se desarrolla respecto a la dinámica de vibración del hilo en el mecanismo y se deriva un modelo matemático. Este modelo se compara con los resultados experimentales. El desplazamiento medido en un electrodo de hilo en el mecanizado de una placa delgada se analiza con la fuerza impulsiva medida a través de la respuesta de impulso por una sola descarga. La fuerza que actúa sobre el hilo depende de la dirección del movimiento del cable en la vibración. Se deriva un sistema de ecuación de tercer orden para el proceso de electroerosión por hilo teniendo en cuenta la remoción del mecanizado y las características vibracionales del sistema que se representan con la ecuación. Como el circuito de descarga cambia repentinamente de acuerdo con la condición de gap (distancia generada a cada lado del hilo conductor que lo separa de la pieza de trabajo), este sistema de vibración es esencialmente no lineal.

Tomando en cuenta la condición de no linealidad del sistema, la investigación se puede tomar como modelo base para el diseño de un controlador de mecanizado de alta precisión, pues con la ecuación utilizada, la relación entre la vibración del hilo y las variables de estado del sistema

todo se representa correctamente ya que los resultados de la simulación del comportamiento de la vibración del hilo con el sistema modelado muestran una muy buena relación con los resultados experimentales.

Desde otro enfoque en [5], S. S. Mahapatra et al., abordan el maquinado por descargas eléctricas a través de un hilo conductor (WEDM) como un proceso de mecanizado térmico especializado capaz de mecanizar con precisión componentes o piezas de materiales duros con formas complejas. Las piezas que tienen bordes afilados que presentan dificultades para ser mecanizadas por los procesos de mecanizado tradicionales pueden mecanizarse fácilmente mediante el proceso WEDM. Como se mencionaba a grandes rasgos en párrafos anteriores, la tecnología del proceso WEDM se basa en el fenómeno de electroerosión convencional que utiliza la técnica de eliminación de material sin contacto ampliamente aceptada, con la diferencia de que la chispa o descarga se genera entre el hilo y la pieza de trabajo generando un gap o separación entre ellas. Desde la introducción del proceso, WEDM ha pasado de ser usada como un medio simple para fabricar herramientas y matrices hasta convertirse en la mejor alternativa de producir piezas a microescala con el más alto grado de precisión dimensional y acabado superficial. En este trabajo los investigadores describen el desarrollo de un modelo y su aplicación para optimizar los parámetros de mecanizado WEDM. Se realizan experimentos para probar el modelo y se obtienen resultados satisfactorios. La metodología descrita en esta investigación es altamente beneficiosa para las industrias manufactureras, y también para otras áreas como la industria aeroespacial, automotriz y de fabricación de herramientas.

En su trabajo [5], S. S. Mahapatra et al., estudian factores como la corriente de descarga, duración del pulso, frecuencia del pulso, es decir tiempo de encendido y tiempo de apagado, velocidad del hilo, tensión del hilo y pocas interacciones seleccionadas para maximizar el MRR (tasa de remoción de material) y minimizar la rugosidad de la superficie en el proceso WEDM usando el Método Taguchi. El análisis muestra que factores como la corriente de descarga (A), la duración del pulso (B), el índice de flujo dieléctrico (F) y las interacciones AxB y AxF han desempeñado un papel importante en las operaciones de corte. El análisis de sus resultados lleva a concluir que los factores en los niveles A2, B2 y F3 (24amp, 6.40 μ sec, 1.40bar) se pueden establecer para la maximización de la MRR. De manera similar, se recomienda utilizar los factores en niveles como A1, B1 y F3 (16.00amp, 3.20 μ sec, 1.40bar) para maximizar la SF

(acabado superficial). Cabe resaltar que, en cualquier proceso, un número reducido de interacciones como por ejemplo menos de 2, es decir pocas interacciones, desempeñan un papel vital en la definición de las medidas de rendimiento óptimas. Un estudio sin considerar los efectos de interacción parece carecer de un análisis en profundidad. Por lo tanto, en este estudio, no solo se han considerado el factor sino también algunas interacciones seleccionadas. Los resultados del experimento de confirmación concuerdan bien con la configuración óptima predicha, ya que se encuentra un error de 4.062% con MRR. De manera similar, se observó un error de 1.53% para SF. Cabe señalar que los niveles óptimos de los factores para ambos objetivos difieren ampliamente. Para optimizar ambos objetivos, los modelos matemáticos se desarrollan utilizando un método de regresión no lineal. La búsqueda óptima de valores de parámetros de mecanizado para el objetivo de maximizar tanto MRR como SF se formula como un problema de optimización multi objetivo, multivariable y no lineal. Este estudio también evalúa las medidas de rendimiento con la misma importancia para los factores de ponderación, ya que una alta MRR y una alta SF son objetivos igualmente importantes en la aplicación WEDM.[15]

Por otra parte en [1], S. Datta et al., en su investigación usan modelos matemáticos cuadráticos derivados para representar el comportamiento del proceso de maquinado por descargas eléctricas a través de un hilo conductor (WEDM) en operación. Los experimentos se han llevado a cabo con seis parámetros de proceso: corriente de descarga, duración del pulso, frecuencia del pulso, velocidad del hilo, tensión del hilo y índice de flujo dieléctrico; para ser variados en tres niveles diferentes. Datos relacionados con las respuestas del proceso como la tasa de eliminación o remoción de material (MRR), el valor de rugosidad de la superficie trabajada (una medida del acabado de la superficie, SF) y el corte se han medido para cada una de las corridas experimentales y que corresponden a diferentes combinaciones de configuración de factores elegidas al azar. Estos datos se han utilizado para ajustarse a un modelo matemático cuadrático (modelo de superficie de respuesta) para cada una de las respuestas, que se puede representar como una función de los seis parámetros de proceso mencionados anteriormente. [16]

Los datos predichos se han utilizado para identificar la influencia paramétrica en forma de representación gráfica para mostrar la influencia de los parámetros en las respuestas seleccionadas. Los datos predichos dados por los modelos (según el diseño de matriz Ortogonal

L27 ($3 * 6$) de Taguchi) se han utilizado en busca de una combinación paramétrica óptima para lograr el rendimiento deseado del proceso: MRR máximo, buen acabado superficial (rugosidad mínima) y precisión dimensional del producto. Se ha adoptado el análisis relacional Grey para convertir este criterio multi objetivo en una función objetivo-única equivalente; grado relacional Grey general, que se ha optimizado (maximizado) mediante el uso de la técnica de Taguchi. La configuración óptima se ha verificado a través de una prueba de confirmación; mostró una buena relación con el valor predicho. Esto indica la utilidad de la técnica Grey-Taguchi como optimizador multi objetivo en el campo de WEDM.

A su vez en [4], V. K. Pasam et al., en su trabajo de investigación consideran que la selección de combinaciones de parámetros de mecanizado óptimos para obtener una mayor precisión es una tarea desafiante en WEDM debido a la presencia de un gran número de variables de proceso y mecanismos de proceso estocásticos complejos. En su trabajo, estudian experimentalmente WEDM de aleación de titanio (Ti6Al4V), determinan el comportamiento de ocho parámetros de control tales como corriente de pulso de ignición (A), duración de pulso corto (B), tiempo entre dos pulsos (C), velocidad servo (D), voltaje de referencia servo (E), presión de inyección (F), velocidad del hilo (G) y la tensión del hilo (H) en el acabado superficial, se estudiaron usando el diseño de parámetros de Taguchi en donde se usa la matriz ortogonal L27 ($3*8$) con ocho parámetros de control y sus efectos sobre la variable de respuesta. Desarrollan un modelo matemático mediante análisis de regresión lineal para establecer la relación entre los parámetros de control y el acabado superficial como respuesta al proceso. Intenta optimizar el modelo de predicción de rugosidad superficial utilizando el Algoritmo Genético (GA). Se obtienen valores óptimos de los parámetros de control en el nivel A1, B1, C1, D3, E1, F3, G2, H3 (8.00amp, 0.6µsec, 4µsec, 12µm/min, 30V, 4bar, 8m/min, 1.2dN) para el rango seleccionado y el material de la pieza de trabajo.

De una manera particular en [6], L. Pérez, realiza una investigación que se basa en un estudio acerca del proceso de electroerosión. realiza una serie de ensayos prácticos en una máquina de electroerosión por penetración (modelo AGIE COMPACT 3), y con ayuda del método de estudio estadístico, denominado Método Taguchi, procesa los resultados obtenidos en los ensayos prácticos para alcanzar los resultados finales que consisten en la optimización del proceso de electroerosión, y más concretamente la optimización de los diferentes parámetros que influyen



en dicho proceso el coeficiente TW (Tool Wear - Tasa de desgaste de herramienta), el coeficiente MRR (Material Removal Rate - Tasa de eliminación de material), y el coeficiente TWR (Tool Wear Rate - Coeficiente de desgaste de herramienta) finalmente gracias a la se deduce que una vez finalizado cada uno de los ensayos, y calculado los valores de los parámetros óptimos del proceso, se observa como el tiempo de duración óptimo es prácticamente hasta tres veces inferior a tiempo medio realizado en los dieciocho ensayos prácticos restantes. Su principal consecuencia es la posibilidad de mecanizar el doble o triple de piezas para un mismo periodo de tiempo, lo que influirá en un aumento de producción y de capacidad de satisfacer las demandas de los compradores, sin perder la calidad del producto en ningún momento.

3. METODOLOGÍA

En este apartado se describe de una manera detallada la metodología utilizada para resolver la problemática planteada en el caso de estudio y de esta manera optimizar el proceso de electroerosionado o corte por hilo.

Conocidos los parámetros o variables que intervienen en el proceso de electroerosión, y las variables de respuesta que se desean analizar para obtener las conclusiones correspondientes, se utiliza un método de análisis estadístico para llevar a cabo dicho procedimiento. Se hace necesario tener en cuenta que, para obtener conclusiones y resultados apropiados, es necesario variar los parámetros y relacionarlos entre sí, para poder alcanzar una hipótesis válida. [17]

Para realizar los diferentes ensayos prácticos se decide entonces por la utilización de un método estadístico, denominado Método Taguchi, o diseño robusto. El objetivo principal de la utilización de este método es la reducción del número de ensayos prácticos a realizar, con el correspondiente ahorro de tiempo, material, y gasto eléctrico. Se inicia realizando el diseño de experimentos ya que teniendo en cuenta el número de parámetros existentes y la inclusión de varios niveles para cada parámetro, hace necesario un gran número de ensayos prácticos para verificar resultados. Este elevado número de ensayos se ve drásticamente reducido gracias a la metodología de Taguchi. Por lo tanto, se llevará a cabo la siguiente metodología para desarrollar la experimentación y determinar los parámetros más influyentes en el proceso de electroerosión, su nivel más apropiado y la combinación de dichos parámetros en busca de la optimización del proceso de electroerosionado o corte por hilo.

Metodología desarrollada:

Definición del problema: Realizar una serie de ensayos prácticos para determinar los parámetros de corte más influyentes en el proceso de electroerosión por hilo y sus niveles más apropiados que conlleven a mejorar la eficiencia y confiabilidad del proceso.

Selección de la geometría: Se determina la geometría más apropiada que será utilizada para realizar la fase de experimentación.

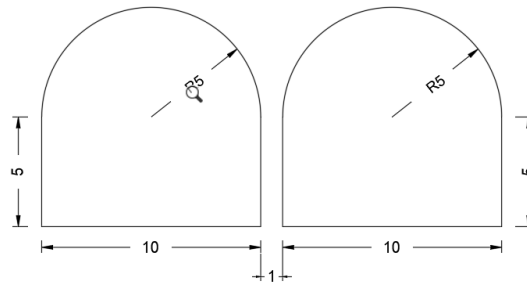


Figura 3.1 Geometría seleccionada.

Selección de los factores de control: Se determinan los parámetros de control y se consideran 3 niveles para cada uno como se muestra a continuación:

- Ton-Tiempo de encendido Niveles (9, 12, 15)
- Toff-Tiempo de apagado Niveles (10, 14, 18)
- Toff-Tiempo de apagado Niveles (10, 14, 18)
- WS-Velocidad del hilo Niveles (70, 100, 130)

Variables de respuesta: En base a los factores y niveles anteriormente seleccionados, se realiza el diseño de experimentos que represente mejor la problemática, y por ende se elige el arreglo L9 de Taguchi en el que se esperan como variables de respuesta las siguientes:

- El tiempo de maquinado ideal.
- El tiempo de maquinado real
- Rugosidad superficial de la pieza (R_a).
- Número de veces que se rompió el hilo durante el maquinado

Ejecución de la fase experimental

Se seleccionan 2 materiales para realizar la fase de experimentación (aluminio 6061-T6 y acero O1) en un espesor de 5/8 de pulgada. Se tendrán que realizar en total 81 corridas si se realizara la experimentación completa en cada material seleccionado, pues se tendría un arreglo ortogonal completo representado como: 3^4 lo que arrojaría un total de 81 corridas, donde se toma de base los 3 niveles y cuatro factores de control, pero gracias a la metodología de Taguchi se obtendrá una drástica reducción a un total de 9 experimentos a realizar, representados como un arreglo L9, posteriormente como validación estadística se ejecutan dichos experimentos tres veces cada uno para garantizar repetibilidad, es decir un total de 27 experimentos por cada placa y en su espesor seleccionado de 5/8 de pulgada, finalmente después de cada corte, se procede a realizar la medición de las variables de respuesta enunciadas en el punto anterior.

Interpretación de resultados

Se determina la mejor combinación de los parámetros de corte en el proceso de electroerosión por hilo en su nivel más óptimo y se ejecuta la experimentación de validación para posteriormente reportar los resultados obtenidos.

3.1 Diseño de experimentos

Para cumplir con el objetivo, parámetros como velocidad del hilo, tiempo de encendido, tiempo de apagado y servo voltaje, serán las variables de entrada a controlar, en base a investigaciones previas, para posteriormente determinar mediante la experimentación y el análisis correspondiente, las variables con mayor influencia en el proceso, la mejor combinación de estas y de esta manera llevar a la mejora en cuanto a confiabilidad y eficiencia del proceso de electroerosión por hilo.

Se optó por el uso de un método estadístico, denominado Método Taguchi, o diseño robusto. El objetivo principal de la utilización de este método como se menciona anteriormente es la reducción del número de ensayos prácticos a realizar, con el correspondiente ahorro de tiempo, material, y gasto eléctrico.

3.2 Definición de las variables de respuesta

- Número de veces que se rompió el hilo durante el maquinado (tomando cero como número ideal de rupturas).
- El tiempo de maquinado ideal (la máquina indica el ideal, sin rupturas de hilo).
- El tiempo de maquinado real (tiempo transcurrido desde que el corte inicia hasta que termina).
- Rugosidad superficial de la pieza R_a

3.3 Definición de los factores a considerar y niveles de cada uno

Los parámetros como velocidad del hilo, tiempo de encendido, tiempo de apagado y servo voltaje, que afectan el proceso son controlables y se eligen los siguientes niveles que son los diferentes valores que puede tomar un parámetro a lo largo del experimento.

- Ton-Tiempo de encendido [μs]
 - Niveles: 9, 12, 15
- Toff-Tiempo de apagado [μs]
 - Niveles: 10, 14, 18

- SV-Servo Voltaje [mV]
 - Niveles: 25, 35, 45
- WS-Velocidad del hilo [mm/s]
 - Niveles: 70, 100, 130

3.4 Realización del Diseño de experimentos

Se utilizó un arreglo ortogonal L9 de Taguchi que se representa en la tabla 3.1 y consta de 4 factores (A,B,C,D) ubicados horizontalmente representados por las columnas, y 3 niveles (1,2,3) ubicados verticalmente representados por las filas; es decir que si se tiene 4 factores y 3 niveles en una experimentación completa deberían realizarse 3^4 experimentos, es decir 81 experimentos en total, pero gracias a la metodología Taguchi se ven reducidos a 9 experimentos por cada espesor de material; como puede evidenciarse en las columnas Ton, Toff, SV y WS de la tabla 3.1 donde se muestran los valores reales en cada nivel de los factores de control que serán Ton (Tiempo de encendido), Toff (Tiempo de apagado), SV(Servo-Voltaje) y finalmente WS (Velocidad del hilo).

Tabla 3.1 Ejemplo de matriz L9

A	B	C	D	Ton	Toff	SV	WS
1	1	1	1	9	10	25	70
1	2	2	2	9	14	35	100
1	3	3	3	9	18	45	130
2	1	2	3	12	10	35	130
2	2	3	1	12	14	45	70
2	3	1	2	12	18	25	100
3	1	3	2	15	10	45	100
3	2	1	3	15	14	25	130
3	3	2	1	15	18	35	70

3.5 Número de réplicas

Se ejecutaron experimentaciones aleatorias de los niveles codificados mediante la metodología de Taguchi, por ende, se usó un color para identificar cada una de las nueve combinaciones provenientes del L9 y cada color se repetirá 3 veces, pues cada fila de la tabla 3.2 tiene tres repeticiones, por lo que son 27 corridas experimentales en total por cada espesor de material.

La aleatoriedad de la experimentación se debe a que se requiere eliminar posibles fuentes de ruido, por ejemplo, temperatura ambiente, hora de la prueba y condiciones del equipo entre otras; en la región derecha de la tabla 3.2 se registraron los valores reales de cada uno de los tres niveles con los que cuenta cada factor, con el fin de llevar a cabo una experimentación más controlada.

Tabla 3.2 Corridas experimentales

corrida	A	B	C	D	Ton	Toff	SV	WS
1	1	3	3	3	9	18	45	130
2	1	1	1	1	9	10	25	70
3	2	3	1	2	12	18	25	100
4	3	1	3	2	15	10	45	100
5	2	2	3	1	12	14	45	70
6	3	3	2	1	15	18	35	70
7	2	1	2	3	12	10	35	130
8	3	2	1	3	15	14	25	130
9	1	2	2	2	9	14	35	100
10	2	3	1	2	12	18	25	100
11	1	2	2	2	9	14	35	100
12	2	2	3	1	12	14	45	70
13	3	2	1	3	15	14	25	130
14	3	1	3	2	15	10	45	100
15	3	3	2	1	15	18	35	70
16	2	1	2	3	12	10	35	130
17	1	1	1	1	9	10	25	70
18	1	3	3	3	9	18	45	130
19	2	2	3	1	12	14	45	70
20	3	3	2	1	15	18	35	70
21	1	2	2	2	9	14	35	100
22	1	3	3	3	9	18	45	130
23	1	1	1	1	9	10	25	70
24	3	1	3	2	15	10	45	100
25	2	1	2	3	12	10	35	130



26	3	2	1	3	15	14	25	130
27	2	3	1	2	12	18	25	100

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar el análisis de los datos de una manera confiable se organizan los datos obtenidos mediante la experimentación y se clasifican por respuesta deseada, tipo de material y espesor como se muestra en las tablas 4.1,4.2,4.3 y 4.4, especificando el L9 de Taguchi y donde se incluyen las 3 repeticiones de la experimentación.

A continuación, como se puede apreciar en la tabla 4.1 se usa un formato especial que permite visualizar de una manera clara el tipo y espesor del material: Aluminio 6061 T6 con un espesor de 5/8 de pulgada, además cada uno de los cuatro factores de control cuenta con un color diferente es decir que se aplicara un color distintivo para: Tiempo de encendido Ton [μs], Tiempo de apagado Toff [μs], Servo Voltaje SV [mV] y Velocidad del hilo WS [mm/s], adicionalmente cada uno de los tres niveles de cada factor está identificado con un color en específico para evitar confusión a la hora de ejecutar la fase de experimentación, el color rosa es para el nivel 1 o nivel bajo, el color ladrillo es usado para el nivel 2 o nivel medio y el color marrón se usa para identificar el nivel 3 o nivel alto; es decir los niveles son los diferentes valores que puede tomar un parámetro. Finalmente se usa una tonalidad de color verde para identificar cada una de las veces que se ejecuta el experimento y se titulan prueba 1, prueba 2, y prueba 3, cabe resaltar que en cada tabla (4.1,4.2,4.3 y 4.4) se registran los datos finales para cada superficie de respuesta respectivamente: Rupturas Hilo N [u], Tiempo Ideal Ti [s], Tiempo Real Tr [s] y finalmente Rugosidad Ra [μm].

Tabla 4.1 **Rupturas de hilo** en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

ALUMINIO AISI 6061 T6 5/8 in							
Arreglo	Arreglo ortogonal L9 (3^4) Factores				Rupturas Hilo N [u]		
	Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	9	10	25	70	0	0	0
2	9	14	35	100	0	0	0
3	9	18	45	130	0	0	0
4	12	10	35	130	1	0	0
5	12	14	45	70	0	0	0
6	12	18	25	100	0	0	0
7	15	10	45	100	5	5	4

8	15	14	25	130	5	3	5
9	15	18	35	70	1	2	1

A continuación, se utilizará el mismo formato descrito anteriormente para las tablas en donde se encuentran organizados los datos provenientes de la experimentación.

 Tabla 4.2 **Tiempo Ideal** en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

ALUMINIO AISI 6061 T6 5/8 in							
Arreglo	Arreglo ortogonal L9 (3 ⁴) Factores				Tiempo Ideal Ti [s]		
	Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	9	10	25	70	205	214	206
2	9	14	35	100	207	206	206
3	9	18	45	130	232	242	235
4	12	10	35	130	215	206	211
5	12	14	45	70	214	208	223
6	12	18	25	100	211	213	214
7	15	10	45	100	223	226	227
8	15	14	25	130	214	212	212
9	15	18	35	70	212	213	213

 Tabla 4.3 **Tiempo Real** en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

ALUMINIO AISI 6061 T6 5/8 in							
Arreglo	Arreglo ortogonal L9 (3 ⁴) Factores				Tiempo Real Tr [s]		
	Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	9	10	25	70	214	223	214
2	9	14	35	100	215	215	214
3	9	18	45	130	239	250	245
4	12	10	35	130	629	224	218
5	12	14	45	70	227	221	215
6	12	18	25	100	221	222	221
7	15	10	45	100	1435	1472	920
8	15	14	25	130	1180	950	1213
9	15	18	35	70	322	597	373

Tabla 4.4 **Rugosidad** en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

ALUMINIO AISI 6061 T6 5/8 in							
Arreglo	Arreglo ortogonal L9 (3 ⁴) Factores				Rugosidad Ra [μm]		
	Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	9	10	25	70	4.99	4.61	4.53
2	9	14	35	100	4.9	4.58	4.33
3	9	18	45	130	4.38	4.44	4.59
4	12	10	35	130	4.88	4.96	4.87
5	12	14	45	70	4.61	4.81	4.72
6	12	18	25	100	4.6	4.52	4.94
7	15	10	45	100	5.35	4.97	5
8	15	14	25	130	4.68	5.36	4.94
9	15	18	35	70	4.76	5	4.78

Utilizando el software de Microsoft “Excel” © se ejecuta el análisis de los datos y de esta manera se determinó cuál o cuáles son los factores de control que tienen mayor influencia en la respuesta deseada. Se utilizaron las ecuaciones que brinda la literatura (ver sección 2.4.3) para representar este tipo de procesos y de esta manera se almacenaron los factores S/N (Señal de ruido), Mean value (Valores promedio) y Des. Est. (Desviación estándar), como se muestra en la tabla 4.5:

Tabla 4.5 Valores para cálculo de porcentaje de influencia Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

Arreglo	Arreglo ortogonal L9 (3 ⁴) Factores				Rugosidad Ra [μm]			S/N	Mean Value	Des. Est.
	Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3			
1	9	10	25	70	4.99	4.61	4.53	13.44	4.71	0.25
2	9	14	35	100	4.9	4.58	4.33	13.23	4.60	0.29
3	9	18	45	130	4.38	4.44	4.59	13.00	4.47	0.11
4	12	10	35	130	4.88	4.96	4.87	13.81	4.90	0.05
5	12	14	45	70	4.61	4.81	4.72	13.46	4.71	0.10
6	12	18	25	100	4.6	4.52	4.94	13.40	4.69	0.22
7	15	10	45	100	5.35	4.97	5	14.15	5.11	0.21
8	15	14	25	130	4.68	5.36	4.94	13.93	4.99	0.34
9	15	18	35	70	4.76	5	4.78	13.70	4.85	0.13

Para mostrar con más detalle el procedimiento como se obtienen los valores plasmados en la tabla 4.5 se usan las ecuaciones 4.1, 4.2, y 4.3:

- ➔ Para S/N (Señal de Ruido): se tienen 3 diferentes opciones que varían de acuerdo con el requerimiento del caso de estudio y de la respuesta deseada, en este caso en particular se usó la respuesta de Rugosidad y por ende la opción Smaller the better (Ecuación 4.2),

pues si la respuesta de rugosidad es menor será lo más conveniente para cumplir el objetivo.

- Nominal the best (Nominal el mejor):

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

$S/N =$ Señal de ruido

$\mu = \sum(y_i/n)$, por tanto μ se denomina Media

$\sigma^2 = 1/(n-1) \sum(y_i - \mu)^2$, por tanto σ se denomina desviación estándar

$y_i =$ respuesta_{*i*}

$n =$ Numero de respuestas (repeticiones)

Finalmente:

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\text{media}^2}{\text{Desviación estándar}^2} \right) \quad (4.1.1)$$

- Smaller the better (El más pequeño es el mejor):

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \quad (4.2)$$

Donde:

$y_i =$ respuesta_{*i*}

$n =$ Numero de respuestas (repeticiones)

- Larger the better (El más grande es el mejor):

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.3)$$

Donde:

$y_i =$ respuesta_{*i*}

$n =$ Numero de respuestas (repeticiones)

Para continuar con los cálculos, utilizando los valores obtenidos en la experimentación y almacenados en la tabla 4.5 se puede determinar analíticamente el porcentaje de influencia de cada factor de control en la variable de respuesta que en este caso de ejemplo será la rugosidad, en el material Aluminio 6061 T6 con un espesor de 5/8 in.

Tabla 4.6 Calculo de porcentaje de influencia Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

CF	205.763			
St	0.317			
Niveles	Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]
1	13.783	14.720	14.390	14.270
2	14.303	14.310	14.353	14.397
3	14.947	14.003	14.290	14.367
	43.033	43.033	43.033	43.033
S	0.226	0.086	0.002	0.003
P	71%	27%	1%	1%

La figura 4.1 representa el porcentaje de influencia que tiene cada factor en la respuesta deseada (Rugosidad) en el Aluminio 6061 T6 con un espesor de 5/8 in, tal y como se evidencia en los datos de la tabla 4.6, y de donde se puede observar de primera intención que el factor del Ton (tiempo de encendido) tiene gran efecto o influencia en la respuesta, seguido del Toff (tiempo de apagado) con un efecto medio y finalmente los factores SV (servo-voltaje) y WS (velocidad del hilo) con un efecto casi despreciable o nulo [20]

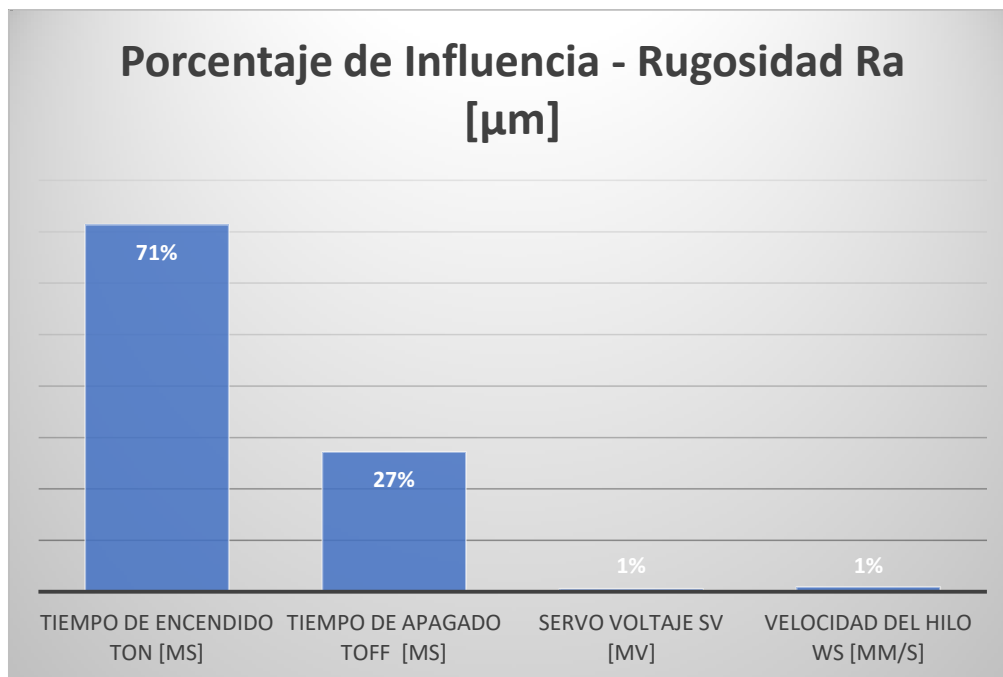


Figura 4.1 Porcentaje de influencia factores de control en Rugosidad.

4.1 Análisis de los datos mediante el software Minitab ©

El análisis de los datos en Minitab consta de los siguientes pasos:

1. Abrir el software Minitab, crear un nuevo proyecto, de la siguiente manera:

Ir a la pestaña Stat → DOE → Taguchi → Create Taguchi Design

Seleccionar el tipo de diseño: 3 Level Design

Seleccionar el número de factores: 4

Seleccionar el arreglo o diseño de Taguchi adecuado: L9

y en la hoja de trabajo copiar y pegar los datos obtenidos y tabulados de la manera como se analizaron en Excel, tal como se indica en la tabla 4.7, es necesario aclarar que como se evidencia en la tabla 4.8 las columnas R1,R2 y R3 representa cada repetición que se realizó respectivamente con la configuración obtenida del método Taguchi.

Tabla 4.8 Distribución de datos en Minitab, Rugosidad en Aluminio AISI 6061 T6 espesor 5/8 in

Experimento	Ton	Toff	V	WS	R1	R2	R3
1	9	10	25	70	4.99	4.61	4.53
2	9	14	35	100	4.90	4.58	4.33
3	9	18	45	130	4.38	4.44	4.59
4	12	10	35	130	4.88	4.96	4.87
5	12	14	45	70	4.61	4.81	4.72
6	12	18	25	100	4.60	4.52	4.94
7	15	10	45	100	5.35	4.97	5.00
8	15	14	25	130	4.68	5.36	4.94
9	15	18	35	70	4.76	5.00	4.78

2. Ir a la pestaña Stat → DOE → Taguchi → Analyze Taguchi Design
3. Seleccionar factores: Ton, Toff, V, WS → ok
4. Seleccionar respuestas: R1, R2, R3 → Select
5. Seleccionar tipo de función de calidad: Options → smaller the better
6. Seleccionar guardar S/N y Mean: Storage → seleccionar Signal to Noise Ratios y Means
7. Ok.

Se procede a obtener las gráficas de respuesta tanto para Means(Promedios) como para S/N ratios(Señales de Ruido) como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3 respectivamente, que representan el efecto de cada factor en la respuesta deseada.

De la gráfica 4.2 se observa claramente que el factor del Ton (tiempo de encendido) tiene gran efecto o influencia en la respuesta, seguido del Toff (tiempo de apagado) con un efecto medio, los otros factores parecen no tener influencia en la respuesta deseada [21], es por eso que se hace necesario conocer los porcentajes de influencia de cada factor para obtener una respuesta más concreta respecto al efecto de cada factor.

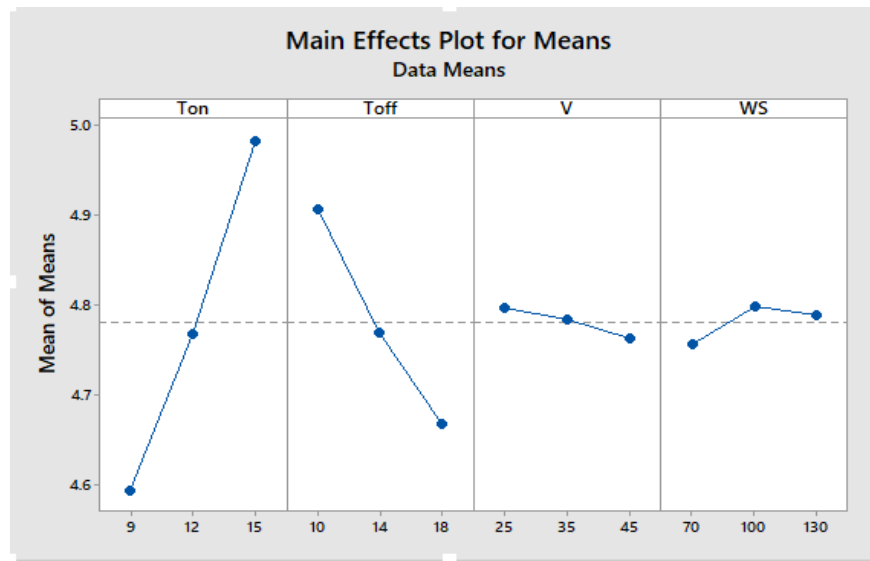


Figura 4.2 Efectos principales para Means(Promedios).

De acuerdo con lo que se puede observar en la figura 4.3 y tomando como referencia la información proveniente de la literatura, los valores óptimos para cada uno de los factores se encontrarán en los niveles más altos de cada factor, por lo tanto, para el factor Ton en su nivel 1, para el factor Toff en su nivel 3, para el factor V en su nivel 3 y finalmente para el factor WS en su nivel 1 [22].

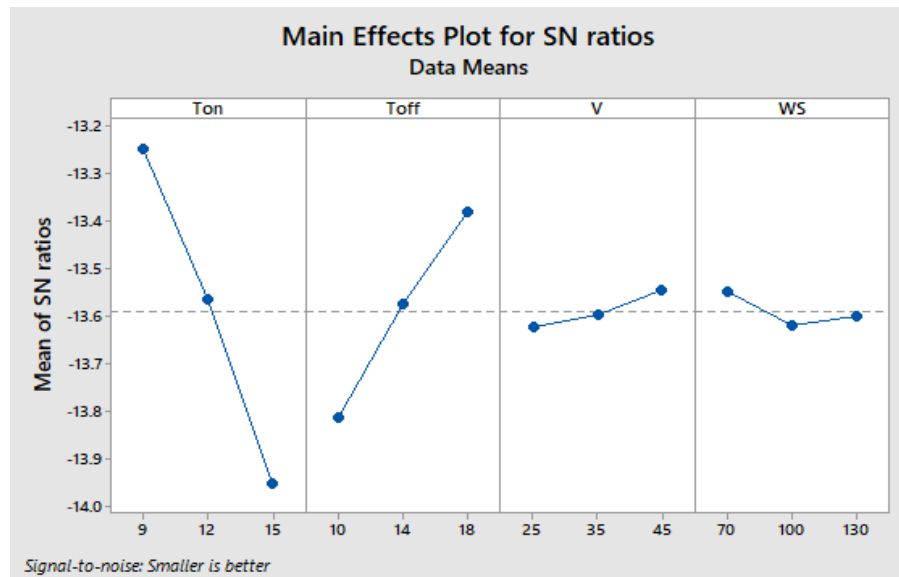


Figura 4.3 Efectos principales para S/N Ratios (Señales de Ruido).

Por otra parte, Si se desea conocer los porcentajes de contribución, se hace necesario realizar una regresión, tanto para S/N (Señal de ruido) como para Means (respuesta promedio).

1. Stat → Regression → Regression → Fit Regression Model
2. Seleccionar Respuestas: SNRA1, MEAN1
3. Seleccionar factores: Ton, Toff, V, WS
4. Results → Display of results → Expanded tables

Como se puede observar en las figuras 4.4 y 4.5 donde se evidencian los porcentajes de influencia de los factores de control para S/N (Señales de ruido) y Means (Respuestas Promedio) respectivamente.

Regression Analysis: SNRA1 versus Ton, Toff, V, WS

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	1.03889	99.22%	1.03889	0.259723	126.83	0.000
Ton	1	0.74306	70.96%	0.74306	0.743061	362.85	0.000
Toff	1	0.28314	27.04%	0.28314	0.283139	138.26	0.000
V	1	0.00883	0.84%	0.00883	0.008830	4.31	0.106
WS	1	0.00386	0.37%	0.00386	0.003862	1.89	0.242
Error	4	0.00819	0.78%	0.00819	0.002048		
Total	8	1.04708	100.00%				

Figura 4.4 Porcentaje de influencia factores de control en Rugosidad S/N Ratios.

Regression Analysis: MEAN1 versus Ton, Toff, V, WS

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	0.314383	99.10%	0.314383	0.078596	110.65	0.000
Ton	1	0.225557	71.10%	0.225557	0.225557	317.53	0.000
Toff	1	0.085602	26.98%	0.085602	0.085602	120.51	0.000
V	1	0.001667	0.53%	0.001667	0.001667	2.35	0.200
WS	1	0.001557	0.49%	0.001557	0.001557	2.19	0.213
Error	4	0.002841	0.90%	0.002841	0.000710		
Total	8	0.317225	100.00%				

Figura 4.5 Porcentaje de influencia factores de control en Rugosidad Means.

Como se puede evidenciar en las figuras 4.4 y 4.5 obtiene resultados con un porcentaje de confiabilidad muy alto debido a que el error es casi nulo (menor al 5%) [6][23][24], ya que mediante Minitab se validaron los cálculos que previamente se realizaron a través de Excel, permite conocer los valores óptimos para los factores de control y esto conlleva a obtener una respuesta deseada en este caso de rugosidad.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ejecutaron una serie de Experiencias y se tabularon los resultados obtenidos de las mismas, posteriormente se realizó un estudio o análisis de los datos obtenidos, mediante el software Excel y luego fue validado dicho estudio mediante el uso del Software para análisis estadístico de datos Minitab, obteniendo resultados bastante confiables, con errores menores de 5%.

Gracias a la metodología Taguchi se logró la optimización de los parámetros de corte en el proceso de electroerosionado por hilo, con una reducción significativa en la experimentación, pues gracias a esta metodología se logró reducir el número de experimentos de 81 a solo 9 por cada espesor de material, lo cual conllevó evidentemente a un ahorro de material, gasto energético y una reducción drástica en los tiempos de experimentación.

En base a los análisis de los datos mediante el software Excel es posible determinar de una manera aproximada los efectos principales de cada factor de control en la respuesta deseada. También es evidente que cuando se desarrolla el análisis con el software Minitab se puede tener en cuenta posibles interacciones o comportamientos que no pueden ser determinados a simple vista. Es importante resaltar que cuando se utilizan señales de ruido o S/N para determinar el efecto de los factores en la superficie de respuesta siempre el valor óptimo de cada factor se encontrara tomando el valor más alto de S/N, independientemente de la función de S/N seleccionada, en este caso de estudio en particular “Smaller the better”, debido a que este es un caso en donde se busca que la rugosidad siempre sea menor.

En la figura 4.5 encuentra plasmada la mejor combinación de parámetros que se determinaron, con base a la búsqueda de las diferentes superficies de respuesta y de acuerdo con el tipo de material seleccionado para cada espesor.

Espesor material	Respuesta	Arreglo ortogonal L9 (3^4) Factores			
		Tiempo de encendido Ton [μs]	Tiempo de apagado Toff [μs]	Servo Voltaje SV [mV]	Velocidad del hilo WS [mm/s]
5/8 in	Aluminio Rugosidad Ra [μm]	9	18	45	70
	Aluminio Rupturas Hilo N [u]	12	18	35	70
	Aluminio Tiempo Ideal Ti [s]	12	14	35	70
	Aluminio Tiempo Real Tr [s]	9	18	35	70
5/8 in	Acero Rugosidad Ra [μm]	9	18	45	130
	Acero Rupturas Hilo N [u]	15	10	45	100
	Acero Tiempo Ideal Ti [s]	15	10	35	100
	Acero Tiempo Real Tr [s]	12	18	35	70

Figura 4.5 Combinaciones óptimas.

REFERENCIAS

- [1] S. Datta y S. S. Mahapatra, “*Modeling, simulation and parametric optimization of wire EDM process using response surface methodology coupled with grey-Taguchi technique*”, Multicr. Int. J. Eng. Sci. Technol. Ext., vol. 2, núm. 5, pp. 162–183, 2010.
- [2] P. Miramon y J. Villaron, “*Mecanizado de piezas mediante electroerosión por hilo*”, pp. 1–22, 2014.
- [3] N. Mohri, H. Yamada, K. Furutani, T. Narikiyo, y T. Magara, “*System Identification of Wire Electrical Discharge Machining*”, CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 47, núm. 1, pp. 173–176, 1998.
- [4] V. K. Pasam, M. V. P, y M. Swapna, “*Optimizing Surface Finish in WEDM Using the Taguchi Parameter Design Method*”, vol. XXXII, núm. 2, pp. 107–113, 2010.
- [5] S. S. Mahapatra y A. Patnaik, “*Parametric Optimization of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process using Taguchi Method*”, vol. XXVIII, núm. 4, 2006.
- [6] L. Pérez, “*Optimización del proceso de electroerosión (EDM PROCESS OPTIMIZATION)*”, Universidad de Cantabria, 2014.
- [7] K. . Ho y S. . Newman, “*State of the art electrical discharge machining (EDM)*”, Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 43, núm. 13, pp. 1287–1300, oct. 2003.
- [8] S. Kondoh and Y. Umeda, “*Development of Upgradable Cellular Machines for Environmentally Conscious Products*,” vol. 47, no. 1, pp. 381–384, 1998.
- [9] F. Z. Fang, “*Diamond Cutting of Silicon with Nanometric Finish*,” vol. 47, no. 1, pp. 45–49, 1998.
- [10] A. Azushima, J. Miyamoto, and H. Kudo, “*Effect of Surface Topography of Workpiece on Pressure Dependence of Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming*,” vol. 47, no. 1, pp. 1–2, 1998.
- [11] P. Choul, “*Effect of Tool Edge Geometry on the Nanometric Cutting of Ge B c L*,” vol. 47, no. 2, pp. 2–5, 1998.
- [12] F. Kimura, H. Lipsonz, and M. Shpitalniz, “*Engineering Environments in the Information Age: Research Challenges and Opportunities*,” vol. 47, no. 1, pp. 87–90, 1998.
- [13] K. Langez, “*Enhancement of Drawability by Local Heat Treatment*,” vol. 47, no. 1, pp. 181–184, 1998.

-
- [14] D. Bennetz and S. Thurwachterl, “*Environmental-Based Systems Planning for Machining*,” vol. 47, no. 1, 1998.
- [15] N. Modelling, “*Excimer Laser Cutting: Experimental Characterization and 3D Numerical Modelling for Polyester Resins*,” vol. 47, no. 1, pp. 141–144, 1998.
- [16] B. W. Kruszynski and S. Midera, “*Forces in Generating Gear Grinding-Theoretical and Experimental Approach*,” vol. 47, no. 1, pp. 287–290, 1998.
- [17] Y. Koren, S. J. Hu, and T. W. Weber, “*Impact of Manufacturing System Configuration on Performance*,” vol. 47, no. 1, pp. 2–5, 1998.
- [18] T. Saekil and Y. Samitsuz, “*Infeed Grinding of Silicon Wafers Applying Electrophoretic Deposition*,” vol. 47, pp. 1998–2001, 1998.
- [19] S. Takahashi, T. Miyoshi, “*In-Process Measurement Method for Detection and Discrimination of Silicon Wafer Surface Defects by Laser Scattered Defect Pattern*,” vol. 47, no. 2, pp. 4–7, 1998.
- [20] U. Donmund, “*In-Process Punching with Pressure Fluids in Sheet Metal Forming*,” vol. 47, no. 1, 1998.
- [21] S. Z. Tichkiewitchl, “*Integration of Manufacturing Processes in Design*,” vol. 47, no. 1, pp. 99–102, 1998.
- [22] I. Manufacturing, H. Aspects, and B. M. Systems, “*Interactive Manufacturing: Human Aspects for Biological Manufacturing Systems 1*,” vol. 47, no. 2, pp. 389–392, 1998.
- [23] U. Zitt and P. Management, “*Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Processes*,” vol. 47, pp. 265–270, 1998.
- [24] Z. Y. Yu and M. Fujino, “*Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method*,” vol. 47, pp. 169–172, 1998.
- [25] F. Mariotti, P. Castelli, P. Giacosa, R. T. M., and V. C. To, “*Micromachining with Excimer Laser*,” vol. 47, no. 2, pp. 145–148, 1998.
- [26] B. We, “*Machining Allowance in Electrochemical Machining*,” vol. 47, pp. 165–168, 1997.
- [27] F. Kimura, T. Hata, H. Suzuki, and P. M. Engineering, “*Product Quality Evaluation Based on Behavior Simulation of Used Products*,” vol. 47, no. 1, pp. 119–122, 1998.
-



- [28] G. Reinhart, R. Graser, and R. Klingel, “*Qualification of Standard industrial Robots to Cope with Sophisticated Assembly Tasks*,” vol. 47, no. 2, pp. 2–5, 1998.
- [29] Y. Moril, “*Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition Using Electrolyte Jet I*,” vol. 47, no. 2, pp. 161–164, 1998.
- [30] A. Forcellese, L. Fratini, and F. Gabrielliz, “*Sheet Metal Forming*,” vol. 47, pp. 217–220, 1998.
- [31] R. G. Landers, A. Mechanics, and A. Arbor, “*Supervisory Machining Control: Design Approach and Experiments*,” vol. 47, no. 2, 1998.
- [32] G. Poulachon and A. Moisan, “*A Contribution to the Study of the Cutting Mechanisms During High Speed Machining of Hardened Steel*,” vol. 47, no. 1, pp. 73–76, 1998.