ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Proyecto / Trabajo Fin de Carrera

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN

(EDM PROCESS OPTIMIZATION)

Para acceder al Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor: Luis Pérez Blanco

Mayo -2014

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA 9

1. Objeto del proyecto 12

2. Finalidad y alcance 12

3. Bibliografía 13

4. Definiciones 14

5. Ingeniería del proceso. 17

5.1. Introducción a la electroerosión 17

5.2. Electroerosión por penetración 18

5.2.1. Electrodos de forma 19

5.3. Proceso de la descarga 20

5.4. Parámetros de control de impulso 25

5.4.1. Temperatura del fluido dieléctrico 26

5.4.2. Intensidad de la corriente 26

5.4.3. Tiempo de descarga 27

5.4.4. Tiempo de pausa 27

5.4.5. Compresión 28

5.4.6. Ganancia 28

5.4.7. Relat With. Despl. del soporte de la herramienta 28

5.4.8. Timer Speed 28

5.4.9. Tensión 29

5.4.10. Polaridad 29

5.4.11. S-box 29

5.4.12. ACO y ACC 30

5.4.13. Eros time 30

5.5. Coeficientes de cálculo 30

5.5.1. TW. Tasa de desgaste e la herramienta 31

5.5.2. MRR. Tasa de eliminación de material 31

5.5.3. TWR. Coeficiente de desgaste de la herramienta 32

5.6. Proceso de experiencias. Método Taguchi 34

5.6.1. Introducción 34

5.6.2. Etapas de un proceso de experiencias 35

5.6.3. El “F-Ratio” 39

6. Desarrollo 40

6.1. Selección de los parámetros 40

6.2. Selección de la matriz ortogonal 41

6.3. Ensayos prácticos 44

6.3.1. Programación utilizada 44

6.3.2. Toma de resultados y cálculo de coeficientes 49

6.3.3. Cálculo de las ANOVAS 50

6.3.4. Experiencia óptima y de confirmación. 51

7. Conclusiones 54

7.1. Análisis de los coeficientes 54

7.2. Análisis de los parámetros 56

7.3. Conclusiones finales 58

ANEXOS **60**

Anexo I: **El proceso de electroerosión** 64

1. Introducción 65

2. Tipos 69

2.1. Electroerosión por hilo 69

2.2. Electroerosión por rectificación 71

3. Materiales para piezas utilizados 72

3.1. Aceros para herramientas 72

3.2. Superlaciones 74

3.3. Materiales extra-duros 75

4. Los electrodos en el proceso de electroerosión 76

4.1. Criterio para la selección del material del electrodo 76

4.2. Electrodos metálicos 79

4.3. Electrodos de grafito 81

5. El fluido dieléctrico 82

5.1. Tipos de aceites para electroerosión 85

Anexo II: **Método Taguchi** 88

1. Introducción 88

1.1. Filosofía del Método Taguchi 89

2. Etapas del diseño robusto 90

3. Determinación de los parámetros en el diseño de la matriz ortogonal 92

4. Análisis de la varianza. (ÁNOVAS) 94

4.1. Cálculo de las Ánovas 95

5. F-Test 98

5.1. Formulación y cálculo 98

Anexo III: **Cálculos** 100

1. Toma de medidas 101

2. TW 102

2.1. Cálculo del TW 102

2.2. Cálculo de las Ánovas para el TW 103

3. MRR 104

3.1. Cálculo del MRR 104

3.2. Cálculo de las Ánovas para el MRR 105

4. TWR 106

4.1. Cálculo del TWR 106

4.2. Cálculo de las Ánovas para el TWR 107

Anexo IV: **Materiales utilizados** 108

1. Herramientas o electrodo 109

2. Pieza 111

3. Fluido dieléctrico 112

Anexo V: **Maquinaria**..... 113

1. Introducción..... 113

2. Características 113

3. Componentes..... 114

3.1. Sistema hidráulico/neumático..... 114

3.2. Sistema de control..... 115

3.3. Generador de impulso 116

3.4. Unidad de dieléctrico 117

3.5. Termorregulador..... 118

4. Tabla de códigos 119

PRESUPUESTO 120

1. Gastos 122

1.1. Materias primas 122

1.2. Mano de obra + gastos de taller 122

1.3. Gasto eléctrico..... 123

2. Coste unitario del agujereado por electroerosión. 123

3. Balance económico después de la optimización del proceso. 124

3.1. Ahorro anual en la refrigeración del fluido dieléctrico 124

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Objeto del proyecto 12

2. Finalidad y alcance 12

3. Bibliografía 13

4. Definiciones..... 14

5. Ingeniería del proceso..... 17

5.1. Introducción a la electroerosión 17

5.2. Electroerosión por penetración 18

5.2.1. Electrodos de forma..... 19

5.3. Proceso de la descarga..... 20

5.4. Parámetros de control de impulso..... 25

5.4.1. Temperatura del fluido dieléctrico 26

5.4.2. Intensidad de la corriente 26

5.4.3. Tiempo de descarga 27

5.4.4. Tiempo de pausa 27

5.4.5. Compresión..... 28

5.4.6. Ganancia..... 28

5.4.7. Relat With. Despl. del soporte de la herramienta..... 28

5.4.8. Timer Speed..... 28

5.4.9. Tensión 29

5.4.10. Polaridad..... 29

5.4.11. S-box..... 29

5.4.12. ACO y ACC 30

5.4.13. Eros time 30

5.5. Coeficientes de cálculo 30

5.5.1. TW. Tasa de desgaste e la herramienta 31

5.5.2. MRR. Tasa de eliminación de material 31

5.5.3. TWR. Coeficiente de desgaste de la herramienta 32

5.6. Proceso de experiencias. Método Taguchi 34

5.6.1. Introducción 34

5.6.2. Etapas de un proceso de experiencias 35

5.6.3. El “F-Ratio” 39

6. Desarrollo 40

6.1. Selección de los parámetros 40

6.2. Selección de la matriz ortogonal 41

6.3. Ensayos prácticos 44

6.3.1. Programación utilizada 44

6.3.2. Toma de resultados y cálculo de coeficientes 49

6.3.3. Cálculo de las ANOVAS 50

6.3.4. Experiencia óptima y de confirmación. 51

7. Conclusiones 54

7.1. Análisis de los coeficientes 54

7.2. Análisis de los parámetros 56

7.3. Conclusiones finales 58

1. Objeto del proyecto.

El objeto del presente proyecto se basa en un estudio acerca del proceso de electroerosión. Se realizarán una serie de ensayos prácticos en una máquina de electroerosión por penetración (modelo AGIE COMPACT 3) para llevar a cabo dicho estudio. Con ayuda de un método de estudio estadístico, denominado Método Taguchi, se procesarán los resultados obtenidos en los ensayos prácticos para alcanzar los resultados finales y las correspondientes conclusiones.

2. Finalidad y alcance.

La finalidad de este proyecto de investigación es la optimización del proceso de electroerosión, y más concretamente la optimización de los diferentes parámetros que influyen en dicho proceso. Entre los diferentes parámetros que intervienen.

Los objetivos principales que se alcanzarán son los siguientes:

- Optimizar el coeficiente TW (Tool Wear - Tasa de desgaste de herramienta)

- Optimizar el coeficiente MRR (Material Removal Rate - Tasa de eliminación de material)

- Optimizar el coeficiente TWR (Tool Wear Rate - Coeficiente de desgaste de herramienta)

- Reducir el desgaste de herramienta.

- Optimización individual de los parámetros que intervienen en el proceso, entre los que destacaremos: Temperatura del fluido dieléctrico, intensidad de descarga de la corriente eléctrica, tiempo de descarga.

- Reducir el tiempo de trabajo para un ahorro en el gasto eléctrico llevado a cabo por la maquinaria.

3. Bibliografía.

1. CT electromecánica srl, “PROCESO DE ELECTROEROSION (EDM)” . Departamento Técnico – SC. Buenos Aires. 1983.

2. Fowlkes, William Y.; Creveling, Clyde. “Engineering methods for robust product design”.1997.

3. Guitrau, E. B. “The EDM handbook”. Hanser Gardner Publications. 1997.

4. Ho ,K.H; Newman, S.T. “State of the art electrical discharge machining (EDM)”. International Journal of Machine Tools and Manufacture”. 2003.

5. Moreira Araújo, Arlindo Daniel. “Influência da dureza de um material no desempenho do processo de electroerosão” .Feup. Oporto. 2007.

6. Roy, Ranjit K. “A primer on the Taguchi method”. New York. 1990.

7. Sánchez Galindez, Jose Antonio; López de Lacalle, Luis N.; Mentxaka, Aritzol Lamikiz. “Electroerosión: proceso, máquinas y aplicaciones”. Departamento de Ingeniería Mecánica ETSI-Bilbao.

8. Sommer, C.; Sommer, S. “Wire EDM handbook”, Advance Publishing. 2000.

9. UM, Universidad de Navarra. “Introducción a la electroerosión”. Escuela superior de ingenieros.

10. Wire EDM world. “www.wireedmworld.com”

4. Definiciones.

La terminología que aparece en este proyecto es básicamente perteneciente al campo estadístico, y al del proceso de electroerosión. A continuación se procede a definirla así como la explicación de algunas abreviaturas.

ACC Restricciones con control adaptativo.

ACO Optimización con control adaptativo.

Comp Compresión.

d.o.f Grados de libertad.

DF Ciclo de eficiencia (Duty Factor).

EDM Electroerosión (Electrical Discharge Machining).

F F-Ratio.

Gain Ganancia.

g.l Grados de libertad.

HAZ Zona afectada por el calor (Heat-afected zone).

I Intensidad de corriente.

$\mathbf{m_i}$ Masa inicial de la pieza.

$\mathbf{m_f}$ Masa final de la pieza.

Mean. Sq Variancia.

MRR Tasa de eliminación de material (Material Removal Rate).

P Tiempo de pausa.

Ra Rugosidad superficial media.

Relat. With. Desplazamiento del soporte de la herramienta durante el tiempo de erosión.

S-Box Aumento de la intensidad de corriente.

S.S Suma de los cuadrados.

t Tiempo.

T Tiempo de descarga

$\mathbf{t_d}$ Tiempo de ionización.

Temp Temperatura del fluido dieléctrico.

$\mathbf{t_f}$ Tiempo de descarga.

$\mathbf{t_i}$ Tiempo de impulso.

$\mathbf{t_o}$ Tiempo de pausa.

$\mathbf{t_p}$ Periodo.

TW Tasa de desgaste e la herramienta (Tool Wear)

TWR	Coeficiente de desgaste de la herramienta (Tool Wear Ratio)
U	Tensión.
$\mathbf{U_f}$	Tensión de descarga.
$\mathbf{U_o}$	Tensión en vacío.
$\mathbf{V_1}$	Volumen perdido por el electrodo.
$\mathbf{V_2}$	Volumen perdido por la pieza.
$\boldsymbol{\delta}$	Densidad.

5. Ingeniería del proceso.

5.1 Introducción a la Electroerosión.

La electroerosión 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.

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.

Este proceso también se conoce como EDM, debido a sus siglas de su nombre en inglés: Electrical Discharge Machining.

El proceso(figura 1) 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.

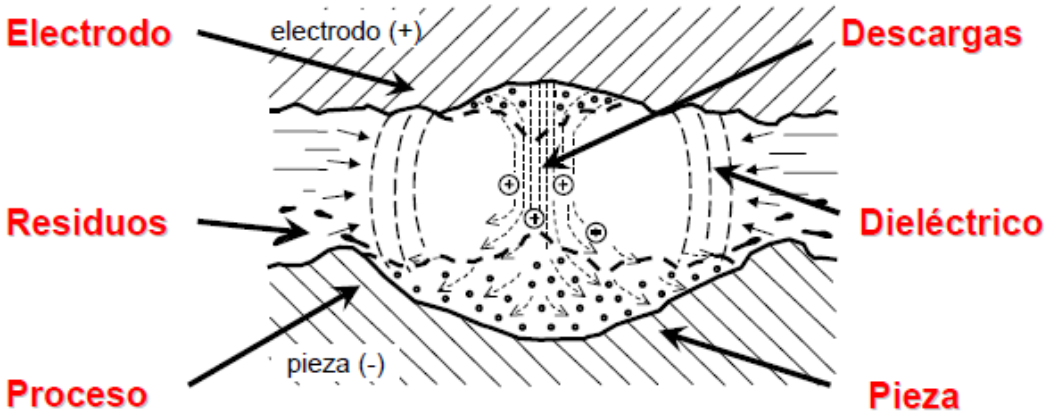


Figura 1 – Principio del proceso de electroerosión.

Existe una gran variedad de tipos de procesos de.electroerosión. A continuación se procederá a explicar el proceso que se utilizará en este proyecto: La electroerosión por penetración.

5.2 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.

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 (-).

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 remplazar 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 ±0,05 mm.

En la siguiente figura 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.

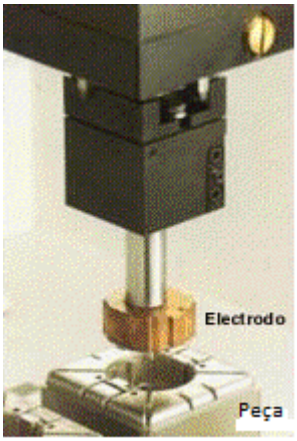


Figura 2 – Electroerosión por penetración.

Los electrodos utilizados en el proceso de electroerosión por penetración también son conocidos como electrodos de forma:

5.2.1. Electrodos 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.

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.

Otro material muy utilizado es el cobre, que es precisamente el material utilizado para el desarrollo de este proyecto. 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.

La forma de los electrodos es 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.

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

Figura 3 – Tipos de electrodos de forma.

5.3 Proceso de descarga.

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

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 liquida aislante, o líquido dieléctrico.

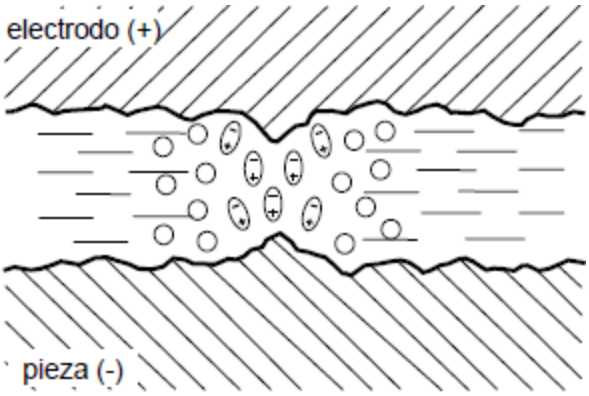


Figura 4 – Ionización del fluido.

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.

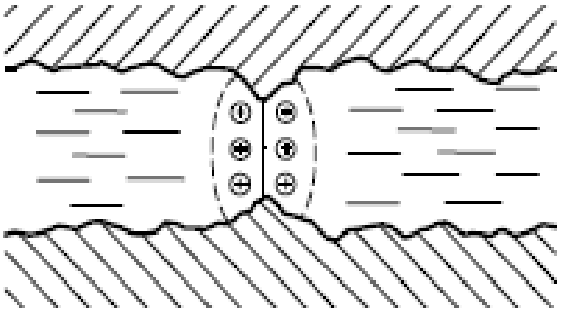


Figura 5 – Inicio de la descarga eléctrica.

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.

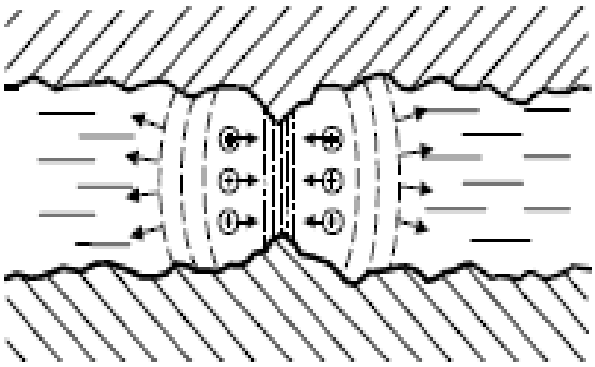


Figura 6 – Formación del canal de plasma.

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.

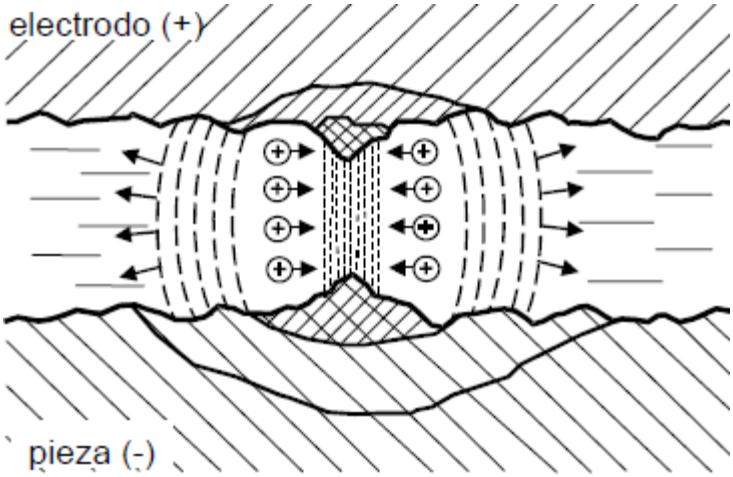


Figura 7 – Fusión y vaporización del material.

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).

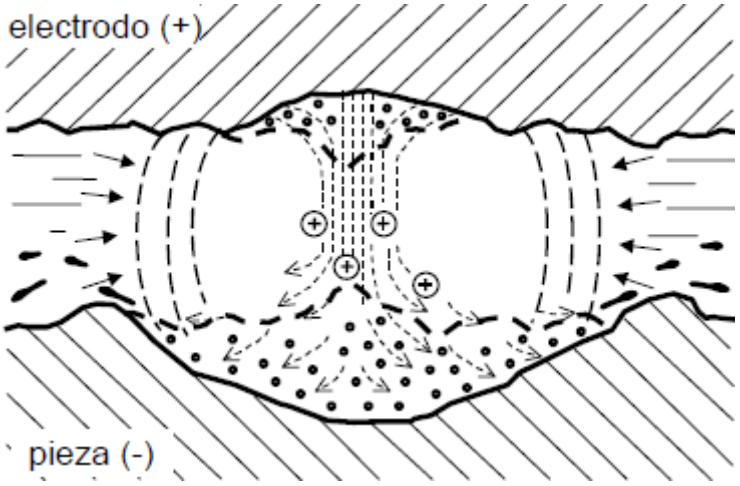


Figura 8 – Implosión de la bola de gas.

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".

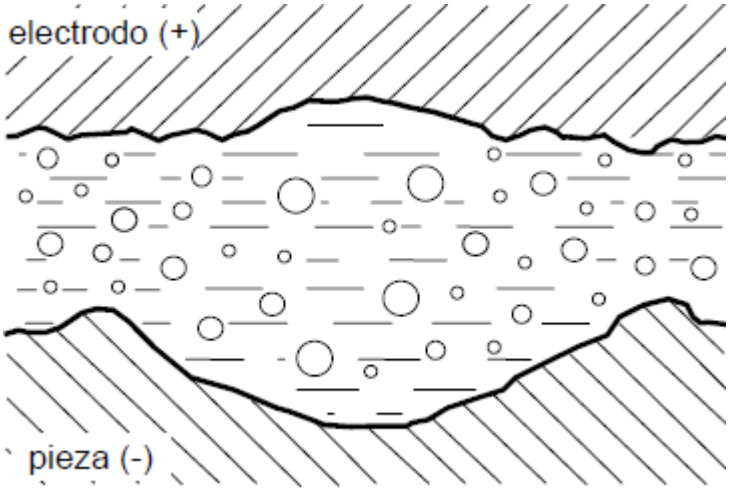


Figura 9 – Formación de cráteres.

Ejemplo de cráteres formados en la pieza.

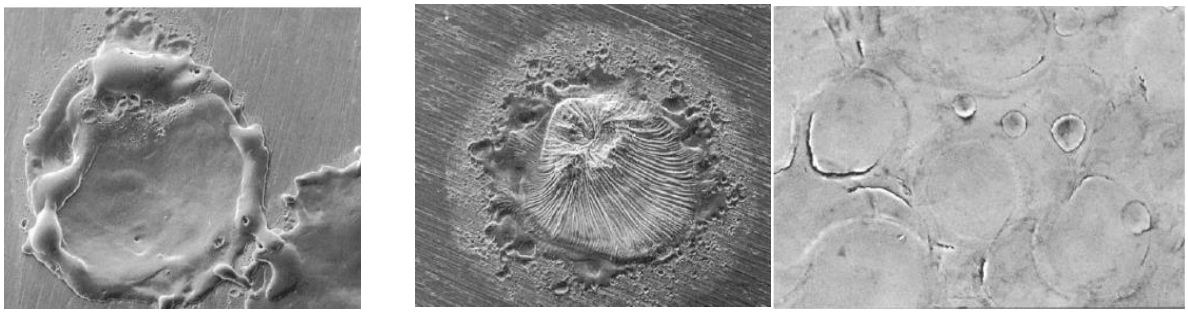


Figura 10- Cráteres formados por el metal fundido.

Resultados de la superficie de la pieza después del proceso de electroerosión.

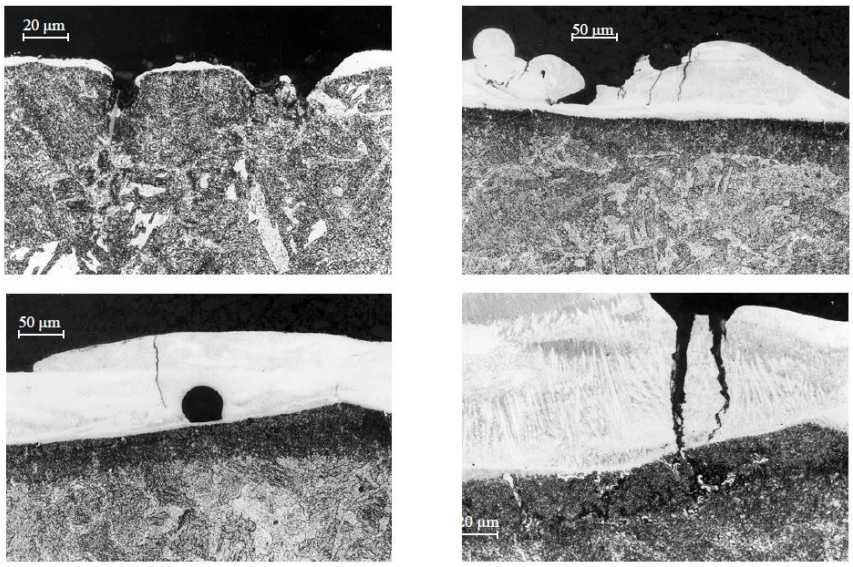


Figura 11-Superficie de la pieza.

Residuos formados durante el proceso:

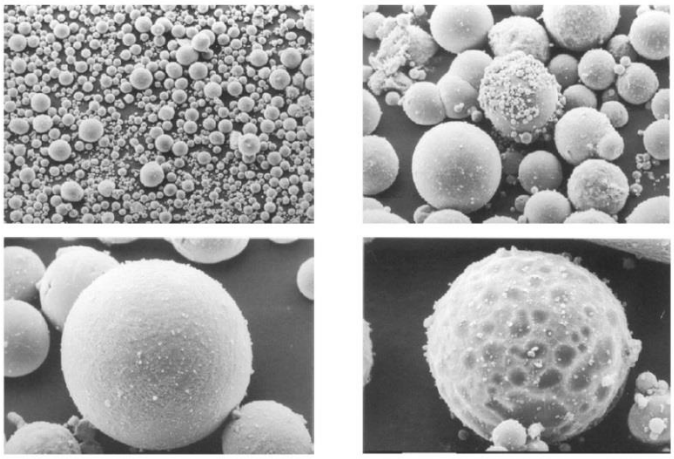
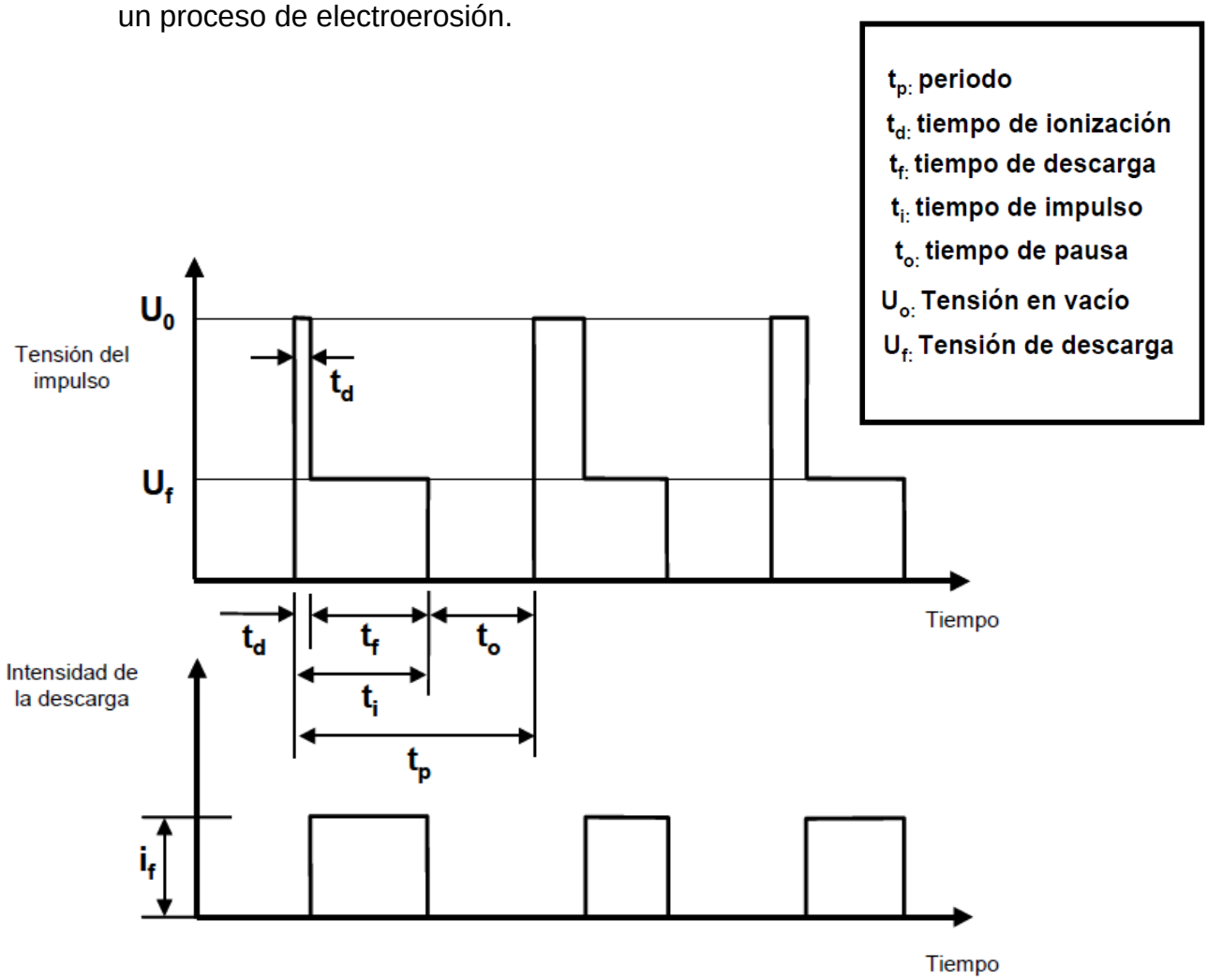


Figura 12- Residuos formados.

5.4. Parámetros de control de impulso.

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



El tiempo de duración de cada ciclo, o periodo (tp), 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, mientas que durante el tiempo de pausa hay ausencia de tensión.

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 (if) a una determinada tensión, también llamada tensión de descarga (Uf).

A continuación se explicara de una forma más detallada los parámetros que intervienen en el proceso de electroerosión:

5.4.1 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.

Una de las conclusiones más importantes de este proyecto es investigar la influencia de la variación de la temperatura de dicho fluido, y las repercusiones que conllevará en los resultados obtenidos después de cada proceso. 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. El objetivo, a la hora de optimizar el proceso, será determinar si es rentable variar la temperatura, o trabajar con un fluido a temperatura ambiente.

5.4.2 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 es ella.

El rango de intensidad de corriente que puede abarcar una máquina de electroerosión es muy amplio, desde 0,8 amperios, hasta 5500, como se puede apreciar en la tabla de la página 119,

En un principio, una mayor intensidad de corriente significará un menos 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.

El objetivo de este proyecto será determinar una intensidad de corriente óptima donde se equilibre el gasto eléctrico de la máquina con el desgaste de la herramienta.

5.4.3 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.

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.

5.4.4 Tiempo de pausa.

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.

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

5.4.5 Compresión.

Este parámetro tiene un valor de carácter porcentual. Los valores más comunes oscilan entre el 20% y el 40%.

5.4.6 Ganancia.

Es posible, a la hora de programar la máquina de electroerosión, variar la ganancia del sistema.

Se estudiarán las consecuencias de dicha variación de la ganancia en los resultados obtenidos en el proceso.

5.4.7 Relat. With. Desplazamiento del soporte de la herramienta.

Es un parámetro que interviene con gran importancia a la hora de programar la máquina de electroerosión.

El electrodo se atornilla a un soporte antes de comenzar el proceso, este parámetro corresponde al desplazamiento de dicho soporte durante el tiempo de erosión. En consecuencia, este parámetro está relacionado como el mencionado tiempo de erosión (EROS TIME), otro parámetro que se explicará en el apartado 5.4.13.

El desplazamiento del soporte se podrá variar entre 1 y 4 mm como valores más recomendables.

5.4.8 Timer speed.

El timer speed es también un parámetro propio de la máquina de electroerosión. Corresponde a un temporizador de la velocidad en el desplazamiento del electrodo.

5.4.9 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 (apartado 5.4.2), que ocasionará el arranque de material en la pieza.

5.4.10 Polaridad.

Durante el proceso de electroerosión, es común que el cátodo corresponda al electrodo, y el ánodo sea la pieza, aunque es posible invertir esta polaridad.

No se dará gran importancia al cambio de polaridad en este proyecto, y se optará por mantener una polaridad constante durante la investigación, para evitar una influencia en los resultados por posibles interpolaciones con otros parámetros.

5.4.11 S-Box.

En un proceso de electroerosión la intensidad de corriente puede permanecer constante, o variar a lo largo del tiempo. El S-Box es el parámetro encargado en hacer posible esta variación.

No se dará importancia a este parámetro, ya que se planteará el estudio para unas intensidades de corrientes determinadas, por lo que variarlas carece de sentido, y complicará en gran medida la interpretación de los resultados.

5.4.12 ACO y ACC

El significado de estos parámetros es “restricciones con control adaptativo” para el caso de ACO, y “optimización con control adaptativo” en el de ACC.”

Son parámetros que aparecen a la hora de programar la máquina, y dependen, en su mayor medida, del material del que se compone la pieza. No ocasionarán grandes problemas, ya que la investigación se llevará a cabo sobre una muestra de un mismo material, por lo que permanecerán constantes.

5.4.13 EROS TIME.

Su traducción, “tiempo de erosión”, puede ocasionar confusiones con el tiempo de descarga, aunque no estén relacionados entre ellos.

Es un parámetro relacionado directamente con el desplazamiento del soporte del electrodo. Ese desplazamiento se producirá durante el tiempo de erosión seleccionado.

5.5 Coeficientes de cálculo.

A partir de la variación de los parámetros anteriormente propuestos, realizaremos una serie de ensayos prácticos con los que obtendremos tres coeficientes para cada caso. Nuestro objetivo es optimizar cada uno de esos coeficientes, minimizándolo o maximizándolo según corresponda. Obtendremos entonces un valor para cada uno de ellos, y de esa manera también calcular los valores de los parámetros óptimos para el proceso de agujereado por electroerosión.

Los tres coeficientes a calcular son los siguientes:

5.5.1 TW. Tasa de desgaste de la herramienta. (Tool Wear)

La tasa de desgaste de herramienta, o TW, es un coeficiente que relaciona el volumen de material perdido por la herramienta y la duración del ensayo. El objetivo será optimizar este coeficiente, minimizándolo en la mayor medida posible, y así poder alcanzar un ahorro económico en el uso del número de electrodos.

El TW satisface la siguiente ecuación:

TW= $\frac{V1}{t}$ **(mm^3/min)**

Dónde:

$V_1 = \frac{m}{\delta}$ (mm^3)

$m=m_f-m_i$ (masa final del electrodo – masa inicial del electrodo) (g)

$\delta = \text{densidad del electrodo}$ (g/mm^3)

V_1=Volumen perdido por el electrodo (mm^3)

t=tiempo (minutos).

5.5.2 MRR. Tasa de eliminación de material (Material Removal Rate).

La tasa de eliminación de material, o MRR, es un coeficiente que relaciona el volumen de la pieza arrancado durante cada ensayo práctico realizado, con el tiempo transcurrido en dicho ensayo.

A la hora de optimizar este coeficiente, el objetivo es maximizar los resultados obtenidos. Esto significará un arranque de material en procesos de

menor duración, por lo que producirá un ahorro en el consumo eléctrico producido por la maquinaria utilizada. También debemos tener en cuenta, que un proceso más rápido está relacionado con una mayor intensidad de descarga, es decir, un entorno más agresivo para la herramienta, que producirá un mayor desgaste en esta. El resultado final tratará de optimizar la tasa de eliminación de material compensando las dos situaciones expuestas.

El MRR satisface la siguiente ecuación:

MRR= $\frac{V2}{t}$ **(mm^3/min)**

Dónde:

$V_2=\frac{m}{\delta}$ (mm^3)

$m=m_f-m_i$ (masa final de la pieza – masa final de la pieza)

$\delta = \text{densidad de la pieza}$ (g/mm^3)

V_2=Volumen de material arrancado en la pieza (mm^3)

t=tiempo (minutos).

5.5.3 TWR. Coeficiente de desgaste de la herramienta. (Tool Wear Ratio)

El último coeficiente a calcular es el coeficiente de desgaste de la herramienta, o TWR. Se relaciona el volumen de material perdido por la herramienta con el material arrancado en la pieza para cada ensayo individual. El resultado obtenido será en valor porcentual.

A la hora de optimizar este coeficiente, que guarda gran similitud con el TW, interesa minimizarlo en la mayor medida de lo posible, para evitar el desgaste excesivo de la herramienta. Se complementa con el TW, ya que en

este coeficiente interviene el material arrancado en la pieza, de manera que al obtener las conclusiones, este resultado hace que tanto pieza y herramienta estén relacionadas entre ellas y la optimización de ambas guardaran dependencia directa entre una y otra.

El valor del TWR se calculará a partir de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{TWR} = \frac{V1}{V2} \mathbf{X100\ (\%)}$$

Las variables de dicha ecuación serán, como se ha podido ver anteriormente serán, por parte de la herramienta:

$V_1 = \frac{m}{\delta}$ (mm^3)

$m=m_f-m_i$ (masa final del electrodo – masa inicial del electrodo) (g)

$\delta = \text{densidad del electrodo}$ (g/mm^3)

V_1=Volumen perdido por el electrodo (mm^3)

Y por parte de la pieza:

$V_2 = \frac{m}{\delta}$ (mm^3)

$m=m_f-m_i$ (masa final de la pieza – masa final de la pieza)

$\delta = \text{densidad de la pieza}$ (g/mm^3)

V_2=Volumen de material arrancado en la pieza (mm^3)

5.6. Proceso de experiencias. Método Taguchi.

Una vez conocidos los parámetros o variables que intervienen en el proceso de electroerosión, y los resultaos 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.

Se decide entonces por la utilización de un método estadístico, denominado Metodo 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. Además, este mismo método permitirá obtener los resultados deseados de los tres coeficientes a optimizar (MMR, TW, y TWR), gracias al sistema de cálculo de las “ánovas”, como se explicará más adelante.

5.6.1 Introducción.

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. Una vez 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.

5.6.2 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 cumpa los objetivos deseados, se deberá retroceder a etapas anteriores para modificarla, y tratar de solucionar el problema.

Las etapas que se deberán seguir, correctamente ordenadas, para realizar este proyecto son las siguientes:

1) Establecer el problema a resolver.

A partir del proceso de electroerosión por penetración, realizar un estudio para la optimización del proceso.

2) Definir el objetivo del proceso.

Se buscará, con la optimización del proceso anteriormente mencionada, una reducción en los gastos, económicamente hablando, relacionados con el consumo eléctrico de la maquinaria, y el desgaste excesivo de los

componentes que intervienen en dicho proceso. En relación con el gasto eléctrico, también se pretenderá una reducción del tiempo de ejecución.

3) Determinar los parámetros que afectan al proceso.

Los parámetros del proceso son variables. En el apartado 5.4 de la memoria se detallan cada uno de ellos y sus características. Al ser un gran número de parámetros, se elegirán algunos de ellos como variables, y los otros permanecerán constantes durante todos los ensayos prácticos. Como se detallará más adelante, existen normas de relación entre varios parámetros. Por ejemplo, a una determinada intensidad de corriente le corresponderán ciertos valores de tensión, tiempos de pausa o de impulso…etc.

4) Determinar el número de niveles para los parámetros.

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.

5) Seleccionar la matriz ortogonal.

Una vez determinados los parámetros con sus respectivos niveles, se debe seleccionar una matriz ortogonal donde introducir dichos valores.

La matriz de la figura siguiente (figura 1) corresponde, por ejemplo, a una matriz L8.

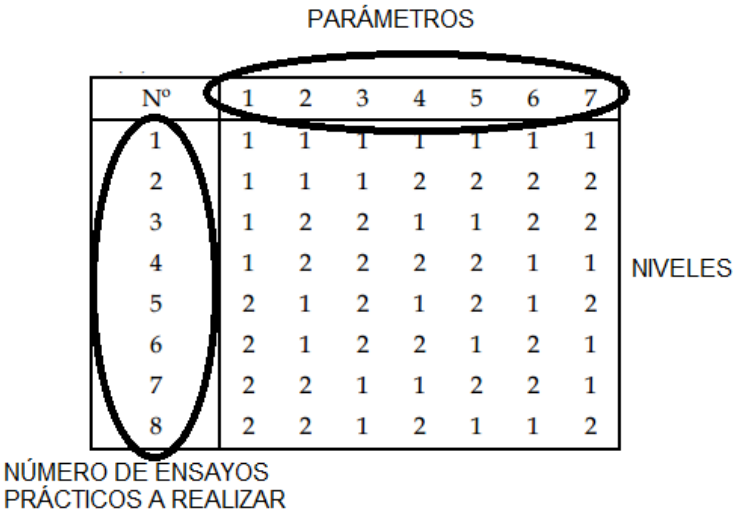


Figura 1- Estructura matriz ortogonal L8.

En la primera fila se introducirá el nombre de los parámetros elegidos. En este hipotético caso, el proceso de experiencias se llevaría a cabo para un total de 7 parámetros, con dos niveles, es decir, dos valores distintos para cada parámetro. Para poder realizar este experimento con seguridad estadística, son necesarios la realización de 8 ensayos prácticos. En cada ensayo, los parámetros tomarán el valor correspondiente al reflejado en la estructura de la matriz ortogonal.

6) Ejecutar la experiencia.

Una vez elegida la matriz ortogonal, y con los valores de los parámetros y sus correspondientes niveles introducidos en ella, se realizaran el número de ensayos prácticos correspondiente.

7) Analizar los resultados.

En cada ensayo obtendremos unos valores. Una vez realizado todos los ensayos y obtenidos todos los resultados, con la utilización del método

Taguchi, se calcularán unas tablas denominadas “Anovas”. En las anovas aparecerán tres valores para cada parámetro:

- SS: Suma de los cuadrados.
- D.o.f: Grados de libertad.
- Mean. Sq: Varianza.

A partir de esos valores, se eliminarán los coeficientes menos relevantes o de menor valor, y con el error calculado, obtendremos un nuevo resultado denominado “F-test”, que será un coeficiente con un determinado valor numérico para cada parámetro, con el que medir la influencia de dicho parámetro en el proceso de electroerosión.

8) Interpretar los resultados.

Se procederá entonces al análisis de dichas “Anovas”. A partir de ellas se obtendrán conclusiones correspondientes a: valores óptimos de los parámetros, grado de influencia de los parámetros.

9) 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 cálculo de las “anovas”. 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.

Para que la experiencia de confirmación sea válida, el coeficiente de variación, entres los resultados teóricos calculados mediantes las ANOVAS del Metodo 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%.

Se calculará el coeficiente de variación como el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética:

$$CV(\%)= \frac{Media\ Aritmética}{Desviación\ Estándar} \text{ x100}$$

$$\text{Media aritmética}= \frac{Valor\ teórico + Valor\ práctico}{2}$$

$$\text{Desviación estándar}= \frac{(Valor\ teórico - Media)^2 + (Valor\ práctico - Media)^2}{2}$$

5.6.3 El "F-Ratio."

El "F-Ratio", o simplemente "F", es un valor obtenido en el cálculo de las "anovas" que será el coeficiente más importante a la hora de determinar las conclusiones finales del proyecto. Este coeficiente medirá la influencia de cada parámetro sobre el proyecto de electroerosión. Cuando F es mayor que F=1, el efecto del parámetro es mucho mayor que la variancia de dicho parámetro, y en consecuencia, el grado de importancia es importante.

Se utilizará una sencilla norma para determinar este grado de influencia en función del valor que tome F.

- F<1. El parámetro no tienen ninguna influencia en el proceso.
- 1<F<4. El parámetro tiene una pequeña influencia en el proceso y en sus resultados. Este parámetro puede interferir en otros parámetros.
- F>4. El parámetro tiene gran influencia en el proceso, y por consiguiente, en los resultados obtenidos en los ensayos.

6. Desarrollo.

Una vez conocidos los aspectos teóricos fundamentales del presente proyecto, y los métodos que se van a utilizar en el mismo, es momento de empezar a plantear el problema a partir de las pautas presentadas en el apartado anterior.

6.1 Selección de parámetros.

El primer paso será seleccionar los parámetros variables que vamos a utilizar durante todo el proceso, y el número de niveles que poseerá cada uno de ellos.

A partir de todos los parámetros presentados en el apartado 5.4, y utilizando la teoría de la electroerosión, se considerarán ocho parámetros variables para el desarrollo del proyecto, permaneciendo los restante parámetros constantes para todos los ensayos prácticos.

Los parámetros variables seleccionados, con sus respectivos niveles, son los siguientes:

1. **Temp:** Temperatura del fluido dieléctrico. Dos niveles, con valores de 10 y 18 grados centígrados respectivamente.

2. **I:** Intensidad de descarga de la corriente eléctrica. Tres niveles: I_1=10 (A), I_2=24(A), I_3=37(A).

3. **T:** Tiempo de descarga (de la corriente eléctrica). Tres niveles: T_1=75 µs, T_2=180 µs, T_3=560 µs.

4. **P:** Tiempo de pausa (de la corriente eléctrica). Este valor dependerá a su vez del duty factor (DF) y del tiempo de descarga (T), cumpliendo la ecuación: $\frac{T}{T+P}$ x100= DF.

   El DF tomará valores de 50%, 65% y 80%.

5. **Comp:** Compresión. Tres niveles: 20,30 y 35%.

6. **Gain.** Ganancia. Tres niveles: 10, 12 y 15.

7. **Relat with.** Desplazamiento del soporte de la herramienta durante el tiempo de erosión. Tres niveles: 1.5 , 2.5 y 3 %.

8. **Timer Speed.** Temporizador de velocidad. Tres niveles: 350, 525 y 700. (µs.)

Los restantes parámetros, permanecerán con valores constantes durante todos los ensayos prácticos.

A continuación se detalla cada uno de ellos y el valor que tomará:

- **U:** Tensión. Con un valor constante de 180 voltios.
- **Pol:** Polaridad del sistema, tomará siempre un valor positivo (+).
- **Sbox**: Aumento de la intensidad de corriente. Con valor nulo, para que I permanezca con los valores asignados durante el ensayo.
- **ACO y ACC:** 155 y 02 respectivamente. Tomarán este valor constante debido a que la muestra de acero utilizada será la misma para todos los ensayos.
- **EROSTIME:** El tiempo de erosión tomará un valor constante de 30, para evitar que influya en los parámetros de tiempo de descarga y tiempo de pausa.

6.2 Selección de la matriz ortogonal.

Una vez determinados los parámetros del sistema, y asignados el número de niveles a cada uno de ellos, con los valores que adquirirán en cada nivel, se procede a la selección de la matriz ortogonal en la cual serán introducidos tanto parámetros como niveles.

La matriz ortogonal seleccionada será una matriz L_{18}. En la siguiente figura se explica la estructura de la misma:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Figura 2- Estructura matriz L_{18}.

Como se puede apreciar, es una matriz para ocho parámetros, donde el primer parámetro tiene dos niveles, y tres niveles para el resto. Se realizarán un total de 18 ensayos para poder confirmar la hipótesis y que los resultados obtenidos sean válidos estadísticamente hablando.

La matriz ortogonal, después de la introducción de sus parámetros y niveles, adoptará la siguiente forma:

	Temp	I	T	P	COMP	GAIN	Relat With.	Timer Speed
1	10	10	75	75 (DF=50)	20	10	1.5	350
2	10	10	180	100 (DF=65)	30	12	2.5	525
3	10	10	560	130 (DF=80)	35	15	3	700
4	10	24	75	75 (DF=50)	30	12	3	700
5	10	24	180	100 (DF=65)	35	15	1.5	350
6	10	24	560	130 (DF=80)	20	10	2.5	525
7	10	37	75	42 (DF=65)	20	15	2.5	700
8	10	37	180	42 (DF=80)	30	10	3	350
9	10	37	560	560 (DF=50)	35	12	1.5	525
10	18	10	75	18 (DF=80)	35	12	2.5	350
11	18	10	180	180 (DF=50)	20	15	3	525
12	18	10	560	320 (DF=65)	30	10	1.5	700
13	18	24	75	42 (DF=65)	35	10	3	525
14	18	24	180	42 (DF=80)	20	12	1.5	700
15	18	24	560	560 (DF=50)	30	15	2.5	350
16	18	37	75	18 (DF=80)	30	15	1.5	525
17	18	37	180	180 (DF=50)	35	10	2.5	700
18	18	37	560	320 (DF=65)	20	12	3	350

Tabla 1- Matriz L_{18} con parámetros y niveles introducidos.

6.3 Ensayos prácticos.

A partir de la matriz L18 anterior, ya se dispone de la información necesaria para proceder a realizar los ensayos prácticos.

Se realizarán entonces, 18 ensayos individuales. Cada uno consistirá en el agujereado de una misma pieza de acero, utilizando un electrodo nuevo y en perfectas condiciones para cada ensayo. Para que los resultados obtenidos tengan validez, se diseñará un programa para la máquina de electroerosión, que será igual para cada ensayo, a diferencia de los parámetros que se variarán en cada ensayo en función de la matriz L18.

6.3.1 Programación de la máquina de electroerosión.

El programa utilizado en los mencionados ensayos prácticos será el siguiente:

N1 CYCLE RESET ALL REGISTER

N2 POSITION VECTOR X=0 Y=0 Z=20 COLL PREVENT. ON

N3 POSITION SINGLE AXIS Z=2 COLL PREVENT ON.

N4 TECHNOLOGY: IMPULSE

N5 TECHNOLOGY: PROCESS CONTROL

N6 EROSION SINGLES AXIS: -12

N7 POSITION SINGLE AXIS: Z=20 COLL PREVENT. ON

N8 COURSE RESTART MANUAL

N9 COURSE END PROGRAM

A continuación se explicará y detallará en que consiste cada uno de los 9 pasos en los que consta el programa:

N1: Resetea los registros existentes en la memoria de trabajo. Garantiza que no intervengan en el programa actual funciones programadas por algún usuario anterior y no deseadas para el programa actual

N2: Este paso se basa en el movimiento y la preparación del electrodo. El punto de contacto entre electrodo y pieza donde se desea realizar el agujero tendrá las coordenadas (0,0,0). Las coordenadas (X=0 Y =0 Z=20), significan que el electrodo se colocará a una distancia de 20mm de la pieza en sentido vertical. La función COLL PREVENT=ON, es un sistema de seguridad que detiene el proceso en caso de que el electrodo encuentre algún impedimento u obstrucción no deseada en su desplazamiento**.**

N3: Paso similar al anterior, en el que se acerca el electrodo a una distancia de 2mm con respecto a la pieza.

N4: Llamada a la función “impulse”. En esta función se introducirá el valor de algunos parámetros: Mode, Pol, U, I, T, Sbox, P, Comp, Gain, M, 2G.

El parámetro Mode, M, 2G, no son parámetros propios del proceso de electroerosión, sino que dependen de la máquina, y están normalizados en función del valor de I (Intensidad de corriente).

N5: Llamada a la función “process control”, en la que intervienen los parámetros restantes: ACO,ACC, Timer-Speed, R-With y Eros Time.

N6: En este paso se produce el agujereado de la pieza mediante la penetración de electrodo en ella hasta una profundidad de 12mm (Z=-12).

N7: Una vez completada la erosión, el electrodo se colocará a una distancia de 20mm de la pieza ya agujereada, y se detendrá el proceso.

N8: La razón del paso anterior es poder tomar el tiempo que duró el proceso. El operario anotará dicho tiempo, y pulsará el botón indicado para que el proceso continúe (COURSE RESTART MANUAL).

N9: La rutina COURSE END PROGRAM, finaliza la secuencia de trabajo y devuelve la pantalla del monitor de la máquina a su menú inicial.

A la hora de programar la máquina, en los pasos N4 y N5 del programa, que es cuando se introducen los parámetros, hay que tener en cuenta que muchos de ellos no se introducen en función de su valor, sino que poseen un código equivalente. En la siguiente tabla se detalla la equivalencia entre el código utilizado para programar la máquina, y los valores reales de los parámetros:

Agietron Compact 3 (FW 0701)				
NC CODE	**T=P µs**	**I real (Amp.)**	**Type Sbox**	**U (Volt)**
0	0.4	0	0.00	60
1	1.3	0.8	1.08	80
2	1.8	1.4	1.57	100
3	2.4	1.8	2.56	120
4	3.2	2.4	3.85	150
5	4.2	3.2	5.68	160
6	5.6	4	5.73	180
7	7.5	5.6	7.34	250
8	10	9.9	10.98	-
9	13	11.4	14.85	-
10	18	15.8	26.91	-
11	24	19.3	29.11	-
12	32	25.4	40.01	-
13	42	37.1	64.11	-
14	56	51.4	73.31	-
15	75	65.6	97.41	-
16	100	100.1	-	-
17	130	137.1	-	-
18	180	165.6	-	-
19	240	200.1	-	-
20	320	237.1	-	-
21	420	265.6	-	-
22	560	300.1	-	-
23	750	400.1	-	-
24	1000	500.1	-	-
25	1300	-	-	-
26	1800	-	-	-
27	2400	-	-	-
28	3200	-	-	-
29	4200	-	-	-
30	5600	-	-	-
31	7500	5500.1	-	-

En la siguiente tabla (tabla 2), se detallan los valores introducidos para los pasos N4 y N5, para las rutinas “impulse” y “process control”, con sus parámetros correspondientes para cada uno de los 18 ensayos prácticos, diseñados a partir de la matriz ortogonal L18.

Tabla 2- Valores introducidos en la programación de la máquina.

	Ta	IMPULSE BLOCK											PROCESS CONTROL				
		Mode	Pol	U	I	T	S-box	P	Comp	Gain	M	2G	ACO	ACC	Speed	R-With	Er-Time
1	10	1	+	6	8	15	0	15	20	10	0.24	0.14	155	02	350	1.5	30
2	10	1	+	6	8	18	0	16	30	12	0.24	0.14	155	02	525	2.5	30
3	10	1	+	6	8	22	0	17	35	15	0.24	0.14	155	02	700	3	30
4	10	1	+	6	11	15	0	15	30	12	0.61	0.31	155	02	700	3	30
5	10	1	+	6	11	18	0	16	35	15	0.61	0.31	155	02	350	1.5	30
6	10	1	+	6	11	22	0	17	20	10	0.61	0.31	155	02	525	2.5	30
7	10	1	+	6	13	15	0	13	20	15	1	0.53	155	02	700	2.5	30
8	10	1	+	6	13	18	0	13	30	10	1	0.53	155	02	350	3	30
9	10	1	+	6	13	22	0	22	35	12	1	0.53	155	02	525	1.5	30
10	18	1	+	6	8	15	0	10	35	12	0.24	0.14	155	02	350	2.5	30
11	18	1	+	6	8	18	0	18	20	15	0.24	0.14	155	02	525	3	30
12	18	1	+	6	8	22	0	20	30	10	0.24	0.14	155	02	700	1.5	30
13	18	1	+	6	11	15	0	13	35	10	0.61	0.31	155	02	525	3	30
14	18	1	+	6	11	18	0	13	20	12	0.61	0.31	155	02	700	1.5	30
15	18	1	+	6	11	22	0	22	30	15	0.61	0.31	155	02	350	2.5	30
16	18	1	+	6	13	15	0	10	30	15	1	0.53	155	02	525	1.5	30
17	18	1	+	6	13	18	0	18	35	10	1	0.53	155	02	700	2.5	30
18	18	1	+	6	13	22	0	20	20	12	1	0.53	155	02	350	3	30

6.3.2 Toma de resultados y cálculo de coeficientes.

Después de cada uno de los ensayos prácticos, se deberán realizar tres mediciones indispensables para el cálculo de los coeficientes: TW, MRR, TWR.

Esas tres medidas son:

1. Duración del proceso de erosión, en segundos.
2. Material arrancado en la pieza. Para ello, se hará la diferencia entre el peso inicial de la pieza antes de someterse al proceso y después de hacerlo.
3. Material perdido por la herramienta. Se utilizará una balanza de gran precisión para el pesado del electrodo antes y después del proceso.

Estos resultados se pueden observar con más detalle en la página 101, correspondiente al Anexo III: Cálculos.

En las siguientes figuras (1 y 2), se representa el estado inicial de la pieza, y el posterior, una vez realizados los 18 ensayos prácticos.

Figura 1- Pieza de acero en su estado inicial.

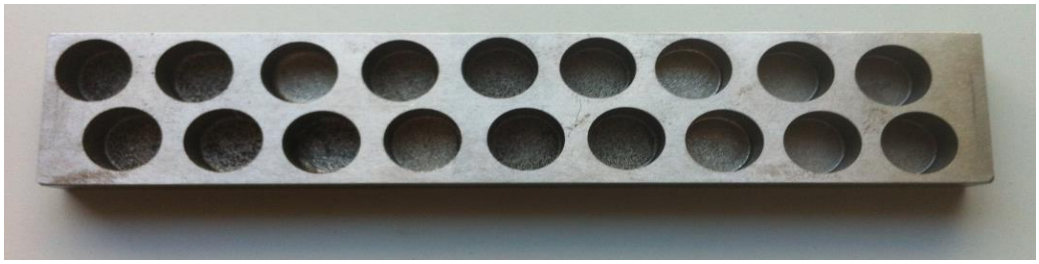


Figura 2- Misma pieza de acero, una vez mecanizada.

Los electrodos de cobre, sufrirán un desgaste mayor o menos, dependiendo de los parámetros del ensayo correspondiente, como se puede apreciar en la figura 3.

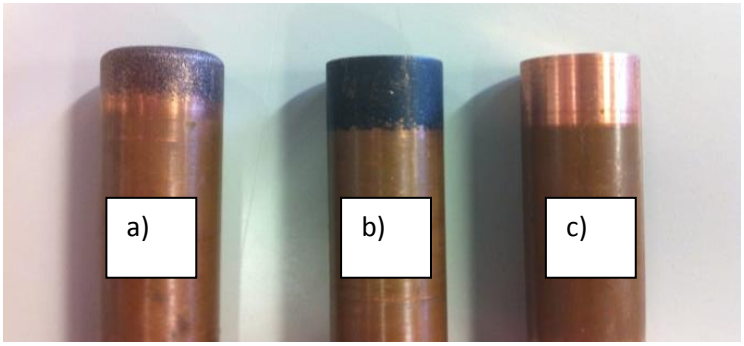


Figura 3- Comparación del desgaste de los electrodos.

Dónde el electrodo a), es un electrodo correspondiente al ensayo número 8 con una intensidad de corriente elevada, de ahí su mayor desgaste. Se aprecia en sus contornos curvos en la base del mismo. El electrodo b), corresponde al ensayo número 3, donde se aprecia una menor pérdida del material, y el color más oscuro significa una mayor duración del tiempo de erosión. Mientas que el electrodo c) es un electrodo nuevo, en perfectas condiciones.

6.3.3 Cálculo de las ANOVAS.

Las ANOVAS es una parte fundamental del proyecto. En el caso de que sus hipótesis sean confirmadas (apartado 6.3.4), sus resultados y la interpretación de sus tablas son las que permitirán obtener las conclusiones finales del proyecto. Su cálculo es complejo, pero sus resultados son simples y concisos. Para información más detallada del cálculo de las ANOVAS, acudir al Anexo III: Cálculos, página 103,105 y 107 .

De entre todos los resultados y columnas de las tablas, es el F-Ratio el resultado más importante. Prácticamente, todos los cálculos anteriores son necesarios para llegar al mencionado F-Ratio, que como se mencionó

anteriormente, es el coeficiente que medirá el grado de influencia de un determinado parámetro en el proceso de electroerosión por penetración.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las ANOVAS calculadas en el ANEXO C, basado en el F-Ratio en función de los distintos coeficientes y parámetros.

F-Ratio			
Parámetros\Coeficientes	**MRR**	**TW**	**TWR**
Intensidad de descarga	**230.4**	**757.3**	16.6
Tiempo de descarga	7.3	**628.8**	**71.8**
Ganancia	3.6	2.8	2.4
Compresión	3.2	9.4	-
Duty fator	3.0	17.7	-
Relat. With	-	-	-
Timer Speed	-	28.0	6.7
Temperatura Dielect.	-	2.3	-

Los valores resaltados en rojo indican que el F-Ratio es muy elevado para esos parámetros, por lo que serán los que tengan una influencia principal en ese coeficiente. Eso no significa que sean los únicos influyentes en el proceso (recordar el apartado 5.6.3 El “F-Ratio.”), pero si los que crean la gran diferencia en la variación de resultados.

6.3.4 Experiencia óptima y de confirmación.

Posterior al cálculo de las ANOVAS, el método Taguchi ofrece la posibilidad de poder obtener una experiencia óptima, es decir, una experiencia para un determinado valor de cada uno de los parámetros utilizados. Este valor que tomarán los parámetros son supuestamente los valores solución del problema, y se deberán confirmar con un ensayo práctico adicional.

Los valores de los parámetros calculados a través del Metodo Taguchi son los siguientes:

- Temperatura del fluido dieléctrico: 18ºC.
- Intensidad de corriente: 37 Amperios.
- Tiempo de descarga: 180 µs.
- Duty factor: 80%. Tiempo de pausa: 42 µs.
- Compresión: 35%.
- Ganancia: 10.
- Relat. With.: 1.5 %.
- Timer speed: 700 µs.

Para estos parámetros obtenidos, las previsiones de los tres coeficientes son:

- MRR= 54.83
- TW= 2.64
- TWR=5.19

Los parámetros y resultados anteriores son teóricos, se procederá a continuación a realizar un ensayo práctico en la máquina de electroerosión por penetración Agie Compact 3, de la misma manera que los 18 ensayos prácticos anteriores. Se introducirá en la programación de la máquina los parámetros con los valores presentados en este apartado, los valores de la experiencia de confirmación.

La toma de medidas posterior al ensayo es la siguiente:

- Tiempo de trabajo: 55.9 min
- Volumen de material perdido por la herramienta: 94.2857(mm^3/min)
- Volumen de material arrancado en la pieza: 2424.6753 (mm^3/min)

A partir de estas medidas, se procede al cálculo de los tres coeficientes, para compararlos con los resultados de la experiencia teórica:

- MRR=58.89
- TWR=2.48
- TW=4.18

Comparando ambas experiencias:

Coeficiente\Experiencia	Teórica	Práctica	CV (%)
MRR	54.83	58.89	7.24
TWR	2.64	2.48	0.25
TW	5.19	4.18	5.33

*Siendo CV: Coeficiente de variación.

La variación de los resultados entre la experiencia práctica y la experiencia teórica están dentro del rango de validez según la teoría del Metodo Taguchi. De esta manera, se pueden confirmar los resultados obtenidos siendo los niveles de los parámetros calculados en este apartado los valores óptimos para cada uno de ellos. Además, los valores de los tres coeficientes óptimos serán válidos dentro del rango que abarca las experiencias teóricas y prácticas.

7. Conclusiones.

Se dividirán las conclusiones finales en tres apartados diferentes. Por un lado se analizarán los coeficientes TW, MRR, y TWR, que permitirán definir el gasto idóneo de material, así como el tiempo de duración de cada proceso. Otro apartado será el análisis individual de cada parámetro en el proceso de electroerosión, y su influencia en este. Finalmente, y más importante, unas conclusiones finales englobando las anteriormente citadas, y desde un punto de vista económico.

7.1 Análisis de los coeficientes.

En este primer apartado se procederá a analizar los resultados y extraer conclusiones a partir de los resultados de las ANOVAS de los coeficientes: MRR, TWR, Y TW.

MRR:

La tasa de eliminación o arranque de material queda definida principalmente por la intensidad de descarga. Al observar el F-Ratio, el valor que toma la Intensidad es desproporcional en comparación con otros parámetros, por lo que podemos confirmar que es el mayor responsable en el arranque del material de la pieza. El tiempo de descarga, es decir, el tiempo durante el cual estará fluyendo la corriente eléctrica influirá lógicamente en el proceso, ya que es un parámetro directamente relacionado con la intensidad de corriente. Por otro lado: ganancia, compresión y duty factor, son importante en el proceso, porque sus distintos niveles varían en los dos parámetros influyentes anteriormente mencionados, aunque individualmente no influyan en el proceso. El resto de parámetros no tiene ninguna influencia en el proceso de

arranque de material de la pieza, ni individualmente, ni interactuando con otros parámetros.

Finalmente, se llega a la conclusión que es ideal un medio de trabajo más agresivo, donde se da una elevada intensidad de corriente trabajando durante un tiempo de descarga medio (según los valores de la experiencia de confirmación), lo que llevará a un proceso de fabricación con un tiempo reducido, para un arranque de material óptimo.

TW:

En la tasa de desgaste de la herramienta vuelve a aparecer la intensidad de descarga y el tiempo de descarga, como los dos parámetros más influyentes. Evidentemente, si anteriormente se menciona un ambiente más agresivo para el arranque de material, también el desgaste de la herramienta sufrirá las repercusiones correspondientes. En este apartado también aparecen el timer speed, el duty factor, y la compresión, como parámetros influyentes en el proceso, aunque en un grado de influencia mucho menor en comparación con la intensidad y el tiempo de descarga. Es importante también resaltar que la temperatura del fluido dieléctrico carece de influencia tanto en el arranque de material, como en el desgaste de la herramienta.

TWR:

Por último se procede a analizar el coeficiente de desgaste de herramienta, que se puede confirmar que es el parámetro más importante, porque es el coeficiente que relaciona tanto desgaste de herramienta como el arranque de material. Desde el punto de vista de la validación de las hipótesis, es muy importante que este coeficiente tenga el porcentaje de variación de 0.25, es decir, una gran exactitud en las previsiones, como se puede apreciar en la tabla del apartado 6.3.4.

Como era de esperar, vuelven a aparecer el tiempo de descarga y la intensidad como los dos parámetros más influyentes, y un tercer parámetro que gana influencia en este apartado, como es el “timer speed”.

Se verifica entonces que un proceso óptimo es aquel que se realiza a una intensidad de descarga elevada y un tiempo de trabajo reducido. Es decir, el mayor desgaste sufrido por la herramienta es compensado por una menor duración en el que la máquina de electroerosión se encuentra encendida, lo que conlleva un menor gasto eléctrico.

7.2 Análisis de los parámetros.

En este apartado se analizarán los 8 parámetros seleccionados, y su influencia en el proceso global de electroerosión.

Intensidad de descarga y tiempo de descarga:

Se analizan estos dos parámetros en conjunto, debido a la relación que guardan entre ellos. Como se ha podido observar son los más influyentes en el proceso. La intensidad óptima tomará el valor más elevado de los tres niveles posibles, pero será acompañado por un tiempo de descarga medio. El significado de un tiempo de descarga medio, cuando previsiblemente se intuía un ambiente de trabajo como el más agresivo posible, es que un mayor tiempo ocasionaría grandes daños en la herramienta, haciendo necesario que se remplace numerosas veces. De esta manera, el electrodo trabajará a una intensidad elevada, pero durante un tiempo medio, para de esta manera, hacer posible su refrigeración, y no sufrir elevados daños.

Ganancia.

La ganancia es un parámetro que de manera individual no influye en el proceso de electroerosión. Se puede observar que su F-Ratio está comprendido entre 1 y 4, lo que significa que será importante cuando se combina con otros parámetros, y que la variación de sus niveles influirá en los resultados de otros, haciendo que su F-Ratio sea ligeramente mayor o menor, pero nunca llegará a darse el caso que otro parámetro sea influyente o no debido a la ganancia.

Compresión.

La compresión tiene influencia en el desgaste de la herramienta (TW), pero una vez que se relaciona dicho desgaste con el arranque de material de la pieza, la compresión carece de influencia.

Relat. With.

El desplazamiento del soporte de la herramienta durante el tiempo de erosión carece de influencia durante todo el proceso de electroerosión. El arranque de material o la pérdida de material en la herramienta no están relacionados de ninguna manera con este desplazamiento.

Tiempo de pausa.

Caso similar a la compresión. El tiempo de pausa evita un desgaste excesivo de la herramienta, lo que hace que tenga influencia en ella, pero no es relevante a la hora de hacer que el electrodo penetre en la pieza. Cuando se ponen en relación estas dos situaciones, se deduce que este parámetro nos es influyente en el coeficiente de desgaste de la herramienta.

Timer speed.

Se puede comparar este caso con el del Duty Factor y la compresión. Los tres influyen en el coeficiente de desgaste de la herramienta, y carecen o

tienen poca importancia a la hora de arrancar el material de la pieza. La única diferencia de este parámetro con los otros dos, es que este temporizador de la velocidad es mucho más influyente que los otros cuando se habla de prevenir o de aumentar el desgaste de la herramienta, por lo que seguirá teniendo influencia en el TWR, que es el coeficiente que relaciona tanto desgaste de herramienta como arranque de material en la pieza.

Temperatura del fluido dieléctrico.

Uno de los más importantes a la hora de definir las conclusiones de este proyecto. Se puede confirmar que la variación de la temperatura del fluido dieléctrico es irrelevante en el proceso de electroerosión.

7.3 Conclusiones finales.

Son dos las conclusiones más importantes en la finalización de este proyecto, y están relacionadas con el tiempo de erosión o agujereado individual y con la refrigeración del fluido dieléctrico.

En primer lugar, 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.

Por otro lado, también se produce un ahorro de tiempo en la refrigeración del líquido dieléctrico. Se estima un tiempo medio de 20 minutos por cada operación de refrigeración del mismo. Este periodo de tiempo hay que sumarlo a la velocidad de producción mencionada en el párrafo anterior, lo que

hace incrementar las mejoras mencionadas. Además, como se puede analizar con detalle en el presupuesto de este proyecto, se estima un ahorro anual de cerca de 315 euros al año, simplemente en la utilización del termorregulador de la máquina de electroerosión.

ANEXOS

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

Anexo I: **El proceso de electroerosión** 64

1. Introducción 65

2. Tipos 69

    2.1. Electroerosión por hilo 69

    2.2. Electroerosión por rectificación 71

3. Materiales para piezas utilizados 72

    3.1. Aceros para herramientas 72

    3.2. Superlaciones 74

    3.3. Materiales extra-duros 75

4. Los electrodos en el proceso de electroerosión 76

    4.1. Criterio para la selección del material del electrodo 76

    4.2. Electrodos metálicos 79

    4.3. Electrodos de grafito 81

5. El fluido dieléctrico 82

    5.1. Tipos de aceites para electroerosión 85

Anexo II: **Método Taguchi** 88

1. Introducción 88

    1.1. Filosofía del Método Taguchi 89

2. Etapas del diseño robusto 90

3. Determinación de los parámetros en el diseño de la matriz ortogonal 92

4. Análisis de la varianza. (ÁNOVAS) 94

4.1. Cálculo de las Ánovas 95

5. F-Test 98

5.1. Formulación y cálculo 98

Anexo III: **Cálculos** 100

1. Toma de medidas 101

2. TW 102

2.1. Cálculo del TW 102

2.2. Cálculo de las Ánovas para el TW 103

3. MRR 104

3.1. Cálculo del MRR 104

3.2. Cálculo de las Ánovas para el MRR 105

4. TWR 106

4.1. Cálculo del TWR 106

4.2. Cálculo de las Ánovas para el TWR 107

Anexo IV: **Materiales utilizados** 108

1. Herramientas o electrodo 109

2. Pieza 111

3. Fluido dieléctrico 112

Anexo V: **Maquinaria**..... 113

1. Introducción..... 113

2. Características..... 113

3. Componentes..... 114

3.1. Sistema hidráulico/neumático..... 114

3.2. Sistema de control..... 115

3.3. Generador de impulso..... 116

3.4. Unidad de dieléctrico..... 117

3.5. Termorregulador..... 118

4. Tabla de códigos..... 119

Anexo I: El proceso de electroerosión.

Este anexo tiene como finalidad complementar la información explicada en la memoria acerca del proceso de electroerosión.

Así como en la memoria se detalla las características y especificaciones necesarias para poder comprender este proyecto, en este anexo se ampliarán los conocimientos sobre este proceso: Se explicarán otros tipos de agujereado por electroerosión, ventajas y desventajas de cada proceso, materiales más utilizados a la hora de la fabricación de electrodos, materiales idóneos para el mecanizado por electroerosión (haciendo especial hincapié en los aceros de matricería)…etc.

1. Introducción.

Dentro de los procesos no convencionales de mecanizado presentes en la industria metal- mecánica, la electroerosión (en inglés Electrical Discharge Machining, EDM) ocupa sin duda un lugar privilegiado por sus numerosas aplicaciones y por el crecimiento que ha alcanzado a partir de 1970. En el momento de su aparición esta tecnología supuso una verdadera revolución especialmente en las industrias de fabricación de utillajes en general, cubriendo sectores tales como la estampa de forja, la troquelería, el molde de inyección de metales ligeros y de plásticos, las hileras de extrusión y estirado, los útiles para sinterizado, etc. La figura 1 muestra una de las estampas utilizadas para la forja de un cigüeñal, que se muestra aún con la rebaba a la izquierda.

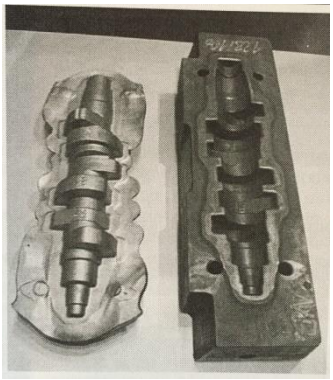


Figura 1- Cigüeñal junto a la estampa utilizada para su forja. (Fabricada por electroerosión)

Aunque los arriba mencionados son sus principales mercados, otros sectores también se benefician de las ventajas del proceso a la hora de mecanizar materiales de elevada dureza especialmente cuando se buscan geometrías complicadas, tolerancias ajustadas y excelentes acabados superficiales. Industrias tales como la aeronáutica, a pesar de sus reticencias hacia el proceso debido a las modificaciones que induce 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.

Las experiencias relacionadas con el arranque de material por medios eléctricos han sido muy numerosas y se remontan a finales del siglo XIX. Incluso en la primera mitad del siglo XX se presentaron patentes de maquinaria industrial, los desintegradores de arco que aún hoy, con variaciones, se utilizan en ciertas aplicaciones. Pero no fue hasta la Segunda Guerra Mundial cuando se sentaron las bases de lo que se considera la tecnología moderna de electroerosión.

Dichas bases son debidas al grupo investigador dirigido por el matrimonio ruso formado por Boris R. y Natasha l. Lazarenko. Uno de los investigadores de este grupo, Boris N. Zolotykh, presentó en 1943 un sencillo circuito basado en resistencias y condensadores que permitía el arranque controlado de material. Aún hubo que esperar hasta la siguiente década para que aparecieran las primeras máquinas industriales de electroerosión.

Desde entonces los avances en esta tecnología han sido continuos. La aparición de los generadores transistorizados, la introducción del Control Numérico, la puesta a punto y posterior popularización de la tecnología de corte por hilo, y más' recientemente, el desarrollo de máquinas y tecnología de micro-electroerosión han sido probablemente los hitos más reseñables en esta evolución. Junto a ellos los avances en materiales de electrodos, los desarrollos en hilos, los modernos sistemas de filtración, la especialización de los dieléctricos en función de los requisitos de la pieza a mecanizar o la extensiva utilización de utillajes estandarizados han contribuido a conseguir la máxima eficiencia de un proceso al que tradicionalmente se le ha achacado el conseguir bajas tasas de arranque.

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.

El mecanismo de arranque de material, es fundamentalmente una combinación 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 dieléctrico circulante.

Además este fluido 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.

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 comentara 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.

La figura 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 electrodo y pieza, sino que entre ambos se establece una distancia que normalmente se conoce como gap. El gap está ocupado por el dieléctrico,

de manera que es a través del mismo como se establecen las descargas eléctricas.

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

Como consecuencia, el gap 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, el diámetro del agujero mecanizado será igual al diámetro del electrodo más dos veces el gap.

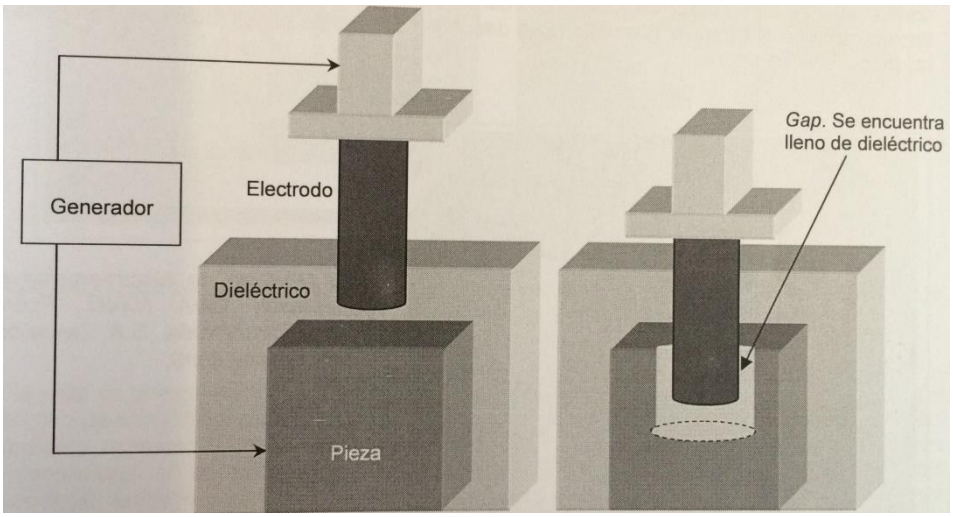


Figura 2- Esquema básico del proceso de electroerosión.

2 Tipos.

Existe una gran variedad en los diferentes tipos de electroerosión, además del proceso de electroerosión por penetración, que por ser el método seleccionado para la realización. A continuación se mencionan y se explican las características de algunos de ellos:

2.1 Electroerosión por hilo.

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

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

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

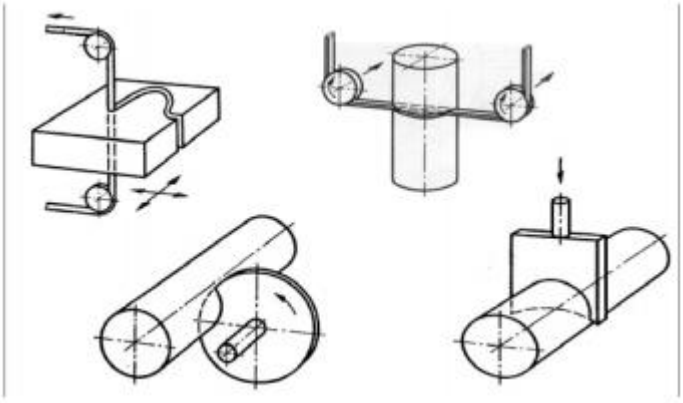


Figura 1- Esquema del corte por hilo.

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.

En este tipo de electroerosión, el líquido dieléctrico habitualmente utilizado es el agua desionizada, aunque también existe alguna máquina que funciona con aceite.

Debe tenerse en cuenta que la WEDM permite únicamente producir geometrías pasantes. Así mismo, es posible realizar el corte en vertical o en cónico por medio de un descentramiento, controlado por el CNC, de la guía superior con respecto a la guía inferior. De este modo se pueden realizar formas con cortes cónicos que pueden ser de gran complejidad (figura 2).

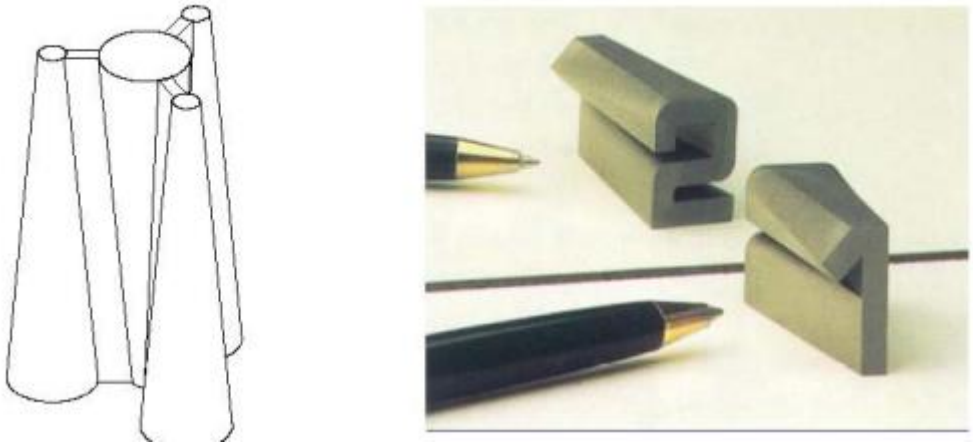


Figura 2- Ejemplos de corte cónico.

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.

2.2 Electroerosión por rectificación.

En esta forma de electroerosión se da un movimiento de rotación del electrodo, con lo que el comportamiento se asemeja a una operación de rectificado convencional, pero el arranque de material se realiza mediante descargas eléctricas, sin contacto directo entre electrodo y pieza (Fig. 3). El campo de aplicación de este tipo de máquina es muy reducido.

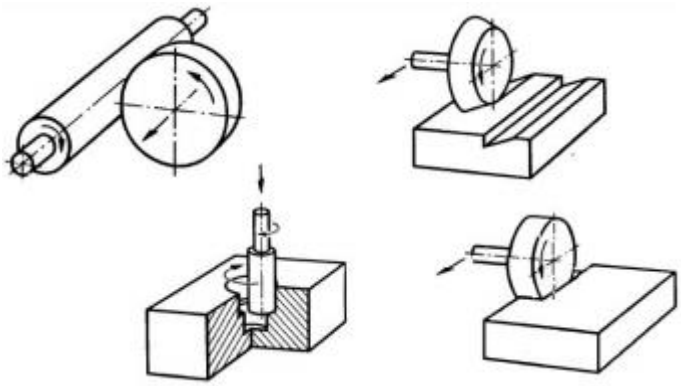


Figura 3- Esquema del rectificado por electroerosión.

3. Materiales para piezas más utilizados.

De manera general, puede decirse que cualquier material con una resistividad eléctrica por debajo de 100 Ω*cm es susceptible de ser mecanizado por electroerosión. Se trata de un umbral de resistividad lo suficientemente alto como para que todos los materiales metálicos y algunos no metálicos puedan ser procesados por esta técnica. Sin embargo y como ya se ha comentado, la utilización económica del proceso sólo está justificada cuando la maquinabilidad del material sea baja. Es por ello que el uso de esta tecnología se centra fundamentalmente en los siguientes grupos de materiales: aceros de herramientas, aleaciones aeronáuticas y materiales extra-duros.

3.1 Aceros de herramientas

Por ser habitualmente utilizados en nuestro entorno puede hacerse aquí mención a algunos aceros concretos que son mecanizados por electroerosión, aunque por supuesto hay muchos más casos.

- UNE F-5211 / AISI D2 / ISO 160CrMoV12 (denominación comercial Sverker 21, de Uddeholm). Se trata de un acero de herramientas de trabajo en frío, con alto contenido de carbono y cromo, aleado con molibdeno y vanadio, caracterizado por una alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión, alta dureza superficial después del temple, buenas propiedades de temple profundo, excelente estabilidad en el temple y buena resistencia al revenido. Este acero se recomienda para fabricar herramientas que deban tener una resistencia muy alta al desgaste, combinada con una tenacidad moderada. Además se utiliza para cortar materiales gruesos y duros, y en herramientas de dar forma expuestas a esfuerzos de flexión y cargas de impacto. Sus aplicaciones más comunes son cizallas, herramientas de embutición profunda,

herramientas de corte de alto rendimiento, herramientas para extrusión, moldes de plástico, instrumentos de medida, etc.

- UNE F-5318 / AISl H13 / ISO 40CrMoV5 (denominación comercial Orvar Supreme, de Uddeholm). Se trata de un acero de alta tenacidad y resistencia en caliente, buena conductividad térmica y es insensible a la formación de grietas por calor. Este acero puede ser nitrurado y también es apto para temple al vacío. Presenta un 0,39% de carbono y 5,1% de cromo, aleado con molibdeno y vanadio. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran casquillos de fundición inyectada, cuchillas para cortar en caliente, fabricación de cuerpos huecos y cámara hueca, herramientas de extrusión en caliente, herramientas para fundición inyectada, insertos de estampa, etc.

- UNE F-528 bonificado / ISO 55NiCrMoV7. Es un acero clásico de trabajo en caliente, con 0,56% de carbono, con contenido en cromo y níquel y aleado con molibdeno y vanadio. Sus aplicaciones más comunes incluyen estampas y matrices de forja de todo tipo, matrices de conformado, punzones de extrusión, portamatrices, anillos y placas de sujeción, cuchillas de corte en caliente y moldes para la inyección de plástico.

Figura 4- Mecanizado de acero Sverker 21 mediante electroerosión.

3.2 Superaleaciones

Las aleaciones de níquel, cromo y otros compuestos duros se utilizan de manera amplia en la industria aeronáutica debido a su alta tensión última y su dureza a alta temperatura. Probablemente entre estas aleaciones una de las más populares sea el Inconel 718 que se presenta con diferentes tratamientos térmicos. Este tipo de materiales se utiliza principalmente en la producción de componentes para aviación que deben trabajar a temperaturas por encima de 500°C, por ejemplo alabes y hélices de compresores, discos, ejes, carcasas y anillos, etc.

Sin embargo la combinación de propiedades tales como una baja conductividad térmica, alta resistencia a la deformación plástica, tendencia al endurecimiento mecánico y una alta afinidad química con los materiales de herramienta provocan que el mecanizado de Inconel 718 sea extremadamente difícil, ya que las propiedades anteriormente citadas resultan en temperaturas de corte elevadas, tensiones en las piezas y una delgada capa adherida en el interfaz herramienta-pieza durante el proceso de mecanizado. En concreto, las aleaciones base níquel poseen una baja conductividad térmica y una gran tendencia a la abrasión y a soldarse principalmente sobre la cara de desprendimiento de la herramienta de corte. A esto hay que añadir que estas aleaciones tienden a un importante endurecimiento mecánico durante la deformación plástica del corte debido a su matriz austenítica. Estas dificultades obligan al usuario a utilizar parámetros de corte excesivamente conservadores, con los elevados tiempos de mecanizado y costes asociados que esto implica.

Por todo ello, la electroerosión resulta una alternativa de interés para la industria aeronáutica. Probablemente, las mayores reticencias se encuentran en los estrictos controles de integridad superficial que deben superar los componentes aeronáuticos con objeto de asegurar su resistencia a la fatiga termo-mecánica. Debe tenerse en cuenta que la naturaleza térmica de la electroerosión puede afectar a dicha integridad. Sin embargo, tanto fabricantes de máquinas como usuarios de la tecnología se están esforzando por

desarrollar tecnologías tanto de hilo como de penetración que minimicen dichos daños.

Las capacidades de arranque dependen de la composición química de la aleación concreta de que se trate. En el caso del lnconel, debido a su elevado contenido en hierro las velocidades son cercanas a las de un acero común tanto en hilo como en penetración.

Figura 5- Aleacion Inconel 718 mecanizada mediante electroerosión por hilo.

3.3 Materiales extra-duros

En este grupo se engloban materiales avanzados de extrema dureza como pueden ser ciertas cerámicas y materiales compactos como el diamante policristalino (PCD). En general, la conductividad eléctrica de estos materiales es bastante reducida en comparación con la de los materiales metálicos y es por ello que en muchos casos no pueden ser mecanizados por electroerosión. Este es el caso de una cerámica como la alúmina (AIZOQ), muy utilizada.

Sin embargo en otros casos la resistividad eléctrica está por debajo del umbral de los 100 Ω*cm antes mencionado. Es el caso del carburo de silicio (SiC) y del carburo de boro (B4C) entre otros. Debe tenerse en cuenta que bien por su extrema dureza y fragilidad, o bien por su carácter altamente abrasivo,

estos materiales no pueden ser mecanizados por métodos convencionales por lo que debe recurrirse a técnicas no convencionales. En este contexto la electroerosión se convierte en una alternativa viable frente a otras técnicas de mecanizado.

4. Los electrodos en el proceso de electroerosión.

Hoy por hoy son dos los materiales de electrodo más comúnmente utilizados: el cobre electrolítico y el grafito, ambos con sus respectivas variantes. La discusión sobre los supuestos beneficios de una alternativa sobre la otra ha sido amplia y los promotores de cada material encuentran siempre nuevas razones para inclinar la balanza a su favor. Objetivamente, debe decirse que en los últimos años los importantes avances en la tecnología de los grafitos han dado un importante impulso a esta opción; por ejemplo son ya pocos los usuarios que se inclinan por el cobre en la erosión de aceros para herramientas, aunque sigue utilizándose en otras aplicaciones. Antes de entrar a discutir las propiedades y aplicaciones de cada material concreto, merece la pena analizar los criterios que deben tenerse en cuenta en la selección final.

4.1 Criterios para la selección de material de electrodo

A la hora de seleccionar el material de electrodo más adecuado para una cierta aplicación deben considerarse una serie de aspectos que convertirán a un cierto material en la opción más adecuada. Se pueden resumir en 5 los puntos clave o criterios que deben considerarse en la elección, aunque éstos son probablemente los aspectos más fácilmente cuantificables.

En este apartado se analizarán únicamente los que pueden considerarse como criterios objetivos y que pueden resumirse en 5 puntos:

a) Capacidad de arranque: La maximización de la capacidad de arranque se consigue mediante la adecuada combinación de los parámetros

eléctricos de la máquina, del dieléctrico y del modo de limpieza y, por supuesto del material de electrodo. Centrándonos en este último aspecto, conseguir la máxima capacidad de arranque pasa por concentrar al máximo la energía de la descarga sobre la pieza. Dicho de otro modo, deben reducirse cuanto sea posible las pérdidas de energía a través del electrodo. Así, la conductividad térmica y la temperatura de fusión del material de electrodo se convierten en aspectos de la máxima importancia. Una conductividad térmica baja resulta beneficiosa, puesto que reduce la energía conducida a través del electrodo, concentrando dicha energía en la zona de descarga y maximizando el arranque. Para poder soportar el aumento de temperatura debido a dicha concentración sin deteriorarse, el punto de fusión del material de electrodo debe ser elevado.

b) Resistencia al desgaste: El desgaste debe analizarse también a partir de la combinación de parámetros de erosión y material de electrodo. Se han hecho ya comentarios sobre la influencia de los parámetros de erosión sobre el desgaste, por lo que se tratará a continuación el papel del material de electrodo en este fenómeno. Evidentemente, la temperatura de fusión es una propiedad fundamental. Cuanto más baja sea esta, para una cierta concentración de energía en la zona de erosión mayor será la cantidad de material de electrodo perdida. Pero no es el único factor. La naturaleza del material de electrodo, y más concretamente su densidad, también está directamente relacionada con los mecanismos de desgaste. Por ejemplo, en condiciones de acabado un grafito de grano medio tiende a perder dichos granos lo que resulta en un mayor desgaste y en inestabilidad del proceso, especialmente si debido al tamaño de esos granos no es posible limpiar adecuadamente el canal de descarga.

c) Acabado superficial final del componente erosionado: El acabado superficial final de la pieza erosionada es otro de los aspectos a tener en cuenta. La cavidad erosionada resulta ser una copia exacta del electrodo que se ha utilizado para su erosión, tanto en geometría como en rugosidad. Esto

quiere decir que el electrodo imprime su rugosidad en la pieza y que, por tanto, la mínima rugosidad que pueda obtenerse en el material de electrodo determinará la mínima rugosidad de la pieza. Además, como ya se ha explicado, debe tenerse en cuenta que las operaciones de acabado se caracterizan por elevados desgastes de electrodo, pero este desgaste no está asociado a las altas temperaturas alcanzadas durante la operación puesto que los parámetros de acabado son poco energéticos, por lo que en esta situación más que a la temperatura de fusión del material de electrodo debería atenderse a su densidad.

d) Maquinibilidad: La maquinabilidad del material de electrodo es otro de los aspectos de más interés. Tan importante es la facilidad de obtener tolerancias ajustadas en un cierto material como la ausencia de problemas operativos durante la operación de mecanizado. En el caso del grafito la capacidad de generar corte sin rebaba, que luego deba eliminarse en costosas operaciones de acabado, es un punto a favor. Sin embargo, también en el caso del grafito el material arrancado en forma de polvo, que resulta muy abrasivo, puede depositarse en elementos sensibles del centro de mecanizado, especialmente las guías, y resultar en un deterioro de su funcionamiento y reducción de su vida útil.

e) Coste final del electrodo: Aunque en ocasiones el usuario tiende a fijarse en el coste del material en bruto, la variable a considerar debería ser el coste total del electrodo incluyendo los costes de mecanizado. En este coste total el peso del coste del material de partida suele ser algo secundario, especialmente en electrodos de pequeño tamaño. Es cierto que muchos usuarios de electrodo metálico de cobre se ven sorprendidos por los precios de las mejores calidades de grafito, que pueden ser hasta 5 veces más caras que el cobre. Sin embargo, es justo reconocer que las calidades más caras se reservan solo para ciertas aplicaciones, mientras que las calidades más corrientes presentan precios más cercanos a los del cobre.

4.2 Electrodos metálicos.

Inicialmente, el único material de electrodo que se usaba en electroerosión era el latón, que resultaba barato y fácil de conseguir a pesar de presentar desgastes muy elevados. Pronto el latón fue sustituido por el cobre, que ofrece mayor conductividad eléctrica y desgastes considerablemente menores. Durante décadas el cobre ha sido utilizado de forma extensiva para la mayor parte de las aplicaciones, aunque en los últimos años los usuarios de electroerosión parecen inclinarse mayoritariamente hacia los electrodos de grafito después de haberse resuelto gran parte de las dificultades operativas que limitaban su aplicación.

Probablemente las mayores limitaciones del cobre se encuentran en su bajo punto de fusión (1082°C) y su elevada conductividad térmica, factores estos que limitan su capacidad de arranque. Esto hace que en la erosión de aceros de herramientas, eligiendo el grado adecuado de grafito se consigan capacidades de arranque considerablemente superiores a las que se consiguen con electrodo de cobre. Por otra parte, el cobre presenta un coeficiente de dilatación lineal ($16*10^{-6}$ °C) que puede considerarse elevado si se compara con el del grafito, lo que puede afectar a la precisión de la operación especialmente si el trabajo es de larga duración y no se dispone de sistemas refrigerantes para el líquido dieléctrico.

El cobre presenta un alto peso específico (8,95 kg/dm^3). Este aspecto limita la fabricación de electrodos voluminosos, puesto que su peso sería demasiado elevado. Por ello, para grandes electrodos se recurre al grafito.

En lo que se refiere al acabado superficial final del componente erosionado, hay que decir que de modo general, en comparación con el grafito, el cobre permite alcanzar mejores rugosidades gracias a su estructura densa. Sin embargo, es justo reconocer que los modernos grados de grafito disponibles en el mercado y el desarrollo de las estrategias de erosión orbital han permitido obtener con grafito rugosidades adecuadas a las aplicaciones más exigentes.

El mecanizado de cobre con tolerancias muy ajustadas resulta complicado. El cobre tiende a dejar rebabas y a sufrir deformaciones durante el arranque, por lo que es difícil conseguir buena precisión. El rectificado tampoco resulta una opción sencilla Una alternativa es el corte por hilo de los electrodos, que permite conseguir electrodos precisos a elevadas velocidades de corte. Otra alternativa es utilizar cobre al que se ha añadido telurio en una proporción del 0,5 al 1%, material conocido como Telco. El mecanizado de este material es mucho más sencillo, no presentando ningún tipo de rebabas, aunque sufre una cierta merma en las propiedades erosivas frente al cobre puro.

En el mercado existen otras alternativas de materiales metálicos para la electroerosión, aunque se trata de soluciones puntuales para problemas concretos y no de materiales de uso extensivo. Probablemente la más conocida son las aleaciones con presencia de tungsteno, fundamentalmente el tungsteno-cobre (al 70/30). Su uso se centra en materiales difíciles de erosionar como los carburos y los materiales aeronáuticos (aleaciones base cobalto, niquel,etc.) y su principal ventaja es su reducido desgaste debido al elevado punto de fusión del tungsteno. A cambio, su precio es elevado y su peso específico alto (15-20 kg/dm^3), con lo que no es adecuado para electrodos de tamaño medio-grande. La plata-tungsteno, el tungsteno puro, el aluminio o incluso el acero completan los materiales metálicos para electrodos, aunque obviamente, su utilización solo puede considerarse como marginal. La figura 6 muestra dos ejemplos de electrodos metálicos, en concreto cobre tungsteno-cobre.

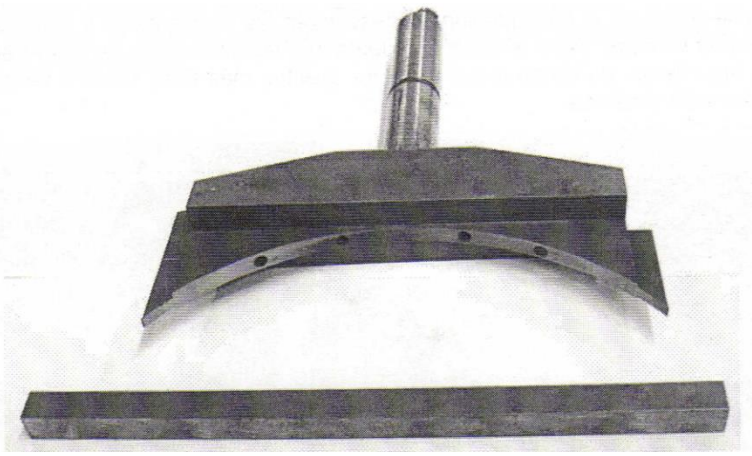


Figura 6- Electrodo de cobre cortado por electroerosión por hilo (arriba) y electrodo de tungsteno-cobre (abajo).

4.3 Grafito

La introducción del grafito como material de electrodo permitió aumentar considerablemente las capacidades de arranque frente a los valores que se obtenían con el cobre, reduciendo desgastes especialmente en operaciones de desbaste en las que se ponen en juego elevadas energías de descarga y bajas frecuencias de chispeo. En operaciones de acabado, sin embargo, en las que se dan altas frecuencias de descarga, el desgaste del grafito es superior al del cobre. También se alcanzan elevados desgastes en el caso de operaciones de arranque masivo con polaridad negativa, aunque en estos casos la prioridad es la capacidad de arranque sin prestar atención a la pérdida de material de electrodo.

Además de estas ventajas, la facilidad de mecanizado del grafito, frente a los problemas comentados para el cobre, supone un aspecto crucial. El grafito se mecaniza en máquinas de alta velocidad con herramientas de metal duro tanto de plaquitas como enterizas, aunque hay que tener especial cuidado en su manipulación debido a su fragilidad. El máximo detalle que se puede obtener es función del tamaño de partícula. Intentar apurar detalles sin tener en cuenta este factor resulta en largas operaciones de mecanizado que terminan con la rotura o astillado del electrodo. Cuando es preciso obtener radios de acuerdo pequeños y buena precisión debe recurrirse a calidades de grafito de muy pequeño tamaño de partícula.

Figura 7- Electrodos de grafito.

Debe tenerse en cuenta que el mecanizado sólo puede llevarse a cabo en máquinas especialmente preparadas para ello. El motivo es que el corte no genera virutas, sino un polvo de color oscuro que puede ser tóxico para el personal cercano a la máquina y que además debido a su carácter muy abrasivo puede dañar las guías de la máquina e incluso afectar al equipo eléctrico. Por ello, las máquinas para mecanizado de grafito están equipadas con sistemas de extracción de aire de la zona de mecanizado y con protecciones especiales para las guías y para los sistemas que pudieran verse afectados.

5. El fluido dieléctrico.

El fluido dieléctrico juega un papel fundamental en cualquier operación de electroerosión. Los fabricantes y los usuarios de estas máquinas reconocen la importancia de utilizar un dieléctrico de buenas características, que sea suministrado de forma conveniente a la zona de corte, y que sea adecuadamente filtrado.

De manera general, las características que se buscan en un buen fluido dieléctrico son las siguientes: buen aislamiento eléctrico, reducción al mínimo de la superficie de descarga, refrigeración de electrodo y pieza, buena acción de lavado de los residuos de la erosión, buena capacidad de filtración, alta velocidad de ionización y desionización y, finalmente, tener una viscosidad

adecuada. Además de estas características, que pueden considerarse fundamentales, al fluido se le exigen también otros aspectos, tales como ser inodoro e incoloro, no poseer hidrocarburos aromáticos y tener baja tendencia a la evaporación, para evitar provocar demasiados humos.

La función primera de un fluido dieléctrico es procurar aislamiento entre electrodo y pieza de manera que salte la chispa cuando la distancia entre ambos sea mínima. Un gap mínimo permite aumentar el rendimiento de la erosión provocada por la energía de la descarga, así como mejorar la precisión dimensional de la pieza erosionada. El valor óptimo del gap, a igualdad de tensión de descarga, depende de la resistencia eléctrica del fluido, la cual varía en función de la presencia de burbujas de gas y de la contaminación producida por los residuos sólidos de la erosión. En otras palabras, la aparición de canales de descarga no controlados depende, hasta cierto punto, de la eficacia del filtrado.

El gap que se establece en el proceso de erosión representa un compromiso entre dos factores diferentes: por un lado, una capacidad aislante elevada permite trabajar con gap más estrecho, con lo que se consiguen altos niveles de precisión en el corte; por el contrario, una distancia demasiado reducida entre los dos electrodos provoca un aumento en el desgaste del electrodo y una reducción en la capacidad de arranque. Por tanto, la resistividad eléctrica es un factor crítico en la actuación de estos fluidos.

Otra de las funciones del fluido dieléctrico es mantener el canal de descarga tan reducido como sea posible con objeto de concentrar la energía y la temperatura en una zona localizada, lo que permite obtener el mejor rendimiento de erosión por cada descarga. A medida que el canal de descarga se vuelve conductor por efecto de la ionización, la viscosidad del fluido tiende a reducir la difusión del vapor y del gas. Cuanto mayor sea la viscosidad, mayor será la concentración de la energía y la profundidad de los cráteres, que se encuentran concentrados en una zona relativamente localizada. Por tanto, la viscosidad del fluido es la característica físico-química que gobierna el diámetro del canal de ionización para un mismo amperaje.

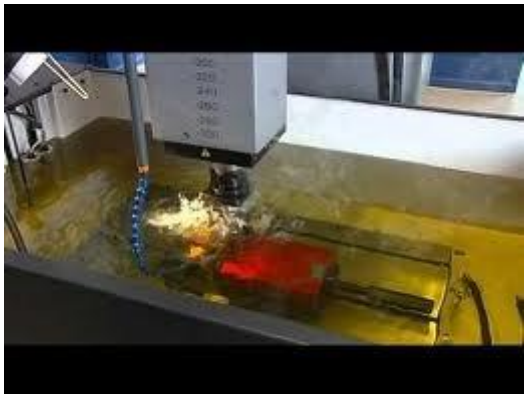


Figura 8- Fluido dieléctrico durante el proceso de electroerosión.

El fluido dieléctrico lleva también a cabo una función de refrigeración de la pieza y del electrodo para evitar fenómenos de sobrecalentamiento. En el curso de la descarga toda la energía se convierte en calor, que será el responsable de la fusión y/o evaporación del material de pieza. Una cantidad inapropiada de fluido dieléctrico en la zona de erosión puede ser causa de sobrecalentamiento de la pieza (lo cual puede comprometer su precisión) y de producción de gas y vapor en cantidades altas. En aquellos casos en los que la producción de calor durante el proceso sea excesiva se recomienda disponer un enfriador en el sistema de recirculación del dieléctrico.

La capacidad de filtración es otro de los aspectos críticos a la hora de su selección. Como ya se ha comentado, una de las funciones primarias del fluido es eliminar de la zona del gap los residuos sólidos que se generan como consecuencia del proceso. Sin embargo, esta afirmación entraña una matización de gran importancia. Los residuos a eliminar deben ser aquellas partículas cuyo tamaño sea superior a 5 um. Las partículas más finas (entre 1 y 3 um) juegan un papel fundamental a la hora de aumentar la conductividad residual del dieléctrico, para facilitar la ionización y la formación del canal de descarga.

La presencia de residuos metálicos y carbonos de gran tamaño, debidos a un filtrado inadecuado puede ser causa de un proceso de oxidación rápida del fluido, que traiga como consecuencia una degradación de sus propiedades. La capacidad de filtración de un fluido para EDM viene determinada por un

elevado número de factores, entre los cuales cabe citar su viscosidad y su susceptibilidad a la degradación térmica y a la oxidación. En efecto, un fluido con tendencia a la oxidación puede polimerizar a lo largo del proceso de erosión. Como consecuencia, aparecen resinas que pueden quedar depositadas tanto en la zona de corte como a lo largo del circuito de recirculación del dieléctrico.

La capacidad de ionización y deionización rápida permite reducir los intervalos entre descargas. Ya se han comentado las ventajas que esto comporta, desde un aumento de la eficiencia del proceso hasta una mejora del acabado superficial de la pieza erosionada. La formación del canal de descarga durante la emisión de iones depende de la resistividad del fluido dieléctrico, que en el caso de los aceites se encuentra en torno a los 10^{15} Ω*cm. Como ya se ha comentado la resistividad del fluido se ve fuertemente influida por el grado de contaminación. De este modo, tanto la eficiencia del sistema de filtrado como la propia capacidad de filtración del fluido influyen en su capacidad de ionización.

5.1 Tipos de aceites para electroerosión.

Fundamentalmente, dos son los grupos de compuestos que se utilizan como dieléctricos en operaciones de electroerosión: los aceites minerales y el agua desionizada. En realidad, el uso de esta última se restringe a operaciones de corte por hilo y a algunos casos muy concretos de erosión por penetración, como ciertas operaciones de micro-mecanizado, por ejemplo, el taladrado por electroerosión de agujeros de muy reducido diámetro.

Entre el amplio espectro de compuestos de hidrocarburos existentes, solamente un número limitado de los mismos posee las características adecuadas para ser utilizado en operaciones de erosión, teniendo en cuenta que aquellos con un punto de inflamación inferior a 70°C no son indicados por motivos de seguridad debido a su tendencia a generar vapores fácilmente inflamables; y que los que tienen una viscosidad superior a 8 cSt a 20°C son

demasiado viscosos como para permitir un desplazamiento suficiente en la zona del gap, especialmente cuando se han de erosionar cavidades profundas. De hecho, de entre los fluidos utilizados, los más viscosos presentan valores límite de 5,5 cSt a 20°C.

Esta segunda condición exige un compromiso a la hora de seleccionar el fluido dieléctrico, puesto que como ya se ha dicho, la viscosidad es la que gobierna la superficie de descarga (en realidad, la anchura del canal de descarga), y en ocasiones puede interesar que las descargas estén localizadas en una pequeña superficie.

Por ello, se pueden dar algunas recomendaciones a la hora de seleccionar el aceite dieléctrico más adecuado para una cierta aplicación. Estas recomendaciones relacionan la aplicación buscada con la viscosidad del fluido:

- Aceites entre 1,75 Y 1,85 cSt a 20°C. Esta clase de fluidos proporciona los mejores resultados en la erosión de geometrías simples con altos requisitos de rugosidad. Un ejemplo puede ser la fabricación de moldes para inyección de piezas de plástico con tolerancias y acabados muy ajustados.

- Aceites entre 2,1 Y 2,4 cSt a 20°C. Cuando se pretende erosionar geometrías algo más complejas manteniendo la precisión y una buena rugosidad, los aceites en este rango de viscosidad constituyen una buena opción.

- Aceites entre 2,65 y 3 cSt a 20°C. Los aceites de esta gama están relacionados con operaciones de más arranque caracterizadas por intensidades de corriente media-alta, tras las cuales se requiere una buena rugosidad, como es el caso de ciertos moldes para termoplásticos.

- Aceites entre 3,3 y 3,5 cSt a 20°C. Este tipo de aceites proporcionan los mejores resultados en operaciones de desbaste, con intensidades superiores a 70 A. Un ejemplo de uso podría ser la erosión de cavidades en útiles para forja.

Anexo II: Método Taguchi.

1. Introducción.

El método Taguchi se basa en la reducción de las variantes de un proceso por el diseño robusto de los experimentos. El objetivo general del método es producir un determinado producto de alta calidad que a su vez, suponga un bajo coste para el fabricante. El método Taguchi fue desarrollado por el Dr. Taguchi Genichi, de Japón, a partir de la idea de la reducción de las variables en un determinado proceso. Taguchi desarrolló este método para investigar cómo los diferentes parámetros afectan a la media y la varianza, una característica del rendimiento del proceso que mide como de bien está funcionando dicho proceso. El diseño experimental propuesto por Taguchi implica el uso de matrices ortogonales para organizar los parámetros que afectan el proceso y los niveles a los que se les deben variar. En lugar de tener que probar todas las combinaciones posibles, como el diseño factorial, el método Taguchi prueba pares de combinaciones. Esto permite que para la recogida de los datos necesarios para determinar los factores que más afectan a la calidad del producto con una cantidad mínima de experimentos, con el consiguiente ahorro de tiempo y recursos. La utilización del método de Taguchi es idónea cuando hay un número intermedio de variables (3 a 50) , pocas interacciones entre las variables , y cuando sólo unas pocas variables contribuyen de manera significativa .

Las matrices de Taguchi se pueden derivar o miraron .Matrices pequeñas se pueden deducir de forma manual, y grandes matrices se pueden derivar de determinados algoritmos. Las matrices se seleccionan por el número de parámetros (variables) y el número de niveles (estados). El análisis de la varianza en los datos recogidos, desde el diseño de experimentos Taguchi, se puede utilizar para seleccionar los nuevos valores de los parámetros para optimizar la característica de rendimiento. Los datos de las matrices se pueden analizar mediante el trazado de los datos y la realización de un análisis visual,

ANOVA , rendimiento bin y la prueba exacta de Fisher o Chi - cuadrado de prueba para probar la significación .

1.1 Filosofía del Método Taguchi

El método Taguchi surgió a partir de una serie de ideas de su creador, Genichi Taguchi, a partir de la observación de la calidad de los productos y su sistema de fabricación. Su mentalidad y objetivos que le llevaron a crear el diseño robusto, pueden resumirse en tres ideas fundamentales que se explican a continuación:

1. La calidad debe estar participe en el diseño de un producto, no en la inspección del producto. La calidad está diseñada en un proceso a través del diseño del sistema, el diseño de parámetros y diseño de la tolerancia. El diseño de parámetros, que será el tema central de este proyecto, se realiza mediante la determinación de los parámetros de proceso que más que afectan al producto, para dar una calidad satisfactoria al producto. La inspección de calidad de un producto significa que el producto se presenta en los niveles de calidad establecidos y los que se encuentran demasiado lejos de esos niveles, son desechados.

2. Se consigue mejor la calidad mediante la minimización de la desviación con respecto a un objetivo. El producto debe ser diseñado de modo que sea inmune a factores ambientales no controlables. En otras palabras, la relación entre señal (la calidad del producto) y ruido (factores incontrolables), debe ser alta .

3. El costo de la calidad debe ser medida como una función de la desviación estándar y las pérdidas. Este es el concepto de la función de pérdida, o la pérdida total incurrido en el cliente y la sociedad de un producto de mala calidad. Debido a que el productor es también un miembro de la sociedad y por la insatisfacción del cliente desalentará un futuro patrocinio, este costo a los clientes y la sociedad volverá al productor.

2. Etapas del diseño robusto.

Los pasos generales implicados en el método de Taguchi son los siguientes:

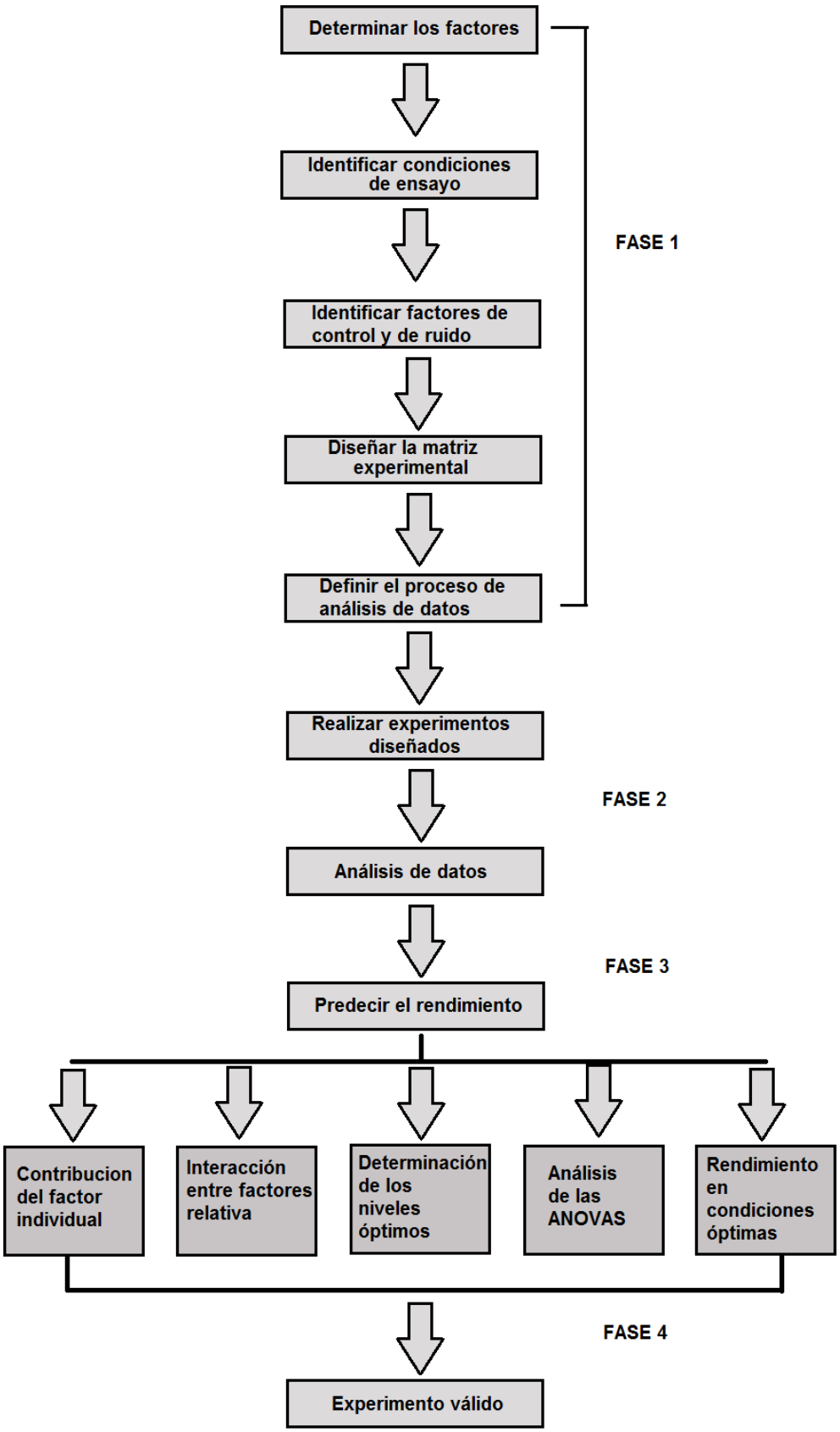
1. Definir el objetivo del proceso, o más específicamente, un valor objetivo para una medida de rendimiento del proceso. Esto puede ser una velocidad de flujo, la temperatura, etc. El objetivo de un proceso también puede ser un mínimo o máximo ; Por ejemplo , el objetivo puede ser para maximizar la velocidad 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.

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. Por ejemplo, una temperatura podría variar a un valor bajo y alto de 40 C y 80 C. Aumentar el número de niveles para variar un parámetro AT incrementa el número de experimentos a realizar.

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.

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

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


Determinar los factores
Identificar condiciones de ensayo
Identificar factores de control y de ruido
Diseñar la matriz experimental
Definir el proceso de análisis de datos
FASE 1
Realizar experimentos diseñados
FASE 2
Análisis de datos
FASE 3
Predecir el rendimiento
Contribucion del factor individual
Interacción entre factores relativa
Determinación de los niveles óptimos
Análisis de las ANOVAS
Rendimiento en condiciones óptimas
FASE 4
Experimento válido

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 coste 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.

Conociendo el número de parámetros y el número de niveles, la matriz ortogonal apropiada puede ser seleccionada sin mayor dificultad. Utilizando la tabla de selección de matriz que se muestra a continuación, el nombre de la matriz adecuada se encuentra buscando en la columna y la 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 L_{16}, será necesario la realización de 16 ensayos para su posterior verificación y confirmación. Se muestran también a continuación ejemplos de diferentes tipos de matrices. Estas matrices se han creado usando un algoritmo desarrollado

por Taguchi, y permite que para cada variable y configuración, puedan ser probadas igualmente.

Por ejemplo, si tenemos tres parámetros (tensión, temperatura, presión) y dos niveles (alto , bajo) , la matriz adecuada es L4.

Experiment	P1	P2	P3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Figura 1-Ejemplo de matriz L_4

Se puede observar cuatro experimentos diferentes en la matriz. Los niveles designados como 1, 2,3, deben ser reemplazadas en la matriz con los valores del nivel real, y P1, P2, P3 deben ser sustituidos por los parámetros reales (es decir, voltaje, temperatura, etc.)

A continuación se muestra la tabla para selección del tipo de matriz ortogonal en función del número de parámetros y niveles:

		Number of Parameters (P)																						
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Number of Levels	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	
	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32														
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50												

Figura 2- Tabla para la selección de la matriz ortogonal.

Por último, ejemplo de dos matrices ortogonales.

Experiment	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Experiment	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Figura 3- Ejemplos de Matriz L_9 y L_{18}

4. Análisis de la varianza. (ANOVAS)

En estadística, el análisis de la varianza (ANOVA, ANalysis Of VAriance, según terminología inglesa) es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas.

Las técnicas iniciales del análisis de varianza fueron desarrolladas por el estadístico y genetista R. A. Fisher en los años 1920 y 1930 y es algunas veces conocido como "Anova de Fisher" o "análisis de varianza de Fisher", debido al uso de la distribución F de Fisher como parte del contraste de hipótesis.

4.1 Cálculo de las ANOVAS.

El análisis de la varianza parte de los conceptos de regresión lineal.

El primer concepto fundamental es que todo valor observado puede expresarse mediante la siguiente función:

$$Y = B_0 + B_1 * X + e$$

Donde Y sería el valor observado (variable dependiente), y X el valor que toma la variable independiente.

B_0 sería una constante que en la recta de regresión equivale a la ordenada en el origen, B_1 es otra constante que equivale a la pendiente de la recta, y "e" es una variable aleatoria que añade a la función cierto error que desvía la puntuación observada de la puntuación pronosticada.

Por tanto, a la función de pronóstico la podemos llamar "Y prima":

$$Y' = B_0 + B_1 * X$$

Podemos resumir que las puntuaciones observadas equivalen a las puntuaciones esperadas, más el error aleatorio:

$$Y = Y' + e \quad (1.1)$$

Sabiendo este concepto, podemos operar con esta ecuación de la siguiente forma:

1) Restamos a ambos lados de la ecuación (para mantener la igualdad) la media de la variable dependiente:

$$Y - \overline{Y} = Y' + e - \overline{Y}$$

2) Substituimos el error por la ecuación resultante de despejar la ecuación 1.1:

$$e = Y - Y'$$

Por tanto...

$$Y - \overline{Y} = Y' + (Y - Y') - \overline{Y}$$

Y reorganizando la ecuación:

$$Y - \overline{Y} = (Y' - \overline{Y}) + (Y - Y')$$

Ahora hay que tener en cuenta que la media de las puntuaciones observadas es exactamente igual que la media de las puntuaciones pronosticadas:

$$\overline{Y} = \overline{Y}'$$

Por tanto:

$$Y - \overline{Y} = (Y' - \overline{Y}') + (Y - Y')$$

Podemos ver que nos han quedado 3 puntuaciones diferenciales. Ahora las elevamos al cuadrado para que posteriormente, al hacer el sumatorio, no se anulen:

$$(Y - \overline{Y})^2 = [(Y' - \overline{Y}') + (Y - Y')]^2$$

Y desarrollamos el cuadrado:

$$(Y - \overline{Y})^2 = (Y' - \overline{Y}')^2 + (Y - Y')^2 + 2 * (Y' - \overline{Y}')(Y - Y')$$

Podemos ver que tenemos los numeradores de las varianzas, pero al no estar divididas por el número de casos (n), las llamamos Sumas de Cuadrados., excepto en el último término, que es una Suma Cruzada de Cuadrados (el numerador de la covarianza), y la covarianza en este caso es cero (por las propiedades de la regresión lineal, la covarianza entre el error y la variable independiente es cero).

Por tanto:

$$(Y - \overline{Y})^2 = (Y' - \overline{Y}')^2 + (Y - Y')^2$$

O lo mismo que:

$$SS_{total} = SS_{fact} + SS_{error}$$

de un factor, que es el caso más sencillo, la idea básica del análisis de la varianza es comparar la variación total de un conjunto de muestras y descomponerla como:

$$SS_{total} = SS_{fact} + SS_{int}$$

Dónde:

- **SS fact** es un número real relacionado con la varianza, que mide la variación debida al "factor", "tratamiento" o tipo de situación estudiado.
- **SS int** es un número real relacionado con la varianza, que mide la variación dentro de cada "factor", "tratamiento" o tipo de situación.

En el caso de que la diferencia debida al factor o tratamiento no sean estadísticamente significativa puede probarse que las varianzas muestrales son iguales:

$$\hat{s}_{fact} = \frac{SS_{fact}}{a-1}, \qquad \hat{s}_{int} = \frac{SS_{int}}{a(b-1)}$$

Dónde:

- **a** es el número de situaciones diferentes o valores del factor se están comparando.
- **b** es el número de mediciones en cada situación se hacen o número de valores disponibles para cada valor del factor.

Así lo que un simple test a partir de la F de Snedecor puede decidir si el factor o tratamiento es estadísticamente significativo.

5. F-test.

El F-test es cualquier prueba estadística en la que el estadístico de la prueba tiene una distribución F bajo la hipótesis nula. Se utiliza con mayor frecuencia cuando se comparan los modelos estadísticos que han sido instalados en un conjunto de datos, a fin de identificar el modelo que mejor se ajuste a la población de la que se tomaron muestras de los datos. Exactas "F-tests" surgen principalmente cuando los modelos se han ajustado a los datos por mínimos cuadrados. El nombre fue acuñado por George W. Snedecor, en honor a Sir Ronald A. Fisher. Fisher desarrolló inicialmente la estadística como la relación entre la variación en la década de 1920

5.1 Formulación y cálculo.

La mayoría de estas pruebas surgen al considerar una descomposición de la variabilidad de un conjunto de datos en términos de sumas de cuadrados. La estadística de prueba en una prueba F es la relación entre dos cantidades a escala de los cuadrados que reflejan diferentes fuentes de variabilidad. Estas sumas de cuadrados se construyen de modo que la estadística tiende a ser mayor cuando la hipótesis nula no es cierta. A fin de que la estadística para seguir la distribución F bajo la hipótesis nula, las sumas de cuadrados deben ser estadísticamente independientes, y cada uno deben seguir una distribución cuadrada. Esta última condición está garantizada si los valores de los datos son independientes y distribuidos normalmente con una varianza común.

El F-test en el análisis unidireccional de varianza se utiliza para evaluar si los valores esperados de una variable cuantitativa dentro de varios grupos predefinidos diferentes entre sí. Por ejemplo, supongamos que un ensayo clínico compara cuatro tratamientos. El F- test, a partir de la ANOVA, se puede utilizar para evaluar si alguno de los tratamientos es en promedio superior, o inferior, a los demás frente a la hipótesis nula de que los cuatro tratamientos producen la misma respuesta media. Lo que significa que se realiza una sola

prueba para detectar cualquiera de las varias posibles diferencias. Alternativamente, se podría llevar a cabo pruebas por parejas entre los tratamientos (por ejemplo, en el ejemplo de ensayo médico con cuatro tratamientos que podríamos llevar a cabo seis pruebas entre pares de tratamientos) . La ventaja del F-test es que no se necesita comprobar la validez de especificar qué tratamientos se van a comparar, y no es necesario tener que ajustar para hacer comparaciones múltiples. La desventaja del F - test es que si se rechaza la hipótesis nula, no sabemos qué tratamientos se puede decir que sea significativamente diferente de los demás.

La fórmula para el cálculo del F-test:

$$F = \frac{S_X^2}{S_Y^2}$$

Que se calculará a partir de los valores de las medias:

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \qquad \overline{Y} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Y_i$$

Y las varianzas:

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \overline{X}\right)^2 \quad S_Y^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m} \left(Y_i - \overline{Y}\right)^2$$

El F-test tiene una distribución n - 1 y m - 1 grados de libertad si la hipótesis nula de igualdad de varianzas es cierta. La hipótesis nula se rechaza si F es demasiado grande o demasiado pequeño.

Anexo III: Cálculos.

En este apartado se detallarán todos los cálculos obtenidos una vez realizados los ensayos prácticos. Estos resultados obtenidos mediante el Metodo Taguchi servirán para realizar las conclusiones correspondientes y poder verificar la finalidad de presente proyecto.

1. Toma de medidas.

Las tres medidas fundamentales a partir de las cuales podemos realizar los cálculos necesarios de los tres coeficientes planteados (MRR, TWR Y TW), son:

- Material arrancado en la pieza en cada ensayo.
- Material perdido por la herramienta en cada ensayo.
- Duración de cada ensayo.

A continuación (tabla 1) se detallan estas tres medidas para cada ensayo práctico realizado:

Número de ensayo.	ELECTRODO		PIEZA		Tiempo de ejecución. (min.)
	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	
1	138,543	138,1254	923,28	904,78	728,33
2	138,1254	137,9154	904,78	885,65	622,85
3	138,9136	138,8333	885,65	866,37	991,966
4	138,8333	137,9965	866,37	848,03	104,616
5	124,9462	124,7297	848,03	828,82	78,666
6	124,7297	124,7051	828,82	809,13	113,5333
7	120,4401	117,5449	809,13	792,99	54,466
8	117,5449	116,5763	792,99	774,85	56,8166
9	116,8196	116,7417	774,85	755,26	74,333
10	116,7417	116,381	755,26	736,45	420,65
11	107,1567	106,9361	736,45	717,77	1449,183
12	106,9361	106,7639	717,77	698,61	2298,066
13	101,5682	100,7532	698,61	680,24	97,75
14	100,7532	100,5513	680,24	661,2	71,2
15	100,8715	100,852	661,2	641,85	175,6833
16	100,852	98,5852	641,85	625,22	48,7
17	104,8651	103,9069	625,22	607,04	46,316667
18	103,9069	103,8219	607,04	583,37	80,966667

Tabla 1- Tabla de medidas.

A partir de estas medidas, se procederá a realizar los cálculos de los tres coeficientes anteriormente mencionados, así como el cálculo de las “Anovas”, como se detalla a continuación.

2. TW. Tasa de desgaste de la herramienta. Tool Wear.

La tasa de desgate de la herramienta relaciona el volumen perdido por la herramienta y la duración del ensayo correspondiente.

2.1 Calculo del TW.

Recordatorio de las fórmulas utilizadas para su cálculo:

$TWR = \frac{V1}{t}$

$V_1 = \frac{m}{\delta}$

$m = m_f - m_i$ (masa final del electrodo – masa inicial del electrodo)

$V_{1=}$Volumen perdido por el electrodo.

t=tiempo (minutos).

Densidad de la herramienta: δ =8960 kg/m^3=8,96×10^{-3} g/mm^3

Número Ensayo	Masa Electrodo (g)			Tempo (min.)	V1 (mm^3)	TW (mm^3/min)
	Inicial	Final	Removida			
1	138,543	138,1254	0,4176	728,33	46,607143	0,064
2	138,1254	137,9154	0,21	622,85	23,4375	0,038
3	138,9136	138,8333	0,0803	991,966	8,9620536	0,009
4	138,8333	137,9965	0,8368	104,616	93,392857	0,893
5	124,9462	124,7297	0,2165	78,666	24,162946	0,307
6	124,7297	124,7051	0,0246	113,5333	2,7455357	0,024
7	120,4401	117,5449	2,8952	54,466	323,125	5,933
8	117,5449	116,5763	0,9686	56,8166	108,10268	1,903
9	116,8196	116,7417	0,0779	74,333	8,6941964	0,117
10	116,7417	116,381	0,3607	420,65	40,256696	0,096
11	107,1567	106,9361	0,2206	1449,183	24,620536	0,017
12	106,9361	106,7639	0,1722	2298,066	19,21875	0,008
13	101,5682	100,7532	0,815	97,75	90,959821	0,931
14	100,7532	100,5513	0,2019	71,2	22,533482	0,316
15	100,8715	100,852	0,0195	175,6833	2,1763393	0,012
16	100,852	98,5852	2,2668	48,7	252,99107	5,195
17	104,8651	103,9069	0,9582	46,316667	106,94196	2,309
18	103,9069	103,8219	0,085	80,966667	9,4866071	0,117

Tabla 2- Cálculo del TW.

2.2 Cálculo de la Anovas correspondientes al TW.

A continuación se detalla en la siguiente tabla el cálculo de la Anova para la tasa de desgaste de la herramienta en función de los ocho parámetros utilizados en el desarrollo práctico.

PARÁMETROS	SS	g.l	Mean. sq
Intensidad	3209.23	2	1604.61
T. descarga	2664.49	2	1332.24
Timer Speed	118.83	2	59.42
Duty Factor	74.87	2	37.44
Comp	39.98	2	19.99
Gain	11.69	2	5.85
Temp. Dielec.	4.88	1	4.88
Relat. With.	4.24	2	2.12

Mediante la eliminación de los parámetros o parámetro con un valor de varianza (Mean square), irrelevante en comparación con los otros, se obtiene la anova en función del factor F.

PARAMETROS	SS	g.l	Mean. sq	F
Intensidad	3209.23	2	1604.61	**757.3**
T. descarga	2664.49	2	1332.24	**628.8**
Timer Speed	118.83	2	59.42	**28.0**
Duty Factor	74.87	2	37.44	**17.7**
Comp	39.98	2	19.99	**9.4**
Gain	11.69	2	5.85	**2.8**
Temp. Dielec.	4.88	1	4.88	**2.3**
ERROR	4.24	2	2.12	

3. MRR. Tasa de eliminación de material. Material removal rate.

La tasa de eliminación de material relaciona el volumen del material arrancado durante un determinado ensayo del proceso de electroerosión con la duración de dicho proceso.

3.1 Cálculo del MRR.

Recordatorio de las fórmulas utilizadas para su cálculo:

$$MRR = \frac{V2}{t}$$

$$V_2 = \frac{m}{\delta}$$

$m=m_f-m_i$ (masa final de la pieza – masa inicial de la pieza)

V2=Volumen de material arrancado en la pieza.

t=tiempo (minutos).

Densidad de la pieza: $\delta = 7700$ kg/m^3=7,7×10^{-3} g/mm^3

Número ensayo	Masa Pieza (g)			Tiempo (min.)	V2 (mm^3/min)	MRR (mm^3/min)
	Inicial	Final	Arrancada			
1	923,28	904,78	18,5	728,33	2402,5974	3,30
2	904,78	885,65	19,13	622,85	2484,4156	3,99
3	885,65	866,37	19,28	991,966	2503,8961	2,52
4	866,37	848,03	18,34	104,616	2381,8182	22,77
5	848,03	828,82	19,21	78,666	2494,8052	31,71
6	828,82	809,13	19,69	113,5333	2557,1429	22,52
7	809,13	792,99	16,14	54,466	2096,1039	38,48
8	792,99	774,85	18,14	56,8166	2355,8442	41,46
9	774,85	755,26	19,59	74,333	2544,1558	34,23
10	755,26	736,45	18,81	420,65	2442,8571	5,81
11	736,45	717,77	18,68	1449,183	2425,974	1,67
12	717,77	698,61	19,16	2298,066	2488,3117	1,08
13	698,61	680,24	18,37	97,75	2385,7143	24,41
14	680,24	661,2	19,04	71,2	2472,7273	34,73
15	661,2	641,85	19,35	175,6833	2512,987	14,30
16	641,85	625,22	16,63	48,7	2159,7403	44,35
17	625,22	607,04	18,18	46,316667	2361,039	50,98
18	607,04	583,37	23,67	80,966667	3074,026	37,97

Tabla 3- Cálculo del MMR.

3.2 Cálculo de la Anovas correspondientes al MRR.

A continuación se detalla en la siguiente tabla el cálculo de la Anova para la tasa de eliminación del material en función de los ocho parámetros utilizados en el desarrollo práctico.

PARAMETROS	SS	g.l	Mean. sq
Intensidad	1907.36	2	953.68
T. descarga	60.85	2	30.43
Gain	29.68	2	14.84
Comp	26.21	2	13.11
Duty factor	25.02	2	12.51
Relat. With	12.35	2	6.17
Timer Speed	9.52	2	4.76
Temp. Dielect.	4.14	1	4.14

Mediante la eliminación de los parámetros o parámetro con un valor de varianza (Mean square), irrelevante en comparación con los otros, se obtiene la anova en función del factor F.

PARAMETROS	SS	g.l	Mean. sq	F
Intensidad	1907.36	2	953.68	**230.4**
T. descarga	60.85	2	30.43	**7.3**
Gain	29.68	2	14.84	**3.6**
Comp	26.21	2	13.11	**3.2**
Duty factor	25.02	2	12.51	**3.0**
Relat. With	12.35	2	6.17	**-**
Timer Speed	9.52	2	4.76	**-**
ERROR	4.14	2	4.14	

4. TWR. Coeficiente de desgaste de la herramienta. Tool Wear Ratio.

El coeficiente de desgaste de la herramienta, es un coeficiente en valor porcentual, que relaciona el volumen de material arrancado en la pieza y el volumen de material perdido por la herramienta o electrodo.

4.1 Cálculo del TWR.

Recordatorio de las fórmulas utilizadas para su cálculo:

$$\text{TWRATIO} = \frac{V1}{V2} \text{ X100 (\%)}$$

$V_{1=}$Volumen de material perdido por el electrodo.

$V_{2=}$Volumen de material arrancado en la pieza.

*Tomando V_1 Y V_2 los mismos valores que los calculados en los apartados 2.1 y 3.1 respectivamente.

Numero de ensayo	V1 (mm^3/min)	V2 (mm^3/min)	TWR (%)
1	46,607143	2402,5974	1,94
2	23,4375	2484,4156	0,94
3	8,9620536	2503,8961	0,36
4	93,392857	2381,8182	3,92
5	24,162946	2494,8052	0,97
6	2,7455357	2557,1429	0,11
7	323,125	2096,1039	15,42
8	108,10268	2355,8442	4,59
9	8,6941964	2544,1558	0,34
10	40,256696	2442,8571	1,65
11	24,620536	2425,974	1,01
12	19,21875	2488,3117	0,77
13	90,959821	2385,7143	3,81
14	22,533482	2472,7273	0,91
15	2,1763393	2512,987	0,09
16	252,99107	2159,7403	11,71
17	106,94196	2361,039	4,53
18	9,4866071	3074,026	0,31

Tabla 4- Cálculo del TWR.

4.2 Cálculo de la Anovas correspondientes al TWR.

A continuación se detalla en la siguiente tabla el cálculo de la Anova para el coeficiente de desgaste de la herramienta en función de los ocho parámetros utilizados en el desarrollo práctico.

PARAMETROS	SS	g.l	Mean. sq
T. descarga	1910.76	2	955.38
Intensidad	442.60	2	221.30
Timer Speed	179.23	2	89.61
Gain	65.13	2	32.57
Comp	45.31	2	22.66
Duty factor	39.02	2	19.51
Relat. With	27.54	2	13.77
Temp. Dielect.	0.00	1	0.00

Mediante la eliminación de los parámetros o parámetro con un valor de varianza (Mean square), irrelevante en comparación con los otros, se obtiene la anova en función del factor F.

PARAMETROS	SS	g.l	Mean. sq	F
T. descarga	1910.76	2	955.38	**71.8**
Intensidad	442.60	2	221.30	**16.6**
Timer Speed	179.23	2	89.61	**6.7**
Gain	65.13	2	32.57	**2.4**
ERROR	66.56	5	13.31	

Se observa como en este apartado se da el caso de la eliminación un mayor número de parámetros debido a que poseían un valor de variancia irrelevante en comparación con los otros parámetros, por lo que el cálculo de la anova representado en la tabla anterior solo depende de cuatro parámetros.

Anexo IV: Materiales utilizados.

A lo largo de todo el proyecto se ha podido observar como herramienta (o electrodo) y pieza, aparecen constantemente y son una parte fundamental tanto en el planteamiento como desarrollo de este proyecto.

Se detallará a continuación los materiales utilizados en cada caso, y sus principales características técnicas.

1. Herramienta o electrodo.

Existe una gran variedad de materiales de los que se puede componer un electrodo a la hora de realizar un trabajo de electroerosión por penetración como se detalla en el anexo I.

Los ensayos realizados en este proyecto son llevados a cabo por electrodos de las mismas características para que su variedad no tenga repercusión en los resultados del mismo.

En este caso, se utilizaron electrodos de **cobre electrolítico**, siendo sus principales características las representadas en la siguiente tabla:

Diámetro	**14 mm**	
Densidad	**8,96 g/cm^3**	
Punto de fusión	**1083 ºC**	
Conductividad eléctrica	**%I.A.C.S. 100-101**	
Resistividad eléctrica (20 ºC)	**0,15328 Ω/m**	
Composicion química nominal	**Cu>=99.90**	
Propiedades mecánicas	**Resistencia**	**22-35 kg/mm^2**
	Límite de elasticidad	**7-30 kg/mm^2**
	Alargamiento	**5-40 %**
	Dureza Brinell	**42-115 HB**
	Módulo de elasticidad	**12.000-13.500 kg/mm^2**
Aplicaciones	**Anillos rozantes Conductores eléctricos Electrodos para electroerosión Elementos de maquinaria Aparallaje eléctrico**	
Formas de suministro	**Barras redondas y cuadradas**	
	Pletinas y Placones	
	Planchas	
	Cintas: Anchos y gruesos normalizados.	
	Tubos: Medidas normalizadas.	
	Forjados: Medidas especiales.	

Tabla 1- Características de los electrodos de cobre electrolítico.

Ejemplos de los electrodos de cobre electrolítico utilizados durante los ensayos prácticos:

Figura 1- Electrodos de cobre electrolítico utilizados durante el proyecto.

2. Pieza.

En el anexo I se detalla cómo el proceso de electroerosión es un método de fabricación óptimo para el mecanizado de dichos aceros, debido a sus características.

La pieza de acero (figura 2) seleccionada para la realización de los ensayos prácticos es una pieza de acero St37-2K según su norma DIN, com um peso inicial de 923,28g. y unas dimensiones de 22x4x2 cm.

Las características de la pieza son las siguientes:

Norma DIN	**St37-2K**		
Densidad	**7700 kg/m^3**		
Marca	**C1**		
Norma UNE	**AE235B**		
W-Nr^o	**1,0037**		
Composición química	**C ≤ 0,20 %**	**Mn ≤ 1,40 %**	
Colores de identificación	**Verde claro**		
Aplicaciones	**Órganos de máquinas** **Pernos, tornillos, tuercas.**		
Características mecánicas	**Rm (Kg/mm^2)**	**Rp02 (Kg/mm^2)**	**A%**
	≥ 36	**≥22**	**≥8**

Tabla 2- Característica de la pieza utilizada .

Imagen de la pieza utilizada:

Figura 2- Imagen de la pieza utilizada.

3. Fluido dieléctrico.

El fluido dieléctrico utilizado (figura 3) en la realización de los ensayos prácticos y en la experiencia de confirmación de este proyecto es un aceite especial destinado para los procesos de electroerosión, y tienes las siguientes características:

- El aceite utilizado tiene una viscosidad de aproximadamente 1,8 cSt (a 20ºC), ideal para la realización de geometrías simples, con altos requisitos de rugosidad.
- Aceite suave, no soluble con un punto de fusión bajo y excelentes propiedades anti-oxidantes.
- Corte de láminas de acero de hasta 200HB de dureza.
- Es insensible a la humedad y evita de engomado y oxidación.
- Las deformaciones por compactación de chapas de acero de inducción, debido a los choques repetidos se reducen en su uso.

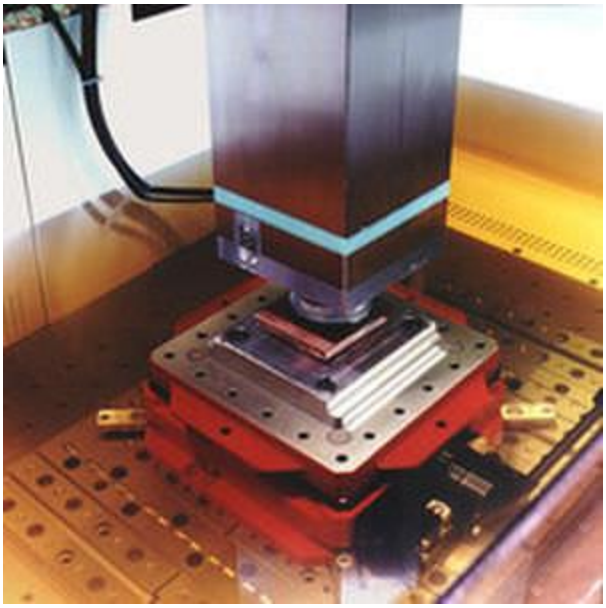


Figura 3- Pieza y electrodo inmersos en un aceite dieléctrico.

Anexo V: Maquinaria.

1. Introducción.

La máquina utilizada para llevar a cabo los ensayos prácticos del proyecto es una máquina de electroerosión por penetración, marca AGIE, modelo AGIETRON COMPACT 3.

A lo largo de este anexo se detallarán las características de la máquina, y se explicarán los componentes que la componen.

2. Características

A continuación se detallan algunas de las características (tabla 1) más importantes de la máquina de electroerosión utilizada en la realización de los ensayos prácticos llevados a cabo en el presente proyecto.

AGIETRON COMPACT 3	
TOTAL PESO (SIN DIELECTRICO)	4500 kg
ENERGÍA DE LA MÁQUINA	15 KW
CAPACIDAD DIELECTRICO	680 L
MAXIMA CORRIENTE ADMISIBIE	60 A
RUOSIDAD MÍNIMA	0.1 µm
CHANGER DE 16 ELECTRODOS	
MOVIMIENTOS DE LOS EJES	
EJE X	500 mm
EJE Y	350 mm

EJE Z	500 mm
RESTRICCIONES EN LA PIEZA	
MAXIMA LONGITUD	1035mm
MAXIMO ANCHO	740 mm
MAXIMA ALUTRA	450 mm
MAXIMO PESO	400 kg

Tabla 1- Características y especificaciones de la máquina de electroerosión Agie Compact 3.

3. Componentes.

Toda máquina de electroerosión se puede dividir, fundamentalmente en cinco componentes. Se pueden detallar de manera individual, pero su trabajo conjunto forma la máquina que hace posible el ciclo de electroerosión, como se explican a continuación:

1. Sistema hidráulico/neumático.

Es el responsable tanto de la mesa de trabajo (figura 1) como del componente al cual se ajusta el electrodo. Tiene capacidad de realizar movimientos lineales en los ejes X, Y y Z, según las limitaciones de cada máquina, como se puede apreciar en la tabla de características.

Figura 1- Mesa de trabajo.

Esta imagen (figura 1) corresponde a dicho sistema. En la mesa de trabajo se ajustará la pieza a mecanizar, y el electrodo se fijará en la componente vertical, para que a través del desplazamiento de dicha componente, el electrodo penetre en la pieza.

2. Sistema de control.

El ordenador de la siguiente imagen (figura 2) es el componente fundamental del sistema en cuestión.

Figura 2- Ordenador del sistema de control

Es el responsable del dialogo entre el operario y la máquina. En él se introducirán los distintos programas deseados para cada proceso de electroerosión que se quiera realizar, como por ejemplo el programa utilizado en este proyecto (Memoria 6.3.1). El desplazamiento del electrodo o de la mesa de trabajo, así como órdenes específicas o detener la máquina en caso de emergencia también son posibles en a través del panel de control de este sistema.

3. Generador de impulso.

Es el componente encargado de producir la tensión eléctrica y una intensidad de corriente deseada para cada proceso (figura 3).

Mediante el giro de la palanca roja que se aprecia en la imagen de la derecha se pondrá en funcionamiento el generador.

Figura 3- Generador de impulso.

Su funcionamiento se puede representar en el siguiente y sencillo esquema eléctrico (figura 4):

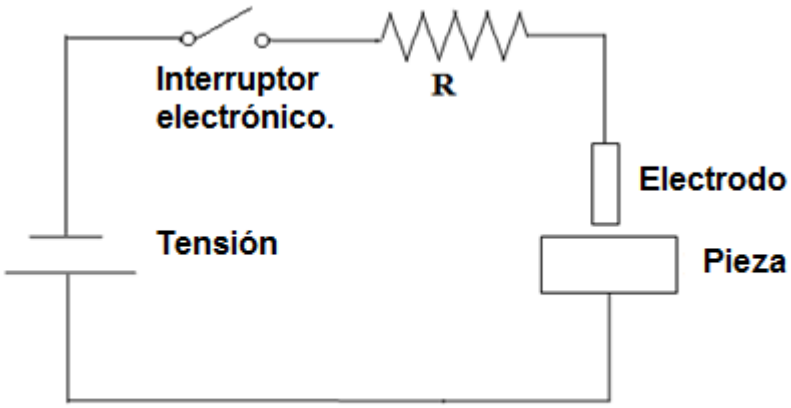


Figura 4- Esquema eléctrico del generador.

El interruptor electrónico permitirá el paso de corriente hasta el electrodo, que utilizará la intensidad de la corriente eléctrica para penetrar en la pieza mediante el arranque de material de esta última.

Es el componente más caro de la máquina de electroerosión.

4. Unidad de dieléctrico.

Sistema responsable de todas las operaciones del fluido dieléctrico dentro de la máquina de electroerosión (figura 5). Sus principales funciones son la circulación del fluido, la limpieza o depuración de dicho fluido una vez terminado el mecanizado de la pieza..etc.

Figura 5- Señalización del lugar que ocupa la unidad de dieléctrico dentro de la máquina de electroerosión.

5. Termorregulador.

El termorregulador (figura 6) es un sistema separado de la máquina conectado a ella mediante una tubería. Es el responsable de la variación de la temperatura del fluido dieléctrico. Antes de encender la máquina, se programa el termorregulador a la temperatura deseada, y se deja actuar durante unos minutos hasta que el fluido alcance la temperatura deseada. A través de la tubería anteriormente mencionada, la unidad de dieléctrico hará circular el fluido desde el termorregulador hasta el tanque de trabajo para que pueda dar comienzo el proceso de electroerosión.

En la imagen inferior se observa: Una llave roja para encender/apagar el termorregulador. Un “display” para programar la temperatura del fluido a la deseada por el operario de la máquina.

Figura 6- Termorregulador.

4. Tabla de códigos.

En la siguiente tabla se detallan las equivalencias a la hora de programar la máquina de electroerosión Agietron Compact 3, entre el código a utilizar, y el valor real de algunos de sus parámetros.

Agietron Compact 3 (FW 0701)				
NC CODE	**T=P µs**	**I real (Amp.)**	**Type Sbox**	**U (Volt)**
0	0.4	0	0.00	60
1	1.3	0.8	1.08	80
2	1.8	1.4	1.57	100
3	2.4	1.8	2.56	120
4	3.2	2.4	3.85	150
5	4.2	3.2	5.68	160
6	5.6	4	5.73	180
7	7.5	5.6	7.34	250
8	10	9.9	10.98	-
9	13	11.4	14.85	-
10	18	15.8	26.91	-
11	24	19.3	29.11	-
12	32	25.4	40.01	-
13	42	37.1	64.11	-
14	56	51.4	73.31	-
15	75	65.6	97.41	-
16	100	100.1	-	-
17	130	137.1	-	-
18	180	165.6	-	-
19	240	200.1	-	-
20	320	237.1	-	-
21	420	265.6	-	-
22	560	300.1	-	-
23	750	400.1	-	-
24	1000	500.1	-	-
25	1300	-	-	-
26	1800	-	-	-
27	2400	-	-	-
28	3200	-	-	-
29	4200	-	-	-
30	5600	-	-	-
31	7500	5500.1	-	-

PRESUPUESTO

ÍDNICE DEL PRESUPUESTO.

1. Gastos 122

1.1. Materias primas 122

1.2. Mano de obra + gastos de taller 122

1.3. Gasto eléctrico 123

2. Coste unitario del agujereado por electroerosión. 123

3. Balance económico después de la optimización del proceso. 124

3.1. Ahorro anual en la refrigeración del fluido dieléctrico 124

1. Gastos.

1.1 Materias primas.

Fluido dieléctrico:

Coste aceite dieléctrico para electroerosión: 499 € / bidón 208 litros.

Precio del litro de aceite: 2,40 €

Capacidad tanque de dieléctrico de la máquina: 680 litros.

Coste total: 2,40 € / litro x 680 litros= **1632 €**

Electrodos:

Coste electrodos de cobre electrolítico para electroerosión: 16,50 € / kilogramo

Número de electrodos a utilizar: 10 electrodos

Peso medio de cada electrodo: 120 gramos

Precio individual de electrodo: 2 €

Coste total = 10 electrodos x 2€ / electrodo= **20 €**

Gasto total= 1652 €

1.2 Mano de obra + gastos de taller.

Salario del operario + gastos de taller: 12 € /hora.

Tiempo estimado de duración de cada ensayo= 4 horas.

- Programación de la máquina = 10 minutos.
- Refrigeración fluido dieléctrico= 20 minutos. (si necesario)
- Tiempo medio de erosión= 3 horas.
- Toma de medidas, pesado de pieza y herramienta, limpieza de la máquina= 30 minutos.

Tiempo total estimado: 4 horas x 19 ensayos= 76 horas.

Coste total mano de obra: 12 €/ hora x 76 horas = **912 €**

1.3 Gasto eléctrico.

Potencia consumida por la máquina de electroerosión: 15 kw.

Tiempo estimado funcionamiento de la máquina: 76 horas.

Precio kw/hora= 0.130485 €/kwh (según tarifa Endesa).

Coste total= 15 kw x 76 horas x 0.130485 €/kwh= **149 €**

2. Coste unitario del agujereado por electroerosión.

Coste electrodo= 2€ / 2= 1 € (*cada electrodo puede realizar 2 ensayos.)

Coste mano de obra + gastos de taller= 12 € hora x 4 horas cada ensayo = 48 €

Gasto eléctrico = 15 kw x 4 horas x 0.130485 €/kwh = 7.8291 €

El gasto del fluido dieléctrico es despreciable en este caso debido a los múltiples usos que pueden llevarse a cabo con el mismo aceite.

Coste total= 57 €

3. Balance económico después de la optimización del proceso.

3.1 Ahorro anual en la refrigeración fluido dieléctrico.

Tiempo refrigeración= 20 minutos.

Número refrigeraciones al día= 2.

Días laborales= 240 días.

Tiempo total= 160 horas

Ahorro gasto eléctrico= 15 kw x 80 h x 0.130485 €/kwh= **315 €/año.**