

## Tesis Doctoral

# UNA NUEVA APROXIMACIÓN A LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE WEDM EN BASE A LA EXPERIMENTACIÓN Y LA ANALÍTICA DE CANTIDADES MASIVAS DE DATOS

Presentada por  
**Dña. Aintzane Conde Fernández**

en el  
**Departamento de Ingeniería Mecánica**

de la  
**Universidad del País Vasco / Euskal Herriko  
Unibertsitatea (UPV/EHU)**

para la obtención del título  
**Doctora Ingeniera Industrial**

dirigida por  
**Dr. José Antonio Sánchez Galíndez y  
Dra. María Soraya Plaza Pascual**

Bilbao, septiembre de 2018

## **Tesis Doctoral**

# **UNA NUEVA APROXIMACIÓN A LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE WEDM EN BASE A LA EXPERIMENTACIÓN Y LA ANALÍTICA DE CANTIDADES MASIVAS DE DATOS**

Presentada por  
**Dña. Aintzane Conde Fernández**

en el  
**Departamento de Ingeniería Mecánica**

de la  
**Universidad del País Vasco / Euskal Herriko  
Unibertsitatea (UPV/EHU)**

para la obtención del título  
**Doctora Ingeniera Industrial**

dirigida por  
**Dr. José Antonio Sánchez Galíndez y  
Dra. María Soraya Plaza Pascual**

Bilbao, septiembre de 2018

*Vive como si fueras a morir mañana,  
aprende como si fueras a vivir para siempre*

*Mahatma Gandhi*



## AGRADECIMIENTOS

*En estas líneas me gustaría expresar mi cariño y agradecimiento a las personas que me han acompañado durante estos años. Y el primero de ellos es, sin duda, mi co-director de tesis José Antonio quien, además de guiarme como nadie en esta ardua tarea, ha sido el culpable de despertar pasión por mi trabajo, tanto como investigadora como docente. Gracias de todo corazón por haberme dado tanto, más de lo que pudiera expresar.*

*Y precisamente en el ámbito docente me gustaría dar las gracias a Ixaka, por permitirme hacer una de las cosas que más me gustan en la vida: intentar que las personas aprendan lo poco que pueda enseñarles. Gracias a todos y cada uno de vosotros, mi grupo de IMH, por darme un lugar donde trabajar en equipo es una realidad y donde he encontrado grandes amigos y compañeros: Itziar E. y Josetxo (milesker zuen animo eta laguntzagatik), Itziar I., Iker, Monika, Roberto, Edurne, Naiara, Beñat, Aitor, Egoitz, Jaione, Iñigo, Mario, Fermín... y todos los que por espacio me dejo.*

*Pero todo esto empezó un poco antes, cuando le pedí a la co-directora de este trabajo entrar a formar parte del Taller de Fabricación Avanzada. Gracias Soraya por darme esa oportunidad, por ser la primera en enseñarme qué es la Electroerosión que tantos buenos momentos me ha dado pero, sobre todo, por haberte convertido en alguien a quien acudir cuando las cosas no salen como nos gustaría. Sin ti no hubiera comenzado este camino.*

*En este lugar es donde conocí a unos compañeros a los que adoro, porque se han convertido en amigos a los que echo de menos: Haizea (sabes cuánto te aprecio), Octavio, Mario, Lander, Iker, Endika, Iñaki, Mada, Natalia, Gorka, Álvaro, Exe, Olatz... y todos los que habéis formado parte durante estos años. También quiero dar las gracias a David, Edu, Marta, Iñaki, Zhaohui, Julen, Jun... habéis sido imprescindibles.*

*Y aún antes, cuando empecé la carrera, tengo que agradecer a esos amigos, que me dieron lo que llevaba años buscando y que por fin encontré. Miguel, tú, que fuiste el primero en confiar en mis posibilidades y ver lo que yo era incapaz de imaginar, gracias, porque "las cosas no son como empiezan sino como acaban" y sin tu ayuda no las hubiera acabado.*

*Finalmente, en lo personal, querría dedicar estas líneas a mis padres, mi abuela y mi hermana (Angela, estás en este grupo), por ser las cuerdas que tiran de mí hacia delante cuando me faltan fuerzas para hacerlo. A Jonan, porque siempre tengo una palabra de ánimo de tu parte. A mis amigas de la Ikas, por acogerme sin duda y hacerme partícipe de sus locuras, por su sinceridad y por las sonrisas que me arrancan. A mis amigos de Bakio, que se han convertido en amigos de verdad, con mayúsculas, parte de esto es vuestro: Joana, Meritxu, Lander, Maita, Iraide.... Y a mi Itsas, mi nena, que estás, aunque no estemos, todo mi cariño para ti.*

*Esto no es un final, sino un nuevo comienzo. Os quiero.*

Aintzane



## RESUMEN

El proceso de corte mediante electroerosión por hilo siempre se ha caracterizado por conseguir tolerancias ajustadas en las piezas fabricadas, aun cuando estas contienen geometrías complejas, con cambios bruscos de dirección. Sin embargo, las necesidades cada vez más exigentes requeridas por sectores como el automovilístico o el aeronáutico han potenciado la investigación para la minimización de estos errores. Así, caracterizar y disminuir la vibración y deformación del hilo, el cual provoca las desviaciones en las piezas, sobre todo en los cambios de dirección, ha sido una de las tareas sobre las que más se ha investigado a lo largo de los años, aun cuando todavía no ha sido explicado su comportamiento en su totalidad.

Por eso, en este trabajo se presenta, primero, un estudio para la caracterización del error en trayectorias circulares de diferente radio, con el fin de proponer, por un lado, una nueva metodología experimental para la medición directa del *wire-lag* o retraso del hilo, alejándose de los estudios y modelos teóricos empleados hasta la fecha; y, por otro, dos metodologías diferentes para corregir el error generado en las trayectorias circulares. La primera se trata de una compensación geométrica y, la segunda, del uso de una red neuronal artificial que prediga este error (evitando así la gran batería de ensayos a realizar) y de una técnica de optimización que genere una trayectoria alternativa para minimizar la desviación predicha.

Una vez visto el buen resultado del empleo de las redes neuronales en el campo de la precisión, se propone su uso para la detección de eventos durante el proceso de corte. Puesto que estas técnicas tienen una enorme capacidad para manejar y analizar gran cantidad de datos, se utilizan las señales obtenidas del proceso de electroerosión para tal fin. Como ejemplo de aplicación de esta alternativa, se estudia el cambio del comportamiento de las señales de tensión obtenidas en el corte de una pieza con un cambio de espesor.

Por otro lado, estas mismas señales de tensión son utilizadas para relacionarlas, junto con otras variables, con el espesor de pieza, de forma que pueda obtenerse una ecuación para identificar el espesor que se está erosionando en cada momento. Un estudio más exhaustivo de los resultados obtenidos permite obtener, a su vez, la antelación con la que puede determinarse una variación en el espesor a cortar.

Por tanto, y como resumen de lo planteado en los párrafos anteriores, se puede concluir que el objetivo principal de esta tesis es demostrar la posibilidad de mejorar aspectos concretos del proceso de electroerosión por hilo mediante el uso de técnicas experimentales y de analítica de cantidades masivas de datos como alternativa a los modelos teóricos existentes en la literatura.



# CONTENIDO

I.	Introducción .....	3
I.1	Contexto industrial y científico de la electroerosión por hilo.....	3
I.1.1	Principales novedades en las máquinas de electroerosión por hilo.....	4
I.2	Objetivos .....	8
I.3	Organización de la memoria .....	9
II.	Estado del arte .....	13
II.1	Introducción .....	13
II.2	Precisión en electroerosión por hilo .....	14
II.2.1	Estudio de las fuerzas que actúan sobre el hilo mediante su modelización.....	15
II.2.2	Vibración y deformación del hilo .....	18
II.2.3	Precisión en el corte de esquinas y círculos.....	34
II.3	Control y monitorización del proceso .....	47
II.3.1	Clasificación y detección de la posición de las descargas .....	47
II.3.2	Cambio de espesor.....	51
II.4	Aprendizaje Automático ( <i>Machine Learning</i> ) .....	54
II.4.1	Introducción a las Redes Neuronales.....	54
II.4.2	Aplicaciones de las Redes Neuronales en Mecanizado .....	56
II.5	Conclusiones .....	63
III.	Caracterización del error en trayectorias circulares .....	67
III.1	Introducción .....	67
III.2	Causas que generan un error en las trayectorias circulares .....	68
III.2.1	Simulación del error generado en trayectorias con cambios de dirección.....	68
III.2.2	Desequilibrio de áreas de erosión en el corte de trayectorias circulares.....	70
III.3	Estudio experimental para la caracterización de las desviaciones en trayectorias circulares.....	73

III.3.1	Estudio preliminar .....	74
III.3.2	Estudio experimental sobre el defecto de erosión generado en el corte de trayectorias circulares .....	78
III.3.3	Propuesta de mejora mediante una compensación geométrica .....	84
III.4	Defecto de erosión generado por la envolvente del hilo.....	92
III.4.1	Estudio experimental .....	92
III.4.2	Nueva metodología para la medición del error en círculos .....	98
III.4.3	Análisis de los resultados obtenidos .....	105
III.5	Relación del tiempo de ionización con el corte de trayectorias circulares .....	110
III.6	Conclusiones.....	112
IV.	Predicción y corrección del error en trayectorias circulares mediante ANNs y métodos de optimización .....	115
IV.1	Introducción .....	115
IV.2	Objetivo .....	116
IV.3	Metodología experimental.....	116
IV.3.1	Configuración de entradas y salidas de la ANN y generación de la base de datos para entrenarla.....	118
IV.3.2	Estrategia de entrenamiento de la ANN .....	123
IV.3.3	Validación de la arquitectura de la ANN y evaluación de su rendimiento.....	124
IV.3.4	Optimización de la trayectoria del hilo mediante el uso de la técnica de Simulated Annealing.....	128
IV.4	Discusión de los resultados .....	129
IV.5	Conclusiones.....	138
V.	Detección de eventos en WEDM en función de las señales obtenidas del proceso.....	143
V.1	Introducción .....	143
V.2	Objetivo .....	144
V.3	Comprobación de la clasificación de las descargas propuesta en la literatura.....	144
V.4	Uso de redes neuronales para la detección de eventos durante el proceso de corte por WEDM	152

V.4.1	Procedimiento experimental .....	152
V.4.2	Análisis de los resultados .....	155
V.5	Detección del espesor de pieza durante el corte por WEDM mediante el uso del tiempo de ionización de las descargas .....	160
V.5.1	Procedimiento experimental .....	160
V.5.2	Análisis de los resultados .....	166
V.6	Conclusiones .....	171
VI.	Conclusiones y líneas futuras .....	175
VI.1	Conclusiones .....	175
VI.2	Líneas futuras .....	180
VII.	Bibliografía .....	181



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Datos de participación en la BIEMH [BIEMH]. .....	3
Figura I.2. Máquinas de electroerosión por hilo de alta precisión: a) para micro-mecanizado [GFMS]; b) con control simultáneo de 8 ejes [ONA]. .....	4
Figura I.3. Aplicaciones del proceso de WEDM: a) disco de geometría tipo <i>firtree</i> [GFMS]; b) molde para su uso en el sector automovilístico [ONA]. .....	6
Figura I.4. Máquina de electroerosión que permite la adición de funciones adicionales [Fanuc]. .....	7
Figura I.5. Artículos publicados sobre electroerosión por hilo (palabras clave “WEDM” y “wire EDM”) por trienio en ScienceDirect [ScienceDirect]. .....	7
Figura II.1. Clasificación de artículos durante 2016 en función de las principales líneas de investigación en electroerosión por hilo [ScienceDirect]. .....	14
Figura II.2. Esquema del modelo generado para la medición de la impedancia del circuito entre hilo y pieza [Hada, 2013]. .....	16
Figura II.3. Área de vibración del hilo [Kinoshita, 1984]. .....	19
Figura II.4. Esquema de la vibración del hilo real [Puri, 2003 1]. .....	20
Figura II.5. Esquema simplificado de la vibración del hilo [Beltrami, 1996]. .....	21
Figura II.6. Esquema de la vibración del hilo simplificado [Puri, 2003 1]. .....	23
Figura II.7. Esquema de la vibración del hilo [Han, 2007]. .....	24
Figura II.8. Esquema de la flexión del hilo [Chen, 2014]. .....	25
Figura II.9. Esquema de la flexión del hilo [Zhang, 2014]. .....	27
Figura II.10. Esquema de fuerzas analizadas en WEDM [Chen, 2015]. .....	28
Figura II.11. Esquema de la recogida de imágenes del movimiento del hilo [Okada, 2010]. .....	30
Figura II.12. Recogida de imágenes: a) captación de las imágenes; b) esquema del corte en diferentes posiciones del hilo [Liang, 2014]. .....	31
Figura II.13. Ejemplo de descarga normal y descarga anormal según Liang [Liang, 2014]. .....	32
Figura II.14. Generación de pieza: a) trayectoria generada; b) vista de detalle de la intersección entre la <i>Trayectoria 1</i> y la <i>Trayectoria 2</i> [Liang, 2014]. .....	32
Figura II.15. Pieza obtenida para la cuantificación del <i>wire-lag</i> [Liang, 2014]. .....	33
Figura II.16. Esquema de la observación de la vibración del hilo según su dirección: a) paralela; b) perpendicular [Kamei, 2016]. .....	34
Figura II.17. Trayectoria del hilo para la corrección de esquinas [Dekeyser, 1989]. .....	35
Figura II.18. Definición del <i>ángulo de descarga</i> [Hsue, 1999]. .....	36

Figura II.19. Parámetros a comparar en la mejora del corte de esquinas propuesta por Yan mediante el control de la tensión [Yan, 2004].	38
Figura II.20. Esquema: a) del corte de esquina; b) parámetros del error de esquina [Sanchez, 2007 1].	39
Figura II.21. Curvatura permanente del corte de una esquina exterior como resultado de la fuerza electromagnética en un material ferromagnético [Dodun, 2009].	41
Figura II.22. Modelizado de la trayectoria del centro del hilo en un ángulo: a) recto; b) agudo; c) obtuso [Chen, 2014].	43
Figura II.23. Piezas del sector aeronáutico estudiadas para su realización por SEDM y WEDM: a) <i>blisk</i> [Mateo, 2014]; b) sujeción entre el rotor de la turbina y los álabes mediante uniones de tipo <i>firtree</i> [TeBa].	44
Figura II.24. Ejemplo de probeta para el corte de esquinas de diferente ángulo y radio de redondeo para: a) ángulos convexos; b) ángulos cóncavos [Firouzabadi, 2015].	46
Figura II.25. Tipos de descarga según la clasificación de Caggiano [Caggiano, 2016].	48
Figura II.26. Esquema de una neurona biológica.	54
Figura II.27. Comparativa entre una neurona artificial y una biológica.	55
Figura II.28. Esquema de una red neuronal.	55
Figura II.29. Ejemplo de una arquitectura tipo RNN [Arriandiaga, 2016_2].	58
Figura III.1. Envolvente vibratoria del hilo basada en el trabajo de Kinoshita [Kinoshita, 1984]: a) vista superior; b) vista lateral.	68
Figura III.2. Representación del efecto de concavidad a lo largo del espesor de la pieza.	69
Figura III.3. Error generado por el <i>wire-lag</i> modelizado mediante MATLAB® en: a) una esquina a 90°; b) un radio de 0,8 mm.	69
Figura III.4. Programación de la curva de persecución.	70
Figura III.5. Área de erosión exterior e interior en: a) un corte recto; b) un corte con cambio de dirección.	71
Figura III.6. Esquema de la diferencia de áreas erosionadas en el corte de un círculo entre dos instantes de tiempo.	71
Figura III.7. Tendencia de dispersión del desequilibrio de áreas calculado para diferentes espesores: a) área exterior; b) área interior.	72
Figura III.8. Ejemplo del desequilibrio de áreas en función del radio erosionado para un espesor de pieza de 100 mm: área exterior (azul) y área interior (rojo).	73
Figura III.9. Ejemplo de la: a) geometría utilizada para la erosión de los círculos; b) secuencia de planos medidos.	75

---

Figura III.10. Ejemplo de la evolución del error en el corte de un círculo cortado por WEDM. .	75
Figura III.11. Evolución del error de la probeta de 3 mm de radio en función del espesor para cada plano medido.....	78
Figura III.12. Comparación del tiempo necesario para la fabricación de una probeta en función del espesor y radio. ....	79
Figura III.13. Geometría de la probeta analizada.....	81
Figura III.14. Planos de medición: a) superior (a 1,5 mm de la superficie superior); b) medio-superior (a 40 mm de la superficie superior o en la sección intermedia de la probeta); c) medio-inferior (a 40 mm de la superficie inferior o en la sección intermedia de la probeta); d) inferior (a 1,5 mm de la superficie inferior).....	81
Figura III.15. Ejemplo del resultado de la medición de una probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm en el plano: a) superior; b) medio-superior; c) medio-inferior; d) inferior. ....	83
Figura III.16. Propuesta de corrección geométrica: a) ejemplo de medición; b) modelización mediante Matlab® de la corrección geométrica.....	84
Figura III.17. Resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ en una probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm: a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior. ....	86
Figura III.18. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ en una probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm (Ensayo 1 y Ensayo 1.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior. ....	87
Figura III.19. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ en una probeta de espesor 150 mm y radio 5 mm (Ensayo 2 y Ensayo 2.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior. ....	88
Figura III.20. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ en una probeta de espesor 40 mm y radio 5 mm (Ensayo 3 y Ensayo 3.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior. ....	89
Figura III.21. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 35 $\mu\text{m}$ en una probeta de espesor 100 mm y radio 3 mm (Ensayo 4 y Ensayo 4.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior. ....	90
Figura III.22. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 45 $\mu\text{m}$ en una probeta de espesor 100 mm y radio 8 mm (Ensayo 5 y Ensayo 5.c): a) En el plano superior; b) En el plano medio-superior. ....	90
Figura III.23. Efecto del <i>wire-lag</i> generado en la pieza en función del radio erosionado. ....	93

Figura III.24. Geometrías de pieza para la evaluación del <i>wire-lag</i> y el <i>ce</i> consistente en: a) una interpolación circular; b) tres interpolaciones circulares concatenadas. ....	94
Figura III.25. Planos de medición para la evaluación del <i>wire-lag</i> . ....	95
Figura III.26. Ejemplo de medición del plano medio-superior de una pieza de: a) Espesor 100 mm y radio 3 mm; b) Espesor 100 mm y radios de 2 mm. ....	95
Figura III.27. Resultados del <i>CIF</i> en función del radio erosionado. ....	97
Figura III.28. Geometría de las piezas erosionadas para la medición del <i>wle</i> en: a) un corte recto; b) una interpolación circular. ....	99
Figura III.29. Geometría de las piezas erosionadas para la medición del <i>ce</i> en: a) un corte recto; b) una interpolación circular. ....	100
Figura III.30. Ejemplo de topografía rotada y nivelada. ....	101
Figura III.31. Perfil medio extraído. ....	101
Figura III.32. Perfil medio extraído filtrado con una longitud de corte de 4mm. ....	102
Figura III.33. Ejemplo de la función de estimación de cambio de altura aplicando una longitud de corte de 0,8 mm. ....	103
Figura III.34. Resultado de medición del <i>wle</i> en un espesor de pieza de 60 mm cuando: a) la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar; b) la presión del dieléctrico es de 5 bar. ....	104
Figura III.35. Resultado de medición del <i>wle</i> en función del radio erosionado para diferentes espesores de pieza. ....	106
Figura III.36. Error en el corte de esquina predicho por la curva tractriz como una función del radio erosionado: predicción usando el valor del <i>wire-lag</i> de un corte recto (azul) y usando valor dependiente del radio (rojo). ....	107
Figura III.37. Resultado de medición del <i>ce</i> en función del radio erosionado para diferentes espesores de pieza. ....	109
Figura III.38. Resultado de medición del <i>ce</i> en función del radio erosionado para diferentes espesores de pieza. ....	111
Figura IV.1. Uso de la RNN y la técnica de optimización SA para la corrección de círculos realizados mediante WEDM. ....	117
Figura IV.2. Arquitectura de la RNN utilizada. ....	118
Figura IV.3. Ejemplo de geometría de pieza (radios 5 mm, 9 mm y 12 mm en espesor de 70 mm). ....	119
Figura IV.4. Metodología de medida: planos medidos. ....	120
Figura IV.5. Metodología de medida: resultado de medida y bandas de tolerancia. ....	121

---

Figura IV.6. Error $mMAPE$ para la mejor red para todas las combinaciones de $HN$ y $D$ . .....	124
Figura IV.7. Evolución del radio del círculo en función del ángulo para los valores predichos por la RNN y los valores medidos experimentalmente. Los resultados pertenecen a un círculo de radio 4 mm y un espesor de 50 mm en el plano $j = 5$ ( $Z = -20$ mm). .....	126
Figura IV.8. Evolución del radio del círculo en función del ángulo para los valores predichos por la RNN y los valores medidos experimentalmente. Los resultados pertenecen a un círculo de radio 10 mm y un espesor de 80 mm en el plano $j = 5$ ( $Z = -32$ mm). ....	127
Figura IV.9. Desviación del radio en función del plano medido a lo largo del círculo para el Caso 1 (radio de 10 mm y espesor de 80 mm): a) desviación promedio; b) desviación máxima. Rojo: probeta cortada con la trayectoria del hilo convencional. Azul: probeta cortada con la trayectoria optimizada del hilo. ....	131
Figura IV.10. Desviación radial a lo largo del círculo en el plano de medida número 5 (plano central de la probeta) para el Caso 1: a) probeta cortada con la trayectoria convencional; b) probeta cortada con la trayectoria optimizada. ....	133
Figura IV.11. Desviación del radio en función del plano medido a lo largo del círculo para el Caso 2 (radio de 4 mm y espesor de 50 mm): a) desviación promedio; b) desviación máxima. Rojo: probeta cortada con la trayectoria del hilo convencional. Azul: probeta cortada con la trayectoria optimizada del hilo. ....	134
Figura IV.12. Desviación radial a lo largo del círculo en el plano de medida número 5 (plano central de la probeta) para el Caso 2: a) probeta cortada con la trayectoria convencional; b) probeta cortada con la trayectoria optimizada. ....	135
Figura IV.13. Desviación del radio en función del plano medido a lo largo del círculo para el Caso 3 (radio de 3 mm y espesor de 100 mm): a) desviación promedio; b) desviación máxima. Rojo: probeta cortada con la trayectoria del hilo convencional. Azul: probeta cortada con la trayectoria optimizada del hilo. ....	136
Figura IV.14. Desviación radial a lo largo del círculo en el plano de medida número 5 (plano central de la probeta) para el Caso 3: a) probeta cortada con la trayectoria convencional; b) probeta cortada con la trayectoria optimizada. ....	137
Figura V.1. Evolución durante una descarga singular de: a) la señal tensión; b) la señal de intensidad. ....	145
Figura V.2. Señal de tensión de la descarga de tipo $D3$ . ....	146
Figura V.3. Señal de tensión de la descarga de tipo $D2$ . ....	147
Figura V.4. Señal de tensión de la descarga de tipo $D1$ . ....	147
Figura V.5. Señal de tensión de la descarga de tipo $D0$ . ....	148

Figura V.6. Señal de tensión de la descarga de tipo <i>D00</i> . .....	148
Figura V.7. Ejemplo de una secuencia de descargas recogida mediante un osciloscopio: señal de tensión (azul) y señal de intensidad (rojo). .....	149
Figura V.8. Ejemplo de un ensayo de 43 secuencias de la señal de tensión en el corte de una pieza de espesor 100 mm.....	151
Figura V.9. Esquema del proceso de corte durante el cambio de espesor.....	153
Figura V.10. Matriz de confusión para los datos <i>Z_all</i> con el modelo CGRU. ....	158
Figura V.11. Matriz de confusión para los datos <i>Z_135</i> con el modelo CGRU. ....	159
Figura V.12. Geometría de la pieza para la obtención de los parámetros <i>U</i> . ....	162
Figura V.13. Aplicación generada con el software Matlab® para la detección del espesor. ....	165
Figura V.14. Geometría de pieza y zonas de registro del Caso de validación 1. ....	166
Figura V.15. Ilustración conjunta de la predicción del espesor (verde) y el CV (rojo) para la posible predicción del espesor (azul).....	167
Figura V.16. Zonas de registro para el Caso de validación 2. ....	169
Figura V.17. Resultado obtenido de la aplicación para el reconocimiento de espesor. ....	169

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III.1. Ensayos realizados para la caracterización del error en trayectorias circulares.....	74
Tabla III.2. Parámetros utilizados para el corte de trayectorias circulares.....	74
Tabla III.3. Desviaciones en círculos realizados en H = 40 mm. ....	76
Tabla III.4. Desviaciones en círculos realizados en H = 70 mm. ....	76
Tabla III.5. Desviaciones en círculos realizados en H = 100 mm. ....	77
Tabla III.6. Factor de defecto de las probetas erosionadas. ....	77
Tabla III.7. Casos analizados en el defecto de erosión de trayectorias circulares. ....	80
Tabla III.8. Parámetros utilizados para el corte de trayectorias circulares.....	80
Tabla III.9. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 1 (100 mm de espesor y radio 5 mm). ....	82
Tabla III.10. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 2 (150 mm de espesor y radio 5 mm). ....	82
Tabla III.11. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 3 (40 mm de espesor y radio 5 mm). ....	82
Tabla III.12. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 4 (100 mm de espesor y radio 8 mm). ....	82
Tabla III.13. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 5 (100 mm de espesor y radio 3 mm). ....	83
Tabla III.14. Compensación geométrica aplicada. ....	85
Tabla III.15. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 1.c (100 mm de espesor, radio 5 mm y corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ ).....	85
Tabla III.16. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 2.c (150 mm de espesor, radio 5 mm y corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ ).....	85
Tabla III.17. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 3.c (40 mm de espesor, radio 5 mm y corrección geométrica de 40 $\mu\text{m}$ ). ....	85
Tabla III.18. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 4.c (100 mm de espesor, radio 3 mm y corrección geométrica de 35 $\mu\text{m}$ ).....	86
Tabla III.19. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 5.c (100 mm de espesor, radio 8 mm y corrección geométrica de 45 $\mu\text{m}$ ).....	86
Tabla III.20. Comparativa de los resultados de la aplicación de la corrección geométrica en el plano superior. ....	91
Tabla III.21. Comparativa de los resultados de la aplicación de la corrección geométrica en el plano medio. ....	91

Tabla III.22. Generalización de la curva tractriz. ....	92
Tabla III.23. Clasificación de los radios en función del fenómeno principal a tener en cuenta en espesor 100 mm. ....	93
Tabla III.24. Parámetros utilizados en el corte de las piezas. ....	94
Tabla III.25. Resultados en una probeta de radio 5 mm y espesor de 100 mm. ....	96
Tabla III.26. Resultados en una probeta de radio 3 mm y espesor de 100 mm. ....	96
Tabla III.27. Resultados en una probeta de radio 2 mm y espesor de 100 mm. ....	96
Tabla III.28. Resultados en una probeta de radio 1 mm y espesor de 100 mm. ....	96
Tabla III.29. Resultados en una probeta de radio 0,8 mm y espesor de 100 mm. ....	97
Tabla III.30. Diferentes formas de terminar el corte para la medición del <i>wle</i> . ....	100
Tabla III.31. Resultado de los filtros utilizados para la medición del <i>wle</i> . ....	102
Tabla III.32. Ensayos realizados para cuantificar el <i>wle</i> y el <i>ce</i> . ....	103
Tabla III.33. Parámetros utilizados para cuantificar el <i>wle</i> y el <i>ce</i> . ....	104
Tabla III.34. Resultado de medición del <i>wle</i> y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar. ....	105
Tabla III.35. Resultado de medición del <i>wle</i> y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico es de 5 bar. ....	106
Tabla III.36. Resultado de medición del <i>ce</i> y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar. ....	108
Tabla III.37. Resultado de medición del <i>ce</i> y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico es de 5 bar. ....	109
Tabla III.38. Porcentaje de diferentes tipos de descarga en función del radio y la presión. ....	110
Tabla IV.1. Valores de espesores y radios de las probetas generadas. ....	119
Tabla IV.2. Parámetros utilizados para el corte de las probetas. ....	120
Tabla IV.3. Ejemplo de las entradas y salidas de la ANN para un espesor de pieza de 100 mm y 3 mm de radio. ....	122
Tabla IV.4. Datos utilizados para entrenar y testear la ANN. ....	123
Tabla IV.5. Parámetros utilizados para el corte de probetas en espesores 50 mm y 80 mm. ...	125
Tabla IV.6. Ensayos de validación. ....	129
Tabla IV.7. Resumen de los resultados de validación. ....	138
Tabla V.1. Tipos de descargas según el tiempo de ionización. ....	146
Tabla V.2. Parámetros de corte utilizados en el ejemplo de la secuencia de descargas. ....	149
Tabla V.3. Parámetros del osciloscopio utilizados. ....	150
Tabla V.4. Ejemplo del resumen de las secuencias clasificadas en un mismo ensayo. ....	150

---

Tabla V.5. Datos utilizados.....	155
Tabla V.6. Resultados del modelo para el conjunto de datos $Z_{all}$ .....	156
Tabla V.7. Resultados del modelo CGRU para el conjunto de datos $Z_{all}$ , $Z_{135}$ y $Z_{15}$ . ....	157
Tabla V.8. Dimensiones de la pieza de calibración de los parámetros $U$ .....	162
Tabla V.9. Parámetros de corte empleados.....	163
Tabla V.10. Calibración de los coeficientes $U$ de los distintos espesores.....	163
Tabla V.11. Número de datos en función del rango de espesor.....	164
Tabla V.12. Estimación del espesor y velocidad media en el Caso de validación 1.....	167
Tabla V.13. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 1. ...	168
Tabla V.14. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 1 utilizando un conjunto de datos independiente del espesor. ....	168
Tabla V.15. Estimación del espesor y velocidad media en el Caso de validación 2.....	170
Tabla V.16. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 2. ...	170
Tabla V.17. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 2 utilizando un conjunto de datos independiente del espesor. ....	171



---

## GLOSARIO

### Acrónimos

AI	Inteligencia Artificial, <i>Artificial Intelligence</i>
ANOVA	Análisis de la varianza, <i>Analysis of variance</i>
BPNN	<i>Backpropagation Neural Network</i>
BiGRU	<i>Bidirectional GRU</i>
CNN	<i>Convolutional Neural Networks</i>
DBN	<i>Deep Belief Network</i>
DL	<i>Deep Learning</i>
DNN	<i>Deep Neural Networks</i>
DoE	Diseño de experimentos, <i>Design of Experiments</i>
WEDM	Electroerosión por hilo, <i>Wire Electrical Discharge Machining</i>
MS-WEDM	Electroerosión por hilo de velocidad media, <i>Medium-Speed Wire Electrical Discharge Machining</i>
HS-WEDM	Electroerosión por hilo de alta velocidad, <i>High-Speed Wire Electrical Discharge Machining</i>
SEDM	Electroerosión por penetración, <i>Sinking Electro-Discharge Machining</i>
GRU	<i>Gated Recurrent Units</i>
KNN	<i>k-nearest neighbor</i>
LSTM	<i>Long Short-Term Memory neural network</i>
CMM	Máquina de medir por coordenadas, <i>Coordinate-Measuring Machine</i>
MPCNN	<i>Max-Pooling Convolutional Neural Networks</i>
FEM	Método de Elementos Finitos, <i>Finite Element Method</i>
MCDNN	<i>Multi-Column Deep Neural Networks</i>

PNN	<i>Probabilistic Neural Network</i>
RNN	<i>Recurrent Neural Network</i>
ANN	Red Neuronal Artificial, <i>Artificial Neural Network</i>
RBM	<i>Rule-Reasoning Mechanism neural network</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SVM	<i>Support Vector Machines neural network</i>
SVR	<i>Support Vector Regression</i>
TBC	Superaleaciones base níquel revestidas con barrera térmica, <i>Thermal barrier-coated nickel-based superalloys</i>
GPU	Tarjetas para procesamiento gráfico, <i>Graphic Processing Units</i>
MRR	Tasa de Arranque del Material, <i>Material Removal Rate</i>
PSO	Técnica de optimización por nube de partículas, <i>Particle swarm optimization</i>
ICT	Técnicas de la Información y la Comunicación, <i>Information and Communication Technologies</i>
HSR	Trenes de alta velocidad, <i>High Speed Railways</i>
CIZ	Zona de interpolación circular, <i>Circular Interpolation Zone</i>
LIZ	Zona de interpolación lineal, <i>Linear Interpolation Zone</i>

---

**Variables**

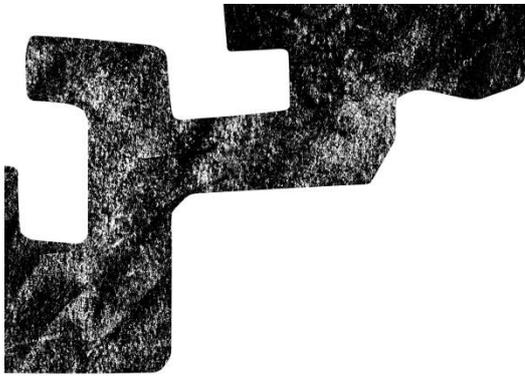
$A$	Amplitud de la vibración del hilo [ $\mu\text{m}$ ]
$d_g$	Anchura del canal generado ( $d + 2g$ ) [ $\mu\text{m}$ ]
$\vartheta$	Ángulo de esquina [ $^\circ$ ]
$C_0$	Ángulo de la descarga [ $^\circ$ ]
$\beta$	Coefficiente de amortiguamiento del material [ $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ]
$TIC$	Coefficiente de identificación de espesor, <i>Thickness Identification Coefficient</i> [-]
$CV$	Coefficiente de Variación, <i>Coefficient of Variation</i> [-]
$k$	Coefficiente de variación del área de la descarga [-]
$\varepsilon_{wl}$	Compensación requerida del <i>wire-lag</i> [ $\mu\text{m}$ ]
$\rho$	Constante dependiente de los parámetros de mecanizado [-]
$K$	Constante de compensación del <i>wire-lag</i> radial [ $\text{mm}^2$ ]
$w$	Deformación del hilo [ $\mu\text{m}$ ]
$J$	Densidad de corriente que recorre un contorno [ $\text{A}/\text{mm}$ ]
$\rho$	Densidad de masa del hilo [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$N_3$	Número de descargas con tiempo de ionización mayor de $10 \mu\text{m}$ [-]
$N_2$	Número de descargas con tiempo de ionización entre $5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ [-]
$N_1$	Número de descargas con tiempo de ionización entre $3 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$ [-]
$N_0$	Número de descargas con tiempo de ionización menor de $3 \mu\text{m}$ [-]
$N_{00}$	Número de descargas con tiempo de ionización nulo [-]
$n$	Desplazamiento horizontal de la esquina [ $\mu\text{m}$ ]
$\alpha_0$	Desplazamiento inicial del hilo [ $\mu\text{m}$ ]
$SD$	Desviación estándar [-]

$d$	Diámetro del hilo [m]
$L$	Distancia entre guías [mm]
$b$	Distancia entre guía y material de pieza [mm]
$gap$	Distancia entre hilo y pieza [ $\mu\text{m}$ ]
$PD$	Duración del pulso de intensidad, <i>Pulse duration</i> [ $\mu\text{s}$ ]
$ce$	Efecto de concavidad, <i>Concavity effect</i> [ $\mu\text{m}$ ]
$wle$	Efecto del retraso del hilo, <i>Wire-lag effect</i> [ $\mu\text{m}$ ]
$e_{wl}$	Error de la trayectoria del corte de esquina [ $\mu\text{m}$ ]
$e_m$	Error de la trayectoria del corte de esquina a $45^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]
$e_e$	Error de la trayectoria del corte a la salida de la esquina [ $\mu\text{m}$ ]
$a_t$	Espacio recorrido por el hilo en un intervalo de tiempo [ $\mu\text{m}$ ]
$h$	Espesor de pieza [mm]
$mt$	Espesor de pieza máquina, <i>Machine thickness</i> [mm]
$u$	Evolución dinámica [-]
$CIF$	Factor de incremento de concavidad, <i>Concavity Increase Factor</i> [-]
$y$	Flexión del hilo [mm]
$F$	Fuerza axial aplicada al hilo [N]
$q_d$	Fuerza de <i>gap</i> por unidad de longitud [kg/mm]
$F_d$	Fuerza de reacción de la descarga [N]
$F_m$	Fuerza electromagnética [N/m]
$F_s$	Fuerza electrostática [N/m]
$q$	Fuerza externa aplicada por unidad de longitud [kg/mm]
$Cd$	Índice de concentración de descargas, <i>Discharge concentration index</i> [-]

---

$B$	Inducción magnética del material [T]
$H$	Intensidad del campo magnético [A/m]
$I/s$	Intensidad de corriente [A/mm <sup>2</sup> ]
$\Delta t$	Intervalo de tiempo [s]
$L$	Longitud del hilo [m]
$Rm$	Matriz solución con los radios a programar [mm]
$E$	Módulo de Young [N/m <sup>2</sup> ]
$I$	Momento de inercia del material [m <sup>4</sup> ]
$i$	Número de iteraciones [-]
$HN$	Número de neuronas en la capa oculta, <i>Neurons in the Hidden layer</i> [-]
$j$	Número de plano medido en la probeta [-]
$D$	Número de unidades de retardo, <i>Delay units in the feedback</i> [-]
$\Delta l$	Pérdida de material en la esquina [ $\mu\text{m}$ ]
$\mu$	Permeabilidad magnética del material [N/A <sup>2</sup> ]
$MAPE$	Porcentaje del error medio absoluto, <i>Mean Absolute Percentage Error</i> [-]
$\alpha$	Posición angular [°]
$mMAPE$	Promedio del MAPE, <i>Mean MAPE</i> [-]
$r_e$	Radio de esquina [ $\mu\text{m}$ ]
$r_g$	Radio de la descarga [ $\mu\text{m}$ ]
$r$	Radio del hilo [ $\mu\text{m}$ ]
$d$	Radio del hilo más <i>gap</i> [ $\mu\text{m}$ ]
$r_r$	Radio del hilo real en el plano superior de la pieza [ $\mu\text{m}$ ]
$r_{rs}$	Radio del hilo real en el plano del centro del hilo [ $\mu\text{m}$ ]

$r_p$	Radio programado [mm]
$R_{ab}$	Ratio anormal de las descargas, <i>Abnormal ratio</i> [-]
$DF$	Ratio de descarga, <i>Duty Factor</i> [-]
$\delta$	Retraso del hilo, <i>Wire-lag</i> [ $\mu\text{m}$ ]
$s$	Sección transversal del hilo [ $\text{mm}^2$ ]
$\sigma_T$	Tensión térmica [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$t$	Tiempo [s]
$t_{on}$	Tiempo de impulso, <i>Pulse on-time</i> [ $\mu\text{s}$ ]
$t_{ion}$	Tiempo de ionización, <i>Ignition delay time</i> [ $\mu\text{s}$ ]
$t_{off}$	Tiempo de pausa, <i>Pulse off-time</i> [ $\mu\text{s}$ ]
$R$	Unidades de retardo, <i>Delay units in the Feedback</i> [-]
$p_{CIZ}$	Valor medio de los valores máximos del efecto de concavidad en la CIZ [-]
$p_{LIZ}$	Valor medio del efecto de concavidad en la LIZ [-]
$T_u$	Valor objetivo de un punto de la evolución dinámica [-]
$P_u$	Valor predicho por la ANN para un punto de la evolución dinámica [-]
$v_h$	Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]
$v$	Velocidad de avance del hilo [mm/min]
$v_T$	Velocidad de avance teórica [mm/min]



# **Capítulo I. Introducción**

---



# I. INTRODUCCIÓN

*A lo largo de este corto primer capítulo se describe el entorno industrial y científico en el cual se ha elaborado este trabajo de investigación (sección I.1). Posteriormente se enumeran los objetivos principales del mismo (apartado I.2), junto con otros subyacentes a los principales. Por último, se realiza un resumen de cada uno de los capítulos en los cuales se divide esta tesis, para poder visualizar la idea global en la que se ha basado este documento (título I.3).*

## I.1 CONTEXTO INDUSTRIAL Y CIENTÍFICO DE LA ELECTROEROSIÓN POR HILO

En estas últimas décadas, gracias a los avances en el campo de la comunicación, las ferias internacionales sobre máquinas-herramienta cada vez han adquirido mayor fama e importancia. Un ejemplo de ello es la feria bienal celebrada en Bilbao sobre este campo, que ha aumentado considerablemente (más de un 20 %) los visitantes recibidos en sus últimas ediciones (ver Figura I.1), incluyendo un incremento en el porcentaje de visitantes extranjeros del 40 % al 60 % en apenas cuatro ediciones.

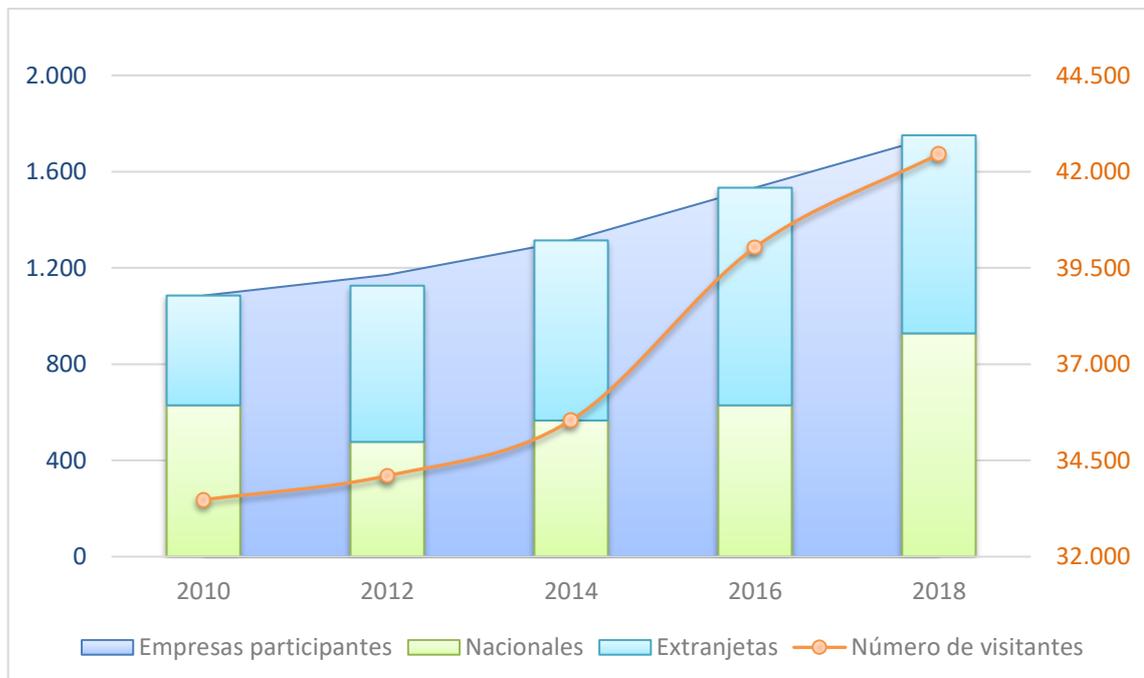


Figura I.1. Datos de participación en la BIEMH [BIEMH].

Otros ejemplos de este tipo de eventos pueden ser algunas ferias celebradas dentro del continente europeo, como las de España, Alemania o Italia [BIEMH] [EMO], y otras fuera del mismo, como las de Chicago, Japón, India o México [IMTS] [JIMTOF] [Tecma] [IMTEX].

Por este motivo, es imprescindible analizar en qué contexto industrial se realiza esta tesis, ver las últimas novedades que se han implementado en las máquinas y concluir, por tanto, qué limitaciones son necesarias vencer de acuerdo a la revisión del estado del arte realizada en el capítulo II.

### I.1.1 PRINCIPALES NOVEDADES EN LAS MÁQUINAS DE ELECTROEROSIÓN POR HILO

Tal y como se ha apuntado anteriormente, la globalización ha permitido que, dentro del cada vez más competitivo sector de la máquina-herramienta, sean varias las empresas fabricantes de máquinas de electroerosión por hilo las que hayan desarrollado mejoras en sus modelos entorno a los mismos problemas. En los próximos párrafos se plantean algunas de las más significativas, agrupadas en tres diferentes conjuntos: el primero está relacionado con las propias capacidades de la máquina, el segundo con la mejora del proceso de corte y, por último, se detallarán otros aspectos que no han podido incluirse en los primeros dos grupos.

Uno de los pilares fundamentales a la hora de mejorar el funcionamiento de este tipo de máquinas son los generadores utilizados, puesto que unas descargas más eficientes repercuten en el proceso de forma directa, consiguiendo niveles de rugosidad superficial más bajos y tasas de arranque más elevadas.



Figura I.2. Máquinas de electroerosión por hilo de alta precisión: a) para micro-mecanizado [GFMS]; b) con control simultáneo de 8 ejes [ONA].

Algunas marcas, como Mitsubishi o Agie Chamilles, han llegado a obtener en sus modelos de mayor precisión unas rugosidades de hasta  $0,04 \mu\text{mRa}$  [Mitsubishi] [GFMS]. De hecho, la primera de ellas es capaz de generar descargas de mil millones de pulsos por segundo, lo que supone un aumento en la precisión en aplicaciones de micro-mecanizado (ver Figura I.2.a). Adicionalmente, otras empresas del sector han centrado sus esfuerzos en la mejora del control de las descargas para el corte de alta velocidad o en espesores variables, como es el caso del generador de rendimiento *iPulse* [Fanuc].

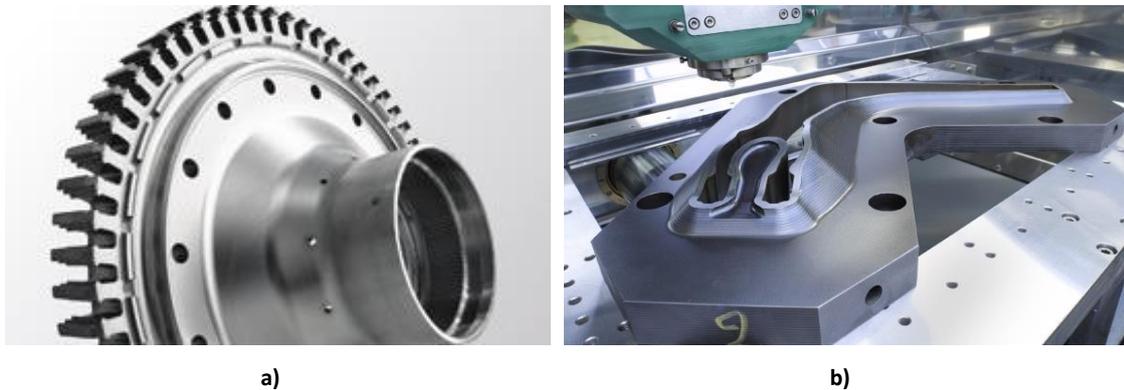
Dentro de esta misma línea de actuación, es remarcable el esfuerzo para conseguir el control simultáneo de varios ejes. Así, algunos fabricantes son capaces de ofrecer el control paralelo de 8 ejes [ONA] [Sodick]. Adicionalmente, en un plano más comercial, se está apostando por mejorar los sistemas CAD/CAM implementados en la máquina o utilizar interfaces más amigables para un uso sencillo y rápido por parte del usuario [Mitsubishi] [Sodick].

En el segundo grupo se engloban las características que mejoran la precisión durante el corte y reducen los tiempos de fabricación de pieza. Una de las más importantes tareas dentro de esta categoría es el proceso de enhebrado y la posibilidad de realizarlo en condiciones difíciles, así como el re-enhebrado automático. La justificación para la inversión económica e investigadora en la labor de enhebrado reside en que, en situaciones en las que existen condiciones geométricas complejas o características de material extremas, la rotura del hilo es más frecuente de lo deseado. Por tanto, disponer de sistemas que minimicen la pérdida de tiempo en esta parte del proceso es vital para aumentar el rendimiento y eficiencia del corte.

Existen diversos fabricantes del sector que publicitan sus logros, como el enhebrado de hilos de pequeño diámetro en agujeros de  $500 \mu\text{m}$  [ONA] o el que realiza Fanuc en micro-mecanizado, en apenas 10 segundos. Por otra parte, la rapidez en el cambio de bobina también ha sido abordada, en este caso por parte de Mitsubishi, quien presenta un sistema de cambio de bobina en un minuto y medio para un gran rango de diámetros de hilo (entre  $30 \mu\text{m}$  y  $200 \mu\text{m}$ ).

Todos estos factores que contribuyen a la mejora de las características y precisión de las piezas obtenidas mediante esta técnica de fabricación son los causantes de que cada vez exista mayor interés en otras aplicaciones que se puedan ofrecer. A pesar de ello, el automovilístico sigue siendo uno de los sectores que mayor uso da a la electroerosión por hilo (ver Figura I.3.b). Como ejemplo de los cada vez más estrictos requisitos a los que deben hacer frente las marcas de este gremio se pueden listar los siguientes logros: una precisión posicional que ronda  $\pm 1 \mu\text{m}$  o unas guías lineales de  $0,1 \mu\text{m}$  de precisión, una redondez con una desviación menor a  $1 \mu\text{m}$ , un

paralelismo función del espesor que puede llegar a ser menor de  $\pm 2 \mu\text{m}$ , y así un largo etcétera de propiedades [Fanuc] [GFMS] [Mitsubishi] [ONA] [Sodick].



**Figura I.3. Aplicaciones del proceso de WEDM: a) disco de geometría tipo *firtree* [GFMS]; b) molde para su uso en el sector automovilístico [ONA].**

Por último, existen otros factores de interés general para los compradores de este tipo de máquinas, dependiendo de la aplicación a la que esta vaya a ser destinada. Aunque en ocasiones se realizan máquinas con alguna característica a medida para el cliente, en otras existen funciones que, a pesar de no ser básicas, están ya prácticamente estandarizadas. Un ejemplo de ello es la venta de maquinaria con división del tanque en 3 compartimentos diferentes. Otras empresas como Fanuc promueven la adición de aplicaciones especiales a las más básicas, como la función de micro-torno que llega a realizar diámetros de 0,1 mm; o Sodick, que presenta una máquina con cambiador de pieza y de electrodo.

Asimismo, la promoción de la industria sostenible por parte de diversos organismos ha provocado que empresas líderes en diferentes sectores se preocupen cada día más por el medio ambiente. Así, ONA se ha dedicado en estos últimos años a la fabricación sostenible o ecológica y, por ello, presenta unos nuevos modelos con una reducción en el consumo de hilo del 30 % con respecto a sus predecesores. De igual modo, Agie-Charmilles consigue reducir los tiempos de mecanizado en un 30 % con respecto a sus modelos anteriores.

Sin embargo, algo en lo que coinciden prácticamente todas las empresas punteras del mercado, es en la necesidad de construir máquinas que puedan ser utilizadas en una amplia variedad de entornos y talleres industriales, por lo que muchas disponen de la función de compensación de control de temperatura (ver Figura I.4).



Figura I.4. Máquina de electroerosión que permite la adición de funciones adicionales [Fanuc].

Muchas de las innovaciones e implementaciones en máquinas de electroerosión por hilo están ligadas a las líneas de investigación de numerosas instituciones, por lo que los artículos publicados tienen una estrecha relación. Así, en la Figura I.5 se muestra la evolución que presenta la electroerosión por hilo en la publicación de artículos en una de las más importantes bibliotecas virtuales de divulgación científica como es ScienceDirect.

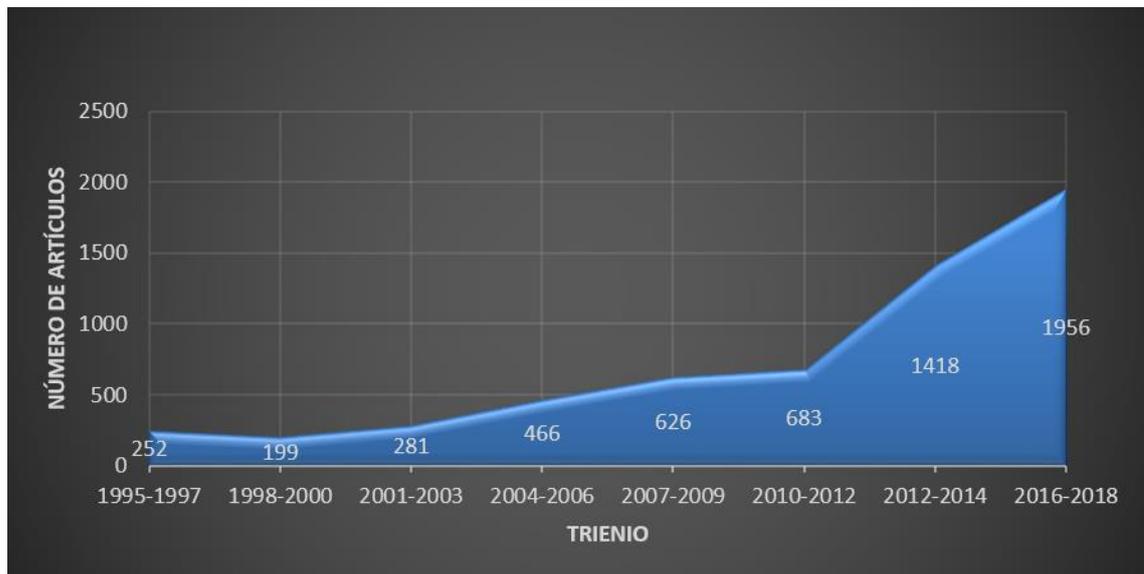


Figura I.5. Artículos publicados sobre electroerosión por hilo (palabras clave “WEDM” y “wire EDM”) por trienio en ScienceDirect [ScienceDirect].

Después del análisis de la situación actual en la que se encuentra este proceso de mecanizado, se comprueba que la precisión es una de las preocupaciones del sector. Además, esta precisión es de vital importancia cuando la geometría de la pieza es compleja. Con estos datos se procede a enumerar, en el próximo apartado, los diferentes objetivos que pretenden llevarse a cabo mediante este estudio.

## I.2 OBJETIVOS

En vista del contexto industrial de este proceso de corte, el objetivo de esta tesis es demostrar la posibilidad de mejorar aspectos concretos del proceso de electroerosión por hilo mediante el uso de técnicas experimentales y de analítica de cantidades masivas de datos, como alternativa a los modelos teóricos existentes en la literatura. De este propósito principal se deducen otros sub-objetivos a los que se pretende dar solución en este trabajo:

- Analizar las causas que generan un error en las trayectorias circulares realizando, a su vez, un estudio experimental para la caracterización de las desviaciones en trayectorias circulares.
- Proponer una metodología para la medida experimental del wire-lag y, de esta forma, caracterizar teóricamente el error generado en las trayectorias circulares.
- Utilizar los datos extraíbles del proceso para predecir el error en las trayectorias con cambios de dirección mediante técnicas de aprendizaje automático que eviten la batería de ensayos necesaria en los dos primeros puntos.
- Mejorar la precisión en el corte de interpolaciones circulares proponiendo una trayectoria alternativa que minimice el error cometido.
- Detectar cambios en los patrones de comportamiento de los diferentes tipos de descarga al registrar un evento durante el proceso de corte.
- Identificar el espesor de pieza durante el proceso de corte y cuantificar la antelación con la cual puede determinarse su cambio mediante la relación existente entre diferentes variables del proceso de corte y el espesor en cada momento.

### I.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

Este trabajo se ha organizado en los capítulos que se describen a continuación:

En este **Capítulo I** se ha presentado el contexto industrial y científico que provoca este estudio, analizando la posición en la que se encuentran los mejores fabricantes mundiales de las máquinas de este proceso de WEDM y cuáles son las líneas de mejora del mismo. Además de eso, se han descrito los objetivos principales de esta tesis y se presenta el esquema organizativo del documento.

A lo largo del **Capítulo II** se realiza una revisión del estado del arte, analizando los diferentes artículos publicados por otros autores en materias similares a las de este estudio. Primero, se analiza la precisión del proceso de WEDM, teniendo en cuenta algunos de los modelos matemáticos y los estudios experimentales más relevantes que han tenido lugar durante los últimos años. Posteriormente, se enumeran algunos trabajos de investigación sobre la clasificación de las descargas. Y, por último, se hace una breve referencia a las redes neuronales artificiales, las cuales empiezan a jugar un papel importante en la solución de diversos problemas de mecanizado y, más concretamente en WEDM, una vez que ya ha sido probado su éxito en otros campos como el de las técnicas de comunicación e información.

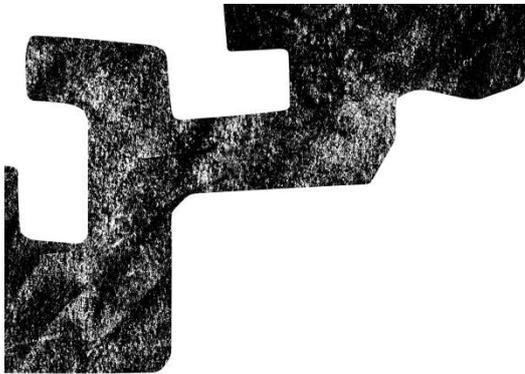
Puesto que uno de los problemas más habituales en WEDM es la falta de precisión en trayectorias con cambios bruscos de dirección, en el **Capítulo III** se caracteriza el error durante los mismos, para poder saber cuáles son las causas que la generan. Posteriormente, se propone una nueva metodología para la medida experimental, directa y sencilla del *wire-lag*. Por último, se estudia la existencia de una relación entre esta deformación del hilo y los tipos de descarga existentes durante el proceso de corte.

Posteriormente, en el **Capítulo IV** se presenta un enfoque original basado en el uso de redes neuronales artificiales para predecir el error y mejorar la precisión del corte de círculos mediante electroerosión por hilo aborado en el capítulo anterior. El entrenamiento de esta red neuronal artificial se ha llevado a cabo utilizando la información extraída de diferentes cortes realizados en condiciones industriales. Combinando las predicciones de esta red con una técnica de optimización, se diseñan trayectorias del hilo de radio variable para aumentar la precisión del proceso.

Finalmente, a lo largo del **Capítulo V** se verifica la clasificación de las descargas realizada hasta la fecha por otros autores para, posteriormente, proponer el uso de otra red neuronal artificial

como herramienta para la detección de eventos durante el proceso de corte, de forma que los patrones de comportamiento sean agrupados por este sistema. Por otro lado, se pretende detectar el espesor de pieza analizando las variables que intervienen durante el corte.

Por último, en el **Capítulo VI** se presentan las conclusiones finales que se derivan de este estudio de investigación y las líneas futuras que deja abiertas el mismo.



## **Capítulo II. Estado del arte**

---



## II. ESTADO DEL ARTE

*En este capítulo se va a realizar una revisión exhaustiva de los estudios más relevantes que se han desarrollado en torno al proceso de corte mediante electroerosión por hilo, siguiendo dos líneas principales de investigación. Por un lado, la pérdida de precisión durante el proceso de corte y el control y monitorización del mismo (apartados II.2 y II.3, respectivamente). De forma más concreta, se estudian los trabajos sobre las fuerzas existentes durante el proceso de corte (apartado II.2.1) que generan la deformación y vibración del hilo (apartado II.2.2), la cual se observa con mayor notoriedad en las piezas con cambios de dirección muy pronunciados (apartado II.2.3). Además, se analizan los trabajos realizados acerca de la clasificación y localización de las descargas (apartado II.3.1) y el corte de piezas con espesor variable (apartado II.3.2). Finalmente, se enumeran algunos de los trabajos más importantes sobre el uso de las herramientas de aprendizaje automático (apartado II.4), ya que han sido útiles en las técnicas de la información y comunicación, y empiezan a probarse para resolver los problemas presentes en este proceso de mecanizado.*

### II.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha visto en el apartado introductorio de este documento, las empresas fabricantes de máquinas de electroerosión por hilo están esforzándose por mejorar la precisión de las piezas electroerosionadas. El trabajo de los investigadores de este sector está cada vez más ligado a las exigencias de la industria y, por tanto, las necesidades de esta se ven reflejadas en las publicaciones.

En la Figura II.1 se muestran las principales líneas de investigación sobre electroerosión por hilo durante el año 2016 [ScienceDirect], con la palabra clave común “*wire edm*”. El análisis del proceso y la mejora de las máquinas copan una quinta parte de los trabajos publicados, y la investigación de los parámetros a utilizar en función de los nuevos materiales que pueden erosionarse y el estudio de las superficies y su resistencia a fatiga representan otra quinta parte de las publicaciones [Hinduja, 2013] [Klocke, 2014 1].

Por otro lado, la temperatura y la transferencia de calor durante el proceso ocupa un 5 % del total y el análisis de las descargas apenas un 2 %. En la otra mitad restante, se agrupan artículos no clasificados y los que tienen relación con el láser, la soldadura y la Inteligencia Artificial (*Artificial Intelligence, AI*).

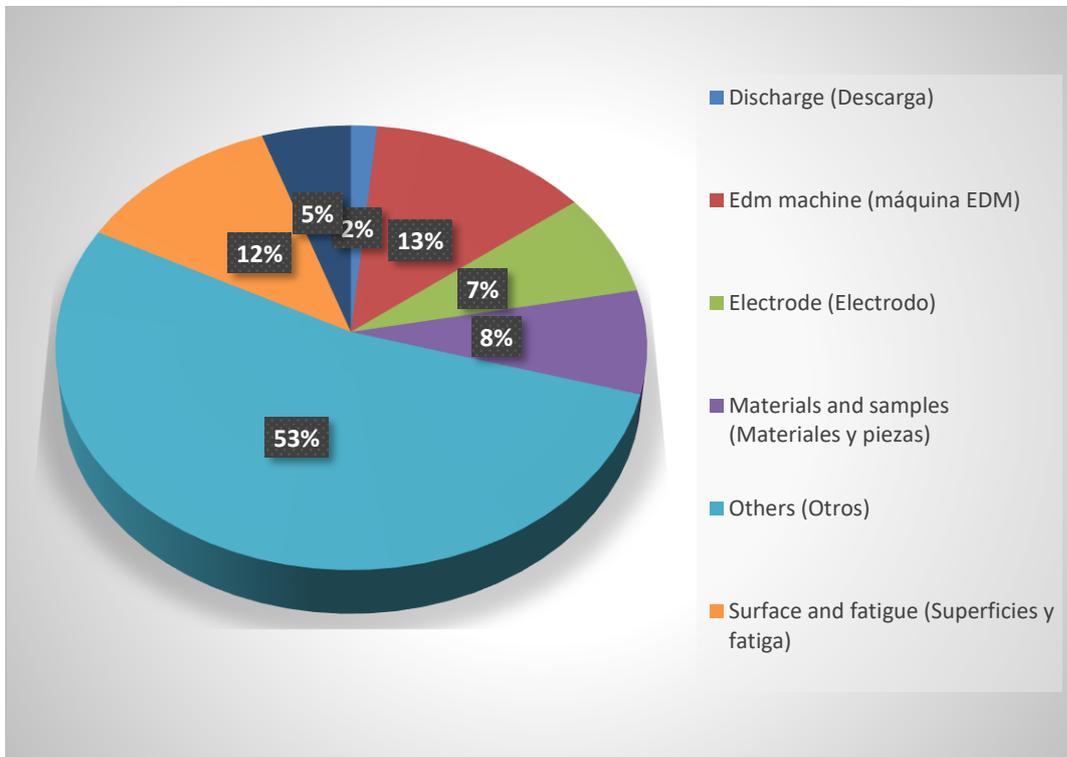


Figura II.1. Clasificación de artículos durante 2016 en función de las principales líneas de investigación en electroerosión por hilo [ScienceDirect].

A continuación, se van a explicar y analizar algunos de los trabajos más importantes publicados.

## II.2 PRECISIÓN EN ELECTROEROSIÓN POR HILO

Puesto que existen varios factores que provocan una pérdida en la precisión de las piezas generadas mediante electroerosión por hilo, como las fuerzas inherentes al proceso (apartado II.2.1), la vibración que estas generan (subcapítulo II.2.2) o la falta de precisión en el corte de esquinas (sección II.2.3), en los siguientes apartados se va a realizar una valoración de los artículos más relevantes relacionados con los objetivos de este trabajo.

## II.2.1 ESTUDIO DE LAS FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL HILO MEDIANTE SU MODELIZACIÓN

Las fuerzas inherentes al proceso de electroerosión por hilo, cuyos orígenes y orden de magnitud se han abordado con mayor detenimiento en el trabajo de tesis de Plaza [Plaza, 2008], son cuatro. La primera de ellas, la fuerza electrostática, aparece cuando se establece una diferencia de potencial entre hilo y pieza generando un campo eléctrico entre ambos que alcanza su mayor intensidad en el punto de menor resistencia. La fuerza electromagnética tiene un valor inferior a la primera y aparece durante el tiempo de pulso. Ambas fuerzas atraen el hilo a la pieza y sus magnitudes son de aproximadamente 0,5 N/m y 0,3 N/m, respectivamente, en máquinas con generadores de relajación [Panschow, 1974].

La fuerza electrodinámica es la resultante de las descargas debido a la elevada presión existente en el canal del plasma y tiende a alejar al hilo de la pieza. Su orden de magnitud oscila entre 1 N/m y 5 N/m [Arunachalam, 2001] cuando la energía de la descarga por pulso se encuentra en un rango de entre 5 mJ y 10 mJ [Zhang, 2014]. Y, por último, se encuentra la fuerza hidráulica, la cual es el resultado de utilizar presiones de dieléctrico que alcanzan hasta los 17 bar en cortes de desbaste.

Adicionalmente, la tracción mecánica que se aplica al hilo durante el corte ayuda a minimizar el error geométrico durante el mismo y mejora su estabilidad [Dekeyser, 1989]. Esta fuerza puede llegar a superar el valor de 2000 N/mm<sup>2</sup>.

A continuación, se explican los modelos de fuerzas que se han propuesto durante los últimos años, empezando por el de Tomura et al., en el que se realiza un análisis de la fuerza electromagnética generada mediante el Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*, FEM). En un primer trabajo [Tomura, 2008] el estudio se centró en la componente continua de la corriente, donde se concluyó que la permeabilidad magnética del material [Ec. II. 1] jugaba un papel importante. Se entiende la permeabilidad como la capacidad para atraer y hacer pasar campos magnéticos, es decir, expresa la relación entre la inducción magnética ( $B$ ) existente y la intensidad de campo magnético ( $H$ ) que aparece en el interior de dicho material:

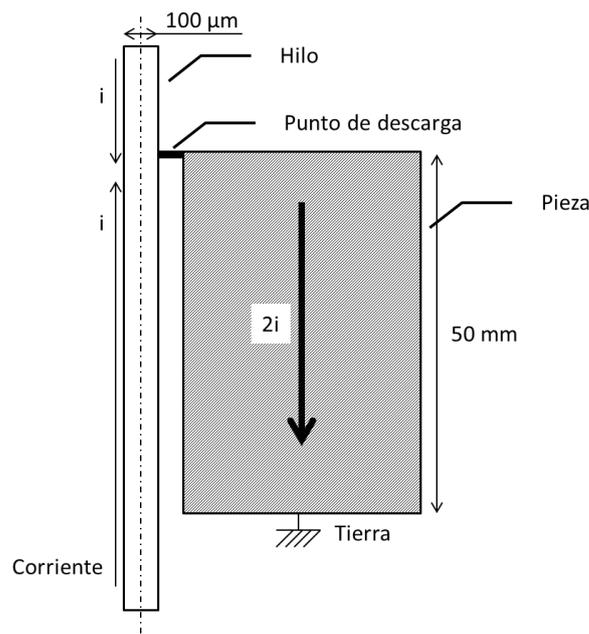
$$\mu = \frac{B}{H}$$

Ec. II. 1

Así, cuando la permeabilidad de la pieza es pequeña, como en el caso del cobre, la componente continua de la fuerza electromagnética es despreciable frente a la alterna; por el contrario, cuando es mayor, como en el acero, la componente alterna es la predominante. Las

consecuencias de este estudio se muestran en otro trabajo posterior [Tomura, 2009], en el que se enlaza esta propiedad con el sentido de la fuerza electromagnética. Cuando la componente estática o, lo que es lo mismo, la componente continua de dicha fuerza es predominante, la resultante es atractiva. Sin embargo, cuando es la componente dinámica (cuya magnitud viene determinada por la conductividad) la más significativa, la resultante de esta fuerza es repulsiva. Este resultado tendrá influencia en la vibración y deformación del hilo, tal y como se verá en el apartado I.

En la misma línea de investigación, Hada et al. [Hada, 2013] analizan, también mediante FEM, la impedancia del hilo y las fuerzas electromagnéticas que se generan a su alrededor. Para ello, generan un circuito compuesto por una resistencia y una inductancia, ignorando la capacitancia parásita entre hilo y pieza, y asumen que la descarga ocurre en un extremo de la pieza, que la corriente suministrada es de la misma cantidad por ambos lados del hilo y que la corriente de todas las descargas recorre la pieza (ver Figura II.2).



**Figura II.2. Esquema del modelo generado para la medición de la impedancia del circuito entre hilo y pieza [Hada, 2013].**

Este estudio se realiza para dos materiales de pieza (cobre y acero) y dos tipos de hilo de cobre (sin recubrimiento y recubierto). Como resultado, se observa que la impedancia del circuito (incluyendo hilo y pieza) es mayor con el hilo recubierto. Asimismo, con la pieza de acero, la impedancia también es ligeramente mayor que con la de cobre, aunque esta diferencia puede considerarse despreciable.

Además, también estudian la división de la impedancia en sus dos componentes (resistencia y reactancia). Los resultados son los siguientes: se comprueba que la resistencia ejerce mayor influencia en la impedancia que la reactancia y, puesto que la sección transversal de la pieza es mayor que la del hilo, se concluye que es la resistencia del hilo la dominante en el valor de la resistencia. Por tanto, la impedancia con el hilo recubierto es mayor que con un hilo sin recubrimiento, independientemente del material de pieza. Por otro lado, la reactancia con el hilo recubierto es mayor, debido a la mayor permeabilidad (ver Ec. II. 1) del acero. Del mismo modo, también la reactancia en la pieza de acero es mayor que en la de cobre.

Si se aplican estos resultados a un corte de pieza y se observa el valor del pico de corriente, se concluye que este es mayor con el hilo recubierto, debido al valor de la impedancia. Cuando se trata de una pieza de cobre, el pico de corriente es ligeramente mayor porque la impedancia del este material es más pequeña; sin embargo, de igual modo al caso anterior, la diferencia puede considerarse insignificante. Por otra parte, realizando un corte con una presión del dieléctrico óptima en dos espesores de pieza diferentes se observa que el pico de corriente decrece con el espesor, debido a la resistencia creciente del hilo.

El objetivo final de este trabajo sería optimizar las condiciones de mecanizado en función de los resultados obtenidos del valor del pico de corriente y de los diferentes tipos de hilo y materiales de pieza; sin embargo, esta línea de actuación no se realiza. Asimismo, tampoco se acomete el análisis de la vibración del hilo debido a estas variaciones en la impedancia del circuito generado durante el proceso.

Para profundizar aún más en el estudio de la temperatura y la energía electromagnética del proceso Chen et al. modelizan la influencia de ambas [Chen, 2015]. En cuanto al modelo térmico, se contempla la tensión generada a causa de una distribución axial no uniforme de la temperatura.

Los resultados de este análisis muestran que existen grandes diferencias en las distribuciones de temperatura bajo diversas velocidades del hilo. Así, cuando la velocidad del mismo es nula, la temperatura es mayor que en el resto de ocasiones y, además, la distribución axial es simétrica con respecto al plano central de la pieza. Sin embargo, la zona inferior de la esta alcanza mayor temperatura que la superior. También se observa que esta distribución crece con el valor de pico de tensión de descarga y el ratio de la misma (*Duty Factor, DF*), que se define como la relación entre el tiempo de impulso ( $t_{on}$ ) con respecto a la suma de este más el tiempo de pausa ( $t_{off}$ ) (ver Ec. II. 2). Sin embargo, aunque la distribución de temperatura decrece con un aumento de espesor de pieza, apuntan que esta variación puede considerarse despreciable.

$$DF = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad \text{Ec. II. 2}$$

Por otro lado, la modelización espacial de la fuerza electromagnética ( $F_m$ ), siguiendo las mismas consideraciones que Tomura [Tomura, 2009], se ha basado en la ley de Maxwell-Ampere (Ec. II. 3), que explica que la circulación de la intensidad del campo magnético ( $B$ ) en un contorno cerrado es proporcional a la densidad de corriente ( $J$ ) que recorre ese contorno. El término ( $\frac{I}{S}$ ) es una densidad de corriente generada externamente.

$$F_m = J \times B + \frac{I}{S} \quad \text{Ec. II. 3}$$

Se desprende de los cálculos realizados que la densidad de flujo magnético cerca del *gap* es mayor que en el resto del área y que es prácticamente simétrica en dirección axial desde el punto de la descarga. Parece que el máximo flujo magnético y la fuerza electromagnética tienen una tendencia decreciente con el aumento del espesor de pieza.

El problema de todos estos modelos matemáticos es que no tratan de forma conjunta todas las fuerzas, puesto que el comportamiento real del hilo debido a las mismas es muy complejo. Por esta razón se sigue estudiando sobre este campo.

## II.2.2 VIBRACIÓN Y DEFORMACIÓN DEL HILO

Tal y como ya se ha mencionado en el apartado anterior, las fuerzas del proceso generan la vibración (componente dinámica) y deformación (componente estática) del hilo e incluso, en ocasiones puntuales, la rotura del mismo. Estos movimientos generan un error geométrico en las piezas, error que se ve incrementado con los cambios de dirección, por lo que varios autores han centrado sus esfuerzos en analizar y minimizar estas vibraciones. A continuación, se enumeran los trabajos más importantes relacionados con este campo.

### II.2.2.1 Modelos matemáticos para la determinación de la deformación y vibración del hilo

Al igual que en el caso del estudio de las fuerzas (apartado II.2.1), una forma de entender mejor el comportamiento del hilo es modelizarlo, ya que la naturaleza estocástica de las descargas y las magnitudes y direcciones de las fuerzas inherentes al proceso hacen que el comportamiento del mismo sea extremadamente complejo [Puri, 2003 1]. Se procede a explicar algunos de los estudios que se han considerado más importantes acerca de este tema.

Kinoshita et al., en 1984, caracterizaron la diferencia entre la trayectoria teórica y real del hilo mediante la acotación de lo que denominaron el *área de vibración* del mismo, para finalmente corregir su trayectoria [Kinoshita, 1984]. Esto lo hicieron mediante la colocación de cuatro palpadores de movimiento axial en un plano horizontal entre la cara superior de la pieza y la guía superior (plano *L-M* de la Figura II.3), rodeando al hilo. El hilo, con su vibración, se ponía en contacto con los electrodos para acotar su área de vibración en cada instante, la cual iba cambiando de tamaño, posición y orientación.

Definiendo las componentes del incremento de la amplitud de la vibración del hilo entre dos instantes en las direcciones del plano *L-M*, y mediante un cambio de coordenadas, se pueden expresar estos incrementos en el plano *X-Y* de la máquina.

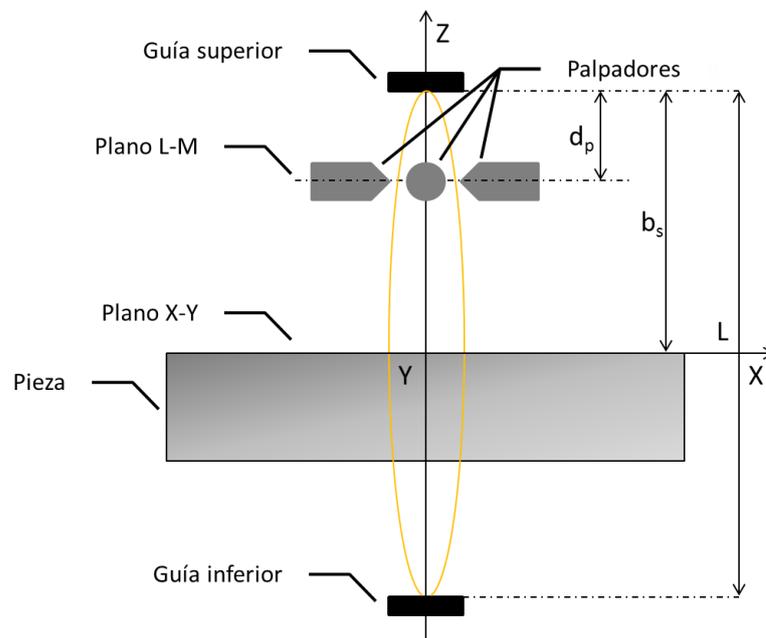


Figura II.3. Área de vibración del hilo [Kinoshita, 1984].

Una vez verificada la fiabilidad del sistema en un primer experimento, se estudió el efecto de la velocidad de avance del hilo. Se comprobó que un aumento de la misma provoca un retraso del hilo con respecto a las guías debido a las fuerzas generadas por las descargas, mientras que la variación en la dirección perpendicular a la velocidad de corte fue prácticamente nula. Por último, la amplitud de la vibración en el plano *L-M* decrece con el aumento de dicha velocidad.

La importancia de este estudio radica en que se analiza la vibración en ambas direcciones: paralela y perpendicular a la velocidad de corte. Esto significa que, cuando se produzca un corte con un cambio de dirección, existirá una variabilidad en el área de vibración, pese a que en el trabajo de Kinoshita et al. esta circunstancia no se contempla.

No es hasta unos años más tarde [Dekeyser, 1989] cuando se menciona, según varios autores, que la trayectoria seguida por el hilo durante el corte de esquinas (que no es más que un caso particular de un corte con cambios de dirección) sigue una curva denominada tractriz. Sin embargo, según Dekeyser et al., la batería de ensayos llevada a cabo revela que el fenómeno del retraso del hilo o *wire-lag* solo es predominante en ángulos mayores a 135°, para ángulos menores comienzan a prevalecer otros factores y, por debajo de los 60°, el efecto del *wire-lag* es insignificante.

Esta afirmación contradice los descubrimientos de Kinoshita et al., puesto que lo que ocurriría es simplemente un cambio en la elipse que constituye el *área de vibración*, no la supresión del efecto del retraso del hilo. Como se verá más adelante (capítulo III), el retraso del hilo afecta, sobre todo, a los cambios de dirección.

Es muy común utilizar la Segunda Ley de Newton (ver el esquema de la Figura II.4) como punto de partida para realizar los diferentes modelos matemáticos que determinan el comportamiento del hilo. Esta ley viene determinada por la expresión de la Ec. II.4. Como primer ejemplo, se muestra un estudio en el que se modeliza el comportamiento del hilo mediante una simplificación de la ecuación diferencial mencionada [Beltrami, 1996],

$$F \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = \rho s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial y}{\partial t} + q(z, t) \quad \text{Ec. II.4}$$

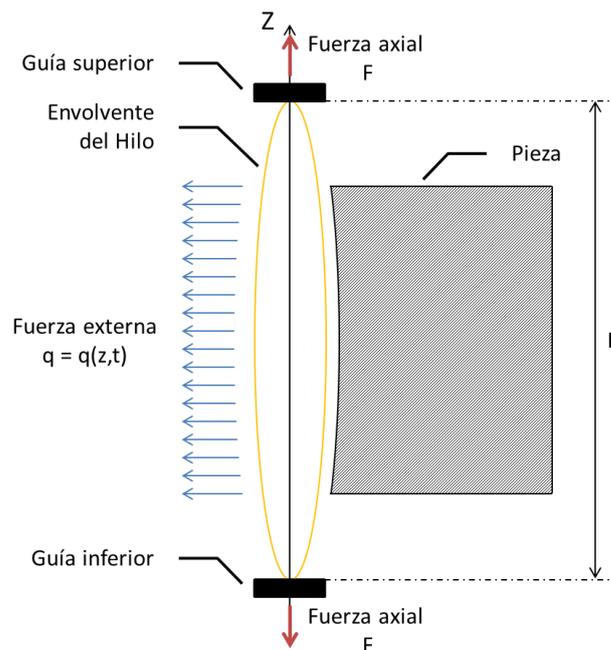


Figura II.4. Esquema de la vibración del hilo real [Puri, 2003 1].

donde  $F$  simboliza la tracción mecánica aplicada al hilo, y la flexión del mismo,  $\rho$  su densidad de masa y  $s$  la sección transversal (siendo  $d$  su diámetro). Por otro lado,  $\beta$  es el coeficiente de amortiguamiento del material,  $E$  su módulo de Young,  $I$  el momento de inercia,  $q(z, t)$  la fuerza externa por unidad de longitud y  $t$  el tiempo.

En este caso, los autores ponen de manifiesto que pueden realizarse numerosas simplificaciones, de forma que la fuerza de tracción ( $F \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$ ) sea igual a la carga externa aplicada ( $q(z, t)$ ). De esta manera, la deformación del hilo se asemeja a una parábola con tres puntos característicos (ver Figura II.5): los dos extremos, el superior e inferior del espesor de pieza (que generan una componente de la desviación  $w_1$ ) y el de máxima flexión, que se dará en el punto medio de espesor de la misma (es decir, la flexión completa vendrá dada por la suma de  $w_1$  y  $w_2$ ). De esta división se desprende que, a mayor espesor de pieza, mayor será la flexión del hilo.

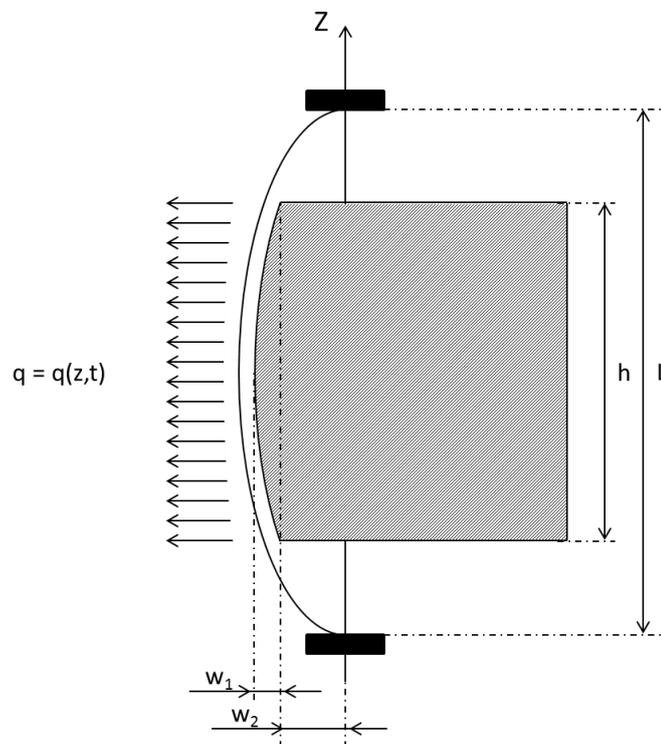


Figura II.5. Esquema simplificado de la vibración del hilo [Beltrami, 1996].

Otro de los trabajos en esta misma línea es el de Murphy et al. [Murphy, 2000], que pretende analizar la influencia de la velocidad de alimentación del hilo y la variación de la temperatura en la vibración del mismo. Primero se obtiene un modelo estructural tridimensional de la traslación del hilo basándose en el principio de Hamilton, principio de la mecánica clásica para describir la evolución a lo largo del tiempo del estado de movimiento tanto de una partícula como de un campo físico. Para ello, se asume que el hilo es una viga de rigidez a flexión no nula.

En cuanto al modelo térmico, este es similar a uno presentado anteriormente [Dekeyser, 1989], con las siguientes consideraciones: el hilo está inmerso en un medio líquido infinito con una temperatura uniforme, el efecto Strouhal es despreciable (no existe calor adicional aportado por la vibración del hilo), el coeficiente de convección es independiente de la velocidad del hilo y la masa del fluido dieléctrico es despreciable.

Con estos dos modelos se determina la configuración de equilibrio del sistema propuesto. Posteriormente, se consideran unas oscilaciones de pequeña amplitud para determinar los valores propios de la ecuación, puesto que su parte imaginaria representará la frecuencia natural no amortiguada que proporciona información sobre la resonancia de vibración libre, que explica la respuesta vibratoria del hilo, sus características resonantes y la estabilidad estática de la configuración de equilibrio. Por otra parte, la componente real del valor propio proporciona una medida de la estabilidad dinámica del sistema.

Se valida el modelo mediante un primer escenario de equilibrio cero [Wickert, 1990] (sistema sin movimiento y sin influencia de la temperatura) para, posteriormente, analizar los diferentes estados: el sistema sin movimiento con influencia de la temperatura, y en movimiento con y sin influencia de la misma. Los resultados, cuando se utiliza la configuración más realista del sistema (en movimiento con efecto de la temperatura) son los siguientes: a velocidades bajas existe una inestabilidad estática; a medida que estas velocidades crecen, el sistema se estabiliza hasta llegar a una nueva inestabilidad debido a la velocidad de alimentación del hilo. Existe, por tanto, un rango de esta velocidad, dependiente de parámetros como la energía de la descarga y la fuerza axial, que hacen el sistema estable.

Finalmente, se concluye que un aumento de la tracción mecánica del hilo aumenta el nivel de energía de las descargas, produciendo una mayor velocidad de erosión y, por tanto, un incremento en la productividad. Sin embargo, este aumento de la tracción produce un aumento de la posibilidad de rotura del hilo. Los autores también apuntan que, si la frecuencia de la descarga coincide con alguna de las frecuencias naturales del sistema, aparecerá una oscilación resonante en el hilo que producirá una notable pérdida de precisión en el corte y puede llegar a provocar la rotura del hilo.

Otro modelo matemático sobre la vibración del hilo fue expuesto por Puri et al., en el que proponen la existencia de una fuerza opuesta al sentido de la descarga a la que llaman *fuerza de impacto* [Puri, 2003 1]. La vibración del hilo de longitud  $L$  sometido a una carga axial en un plano a lo largo del eje  $Z$  (ver de nuevo Figura II.4) se puede expresar mediante la ecuación Ec.

II.4, considerando despreciable el segundo término (la fuerza de flexión transversal del hilo), puesto que se supone perfectamente flexible.

Puesto que su resolución es muy complicada, se vuelve necesario simplificarla a pesar de que ello conlleve perder algo de precisión en el modelo (ver Figura II.6). Se asume, por tanto, que la pieza se mantiene en el plano medio de la longitud del hilo ( $L/2$ ) y que el hilo se desplaza lateralmente a lo largo de su espesor  $h$  debido a la fuerza  $q(z, t)$ . Además, se considera que el generador es isoenergético y que, por tanto, la energía se mantiene constante. Así, esta puede expresarse en términos únicamente de la frecuencia de la descarga, comprobando experimentalmente que la fuerza externa es directamente proporcional a dicha frecuencia. Con todas estas simplificaciones se construye el modelo teniendo en cuenta que, en un instante inicial, debido a las descargas, el hilo se habrá desplazado la distancia  $a_0$  de la ilustración.

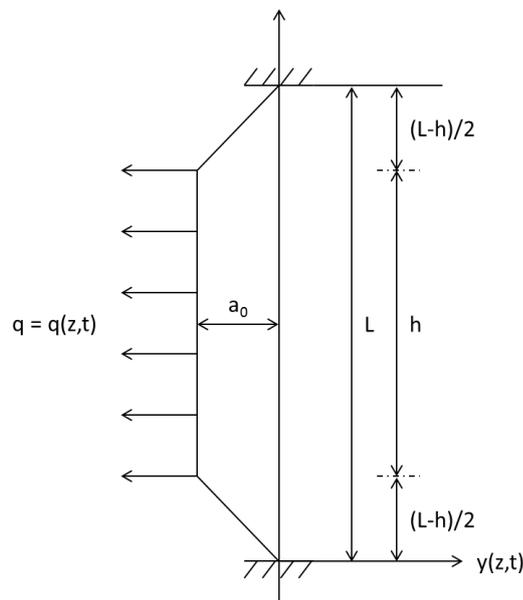


Figura II.6. Esquema de la vibración del hilo simplificado [Puri, 2003 1].

Realizaron una batería de ensayos con diferentes frecuencias de descarga y calcularon tanto el parámetro  $a_0$  como la amplitud de la vibración  $A$ . Como consecuencia, concluyeron que una fuerza axial del hilo mayor disminuye la amplitud de la vibración del hilo, que crece con la frecuencia de la descarga, que el primer modo de vibración es preponderante y que cuanto mayor es el espesor de la pieza ( $y$ , por tanto, la distancia entre guías) la amplitud también lo es.

Por tanto, de los dos estudios anteriores [Beltrami, 1996] [Puri, 2003 1] se deduce la importancia de la tensión axial del hilo, que limita la vibración del mismo y aumenta la productividad del proceso. Sin embargo, aplicar una fuerza demasiado grande puede provocar una mayor probabilidad de la rotura del hilo.

En 2007, Han et al. proponen un modelo para poder simular el error cometido en el corte de esquinas [Han, 2007]. Según el esquema de la Figura II.7, la vibración del hilo (siendo su sección transversal muy pequeña en comparación con su longitud) se asemeja a la de una cuerda sujeta por dos puntos que son las guías, suponiendo que la fuerza de reacción actúa uniformemente a lo largo del mismo.

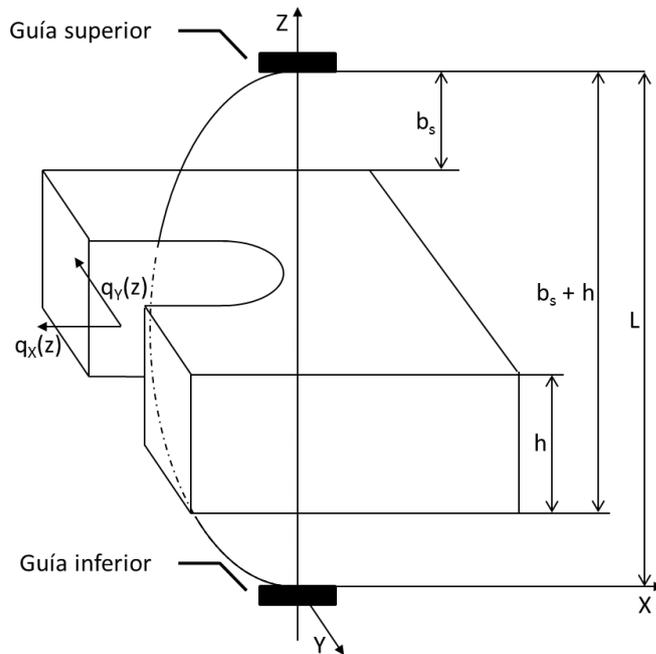


Figura II.7. Esquema de la vibración del hilo [Han, 2007].

Ya se ha apuntado al principio de este apartado II.2.2 que en el hilo se genera una componente dinámica, la cual provoca su vibración, y otra estática, que causa la deformación del hilo denominado *wire-lag*. Este retraso del hilo, que fue modelizado matemáticamente en 1994 para trayectorias rectas [Dauw, 1994], es analizado por Sarkar et al. años más tarde en trayectorias circulares [Sarkar, 2011]. Ambos trabajos se basan en lo que denominan *fuerza de gap*, una fuerza de reacción que se desarrolla principalmente debido a la fuerza explosiva de las burbujas de gas que aparecen durante las descargas.

Para modelizar el comportamiento del hilo en una trayectoria circular, se asume que la distancia entre la pieza y la guía superior y la inferior es la misma, no existen fenómenos dependientes del tiempo y la *fuerza de gap* es constante, la vibración lateral debido a esta *fuerza de gap* es considerada pequeña, la flexión del hilo también lo es si se comparara con el radio del mismo, el hilo se considera perfectamente flexible, la flexión desde la guía hasta la superficie de la pieza se puede asumir despreciable (valor de  $w_2$  en la Figura II.5) y el desgaste del hilo no se tiene en consideración.

Con estas simplificaciones se obtienen dos expresiones que servirán para analizar el fenómeno del *wire-lag* y compensarlo en trayectorias circulares: la constante de compensación radial del *wire-lag* ( $K$ ) y la intensidad de fuerza de *gap* o fuerza de *gap* por unidad de longitud del hilo ( $q_d$ ). Este modelo analítico predice que  $K$  es invariante con el radio y constante para cada espesor de pieza. Asimismo, según las expresiones obtenidas por los autores, la flexión lateral del hilo se verá influenciada por el espesor de pieza y la fuerza axial del hilo, siendo muy reducida en el caso de las trayectorias rectas.

Esta última afirmación es muy importante puesto que se vuelve a contemplar la deformación del hilo en sentido paralelo y perpendicular a la dirección de corte [Kinoshita, 1984]. Como se verá más adelante en el capítulo III, esta circunstancia se verá reflejada en el error de las piezas erosionadas, el cual no depende únicamente del *wire-lag* en las trayectorias con cambios de dirección: en las trayectorias rectas también existe un error de verticalidad generada por esta razón.

Chen et al. asumen las siguientes simplificaciones para generar su modelo matemático del *wire-lag* que parte de la Ec. II.4: la pieza está simétricamente localizada entre las dos guías, la tracción axial es constante, el hilo (con su masa uniformemente distribuida a lo largo de su longitud) permanece estático y su vibración no se tiene en cuenta y, por último, la fuerza resultante de las descargas se distribuye por el mismo con un sentido opuesto a la dirección de corte [Chen, 2014].

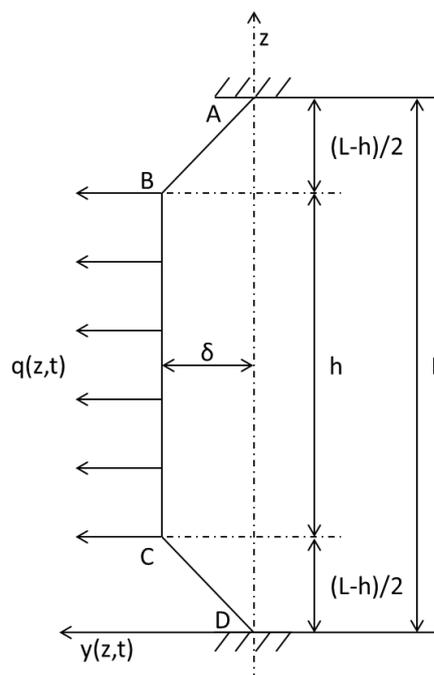


Figura II.8. Esquema de la flexión del hilo [Chen, 2014].

Con estas simplificaciones el modelo es parecido al de Puri [Puri, 2003 1] para este caso particular (ver Figura II.8) y puede expresarse mediante la ecuación simplificada Ec. II.5, de la que puede obtenerse el valor del *wire-lag* ( $\delta$ ) de la Ec. II.6.

$$\frac{q_{(z,t)}h}{2} \approx \frac{2F\delta}{L-h} \quad \text{Ec. II.5}$$

$$\delta = \frac{qh(L-h)}{4F} \quad \text{Ec. II.6}$$

De este modelo matemático se desprende que, a mayor espesor de pieza, mayor será el valor del *wire-lag*, que también aumenta con la intensidad de la descarga pero que, sin embargo, disminuye según aumenta la tensión del hilo.

Ese mismo año, Zhang et al. realizan primero un análisis de cada una de las fuerzas que actúan durante el proceso para poder después modelar la flexión del hilo en el proceso de electroerosión por hilo de velocidad media (*Medium-Speed Wire Electrical Discharge Machining*, MS-WEDM). Los dos modelos macroscópicos propuestos consideran tanto el incremento de temperatura como el comportamiento vibratorio del hilo (tanto su componente estática como dinámica). Si bien las máquinas de electroerosión por hilo se han clasificado según la velocidad de alimentación del hilo en máquinas WEDM de baja velocidad (las clásicas) y de alta velocidad (*High-Speed Wire Electrical Discharge Machining*, HS-WEDM) [Wentai, 2016], los autores generan el concepto de MS-WEDM, las cuales operan en velocidades intermedias [Zhang, 2014]. Las máquinas del tipo HS-WEDM originalmente se desarrollaron en China para mejorar su rendimiento y el hilo utilizado es diferente, con el fin de que pueda alcanzar velocidades de entre 480 m/min y 600 m/min.

Los modelos matemáticos que se desarrollan en este trabajo son dos: la flexión del hilo en el área cercana a la guía (característico del proceso de MS-WEDM, por lo que no se analizará) y el modelo de flexión entre las dos guías. Este modelo, a su vez, se divide en el modelo del *wire-lag*, el de su componente dinámica y la superposición de ambos.

El primero de ellos se simplifica mediante las siguientes consideraciones: la pieza se sitúa simétricamente entre las dos guías, la fuerza axial a la que se somete el hilo es constante y la masa del mismo está uniformemente distribuida a lo largo de su longitud [Sarkar, 2011], tanto la fuerza electromagnética como la generada por el fluido dieléctrico se pueden ignorar; el módulo de Young varía con la temperatura, lo que provoca el *wire-lag* y, por último, la fuerza generada por las descargas es la causa principal de la deformación del hilo [Dauw, 1994].

Con estas simplificaciones aplicadas a la ecuación principal de este apartado (Ec. II.4) y al modelo térmico unidimensional, se obtienen estos resultados: la flexión del hilo tiene una correlación positiva con la fuerza distribuida a lo largo de este, el espesor de pieza y la distancia entre guías; mientras que tiene una correlación negativa con la tensión del hilo, la velocidad de este, la rigidez a flexión del mismo y su sección. Además, el módulo de Young del hilo tiene una tendencia decreciente con el incremento de temperatura en el canal de descarga.

En cuanto a la vibración del hilo, se desarrolla un modelo para una única descarga que se resuelve mediante el método de separación de variables. El hilo es considerado como un hilo vertical en la sección de corte, inmóvil, flexible y de masa uniformemente repartida, la pieza de nuevo se sitúa simétricamente entre ambas guías y la fuerza axial se mantiene constante. Así, la máxima amplitud vendrá dada por la distancia  $A_{m\acute{a}x}$  de la Figura II.9.

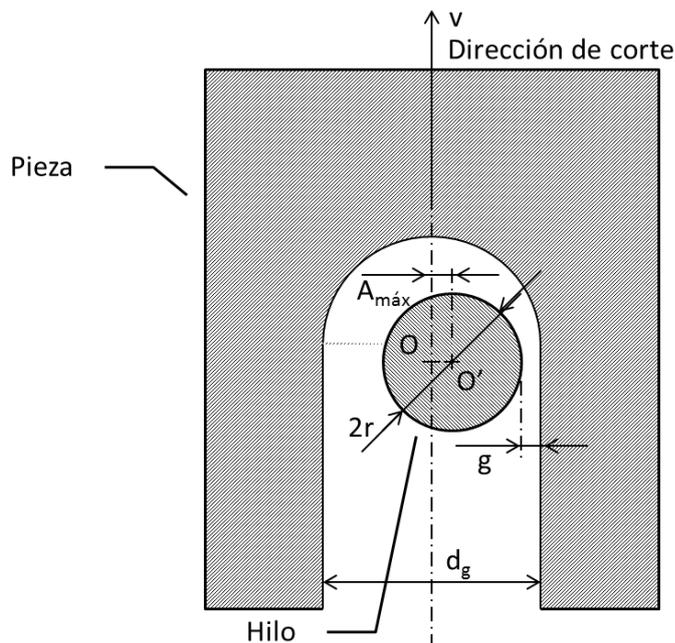


Figura II.9. Esquema de la flexión del hilo [Zhang, 2014].

Superponiendo la máxima amplitud de ambos modelos se obtendría la amplitud máxima debido a la componente estática y a la componente dinámica. Basándose en consideraciones realizadas en otros trabajos (como el de Puri o Plaza, entre otros [Puri, 2003 2] [Plaza, 2009]) se realiza una comprobación experimental comparando su modelo con otros modelos desarrollados anteriormente. Los autores concluyen que el error entre el modelo y los resultados experimentales está en torno al 10 %, siendo menor que el conseguido hasta ahora por otros investigadores [Dauw, 1994] [Puri, 2003 2]. Aunque para completar este trabajo asumen que este análisis debe generalizarse, estudiándolo en el caso de corte de esquinas y corte cónico, la

contribución principal de este trabajo radica en la consideración de un módulo de Young variable con la temperatura para calcular la flexión del hilo, la cual varía suficientemente alrededor de la descarga como para tenerla en cuenta.

El estudio presentado en el apartado II.2.1 sobre el trabajo realizado por Chen para caracterizar la fuerza electromagnética y de la temperatura tiene como último objetivo minimizar la vibración del hilo y optimizar los parámetros de corte [Chen, 2015]. En esta segunda parte del trabajo desarrollan un modelo matemático en base al esquema de la Figura II.10 y la Segunda Ley de Newton (ver de nuevo la Ec. II.4).

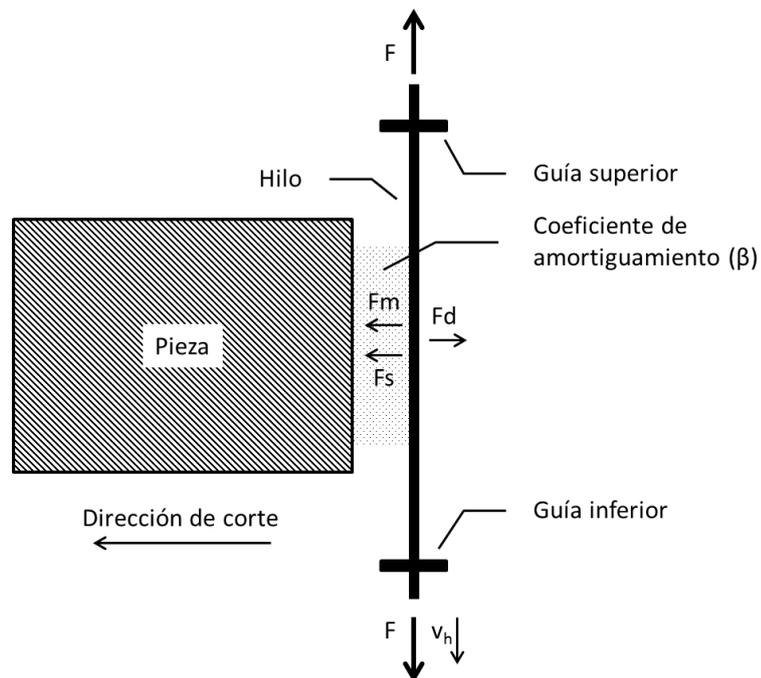


Figura II.10. Esquema de fuerzas analizadas en WEDM [Chen, 2015].

De todas las fuerzas existentes (fuerza axial del hilo ( $F$ ), fuerza de reacción de la descarga ( $F_d$ ), fuerza electromagnética ( $F_m$ ), fuerza electrostática ( $F_s$ ) y fuerza hidrodinámica dependiente del coeficiente de amortiguamiento ( $\beta$ ) y de la tensión térmica ( $\sigma_T$ )), la fuerza electromagnética y la fuerza debida a la variación térmica son las más influyentes en la vibración del hilo. Las simplificaciones que asumen son: la pieza está simétricamente dispuesta entre ambas guías, la tensión y velocidad de alimentación del hilo se mantienen constantes, el hilo es isótropo y completamente elástico, la fuerza de reacción de la descarga está generada por un pulso trapezoidal y el efecto del dieléctrico se puede simplificar con el coeficiente de amortiguamiento.

Con estas simplificaciones generan un modelo combinado de la fuerza electromagnética y la variación de la temperatura. Comparando los resultados experimentales con los resultados de este modelo se comprueba que el programa es una solución viable, puesto que el error relativo entre ambos tiene un valor máximo de  $11,2 \mu\text{m}$ . Los autores apuntan a que esta desviación puede deberse a la inestabilidad de las condiciones de erosión, a la vibración de la máquina y al error de medida.

Por último, otro modelo que cabe mencionar es el que se realiza sobre la fuerza hidrodinámica, que juega un papel importante en la vibración del hilo, para lo que se genera un modelo tridimensional. Este modelo resuelve las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo, incluidas las ecuaciones de Navier-Stokes, por métodos numéricos [Okada, 2015].

Aunque existen diversos factores que no se tienen en cuenta (el efecto de las burbujas, la fuerza de impacto de las descargas o la vibración del hilo) se ha comprobado mediante una cámara de alta velocidad que los resultados teóricos obtenidos concuerdan con los experimentales. Para ello, se mide la flexión del hilo causada por la fuerza hidrodinámica en una pieza de 150 mm de espesor, siendo la tensión del hilo de 1 N (de pequeño valor para poder observar dicha deformación). Primero se mecaniza una pequeña ranura en la pieza y, a continuación, otra de 10 mm de longitud con una tensión mayor, deteniendo el hilo al borde de la muesca para poder observar su movimiento a través de la ranura, utilizando para ello una cámara de vídeo con suficientes aumentos como para poder observar el hilo sometido a la presión del chorro del dieléctrico.

Si se comparan dos imágenes, con y sin dieléctrico, la diferencia de posición entre la referencia y el punto más alejado es de aproximadamente  $86 \mu\text{m}$ , mientras que la flexión del hilo simulada es de  $105 \mu\text{m}$ . Sin embargo, se puede dar por válido el modelo si se tiene en cuenta que el campo de flujo y el de presión modifican ligeramente la flexión, lo que llevaría a una pequeña disminución de la misma. No obstante, a pesar de que la fuerza hidrodinámica juegue un papel primordial en la flexión del hilo, se debe tener en cuenta la influencia del espesor de pieza y no se pueden despreciar el resto de fuerzas que modifican esta deformación, sobre todo, en las trayectorias complejas con cambios bruscos de dirección.

### II.2.2.2 Modelos experimentales para la determinación de la deformación y vibración del hilo

Otra forma de analizar y cuantificar la deformación y vibración del hilo es usar métodos experimentales, como son los equipos de visión de alta velocidad, los cuales se utilizan durante el corte, o microscopios para observar la influencia del comportamiento del hilo en la pieza. Algunos de los trabajos más relevantes se enumeran y explican a continuación.

En 1996, se utiliza un sistema de sensores colocado debajo de las guías superiores para visualizar el comportamiento vibratorio del hilo [Beltrami, 1996]. El desplazamiento del hilo en ambas direcciones ( $X$  e  $Y$ ) se mide mediante la iluminación del mismo con un haz de luz colimada. La sombra es proyectada en los detectores triangulares pudiendo medir así el desplazamiento del hilo y las intensidades ópticas recogidas se transforman en señales eléctricas para su posterior medición. Como se verá más adelante, este sistema se utilizará en el caso del corte de esquinas (ver apartado II.2.3).

En el trabajo de Okada et al., por ejemplo, se construye el sistema esquematizado de la Figura II.11 para la observación, con una cámara de alta velocidad, del proceso de electroerosión por hilo. Este sistema está constituido por un hilo de tungsteno de  $50\ \mu\text{m}$  de diámetro, una pieza de acero de  $1\ \text{mm}$  de espesor y un pequeño tanque realizado con una resina acrílica [Okada, 2010]. Además de la observación de las descargas se monitorizan, con un osciloscopio, las señales de tensión e intensidad.

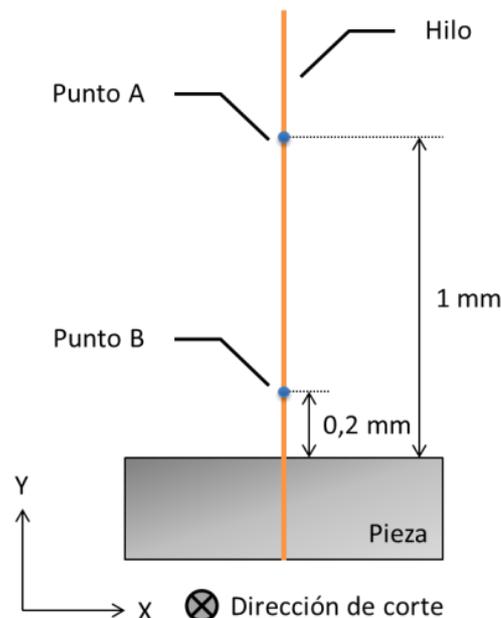


Figura II.11. Esquema de la recogida de imágenes del movimiento del hilo [Okada, 2010].

El área de observación está acotada entre los puntos *A* y *B* (1 mm y 0,2 mm por encima de la superficie superior de la pieza, respectivamente, de la Figura II.11), observando el movimiento del hilo desde la parte posterior al movimiento del mismo. La variación de la posición en el eje *X* de los puntos *A* y *B* se calculó mediante el análisis de las imágenes recogidas, lo cual permitió obtener la amplitud de la vibración del hilo y la frecuencia, usando diodos de emisión y detección de luz.

Los resultados muestran que la amplitud del movimiento decrece con la tensión del hilo, llegando a un mínimo alrededor del valor de  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ . A partir de ese punto la amplitud vuelve a incrementarse. Al coincidir prácticamente con el límite elástico del hilo de tungsteno (su valor es aproximadamente  $0,64 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ ) los autores creen que, a partir de ese punto, el hilo no es capaz de mantener esa mínima amplitud de vibración. La variación del *gap* generado durante el corte se corresponde con dicha variación de amplitud. Por otro lado, analizando la tensión axial del hilo con la tasa de arranque del mismo, se observa que un incremento de la tensión provoca un aumento de esta tasa, debido a que el canal generado se vuelve más estrecho. Sin embargo, si esta tensión es demasiado grande, la vibración se incrementa (tal y como se ha comentado al principio de este mismo párrafo) y la tasa comienza a decrecer de nuevo.

Liang et al. proponen, en su estudio de 2014, dos métodos para la medida experimental de la componente estática de la vibración del hilo que causa el *wire-lag*: por un lado, el uso de una cámara digital y, por otro, el corte de una geometría de pieza que permita medirlo posteriormente mediante un microscopio [Liang, 2014]. El esquema del experimento se muestra en la Figura II.12.a, mientras que en la Figura II.12.b se observa el proceso de captación de las descargas.

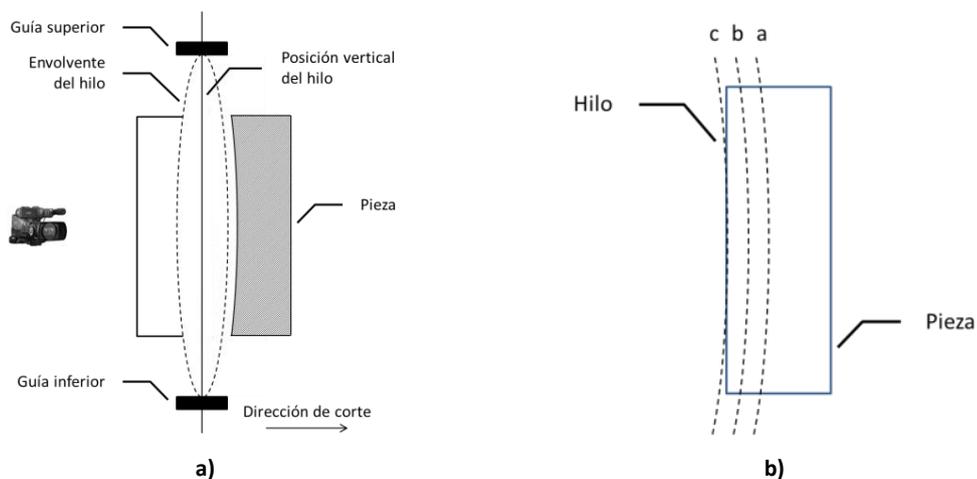


Figura II.12. Recogida de imágenes: a) captación de las imágenes; b) esquema del corte en diferentes posiciones del hilo [Liang, 2014].

Así, mientras el hilo está cortando en la posición *a* no hay captura en la cámara, mientras que al llegar a la posición *b* se pueden grabar las imágenes de las zonas superior e inferior de la pieza y, finalmente, en la posición *c*, la zona media de la pieza también queda al descubierto. Por último, en la Figura II.13 se muestra un tipo de descarga normal y una descarga anormal o arco, cuya diferencia puede ser detectada por el generador. Con la obtención de puntos en diferentes zonas del espesor de pieza se genera la forma de la flexión del hilo.

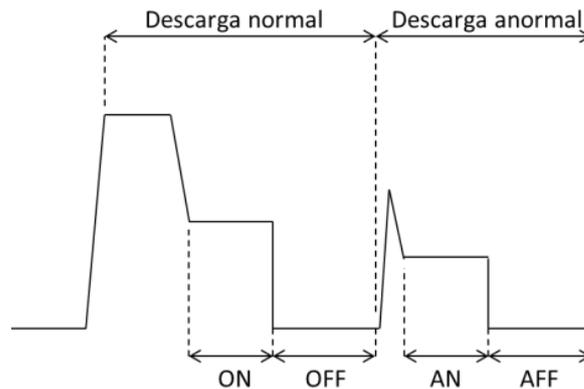


Figura II.13. Ejemplo de descarga normal y descarga anormal según Liang [Liang, 2014].

Por otro lado, en la Figura II.14.a se muestra la trayectoria que el hilo debe realizar para conseguir la pieza de la Figura II.15, teniendo en cuenta que se debe garantizar la perpendicularidad entre este y el *plano de referencia* para la correcta medición del *wire-lag*. Primero se realiza el corte de la *Trayectoria 1*, desconectando el generador al final de la misma; después, se vuela al punto inicial y se comienza la *Trayectoria 2*. Es importante puntualizar que entre la *Trayectoria 1* y la interpolación final de la *Trayectoria 2* debe haber, entre ellas, una distancia en dirección perpendicular a la de corte de radio de hilo más *gap*, para obtener la *línea de referencia*, donde se medirá la flexión del hilo (ver Figura II.14.b).

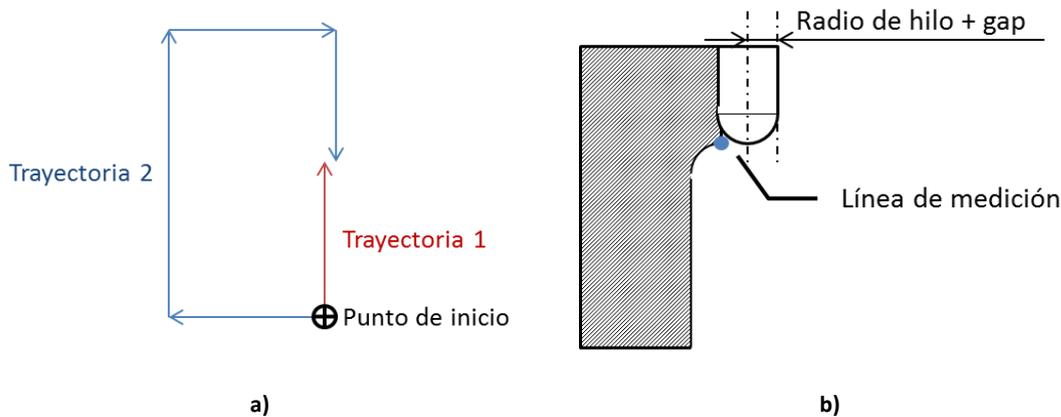


Figura II.14. Generación de pieza: a) trayectoria generada; b) vista de detalle de la intersección entre la *Trayectoria 1* y la *Trayectoria 2* [Liang, 2014].

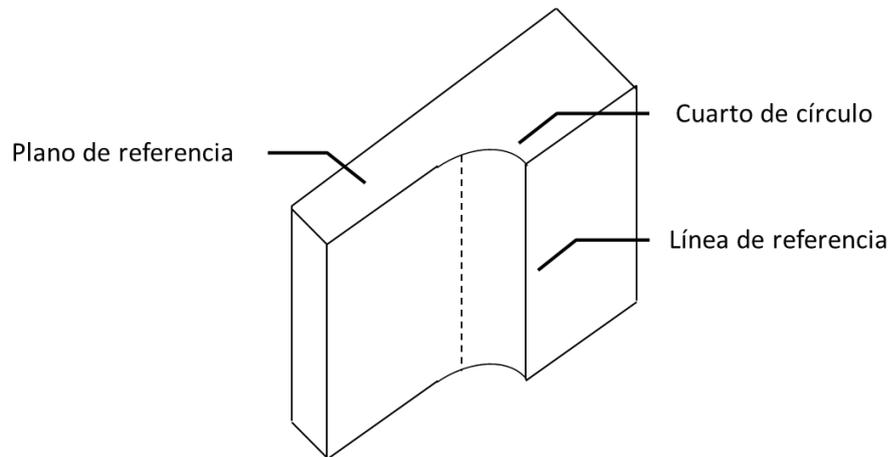


Figura II.15. Pieza obtenida para la cuantificación del *wire-lag* [Liang, 2014].

Las conclusiones de este trabajo muestran que, mediante el corte de pieza y posterior medición con el microscopio, la medida de flexión del hilo es mayor que utilizando la cámara digital. Aunque los autores no aclaran el porqué de esta diferencia, puede deberse a que, mientras en el primero de los casos se está observando la vibración del hilo, en el segundo se mide la marca que este genera en la pieza, lo que conceptualmente es diferente (estos conceptos se verán a lo largo del capítulo III). La limitación de este procedimiento es clara: solo puede medirse la flexión del hilo en los casos en los que la alineación sea perfecta y para una trayectoria recta. Además, no se explica con suficiente precisión el corte realizado: en el momento final de la generación de la pieza puede existir desgarro del material, impidiendo una medición exacta de la flexión del hilo, o un exceso de descargas o un *gap* diferente pueden alterar la exactitud de la medición.

En estos últimos años la electroerosión por hilo también ha servido para realizar piezas más pequeñas que se utilizan en el sector biomédico o relojero, entre otros. Para ello es necesario emplear hilos más finos y espesores de pieza más pequeños. Este es el caso del trabajo sobre el estudio de la amplitud de la vibración y la frecuencia de un hilo de tungsteno de pequeño diámetro [Habib, 2016] [Kamei, 2016], que parte de trabajos anteriores en los que han utilizado cámaras de alta velocidad para la observación microscópica directa de su comportamiento [Okada, 2010] [Okada, 2013].

En el estudio de Kamei se utiliza un hilo de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro y una pieza de 1 mm de espesor para observar su vibración en dirección paralela (Figura II.16.a) y perpendicular (Figura II.16.b) a la dirección de corte. Como ya se ha comentado en otros trabajos, se desprende del análisis que la amplitud de la vibración decrece aumentando la tensión del hilo, lo que provoca, a su vez, un canal de erosión más estrecho. Asimismo, el pico de frecuencia decrece con el aumento de la tensión y es similar al modo de frecuencia de primer orden.

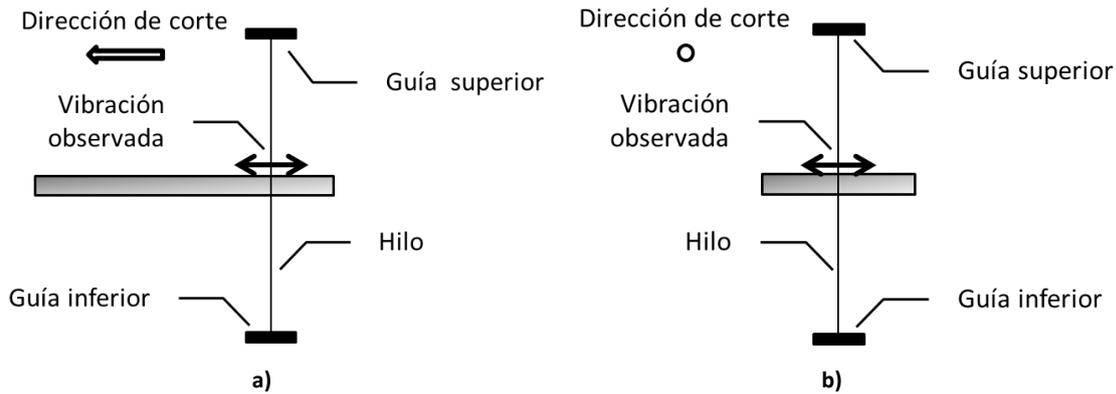


Figura II.16. Esquema de la observación de la vibración del hilo según su dirección: a) paralela; b) perpendicular [Kamei, 2016].

Por otra parte, se realiza una comparativa entre las dos direcciones de vibración. Los autores apuntan a que la vibración en la dirección de corte es mayor, puesto que el canal ya está erosionado, mientras que en la dirección perpendicular el canal de erosión está limitado por la propia pieza. Sin embargo, los autores no citan la existencia de una diferencia direccional en la magnitud de las fuerzas.

Concluyen, por tanto, que la flexión que provoca el *wire-lag* en el proceso de WEDM tradicional también existe con el uso de hilos finos y espesores de pieza pequeños. En dirección perpendicular a la del corte la amplitud decrece cerca del tercer nodo (observan que son los nodos impares los que generan mayor deformación del hilo), mientras que en la dirección paralela es mayor en sentido contrario al de corte. La amplitud de la envolvente frontal y perpendicular es prácticamente la misma.

### II.2.3 PRECISIÓN EN EL CORTE DE ESQUINAS Y CÍRCULOS

Los problemas de vibración y deformación del hilo y la concentración de las descargas son las causas más importantes de los errores en los cortes de esquinas y círculos de pequeño diámetro, ya que las fuerzas y la temperatura se ven alteradas por este cambio en la trayectoria [Chen, 2014]. Desde hace años se ha observado que la componente estática de la vibración del hilo apenas afecta a las trayectorias rectas y, sin embargo, lo hace de forma severa en los cambios de trayectoria bruscos. Por esta razón se ha seguido estudiando el problema a lo largo de todo este tiempo, bien modelizando el comportamiento del hilo durante el corte de este tipo de trayectorias o modificando los parámetros para reducir el error, entre otros [Beltrami, 1996] [Sanchez, 2007 1].

Dekeyser et al. atribuyen la imprecisión en el corte de esquinas a tres factores: el *wire-lag*, las vibraciones del hilo y el cambio en la probabilidad de la descarga [Dekeyser, 1989]. Teniendo en cuenta las causas predominantes en el error cometido en el corte de esquinas (ver apartado II.2.2.1) dejan a un lado el cambio de los parámetros de mecanizado [Juwet, 1987] y optan por adaptar la trayectoria (ver Figura II.17).

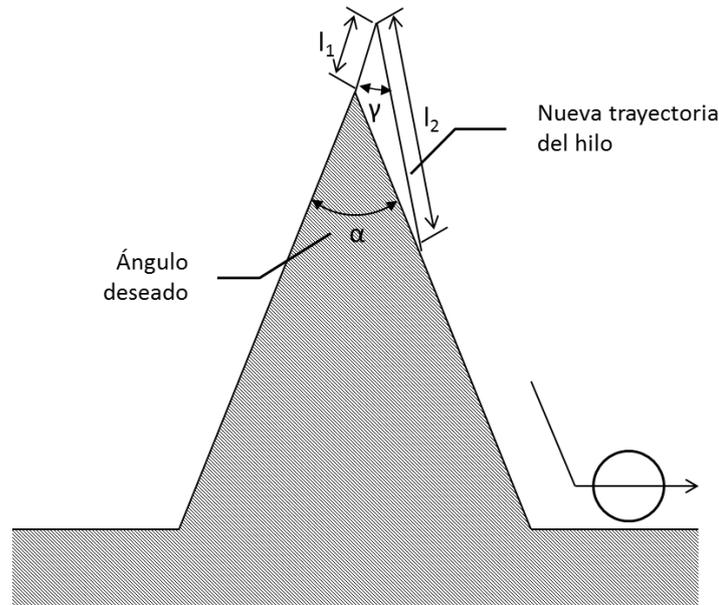


Figura II.17. Trayectoria del hilo para la corrección de esquinas [Dekeyser, 1989].

Primero se realizan las pruebas preliminares para determinar la falta de precisión en el corte de esquinas en función del ángulo ( $\alpha$ ) de las mismas. Sabiendo el error cometido, se le aplica un coeficiente de seguridad para poder calcular, mediante trigonometría, los parámetros  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $l_1$  y  $l_2$  de la Figura II.17. De esta forma se evita obtener una geometría con falta de material, ya que el excedente puede ser eliminado en los sucesivos repasos. Con este método se consigue reducir el error en un 50 %.

Con el modelo simplificado expuesto por Beltrami et al. para el comportamiento del hilo explicado en el apartado II.2.2.1 y el control de su posición en el II.2.2.2, proponen dos métodos para la corrección del error en esquinas [Beltrami, 1996], que cuantifican en cientos de micrómetros: limitar el pulso de potencia y controlar la posición del hilo en tiempo real. Emplean un sensor óptico de posición para saber la flexión del hilo en dirección  $X$  e  $Y$  cada 10 ms de forma que, con cada medición, se modifica la trayectoria del hilo del control numérico. A esta técnica de compensación del error en esquinas la denominan AGIEPLOT.

Para comparar el corte de esquinas sin ningún tipo de corrección con la estrategia de esquinas típica (reducción de la potencia de pulso) y la función AGIEPLOT, generan un corte en zigzag de 3 mm. Los resultados muestran que, si bien cualquiera de las dos correcciones mejora el corte, es la de AGIEPLOT la óptima, puesto que el tiempo relativo es menor en esta última (58 % con respecto al corte sin correcciones y un 2 % con respecto a la variación de parámetros durante el mismo).

En el trabajo de Hsue et al. definen el *ángulo de descarga* (basándose en un trabajo anterior [Obara, 1995]) y la tasa de arranque de material (*Material Removal Rate, MRR*) con objeto de mejorar el corte de esquinas [Hsue, 1999]. El *ángulo de descarga* ( $C_0$ ) es el rango angular en el que existen descargas entre hilo y pieza durante un pequeño periodo de tiempo: su magnitud será igual a  $\pi$  cuando se esté realizando un corte recto y algo más pequeño al comienzo del corte (ver Figura II.18); sin embargo, cuando la trayectoria es compleja este ángulo irá variando en función de la misma. Por otra parte, las condiciones de mecanizado tendrán influencia en el radio de la descarga ( $r_g$ ) representado también en la figura.

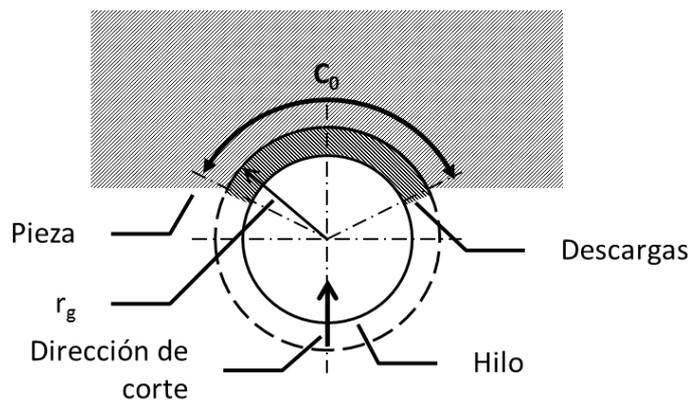


Figura II.18. Definición del *ángulo de descarga* [Hsue, 1999].

Este cambio en el ángulo de la descarga influirá, según los autores, en la *MRR* durante el corte de las esquinas, que se define como el volumen de material erosionado por unidad de tiempo. Asumiendo que el *gap* es constante durante este cambio de dirección, que el generador es isoenergético y que la velocidad del hilo es pequeña, la trayectoria del centro del hilo puede asemejarse a una función exponencial (ver Ec. II. 7) que depende del *wire-lag* ( $\delta$ ) y de los parámetros de mecanizado ( $p$ ).

$$y = \delta \exp(-x/p)$$

Ec. II. 7

Una vez se generaliza esta ecuación para cualquier ángulo de esquina, se estiman tanto el  $C_0$  como la  $MRR$  teóricamente mediante software y se observa cómo decrecen drásticamente a un mínimo y vuelven a su valor anterior al corte de este tipo de trayectoria. Además, esta caída es dependiente del ángulo de esquina. Estos resultados son validados por las pruebas experimentales y se puede interpretar esta caída como un cambio brusco en la  $MRR$ . Además, los autores hacen referencia a una leve caída de presión del dieléctrico al finalizar el corte de los ángulos más pequeños, que es un efecto muy importante en la bajada del rendimiento en el corte.

El mismo año en el que Puri et al. diseñan un modelo matemático para describir el *wire-lag*, el autor principal también publica un trabajo para corregir el error cometido en las esquinas [Puri, 2003 2]. Mediante el método de Taguchi evalúan los principales factores que determinan la velocidad media de corte, la rugosidad superficial y la falta de precisión debida al *wire-lag*. Posteriormente, realizan un análisis de la varianza (*Analysis of Variance*, ANOVA) para optimizar los resultados obtenidos.

Comparando las varianzas y los grados de contribución de cada variable, se llega a la conclusión de que el tiempo de pulso, el tiempo de pausa y el valor de pico del pulso de corriente son los parámetros que influyen en mayor medida en la velocidad de corte durante el desbaste, mientras que el tiempo de pulso y la velocidad media de corte lo son en el repaso. Esto supone que la velocidad de corte es proporcional a la energía invertida durante la erosión y depende, no solo de la energía de la descarga que determinará el tamaño del cráter generado, sino también de la potencia aplicada.

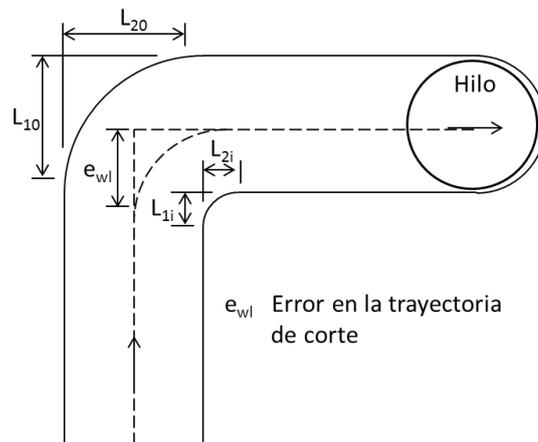
Para la rugosidad superficial, el pico de pulso de corriente, y el tiempo de pulso, el valor de pico del pulso de tensión, la tensión de servo de *gap*, la presión del fluido dieléctrico, el *gap* y la velocidad media de corte son los factores determinantes en el corte de desbaste y repaso, respectivamente. Así, los cráteres formados durante el desbaste están superpuestos a los generados durante el repaso.

Por último, en lo que se refiere a la imprecisión debida al *wire-lag*, en el desbaste son significativos el tiempo de pulso, el tiempo de pausa y el valor de pico del pulso de corriente durante el desbaste, en tanto que este último parámetro, la tensión del hilo, la tensión de servo de *gap*, el propio *gap* y la velocidad media de corte lo son en el repaso. Es decir, todos los parámetros relacionados con la descarga son influyentes en lo que respecta al error generado por el *wire-lag*.

Puesto que encontrar el criterio para un óptimo grupo de parámetros es prácticamente imposible, según la opinión de los autores, han generado tres combinaciones de los mismos en función del logro: mejor productividad, menor imprecisión debida al *wire-lag* o menor rugosidad superficial. Se ha observado una similitud a la hora de optimizar los parámetros en los dos primeros casos.

A pesar del trabajo que supone realizar este análisis, los propios autores son conscientes de que se deben tener en cuenta otros factores, como son el hilo, el material de pieza y su espesor. Esto es debido a que, como se ha visto en el apartado II.2.2, también determinan el *wire-lag* y, por tanto, su efecto en el corte de esquinas.

Puesto que la tensión aplicada al hilo es un factor importante para controlar la vibración y deformación del mismo e, incluso, la generación de esquinas y pequeños radios, una solución es desarrollar un sistema de lazo cerrado para el control de dicha tensión [Yan, 2004]. El error de la trayectoria ( $e_{wl}$ ) y el error de contorno generado tanto en las esquinas exteriores ( $L_{10}$  y  $L_{20}$ ) como interiores ( $L_{1i}$  y  $L_{2i}$ ) vienen definidos en el esquema de la Figura II.19, que son los parámetros que se comparan a la hora de erosionar esquinas de 30°, 60° y 90° en espesores de pieza de 50 mm y 70 mm. De los resultados obtenidos, se observa una mejora de entre un 40 % y un 50 % mediante el uso de este sistema frente al de control de lazo abierto en el corte de esquinas.



**Figura II.19. Parámetros a comparar en la mejora del corte de esquinas propuesta por Yan mediante el control de la tensión [Yan, 2004].**

Aunque la contribución del trabajo es innegable, las máquinas se ajustan cada vez más para poder trabajar con el máximo nivel de fuerza axial posible (limitado por el límite elástico del material del hilo), por lo que el margen de mejora de la precisión mediante esta técnica no tiene mayor recorrido.

En 2007, Han et al. apuntan a un cambio en el ángulo y la frecuencia de la descarga que influirán en la deformación del hilo durante el corte de esquinas [Han, 2007]. Por tanto, definen un coeficiente de la variación del área de descarga ( $k$ ), proporcional a la frecuencia de la misma que, a su vez, lo es de la deformación del hilo ( $w(z)$ ). Con el modelo de deformación, el coeficiente  $k$  y la trayectoria teórica del hilo proponen calcular el recorrido real de este.

Comparando los resultados obtenidos de la simulación con los datos experimentales (midiendo la forma del corte con un microscopio y compensando la trayectoria) se comprueba que estos son bastante consistentes; sin embargo, en ángulos muy agudos no hay datos experimentales para comparar. A pesar de poder observar gráficamente que la tendencia general entre modelo y resultado experimental es coherente, no hay datos de desviaciones medias o máximas de error, por lo que resulta difícil cuantificar el grado de consistencia del método.

En ese mismo año, Sánchez et al. [Sanchez, 2007 1] comprueban experimentalmente que el error a  $45^\circ$  en el corte de una esquina de ángulo recto con un radio de redondeo de 0,2 mm es de  $40 \mu\text{m}$  si el espesor de pieza es de 100 mm, mientras que en el caso de un radio de redondeo de 0,25 mm este error disminuye a  $35 \mu\text{m}$ . Este defecto es debido a lo que denominan “efecto de rueda trasera” que ocurre en el corte de esquinas (ver Figura II.20.a), que no es más que otra acepción del concepto de tractriz mencionado anteriormente por otros autores [Dekeyser, 1989].

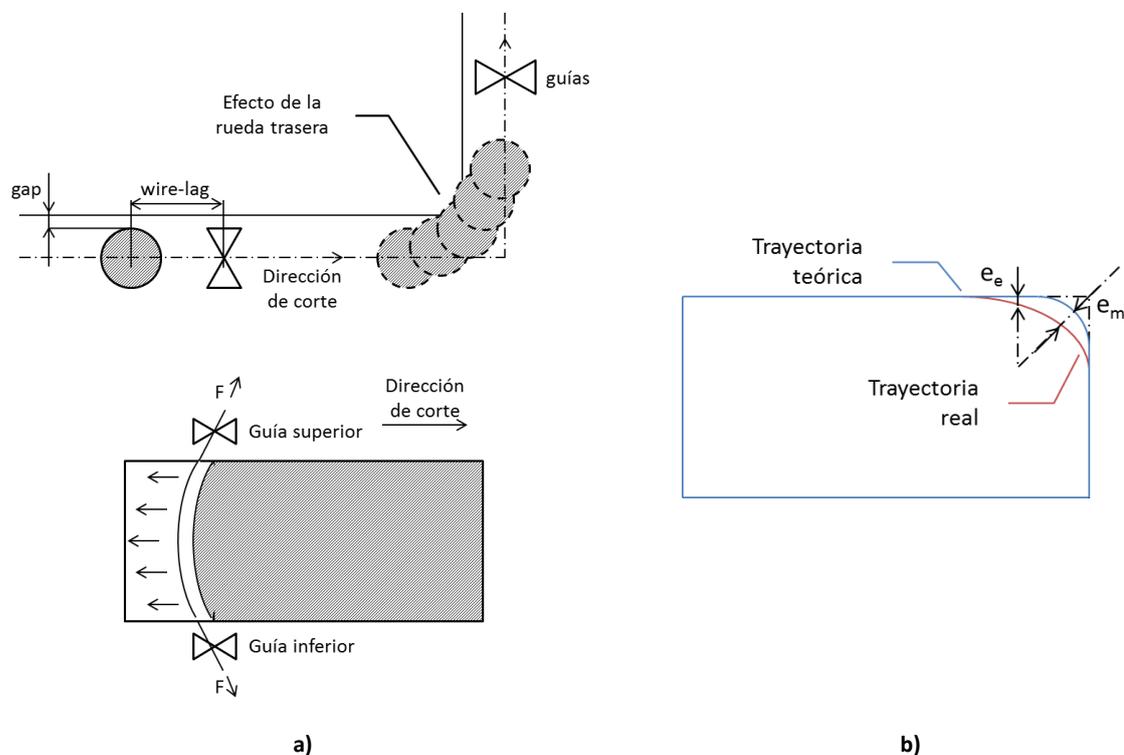


Figura II.20. Esquema: a) del corte de esquina; b) parámetros del error de esquina [Sanchez, 2007 1].

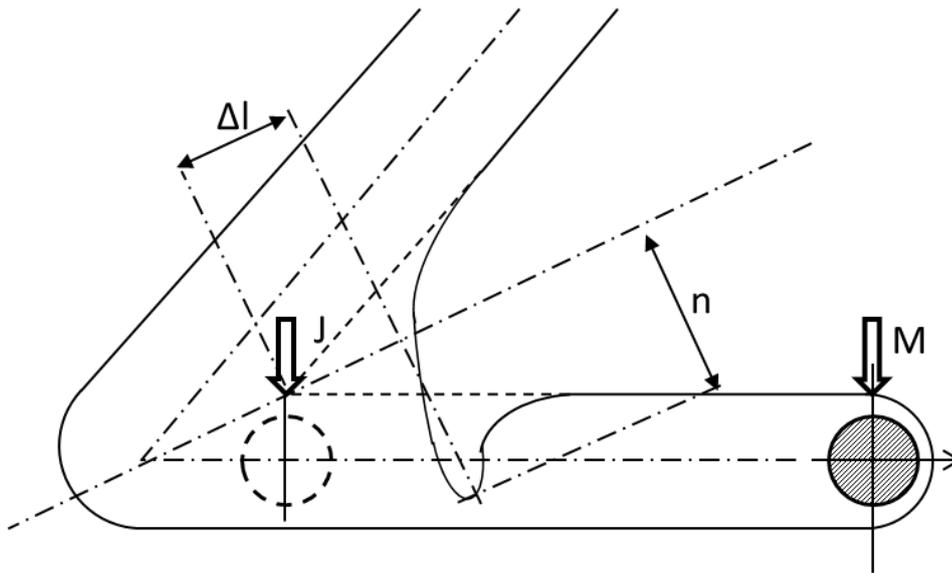
Los autores observan que una mala elección de la velocidad durante el corte de esquinas puede provocar que, si esta es demasiado alta, erosionará menos material del necesario; mientras que, si es más baja de lo recomendado, generará un defecto de material en la pieza. Por ello, deciden limitar la velocidad de corte en los repasos y medir el error cometido a  $45^\circ$  ( $e_m$ ) y a la salida de la esquina ( $e_e$ ), tal y como se esquematiza en la Figura II.20.b. Se llevan a cabo cuatro cortes diferentes, utilizando dos radios de redondeo (de 0,2 mm y 0,25 mm) y dos espesores (de 50 mm y 100 mm). Además, se utilizan tres estrategias: corte y un repaso, corte y dos repasos, y corte y tres repasos.

Una primera aproximación se realiza limitando la velocidad a 0,5 mm/min. Se comprueba que no es la mejor estrategia dependiendo del número de repasos empleados, por lo que se decide comparar esta propuesta con el uso de tres estrategias diferentes en cada repaso (estableciendo las velocidades en 1,2 mm/min, 1,3 mm/min y 1,4 mm/min, respectivamente). Así, y puesto que se observa una mejora en el proceso de corte, el futuro trabajo de este estudio [Sanchez, 2007 2] se enfocará en utilizar una limitación de la velocidad que varíe continuamente durante la consecución de la esquina.

Con este fin, se realizan unos cortes rectos en dos espesores diferentes (50 mm y 100 mm) para poder cuantificar el *gap* en función de la velocidad, el cual crece según disminuye esta. Por consiguiente, en espesores pequeños, el margen de variación de la velocidad es pequeño, puesto que está ajustada para que sea la máxima posible con el fin de aumentar el rendimiento del proceso (y, por tanto, el margen del *gap* es mínimo). En cualquier caso, las curvas del *gap* en función de la velocidad se pueden ajustar a expresiones exponenciales.

La nueva estrategia de corte con una velocidad progresivamente variable (contraria al defecto de material generado) mejora el valor de  $e_e$ , pero sobre todo, el defecto de material  $e_m$  que se cuantifica, para un espesor de pieza de 50 mm, hasta en un 60 %. La limitación de esta estrategia radica en que limitar la velocidad supone una pérdida de productividad por lo que, si bien es una opción viable, también lo es buscar alternativas que no reduzcan la efectividad del corte.

Dos años más tarde, Dodun et al. realizan una primera clasificación de los ángulos en función de si estos son interiores o exteriores, cuantificando el radio de redondeo menor en cada uno de ellos (cero en los exteriores y de valor radio de hilo más *gap* en los interiores). En los casos en los que se realizan cortes de ángulos exteriores muy pequeños (ver Figura II.21) la fuerza atractiva entre el hilo y la pieza genera una deformación en la punta de la pieza. En el caso de materiales ferromagnéticos como el acero, se dobla en el mismo sentido que el de corte; sin embargo, el aluminio, tendrá una doblez en sentido contrario [Dodun, 2009].



**Figura II.21.** Curvatura permanente del corte de una esquina exterior como resultado de la fuerza electromagnética en un material ferromagnético [Dodun, 2009].

Para evaluar la magnitud de este error se propone el uso de dos parámetros mostrados en la Figura II.21: el desplazamiento horizontal de la esquina ( $n$ ) y la pérdida de material en la esquina ( $\Delta l$ ). De la batería de ensayos realizada (corte de ángulos en acero y aluminio de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$  en espesores de pieza de 1 mm, 3 mm y 8 mm) se observa que el valor del ángulo a erosionar ejerce una influencia mayor que el espesor de pieza, además de mostrar una variabilidad mayor de la  $\Delta l$  en el aluminio que en el acero. De los gráficos se extrae que la  $\Delta l$  máxima es aproximadamente de 1,7 mm para un espesor del acero de 1 mm y ángulo de  $10^\circ$ , mientras que el valor máximo de  $n$  es de aproximadamente 0,29 mm y 0,09 mm para el acero (con un ángulo de  $10^\circ$ ) y el aluminio (con un ángulo de  $15^\circ$ , a falta de más datos), respectivamente.

Se concluye que la clasificación de los ángulos en función de si estos son interiores o exteriores es, a pesar de su simpleza, una diferenciación necesaria para evaluar las fuerzas y la vibración que estas generarán durante el corte de los mismos. Además, se evidencia que el error en las esquinas es función de dicho ángulo, y del espesor y material de pieza.

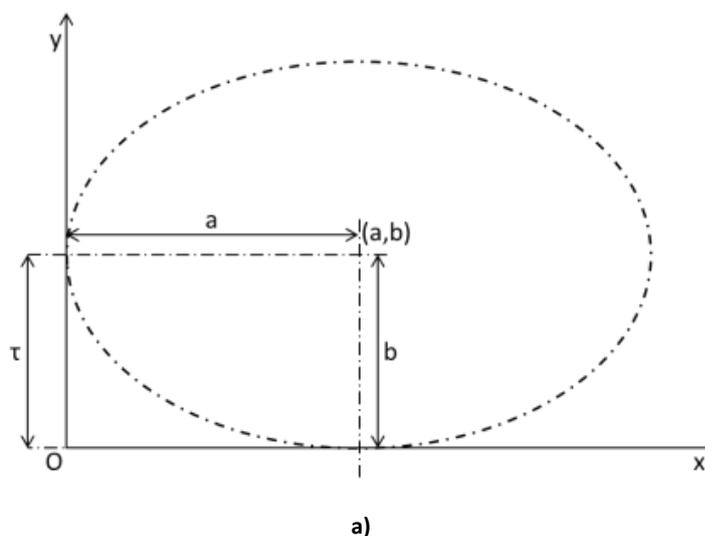
Sarkar et al. proponen corregir el error cometido en las trayectorias circulares utilizando el modelo matemático del *wire-lag* visto en el apartado II.2.2.1 [Sarkar, 2011]. Para ello se realiza una batería de ensayos en tres espesores de pieza (23,1 mm, 37,5 mm y 62,6 mm) y cuatro radios programados ( $r_p$  de 1,5 mm, 3 mm, 5 mm y 7 mm) diferentes. De los mismos se obtiene el radio real de la pieza en la superficie superior ( $r_{rs}$ ), el radio real trazado por el centro del hilo

en la superficie superior de la pieza ( $r_t$ ), la compensación del *wire-lag* requerida ( $\varepsilon_{wl}$ ), la constante de compensación del *wire-lag* radial ( $k$ ) y la *fuerza de gap* por unidad de longitud ( $q_d$ ).

Con estos datos, mediante un análisis de regresión, se calculan los valores de  $k$  para cada uno de los espesores:  $0,027 \text{ mm}^2$  para  $23,1 \text{ mm}$ ,  $0,033 \text{ mm}^2$  para  $37,5 \text{ mm}$  y  $0,027 \text{ mm}^2$  para  $62,6 \text{ mm}$ . Apoyándose en exposiciones de autores anteriores [Dauw, 1994] [Puri, 2003 2] concluyen que, aunque la flexión total es creciente con el espesor de pieza (distancia entre guías), la flexión hasta la superficie de la misma es prácticamente constante, y por eso puede expresarse como una función de la *fuerza de gap*.

A pesar del estudio tan profundo realizado por Sarkar et al. ha sido difícil reproducir sus resultados. Además, existen dos situaciones bajo las cuales estas premisas son muy complicadas de cumplir: tanto si el espesor es pequeño (algunos fabricantes han considerado tecnologías especiales por debajo de  $20 \text{ mm}$  [ONA]) como si el radio a erosionar también lo es (por debajo del radio de la boquilla se genera una pérdida de presión del fluido dieléctrico, en función de la máquina empleada este radio puede rondar los  $3 \text{ mm}$ ), las fuerzas hidrodinámicas varían. Esto hace prácticamente imposible que, con una sola constante, el radio quede completamente compensado en todo el espesor de pieza para todo el ángulo del radio erosionado, y sin contar con la vibración lateral del hilo que algunos autores citan [Kinoshita, 1984] [Habib, 2016] [Kamei, 2016]. Mínimamente deberían diferenciarse las situaciones de espesores y radios pequeños con respecto al resto de situaciones.

Chen et al. [Chen, 2014] presentan un trabajo completo en el que parten de tres modelos para describir la trayectoria del centro del hilo cuando se realiza el corte de un ángulo recto, uno agudo y uno obtuso (ver Figura II.22.a, Figura II.22.b y Figura II.22.c, respectivamente).



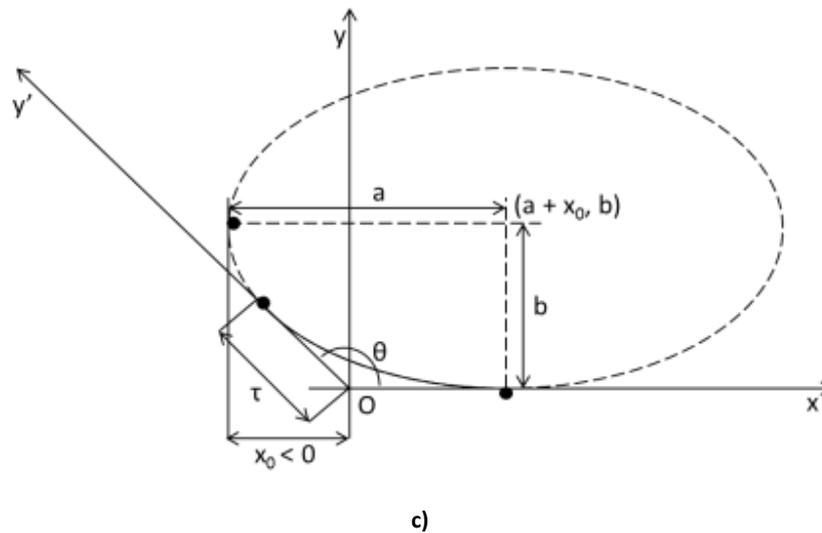
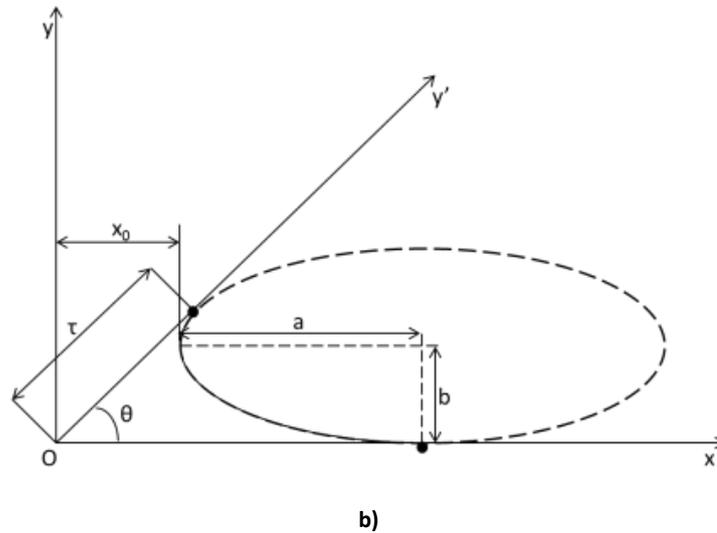


Figura II.22. Modelizado de la trayectoria del centro del hilo en un ángulo: a) recto; b) agudo; c) obtuso [Chen, 2014].

El modelo que determina la función del *wire-lag* ( $\delta$ ) (ver Ec. II. 9) se define en base a la ecuación de la elipse (Ec. II. 8) con unas condiciones de contorno determinadas (Ec. II. 8 y Ec. II. 10):

$$\frac{(x - a - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - b)^2}{b^2} = 1 \tag{Ec. II. 8}$$

$$y = b - b \sqrt{1 - \frac{(x - a - x_0)^2}{a^2}} = \delta \tag{Ec. II. 9}$$

$$\frac{(\tau \cos \theta - a - x_0)^2}{a^2} + \frac{(\tau \sin \theta - b)^2}{b^2} = 1 \tag{Ec. II. 10}$$

$$y = x \tan \theta = \delta$$

donde  $a$  y  $x_0$  son parámetros relativos a las condiciones de mecanizado, y  $b$  depende del *wire-lag* ( $\delta$ ). Una vez obtenidos teóricamente los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $x_0$  se comparan con los valores

experimentales en el corte de esquinas de 45°, 90° y 145° en una pieza de 25 mm de espesor con bocas separadas (45 mm entre guías), observando un error entre la trayectoria real del centro del hilo y la trayectoria teórica menor de 8 μm.

Posteriormente, plantean la optimización de los parámetros del corte de esquinas y, para ello, utilizan el método Taguchi y posterior ANOVA. Se comprueba que en los ángulos agudos (45°) el factor predominante es la velocidad de corte, debido a la correlación positiva entre esta variable y el eje mayor de la elipse; además, los parámetros de control de las descargas (tiempo de pulso y tiempo de pausa) también son importantes. La tensión del hilo, sin embargo, es menos significativa en este tipo de cortes.

Por otro lado, en el corte de ángulos obtusos (135°), la tensión del hilo es la variable de mayor peso, debido a que el fenómeno de concentración de descargas no tiene prácticamente efecto. Asimismo, el tiempo de pulso y el tiempo de pausa se vuelven menos importantes. Y finalmente, en el corte de esquinas de ángulo recto el error se explica mediante la combinación de la flexión del hilo, la velocidad de corte del mismo y el fenómeno de concentración de las descargas.

Por último, proponen tres modelos de regresión no lineal para optimizar los parámetros fundamentales: presión del dieléctrico, tiempo de pulso, tiempo de pausa, pico de corriente, tensión del hilo y velocidad del hilo. El grado de ajuste entre estos valores y los obtenidos experimentalmente es superior al 90 %.

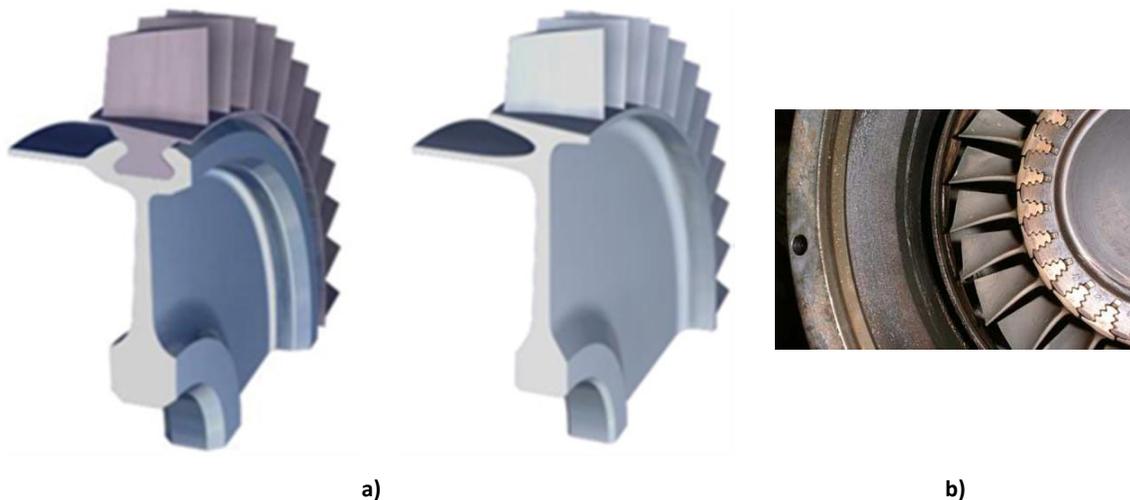


Figura II.23. Piezas del sector aeronáutico estudiadas para su realización por SEDM y WEDM: a) *blisk* [Mateo, 2014]; b) sujeción entre el rotor de la turbina y los álabes mediante uniones de tipo *firtree* [TeBa].

En los últimos años se ha planteado la posibilidad de utilizar la electroerosión para realizar piezas del sector aeronáutico como los *blisks* [Klocke, 2013] (ver Figura II.23.a) o las uniones de álabes con geometrías tipo *firtree* (ver Figura II.23.b), que hasta la fecha se fabricaban mediante otros

procesos de mecanizado [Klocke, 2014 1]. Uno de los autores que ha apostado por esta tendencia es Klocke, con numerosos trabajos centrados en esta línea de investigación.

Así, el *firtree* es una de las piezas del sector aeronáutico que se analiza para su fabricación [Klocke, 2014 2] y monitorización [Klocke, 2014 3] mediante WEDM, para lo que se mecaniza uno genérico en *Inconel 718*<sup>®</sup> (marca comercial de una familia de superaleaciones austeníticas de base níquel-cromo) con el fin de ver las capacidades avanzadas de fabricación de los mismos mediante electroerosión. Se utilizan tres hilos diferentes (uno sin recubrimiento y dos recubiertos) y las tablas tecnológicas empleadas son cinco: dos estándares y tres adaptadas para cumplir los requisitos de integridad superficial de este tipo de piezas. Estos requisitos son una banda de tolerancia de  $\pm 5 \mu\text{m}$ , una rugosidad superficial menor de  $0,8 \mu\text{mRa}$  y una capa blanca nula.

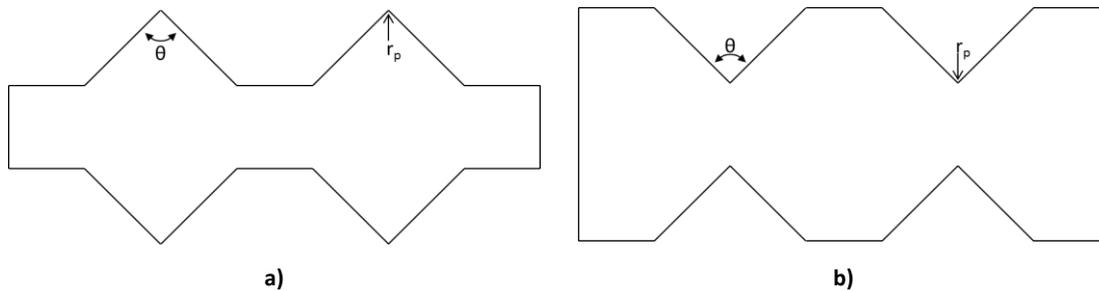
Como resultado de estos experimentos se concluye que un hilo con recubrimiento de níquel reduce la contaminación de cobre y zinc. Además, en términos de productividad e integridad superficial, el hilo es comparable a los otros dos. Sin embargo, es el hilo de latón estándar el que logra mayor exactitud e integridad superficial, cumpliendo los requisitos anteriormente mencionados y con una capa blanca prácticamente inexistente.

En cuanto a la productividad y a las tecnologías desarrolladas, en el corte de una sola ranura de *firtree* se consigue una disminución del tiempo de fabricación de un 33 % con los hilos recubiertos; mientras que la productividad y la exactitud lograda con las tres es superior en comparación con las tecnologías estándares; sin embargo, esto lleva consigo una ligera degradación de la superficie. Asimismo, los autores dejan abierta la posibilidad de modificar la geometría para conseguir una mejor estrategia de corte.

Por último, en cuanto a la monitorización del proceso, relacionando el valor medio de tensión de *gap* y el propio *gap* se comprueba que, de forma general, se pueden detectar los fallos de integridad superficial monitorizando la herramienta, la capa blanca es prácticamente nula y el *gap* sufre variaciones en las zonas críticas, es decir, en radios pequeños.

Precisamente de la influencia del *gap* necesario durante el corte de círculos pequeños hablan Firouzabadi et al. en su estudio. Los autores diferencian el *gap* necesario durante el corte de interpolaciones rectas ( $g^{st}$ ) y de redondeos cóncavos ( $g^{cr}_{cn}$ ) o convexos ( $g^{cr}_{cv}$ ) [Firouzabadi, 2015]. Así, establecen que durante un radio convexo el *gap* debe ser menor al de un corte recto ( $g^{cr}_{cv} < g^{st}$ ) y mayor durante el cóncavo ( $g^{cr}_{cn} > g^{st}$ ).

Cambiando los parámetros de la descarga el *gap* varía (un concepto parecido al expuesto con la velocidad [Sanchez, 2007 2]) por lo que, basándose en esta premisa, utilizan el método de diseño de experimentos (*Design of Experiments, DoE*) y posterior ANOVA para elegir la velocidad idónea (y, por tanto, el *gap*) para el corte de radios pequeños cóncavos y convexos (ver Figura II.24.a y Figura II.24.b), comparándola con la obtenida en el corte recto. Los autores afirman que, aunque controlando la densidad de descargas es posible mejorarlos, el corte de desbaste no es suficiente para eliminar completamente el error. De hecho, la reducción de este material residual es únicamente del 17 %, siendo más difícil eliminarlo cuanto más abrupto es el cambio de dirección.



**Figura II.24. Ejemplo de probeta para el corte de esquinas de diferente ángulo y radio de redondeo para: a) ángulos convexos; b) ángulos cóncavos [Firouzabadi, 2015].**

Como es posible saber el radio real en función del ángulo de la esquina y el material residual, se propone un corte extra para mejorar el corte de esquinas cóncavas con radio de redondeo (ver de nuevo Figura II.24.b). Para ello se cortan esquinas con ángulos  $\vartheta$  de 5°, 20°, 45°, 90° y 120° y un radio de redondeo de esquina  $r_e$  de 300  $\mu\text{m}$ . Con este corte extra se llega a mejorar la desviación en estos ángulos hasta en un 75 %. Además, aplicar este corte circular adicional en las esquinas cóncavas de radio pequeño no solo ayuda a reducir el error, sino que también logra una calidad superficial mejorada porque puede asumirse como un repaso adicional.

Según los autores, al ser un modelo puramente geométrico, creen que los resultados son independientes del material de la pieza. Esto contradice a otros investigadores, que han probado experimentalmente que el material es influyente en la realización de esquinas, tal y como se ha visto a lo largo de este apartado II.2.3. Además, la razón de aplicación de una compensación geométrica es precisamente ahorrar el tiempo perdido por una modificación de los parámetros de corte, por lo que aplicar un corte extra no cumple con dicho objetivo.

## II.3 CONTROL Y MONITORIZACIÓN DEL PROCESO

A lo largo de la sección II.2 se ha comprobado cómo la precisión en las piezas fabricadas es un problema que no se ha resuelto completamente, a pesar de los numerosos trabajos realizados durante décadas. Por esta razón, las nuevas tecnologías intentan abordarlo desde otro punto de vista. Es decir, entender mejor el proceso en base al estudio de las descargas se ha convertido en tema de estudio estos últimos años (subcapítulo II.3.1). El cambio de espesor, a su vez, es un problema que se ha abordado con mayor profundidad desde el control y monitorización del proceso (título II.3.2).

### II.3.1 CLASIFICACIÓN Y DETECCIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS DESCARGAS

Desde la década de los 90, la importancia de la clasificación de las descargas y, más concretamente, los pulsos de las mismas, era conocida [Watanabe, 1990]. Liao et al., para tal fin, generaron un sistema de discriminación de pulsos [Liao, 1997] que distingue entre tres tipos de descarga: la normal, el arco y el cortocircuito. El objetivo de este trabajo es reconocer un comportamiento de corte anormal para poder actuar sobre diversos parámetros, de forma que este vuelva a ser estable y no se pierda efectividad en el mismo.

A pesar de las dificultades que los autores encuentran para distinguir un arco de una descarga normal, proponen el tiempo de pausa como variable discriminadora, puesto que observan que es mayor en las descargas normales. Asimismo, el aumento de la proporción de arcos, cortocircuitos o ambos, son una muestra de inestabilidad del proceso. Como solución a este problema, por tanto, proponen actuar sobre los parámetros del mismo: en el primer caso, la solución pasaría por la disminución del tiempo de ionización; mientras que, en el segundo, habría que reducir el tiempo de pausa.

Como contrapartida, esto aumentaría el riesgo de rotura del hilo. En el caso en el que este riesgo sea muy elevado, se debería aumentar el tiempo de pausa con la consiguiente disminución en el rendimiento debido a la pérdida de velocidad de erosión. La implantación de esta estrategia de control no llega a llevarse a cabo, que queda como un trabajo a realizar. Sin embargo, aunque la clasificación de los pulsos es interesante y pueda resultar una buena estrategia de control, la pérdida de velocidad y rendimiento del proceso no es la solución idónea, por lo que se debe utilizar la información obtenida de las descargas para incrementar la productividad del proceso, tal y como se verá en los capítulos III y V.

Más recientemente, en el trabajo de Caggiano et al. se puede encontrar un estudio en profundidad sobre la clasificación de las descargas, el cual es el resultado de dos publicaciones. En la primera de ellas [Caggiano, 2015], se recoge una lista de los diez parámetros característicos de las descargas adquiridas mediante sendos sensores de tensión e intensidad, los cuales se enumeran a continuación: valor medio de la frecuencia de la descarga, valor medio de la tensión de *gap*, radio de cortocircuitos, duración del cortocircuito, valor medio del tiempo de pausa, ratio de circuitos abiertos, valor medio de la energía de la descarga, valor medio de la intensidad de cortocircuito, valor medio del valor de pico de la intensidad de la descarga y valor medio de la duración del pulso de intensidad de la descarga. Esta lista se genera con la intención de realizar un algoritmo de clasificación de las descargas, el cual pretenden basarlo en la evaluación de las características críticas de la señal, como es el tiempo de ionización.

Siguiendo con esta intención [Caggiano, 2016], y basándose en un estudio realizado por Watanabe [Watanabe, 1990], esta lista se reduce a cinco parámetros que definen los tres tipos de descargas del proceso: las normales, los arcos y los cortocircuitos, tal y como se observa en el esquema de la Figura II.25.

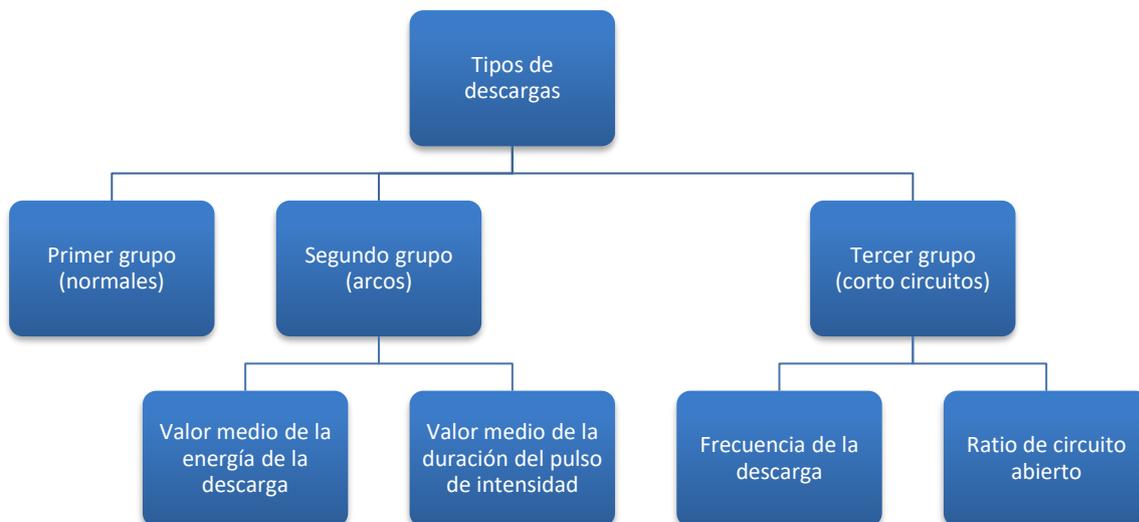


Figura II.25. Tipos de descarga según la clasificación de Caggiano [Caggiano, 2016].

Con esta clasificación se realiza un reconocimiento de patrones de comportamiento de las señales que permite localizar las marcas y zonas de poca calidad superficial, basado en una Red Neuronal Artificial (*Artificial Neural Network*, ANN).

Sin embargo, la limitación de este trabajo radica principalmente en dos aspectos: por un lado, el análisis únicamente del último repaso, ya que un cambio en el patrón de las descargas puede deberse a un problema en el arranque de etapas anteriores, lo cual queda sin analizar; y, por el

otro, el uso de una ANN para comprobar la calidad superficial de la pieza, puesto que es evidente el carácter bidireccional entre un cambio del patrón de comportamiento y una consecuencia en la superficie de la pieza.

Además de la clasificación de las descargas en electroerosión por hilo, esta es una línea de investigación que sigue siendo objeto análisis en otras variantes como la de alta velocidad (HS-WEDM) [Oßwald, 2018] o materiales poco comunes como las superaleaciones base níquel revestidas con barrera térmica (*thermal-barrier-coated nickel-based superalloys*, TBC) [Wang, 2018].

Así, por un lado, se han determinado los tipos de descarga del proceso de HS-WEDM [Oßwald, 2018], que son cinco. Esta clasificación se ha realizado teniendo en cuenta la forma de la descarga de tensión y dos niveles de la misma. La interpretación de los distintos tipos de descargas es el siguiente. El tipo 1 es equiparable a un pulso de EDM y se caracteriza por un desgaste alto, pero con una *MRR* elevada. Los de tipo 2 (descarga parecida al tipo 1 con mayor tiempo de ionización) y tipo 3 (arcos) tienen una gran *MRR* y, por tanto, elevada productividad. El tipo 4 es un circuito abierto que provoca un bajo desgaste y buena calidad superficial y, por último, el tipo 5 es un cortocircuito que puede reducir la rugosidad o calidad superficial, al igual que ocurre con la descarga de tipo 3.

Por otro lado, se han identificado los tipos de descargas al erosionar TBC [Wang, 2018], siendo un número total de 15 (cuatro equivalentes a las típicas del proceso de electroerosión y otras once características de este proceso concreto). Las del primer subgrupo serían la descarga normal, el arco, el circuito abierto y el cortocircuito; mientras que, en el segundo subgrupo, se listan descargas y cortocircuitos con distintos niveles de resistencia y tensión. El test de confirmación demuestra la existencia de todas ellas, por lo que el futuro trabajo se centrará en controlar el servo en función de dichas descargas.

Como puede observarse, realizar una clasificación de las descargas es una tarea primordial para saber el tipo de corte que se está realizando: si este es óptimo o existe alguna inestabilidad, la cual puede generar una deficiente calidad superficial de la pieza u otros problemas. Sin embargo, esta agrupación es completamente aleatoria y depende a su vez de cada fabricante y los parámetros que este utilice en su máquina. Todos los avances que de este conocimiento se deriven estarán ligados a la forma de generación de descarga y proceso de corte que hayan diseñado. Aun con las diferencias entre máquinas, el conocimiento adquirido en este campo podrá ser tenido en cuenta de forma general.

Además de la clasificación de las descargas, otros autores se centran en la detección de la posición de las mismas. Así, por ejemplo, en el trabajo de Okada et al. se varían parámetros como el servo, el tiempo de pausa o la velocidad del hilo para investigar su efecto en la distribución de su localización [Okada, 2010]. El mismo sistema que el descrito en el apartado II.2.2.2 se utiliza para captarlas.

El rango de captación de la cámara de alta velocidad es suficientemente amplio para grabar todo el espesor de pieza (1,3 mm x 0,6 mm) y se recoge una sola descarga, puesto que su frecuencia es de 6000 Hz y la velocidad de adquisición es de 8000 fps. Una vez se filtra la imagen mediante software se puede calcular la posición vertical del centro de la misma. Para evaluar diferentes parámetros y su influencia en la distribución de las descargas, se genera el denominado índice de concentración de descargas (*discharge concentration index, Cd*).

Por una parte, se observa que el *Cd* disminuye significativamente con un aumento de la tensión del servo, la cual no puede disminuir por debajo de 50 V, ya que se produciría la rotura del hilo debido a la dificultad de regenerar el fluido dieléctrico y eliminar la viruta generada. Por otra, el *Cd* disminuye ligeramente con el crecimiento del tiempo de pausa, lo cual es una afirmación lógica. Sin embargo, al comparar estas dos variables se demuestra que el efecto de la tensión del servo en la concentración de descargas es más significativo que el de la variación en el tiempo de pausa.

Por último, contradiciendo un trabajo anterior [Okada, 2009], se comprueba que una mayor velocidad aumenta el *Cd*. En realidad, la *MRR* (indicativo de la generación de una gran cantidad de viruta en el *gap*) aumenta significativamente con la velocidad. Por lo tanto, se puede suponer que la suciedad se acumula en dicho *gap* y la concentración de descargas se produce fácilmente con la velocidad. Pues bien, los resultados experimentales determinan que la distribución de la descarga se vuelve uniforme cuando el valor de la tensión del servo es alto, el tiempo de pausa es largo y la velocidad de corte es baja.

Más recientemente [Mori, 2016] se utilizan electrodos transparentes para visualizar cómo y dónde se producen las descargas. Para realizar este experimento se utiliza un hilo de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro y una pieza de carburo de silicio de 5 mm de espesor y 380  $\mu\text{m}$  de grosor. La ubicación de las descargas y la generación de burbujas durante el corte se registran con una cámara de vídeo de alta velocidad (con una velocidad de adquisición de 100.000 fps, mayor que la frecuencia de la descarga).

De las imágenes obtenidas se observa que la deformación del hilo se debe a la fuerza de reacción de la descarga generada por la expansión de la burbuja, la cual se ha analizado de forma más exhaustiva en el momento en el que el hilo comienza a adentrarse en la pieza, es decir, cuando genera los primeros cráteres en la misma. La diferencia entre las burbujas generadas a un lado y al otro del hilo se define como  $\Delta A$  y, graficando la relación entre este parámetro y la posición de las descargas, se percibe que esta varía con la forma de expansión de las burbujas. Es decir, la distribución de descargas en la dirección circunferencial influye en las vibraciones del hilo. Además, el hilo tiende a desplazarse hacia el lado opuesto a la posición de la descarga. Si bien esto es algo que se adivinaba con estudios anteriores, ahora queda demostrado de forma experimental.

Al usar dos tipos de hilos (uno de latón y otro con recubrimiento de cinc) se comprueba que, ante inestabilidades en el proceso de corte (como una duración mayor o menor a la descarga estándar), la velocidad de corte es mayor en el hilo recubierto. Por otra parte, la distancia relativa entre dos descargas consecutivas utilizando un hilo recubierto de zinc es más grande que la del latón, lo que indica que es más difícil que ocurra una concentración de descargas usando un hilo recubierto de zinc.

### II.3.2 CAMBIO DE ESPESOR

Como se verá más adelante [Cabanes, 2008 1] [Cabanes, 2008 2] una forma de que el proceso se vuelva inestable es una variación en el flujo del dieléctrico. Esta característica ocurre inevitablemente al cortar piezas de espesor variable, junto con otros factores que también provocan la inestabilidad del corte, por lo que es de vital importancia analizarlo.

Cuando ocurre un cambio de espesor, existen algunas variables del proceso que varían hasta estabilizarse en el nuevo régimen como ocurre con la velocidad, y otras que sufren una alteración únicamente en el punto de cambio (por ejemplo, la tensión o la frecuencia de la descarga) [Liao, 2002]. Para realizar un análisis en profundidad, Liao et al. definen un coeficiente de identificación del espesor (*Thickness Identification Coefficient, TIC*) junto con un factor de corrección, que depende de la frecuencia de la descarga [Rajurkar, 1997], las condiciones y características de mecanizado y las propiedades de los materiales [Liao, 2013].

Un análisis del *TIC* experimental mediante ANOVA muestra que depende del tiempo de ionización, de la energía específica de la descarga y del propio espesor de pieza, pero no de la

tensión del servo de *gap*. La comparativa experimental cuantifica el error en menos de 1 mm con un periodo de ajuste de un segundo.

En otro trabajo, fruto de un estudio anterior [Liao, 1997], los autores definen una variable denominada ratio anormal de las descargas (*abnormal discharge ratio*,  $R_{ab}$ ), calculada como la proporción de descargas anormales en un período de muestreo (de entre 2 ms a 65 ms), para adaptar el proceso a los cambios de espesor [Lee, 2007]. Existe un valor de  $R_{ab}$  óptimo o de referencia, para que no rompa el hilo, que se sitúa entre el 55 % y el 60 % para espesores mayores a 20 mm. Filtrando las señales obtenidas para reducir la fluctuación de la medida real de  $R_{ab}$ , se diseña un controlador que permite ajustar los parámetros al espesor utilizado para mejorar la velocidad de corte durante el proceso. Se prueban tres métodos diferentes: mantenerlo constante, una  $R_{ab}$  mayor pero que va disminuyendo temporalmente con las condiciones de mecanizado y un valor de tensión de referencia del servo convencional.

Cuando el valor de  $R_{ab}$  se mantiene constante y se alcanza el punto de cambio de espesor (de 50 mm a 30 mm) el *gap* disminuye ocasionando un mayor número de descargas anormales. Claramente, cuanto mayor sea el cambio de espesor, mayor será el nivel de seguridad que debe configurarse (sin sacrificar la velocidad de corte). El nivel adecuado de este parámetro para un cambio de espesor mayor a 20 mm es del 42 %. Tan pronto como se produce el cambio de espesor y  $R_{ab}$  aumenta drásticamente, el control actúa reduciendo el avance y aumentando el tiempo de pausa. Esto provoca una ligera disminución en el  $R_{ab}$  hasta que el hilo se aleja de la zona de cambio de espesor (aproximadamente unos 300 s). Por tanto, para mantener este parámetro de control alrededor del nivel predefinido, se ajustan gradualmente el tiempo de pausa y la velocidad de avance.

El segundo método consiste en disponer de un margen de seguridad para evitar la rotura del hilo. Por ello, como situar  $R_{ab}$  en su valor óptimo de 55 % no es suficiente cuando el espesor de pieza varía abruptamente, se contempla la posibilidad de reducir temporalmente este valor. Esto se realiza en función del salto, a medida que el hilo va alcanzando el punto de cambio de espesor, para evitar las inestabilidades que se vayan produciendo. Tan pronto como la diferencia entre el valor  $R_{ab}$  de referencia y el real es mayor de 0,015 se vuelve a establecer de inmediato en 42 %. Una vez ha transcurrido aproximadamente 1 mm, este valor de referencia es modificado de nuevo al 55 % de forma gradual.

El tercer método es realizar el proceso de corte de forma convencional, con el fin de comparar las soluciones entre sí. El primer problema es el número de veces que se produce la rotura del hilo al aumentar el espesor: los valores limitantes son 63 V de tensión de referencia del servo y

29  $\mu$ s de tiempo de pausa. Debido al uso de parámetros más conservadores se produce un ligero aumento del  $R_{ab}$  y la velocidad no es la adecuada.

Comparando los tres métodos, la velocidad de mecanizado del primero es más rápida que la del tercero. En cuanto al segundo método, la reducción temporal de  $R_{ab}$  puede mejorar la eficiencia del proceso, ajustando dicho valor de forma correcta y mejorando la velocidad de corte en piezas con espesor variable. Si bien el estudio es útil para entender lo que ocurre en una situación de cambio de espesor, se actúa sobre los parámetros indirectos, cuando estos varían, en lugar de hacerlo cuando cambia la naturaleza del propio corte. Por eso sería más conveniente analizar otro indicador: la variación en el comportamiento de las descargas.

Este otro indicador lo definen Guangwei et al. mediante el nivel de descargas normales [Guangwei, 2018], siendo la velocidad real un indicador indirecto del funcionamiento del proceso. Es por ello que usan estas dos variables como las representativas del proceso cuando existe un cambio de espesor. Utilizando un algoritmo de aprendizaje supervisado (*Support Vector Regression, SVR*) pretenden estimar el espesor de pieza y modificar los parámetros para que estos sean óptimos en todo momento.

Representando el intervalo del tiempo de pulso, la velocidad programada, la velocidad de corte y la presión del dieléctrico en espesores que oscilan entre 10 mm y 30 mm, se observa que solo los primeros dos parámetros son influyentes. La estimación del cambio de espesor tiene un error máximo de 2 mm en la prueba de validación, consistente en una rampa entre los mismos espesores.

Sin embargo, el rango de espesores utilizado es mínimo y la prueba de validación prácticamente idéntica a los ensayos experimentales realizadas. Por otra parte, el ajuste de los parámetros de erosión desequilibrarían el algoritmo y, por tanto, su éxito de predicción posterior debe ponerse en duda. Por último, se debe mencionar que los ensayos realizados se han practicado con un nivel de presión del dieléctrico específico: el cambio en este parámetro tampoco se ha tenido en cuenta.

La conclusión principal del análisis del cambio de espesor durante el proceso de corte es, como se verá en el apartado V, que la naturaleza de las descargas juega un papel importante para que el corte sea el óptimo en todo momento y para poder acometer un cambio en los parámetros, que serán consecuencia indirecta de la inestabilidad generada.

## II.4 APRENDIZAJE AUTOMÁTICO (*MACHINE LEARNING*)

La electroerosión es un proceso con una gran cantidad de datos disponibles, aunque de naturaleza muy estocástica, como ya se ha apuntado en este capítulo. Sin embargo, hasta hace unos años no se ha podido obtener demasiada información de los mismos, puesto que era impensable manejarlos. Con el desarrollo computacional la situación ha cambiado: el *big-data* (capacidad de procesamiento de conjuntos de datos que aplicaciones informáticas tradicionales no son suficientemente potentes para tratarlos y encontrar patrones repetitivos si los hubiera) y el aprendizaje automático o *Machine Learning* (rama de la inteligencia artificial cuyo objetivo es crear programas capaces de generalizar comportamientos a partir de una información suministrada en forma de ejemplos) permiten avanzar en esta dirección.

A continuación se analizará más en detalle, después de hacer una breve introducción a las redes neuronales (capítulo II.4.1), los desarrollos del aprendizaje automático en los últimos años que han servido para mejorar problemas del sector industrial, siempre focalizándolos hacia su uso para las posibles mejoras del proceso de electroerosión (sección II.4.2).

### II.4.1 INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES

Tal y como explica Arriandiaga [Arriandiaga, 2016 2] en su trabajo de tesis, la inteligencia artificial (AI) procura simular el comportamiento del cerebro humano, que consisten en un gran número de neuronas interconectadas entre sí. Cada neurona (ver Figura II.26) está formada por las dendritas, que llevan y reciben las señales eléctricas del núcleo; el propio núcleo y el axón, encargado de traer la señal del cuerpo hacia otras neuronas. A esta configuración se le denomina sinapsis. La magnitud de la señal enviada de una neurona a otra depende de la conexión existente entre las mismas. La membrana se activa cuando está suficientemente excitada (por encima de un umbral) por las neuronas conectadas y, por consiguiente, emite una señal.

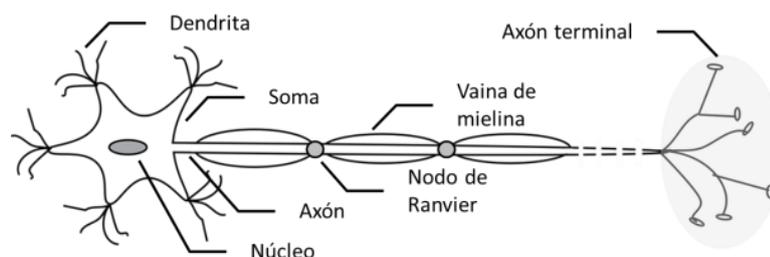


Figura II.26. Esquema de una neurona biológica.

Aun cuando las redes de neuronas biológicas disponen de circuitos eléctricos más lentos, las conexiones son mucho más complejas que en las ANNs. La comparación entre una neurona biológica y una artificial se observa en la Figura II.27. Así, una neurona artificial está compuesta por los pesos (representa el peso sináptico de la neurona), un sumatorio (una relación entre los pesos de entrada), la función de activación (función que limita la amplitud de salida) y el *bias* (el cual decrece o aumenta la entrada a la función de activación).

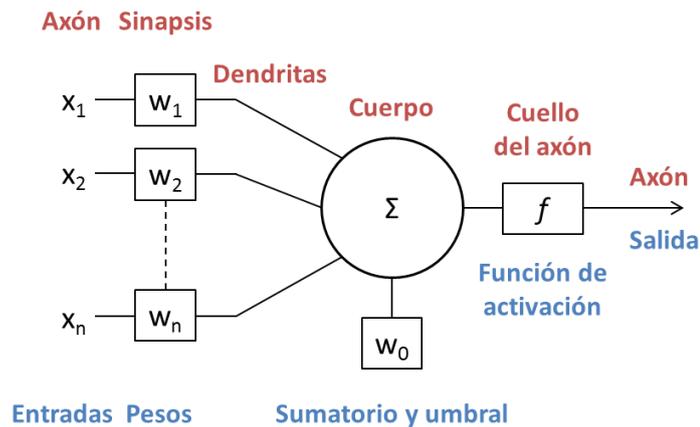


Figura II.27. Comparativa entre una neurona artificial y una biológica.

Estas neuronas se organizan en diferentes estructuras, puesto que una única neurona raramente es capaz de modelar la relación entre entradas y salidas [Hagan, 2014]. Cuando un grupo de neuronas trabajan en paralelo se le denomina *capa*. Por tanto, combinando estas neuronas en una o más capas se construyen diferentes arquitecturas que resolverán problemas específicos para los que han sido diseñadas (un ejemplo de arquitectura se puede observar en la Figura II.28).

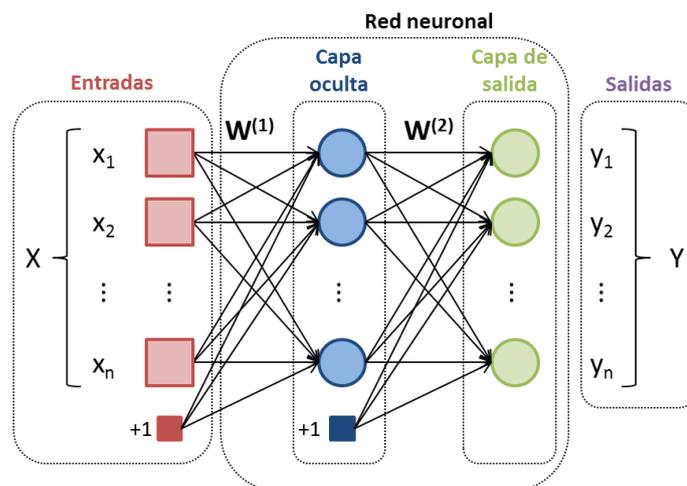


Figura II.28. Esquema de una red neuronal.

El objeto de estudio de este trabajo no es el análisis de las diferentes arquitecturas de las redes existentes (un análisis más exhaustivo puede verse en diversas referencias [Haykin, 1998] [Elman, 1990] [Hagan, 2014]). Por eso, a continuación, se muestran algunos de los trabajos encontrados en la bibliografía que utilizan las ANNs para resolver problemas del sector del mecanizado.

#### II.4.2 APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES EN MECANIZADO

El uso de las ANNs y, sobre todo, el conjunto de métodos de aprendizaje profundo (*Deep Learning*, DL), tradicionalmente se ha asociado a aplicaciones de las Técnicas de la Información y Comunicación (*Information and Communication Technologies*, ICT) y el procesamiento de imágenes. Un ejemplo es el trabajo de Krizhevsky et al. sobre el reconocimiento de imágenes [Krizhevsky, 2012], donde utilizan un conjunto de más de 15 millones de imágenes y el sistema es capaz de clasificarlas mediante aprendizaje puramente supervisado; o el estudio realizado para el reconocimiento de la caligrafía humana china [Ciresan, 2013 2], entrenando la red con caracteres escritos por más de 500 personas. Sin embargo, dado el potencial de las ANNs, pueden aplicarse a otros campos: en este caso al de la fabricación y el mecanizado.

Las ANNs no proporcionan información explícita sobre los fenómenos físicos subyacentes, pero tienen la habilidad de aproximar la relación no lineal entre las entradas y las salidas con una gran capacidad de generalización. Esta es la razón por la que se empieza a pensar en ellas como un instrumento útil para la resolución de diversos problemas del sector de la máquina-herramienta.

Así, por ejemplo en 2006, Benardos et al. plantean el uso de las redes neuronales para predecir las flexiones elásticas sufridas durante el corte de piezas mediante torneado [Benardos, 2006], que provocarán un error en las piezas a causa de una diferencia entre fuerzas de corte teóricas y reales. Una vez descrito el mecanismo de corte, se determina la flexión elástica de la pieza desde dos puntos de vista diferentes.

El primero de ellos es un modelizado del proceso resolviendo las ecuaciones analíticas del segundo teorema de Castigliano, dadas las propiedades mecánicas del material, la geometría final y los valores de la fuerza de corte; con el que se puede predecir la deformación elástica. El segundo enfoque, más novedoso, implica el uso de redes neuronales artificiales para desarrollar un modelo que pueda predecir la desviación dimensional final al correlacionar los parámetros de corte y ciertas características geométricas de la pieza, con las desviaciones de la profundidad de corte. Estas desviaciones se calculan con referencia a los valores de diámetro final, los cuales

han sido medidos con micrómetros de precisión o en una máquina de medir por coordenadas (*Coordinate-Measuring Machine, CMM*).

Ambos métodos se han basado en los datos recopilados experimentalmente en un torno con control numérico y los resultados apoyan el mecanismo de corte propuesto. El método numérico concuerda cualitativamente con los datos experimentales, mientras que el modelo ANN es preciso y consistente en sus predicciones.

Por otro lado, más recientemente, Dou et al. [Dou, 2016], después de un estudio exhaustivo de diferentes técnicas de inteligencia artificial que incluyen las KNN (*k-nearest neighbor*), las redes neuronales probabilísticas (*Probabilistic Neural Networks, PNNs*), las redes neuronales basadas en máquinas de soporte vectorial con aplicación de técnicas de optimización por nube de partículas (*Particle Swarm Optimization and Support Vector Machines, PSO-SVMs*) y las basadas en reglas (*Rule-Reasoning Mechanism, RBM*), pretenden generar un sistema de diagnóstico de fallos para los rodamientos. Se recogen las señales de los rodamientos funcionando en cuatro condiciones de trabajo y velocidades diferentes, esto es, un total de 16 grupos de señales, y se comparan las redes citadas. Los autores concluyen que, si bien la SVM-PSO es el más preciso de los métodos, el RBM podría convertirse en una herramienta extremadamente versátil en el diagnóstico de fallos de maquinaria rotativa debido a su menor complejidad de programación.

Sin embargo, las estructuras de ANNs de tipo *feed-forward* no siempre son válidas para modelizar un sistema en el que unos estados dependen de los eventos anteriores, es decir, capaz de modelizar evoluciones dinámicas ( $u$ ). Una alternativa es utilizar un tipo de red denominada red neuronal recurrente (*Recurrent Neural Network, RNN*), que es capaz de manejar mejor las evoluciones dinámicas debido a su 'memoria'.

En las RNN [Arriandiaga, 2016 2] los datos no solo se alimentan hacia delante, desde la capa de entrada hasta la capa de salida: al menos existe un bucle de realimentación. Estos bucles, los cuales pueden diferir entre sí generando diferentes topologías de red, tienen las denominadas unidades de retardo (*Delays in the feedback, R*) que afectan al entrenamiento y rendimiento de la red neuronal (ver Figura II.29). Una de las topologías más conocidas de red recurrente es la red neuronal de tipo Elman [Elman, 1990], cuyo bucle de realimentación empieza en la salida de la capa oculta y termina a la entrada de la misma.

.

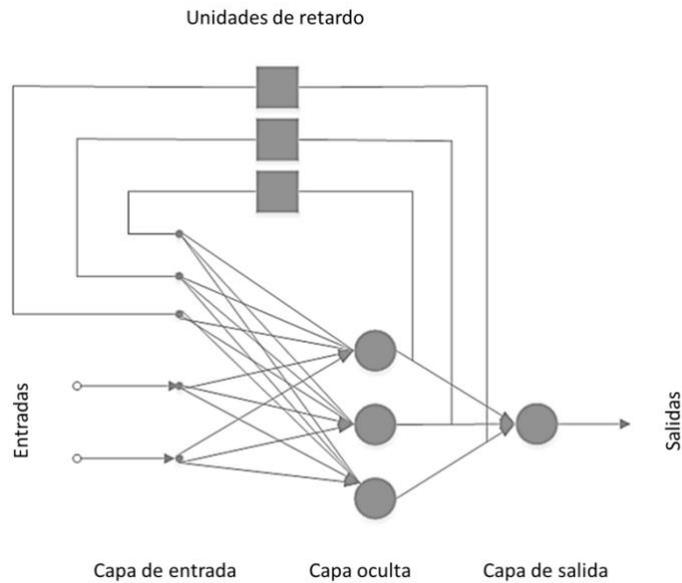


Figura II.29. Ejemplo de una arquitectura tipo RNN [Arriandiaga, 2016\_2].

Sin embargo, estas redes de tipo Elman son un método de entrenamiento cuya arquitectura no se ocupa de las dependencias de tiempo a largo plazo. Por ello, en 1997, Hochreiter et al. introdujeron la red tipo *Long Short-Term Memory neural network* (LSTM) [Hochreiter, 1997], arquitecturas en las que se usan puertas para decidir si mantener o no la memoria existente. Es decir, la LSTM es capaz de lidiar con dependencias de tiempo a largo plazo.

Asimismo, cuando los problemas a solucionar son más complejos, suelen utilizarse las redes neuronales de aprendizaje profundo (*Deep Learning*, DL), que son un conjunto de algoritmos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) que intenta modelar abstracciones de alto nivel usando arquitecturas compuestas de transformaciones no lineales múltiples, pudiendo hacer frente a problemas más complejos. Por ejemplo (tal y como se verá más adelante), se pueden utilizar Redes Neuronales Convolucionales (*Convolutional Neural Networks*, CNNs), que son redes neuronales *feed-forward* que se caracterizan por tener unas primeras capas que aprenderán a reconocer algunas de las características más importantes de un sistema y, después de extraer características de las secuencias, usar las redes recurrentes tipo LSTM para el modelado de datos secuenciales.

Por ejemplo, se han utilizado este tipo de redes para el diagnóstico de fallos, como en el trabajo de Yin et al., en el que han presentado un sistema para algunos de los errores que actualmente se detectan de forma manual en algunos equipos de los trenes de alta velocidad [Yin, 2016]. Se prueban tres tipos de redes: una red de creencia profunda (*Deep Belief Network*, DBN), el método de clasificación supervisada KNN y una red neuronal de propagación hacia atrás

(*Backpropagation Neural Network*, BPNN). Los resultados muestran que una DBN (por encima de la KNN y la BPNN) es capaz de mejorar la precisión de diagnóstico hasta un 95 %.

En mecanizado, una de las líneas de investigación que ha sido estudiada durante años por varios autores es el análisis de la vida de la herramienta ([Jawaid, 1999] [Attanasio, 2013] [Gajate, 2012] son algunos artículos publicados en el caso del proceso de torneado). Sin embargo, el enfoque interesante para esta tesis es la apuesta que en los últimos años se ha hecho por el uso de la AI [D'Addona, 2013] [Mikołajczyk, 2017].

Como ejemplo, se describe uno de los trabajos más recientes, el trabajo de Mikołajczyk et al., en el que proponen el uso de ANNs para predecir la vida de la herramienta en el proceso de torneado [Mikołajczyk, 2018]. Primero, se lleva a cabo la adquisición de datos experimentales de los filos de corte, obteniendo el valor de desgaste de herramienta  $V_B$ . Este parámetro se compara con el estimado mediante un sistema de reconocimiento de imágenes combinado con una ANN, cuya metodología es explicada en una publicación anterior [Mikołajczyk, 2017] y denominan como *Neural Wear*. Posteriormente, estos datos son utilizados para entrenar otra red que prediga la vida de la herramienta.

Los resultados muestran que el error relativo en la predicción del desgaste en el tercer filo, teniendo en cuenta los otros dos, está por debajo del 30 %. Sin embargo, cuando se entrena la red con intención de predecir la vida de la herramienta con el valor *Neural Wear* los resultados empeoran. Por ello, los autores son conscientes de la necesidad de aumentar la base de datos experimental y mejorar la precisión de esta técnica. Este trabajo es un claro ejemplo de que, a pesar de que las técnicas de AI son una posibilidad real de mejora de algunos problemas existentes en mecanizado, aún queda trabajo por hacer para conseguir una cantidad de datos suficientemente amplia y, con ello, unos resultados de predicción más fiables.

En el caso del proceso de rectificado, es el del propio Arriandiaga quien las utiliza con intención de predecir tanto la evolución de la energía específica como los parámetros de rectificado [Arriandiaga, 2016 1]. Este estudio se mejoraría, posteriormente, con la reducción de los datos de entrenamiento [Arriandiaga, 2017]. El objetivo es proponer una nueva estrategia para el entrenamiento de una arquitectura clásica, una RNN, encontrando los parámetros que influyen significativamente en el rendimiento de generalización de la ANN.

Así, en función de la muela abrasiva seleccionada (cuyos dos parámetros fundamentales considerados en este estudio han sido el tamaño de grano y la dureza) y los parámetros de rectificado (el ratio de velocidad y la MRR), y seleccionando una red con 12 capas ocultas y

10 neuronas por capa, se realiza la validación industrial. Los resultados muestran que el error relativo con respecto a la predicción es menor al 23,65 %, lo cual es aceptable para sus usuarios. A pesar de los buenos resultados para predecir esta evolución, los autores son conscientes de la necesaria generalización de este trabajo, por lo que el futuro estudio estará enfocado a automatizar dicha generalización.

#### II.4.2.1 *Aplicaciones de las Redes Neuronales en WEDM*

Por último, aunque es complicado encontrar trabajos sobre el uso de ANNs en el campo de la electroerosión, existen algunos estudios que proponen estas técnicas para resolver diferentes problemas citados en apartados anteriores. Por ejemplo, para estimar el espesor de pieza en tiempo real (apartado II.3.2) se considera el uso de una BPNN, además de una RBP para optimizar los parámetros según se vaya produciendo este cambio [Liao, 2002]. Se realizan diferentes cortes en piezas con un cambio de espesor y se predice dicho cambio con un error menor a 1,6 mm, además de adaptar los parámetros para que el corte siga siendo eficiente.

Este trabajo es indudablemente interesante, puesto que conocer el espesor de pieza en tiempo real es una de las tareas pendientes pero, como se verá en el capítulo V de esta tesis, hay dos cuestiones a las que no se hacen referencia: por un lado, la dificultad de estimar el espesor de pieza radica en no disponer de los datos de partida o que estos puedan ser diferentes entre ensayos (espesor o distancia entre guías y condiciones de mecanizado) y, por otro, a medida que se varían los parámetros para ajustarlos al nuevo espesor, se están modificando de nuevo las condiciones de trabajo siendo estas últimas desconocidas, por lo que el método de reconocimiento del espesor también debería sufrir cambios.

Uno de los aspectos más problemáticos de este proceso es la rotura del hilo, el cual genera tiempos no productivos y el deterioro de la calidad superficial de las piezas fabricadas debido a la aparición de marcas y defectos superficiales. En este aspecto cabe destacar la línea de trabajo de Cabanes y Portillo.

Primero, Cabanes et al. generan una aplicación para detectar las inestabilidades durante el corte, dividiendo las alarmas en tres niveles diferentes de peligrosidad [Cabanes, 2008 1]. El primer nivel alerta de situaciones no demasiado peligrosas, mientras que el segundo nivel está relacionado con un corte inestable del proceso y, por último, el tercer nivel indica una probable rotura del hilo.

Asimismo, se identifican tres razones fundamentales por las cuales existen inestabilidades en el comportamiento del hilo (una deficiente función del líquido dieléctrico, una pieza con geometrías complejas y un incremento en la frecuencia de las descargas), por lo que se observan las variables siguientes mediante una batería de ensayos que comprenden cortes en diferentes espesores, ángulos de cambio de dirección y valores del dieléctrico: la energía de la descarga, el pico de corriente, el número de arcos y cortocircuitos y el tiempo de ionización [Cabanés, 2008 1].

Con la información recogida se genera el sistema de alarmas: la primera saltará cuando el tiempo de ionización sea anormalmente grande; la segunda cuando, además de activarse la primera, se exceda en un 20 % el pico de corriente; y la tercera cuando, además, se exceda este último valor otro 20 %. Así, la rotura de hilo se detecta con una anticipación de 400 ms (500 ms de la primera alarma) en el mejor de los casos, con una eficiencia del 82 %, resultados que se llevan a una aplicación en tiempo real [Portillo, 2009].

Portillo et al. presentan los resultados de un estudio comparativo de distintas configuraciones de redes neuronales, con el fin de detectar comportamientos degradados que predigan la rotura del hilo. En este trabajo se observa que un conjunto de descargas sucesivas con un comportamiento determinado sí puede informar sobre la degradación del proceso. De la misma forma, se observa la aplicabilidad de las redes neuronales en la detección de la degradación del proceso WEDM, respondiendo de forma simultánea a dos objetivos: predecir la rotura del hilo en un rango de espesores y cuantificar el grado de influencia de las causas que lo producen. Para tal fin se ha utilizado una red tipo Elman. La conclusión del trabajo es que la arquitectura Elman constituye la alternativa más adecuada para la detección de la degradación del proceso.

Sin embargo, es importante no solo analizar los resultados de la red utilizada sino examinarlos también desde el punto de vista del proceso. Teniendo en cuenta la tecnología existente hoy en día (la velocidad será algo mayor que en estos estudios y, por tanto, el resultado será más conservador que en la realidad) para el menor de los espesores analizado (50 mm) y una velocidad de 3,4 mm/min, significa que se tiene un espacio de 0,02 mm. Este recorrido, que es mucho menor que el radio del hilo, hace que la actuación en los parámetros no sea si quiera una opción. Además, los autores también concluyen que deberán analizarse más tipos de alarma que aseguren la estabilidad del proceso. Un claro ejemplo es la variación en la presión del dieléctrico que, como se ha visto en la página 29, juega un papel crítico en la deformación del hilo [Okada, 2015] y puede llegar a romperlo.

Un año más tarde, en 2010, Chen et al. intentan optimizar los parámetros de mecanizado [Chen, 2010] que darán una mayor precisión al proceso de corte (sección II.2). Para ello se aplica una BPNN de 6 capas ocultas (por su rápida respuesta y precisión de entrenamiento) junto con una técnica de optimización para problemas no lineales denominada *Simulated Annealing* (SA). La finalidad de este análisis es encontrar el valor adecuado del conjunto de parámetros (tiempo de pausa, tiempo de pulso, tensión de servo, velocidad de corte, tensión axial del hilo y presión de dieléctrico) que minimicen la rugosidad superficial de la pieza.

Los resultados obtenidos del diseño se analizan posteriormente con un ANOVA y se definen los parámetros adecuados en los valores siguientes: tiempo de pausa de 12,15  $\mu\text{m}$ , tiempo de pulso de 0,42  $\mu\text{m}$ , tiempo de pausa de 13,73  $\mu\text{m}$ , tensión de servo de 45,17 V, velocidad de corte de 10,32 m/min, tracción del hilo de 1751,01 gf y presión de dieléctrico de 15,21  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ . Revisando la comparación con los resultados experimentales obtenidos se comete un error menor al 3 %.

Otro ejemplo es el de Shakeri et al. [Shakeri, 2016] que, después de realizar un análisis de los parámetros influyentes en el proceso, intenta predecirlos utilizando dos métodos. El primero de ellos es un modelo de regresión lineal que predice la relación entre la rugosidad superficial y la MRR, teniendo como entradas el pulso de corriente y el de frecuencia, la velocidad del hilo y la velocidad de servo. De este estudio se desprende que las variables fundamentales son el pulso de frecuencia y el de corriente. Y el otro es el uso de una ANN, más concretamente un algoritmo BPNN.

Los resultados de este estudio muestran que aumentar la velocidad de corte genera una mayor MRR y empeora la calidad superficial. La capacidad de predicción promedio de la red utilizada comete un error del 0,773 %, mientras este valor en el modelo de regresión es del 2,547 %; por tanto, aunque el modelo de regresión propuesto es adecuado, la BPNN adquiere una mejor predicción. Con todo, los propios autores afirman que el proceso puede aún ser optimizado mediante el uso de redes neuronales; y están en lo cierto, puesto que existen pocos trabajos que relacionen el uso de estas técnicas y el proceso de WEDM, por lo que el camino a recorrer todavía es muy largo.

## II.5 CONCLUSIONES

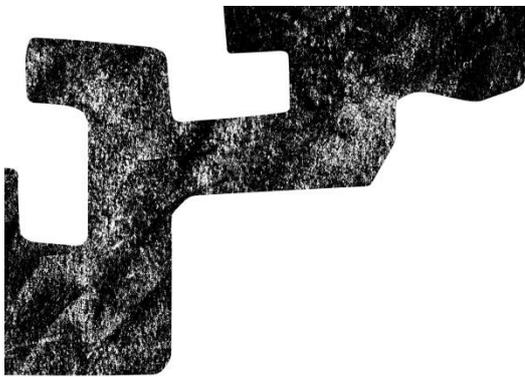
A la vista de la revisión del estado del arte se puede comprobar que una de las grandes metas a cumplir en el proceso de electroerosión por hilo es la mejora continua de la precisión. Si bien es cierto que este proceso ha sido históricamente caracterizado por las buenas tolerancias dimensionales producidas, las nuevas aplicaciones a las que aspira dar solución provocan que, seguir disminuyendo el error geométrico, sea una de las líneas de investigación más potentes.

Puesto que los modelos matemáticos y técnicas experimentales han sido tratados por una gran cantidad de investigadores, en este trabajo se plantea el uso de nuevas técnicas que puedan ayudar a dar solución a estos problemas, como el control y monitorización del proceso o el aprendizaje automático para manejar la gran cantidad de datos existentes a disposición de los investigadores.

Por otra parte, se ha comprobado cómo los tiempos característicos de las descargas, y en especial el tiempo de ionización, son importantes a tenor de las publicaciones realizadas para caracterizar el comportamiento del proceso. Puesto que caracterizarlo de forma correcta implica la obtención de una gran base de datos, se ha comprobado que el uso de las técnicas computacionales utilizadas históricamente para el campo de la comunicación e información, como es la inteligencia artificial, pueden ser utilizadas para mejorar los diferentes procesos de mecanizado existentes, incluyendo el de electroerosión por hilo.

Es por todo ello que en este trabajo se realiza primero un exhaustivo análisis del error geométrico provocado por la vibración y deformación del hilo (apartado III) y se plantea el uso de estas nuevas técnicas computacionales para resolver algunos de los problemas más comunes hoy en día durante el proceso de corte, como es el error generado en los círculos de pequeño diámetro (capítulo IV), la degradación del proceso de corte o la detección del espesor de pieza (título V).





**Capítulo III.  
Caracterización  
del error en  
trayectorias  
circulares**

---



## **III. CARACTERIZACIÓN DEL ERROR EN TRAYECTORIAS CIRCULARES**

*Uno de los problemas más habituales en WEDM es la falta de precisión en trayectorias con cambios bruscos de dirección. Por eso, en los próximos párrafos se aborda, primero, la caracterización del error durante los mismos, indicando cuáles pueden ser las causas que la generan (apartados III.2.1 y III.2.2) y realizando un estudio experimental para validar las hipótesis planteadas (capítulos III.3.1, III.3.2 y III.3.3). Tal y como se verá en los resultados (títulos III.3.2.1 y III.3.3.1), el defecto en la pieza aumenta en los planos intermedios de la misma, por lo que se analizará este efecto en la sección III.4. De este estudio se deriva la necesidad de medición del wire-lag de una forma más directa y sencilla (sección III.4.2), para lo que se expone una nueva metodología con su correspondiente batería de ensayos que prueben la validez de esta técnica (apartado III.4.3). Por último, en el subcapítulo III.5, se estudia la existencia de una relación entre esta deformación y los tipos de descarga existentes durante el corte.*

### **III.1 INTRODUCCIÓN**

Se ha planteado en la revisión del estado del arte (apartado II.2) el esfuerzo de diversos autores por modelizar el comportamiento del hilo, teniendo en cuenta las fuerzas que actúan sobre el mismo; sin embargo, sigue sin entenderse completamente. En este trabajo se propone su análisis de forma experimental, observando el efecto que este genera sobre la pieza y actuando para minimizar el error que causa: en otras palabras, dada la dificultad de actuar sobre el origen del problema se pretende hacerlo sobre el efecto provocado. Se comenzará este capítulo, por tanto, con el apartado III.2, analizando las causas teóricas por las que existe un error en las trayectorias rectas y circulares.

## III.2 CAUSAS QUE GENERAN UN ERROR EN LAS TRAYECTORIAS CIRCULARES

En los próximos párrafos se explicarán las causas principales que generan un error en las trayectorias con cambios de dirección para, posteriormente, comprobar estas hipótesis mediante un estudio experimental que verifique hasta qué punto son correctas estas afirmaciones.

### III.2.1 SIMULACIÓN DEL ERROR GENERADO EN TRAYECTORIAS CON CAMBIOS DE DIRECCIÓN

La vibración y deformación del hilo es un efecto que aparece en todo momento durante el corte, causado por las fuerzas existentes durante el proceso; y son varios los autores que han destacado su importancia en los cambios bruscos de dirección (ver capítulo II.2.3). Este trabajo se basa en la hipótesis de la página 19 planteada por Kinoshita et al. [Kinoshita, 1984]: las fuerzas inherentes al proceso provocan la vibración del hilo generando una envolvente que se asemeja a una elipse (ver Figura III.1). Esta envolvente será objeto de estudio en este trabajo.

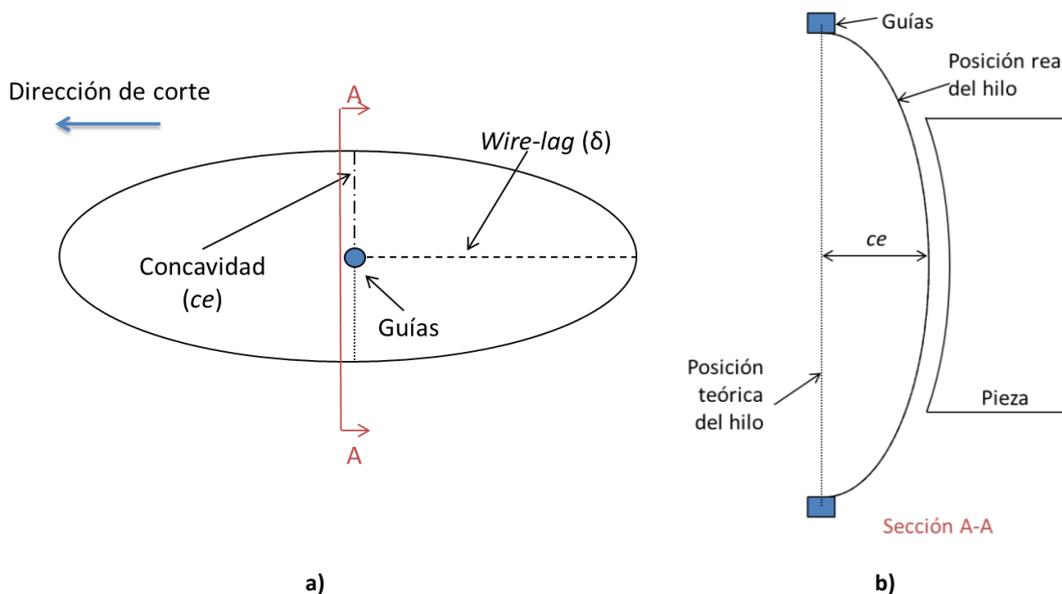


Figura III.1. Envolvente vibratoria del hilo basada en el trabajo de Kinoshita [Kinoshita, 1984]: a) vista superior; b) vista lateral.

Para unificar de aquí en adelante la denominación de los dos ejes de esta elipse, a la desviación en la dirección de corte causada por el retraso del hilo con respecto a las guías se le denominará *wire-lag* ( $\delta$ ). El otro eje, situado en dirección perpendicular a la del corte, genera en la pieza un efecto de concavidad (*concavity effect*, *ce*) debida a las fuerzas actuantes que atraen el hilo hacia

la misma (ver Figura III.2). Cuando existe un cambio de dirección, estas componentes se superpondrán generando un error variable.

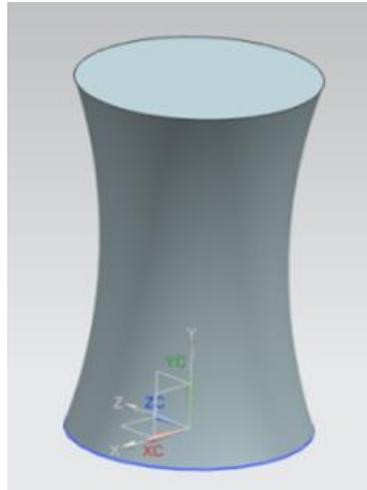


Figura III.2. Representación del efecto de concavidad a lo largo del espesor de la pieza.

El error en la pieza provocado por el *wire-lag* (*wire-lag effect, wle*) al cortar una esquina a  $90^\circ$  puede modelarse según la curva denominada tractriz (ver Figura III.3.a), a la que autores como Dekeyser ya hacían referencia en sus trabajos (puede verse en la página 20). La generalización de dicha curva a cualquier trayectoria se conoce como curva de persecución (*pursuit curve*), la cual se ha programado mediante el software Matlab® (ver Figura III.3.b) para predecir la contribución del *wire-lag* a la falta de precisión en la pieza.

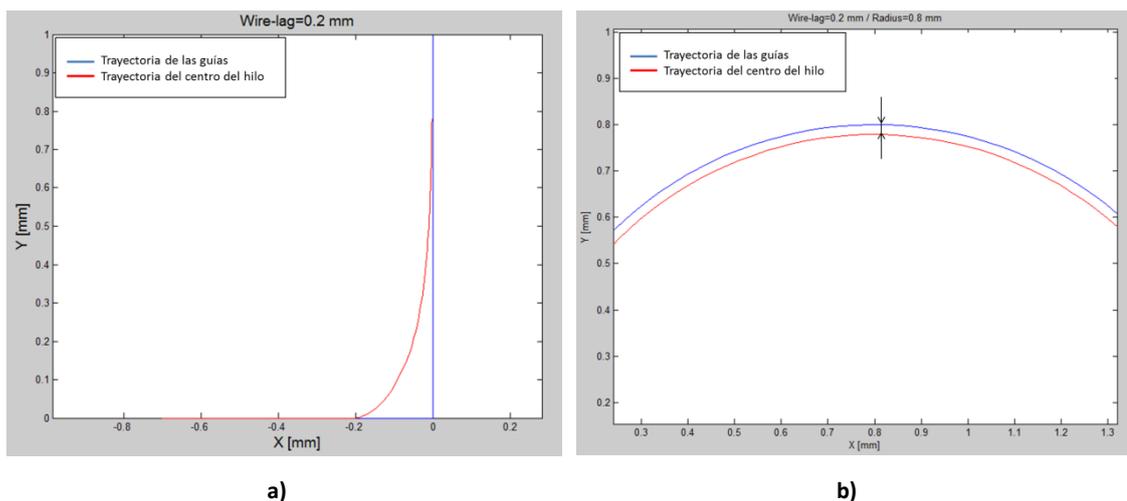


Figura III.3. Error generado por el *wire-lag* modelizado mediante MATLAB® en: a) una esquina a  $90^\circ$ ; b) un radio de 0,8 mm.

La programación de la curva de persecución se explica mediante la Figura III.4, donde se muestra cómo generar tres puntos genéricos pero consecutivos de la misma, y la cual se define como la curva que describe un punto que persigue de manera óptima a otro, separados estos por una distancia determinada, cuando se están desplazando a una velocidad constante (en este caso la distancia de separación será el retraso del centro del hilo con respecto a las guías,  $\delta$ ). Para ello es necesario, primero, unir los puntos  $n$  y  $p - 1$ , y posteriormente se dibuja, con centro en  $n$ , una circunferencia de radio igual a  $\delta$ . Donde intersecan esta circunferencia y la recta  $\overline{n, p - 1}$  se encuentra el punto  $p$ .

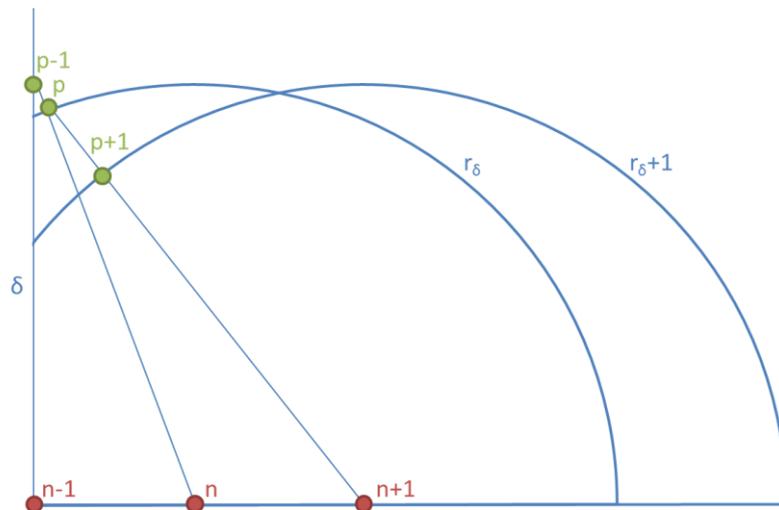


Figura III.4. Programación de la curva de persecución.

Si se repite este procedimiento para todos los puntos por los que vayan pasando las guías del hilo durante el corte, o lo que es lo mismo, todos los puntos  $n$  de cada instante (sabiendo el valor del *wire-lag*) se obtiene, uniendo todos los puntos  $p$ , la trayectoria teórica del centro del hilo y, por tanto, el error que generaría en la pieza sería teóricamente conocido (ver de nuevo la Figura III.3.b).

### III.2.2 DESEQUILIBRIO DE ÁREAS DE EROSIÓN EN EL CORTE DE TRAYECTORIAS CIRCULARES

La simulación del error generado por el *wire-lag*, sin embargo, no representa todo el error cometido, ya que este efecto alcanzará su mayor valor en la zona intermedia de la pieza, pero cuanto más próximo sea el plano analizado a la posición de las guías este defecto disminuirá. Por eso existe otra hipótesis que explicaría el error cometido a lo largo de todo el espesor de la pieza y por qué el defecto de erosión se acentúa en los cambios bruscos de dirección: el

desequilibrio de fuerzas. Es decir, en una interpolación lineal el canal de erosión se encuentra geoméricamente equilibrado y la *MRR* es la misma a izquierda y derecha del centro del hilo, tal y como muestra la Figura III.5.a. Sin embargo, cuando se está erosionando una interpolación circular (o lo que es lo mismo, una geometría con cambio de dirección) las secciones exterior e interior del material que debe arrancar el electrodo quedan descompensadas (ver Figura III.5.b).

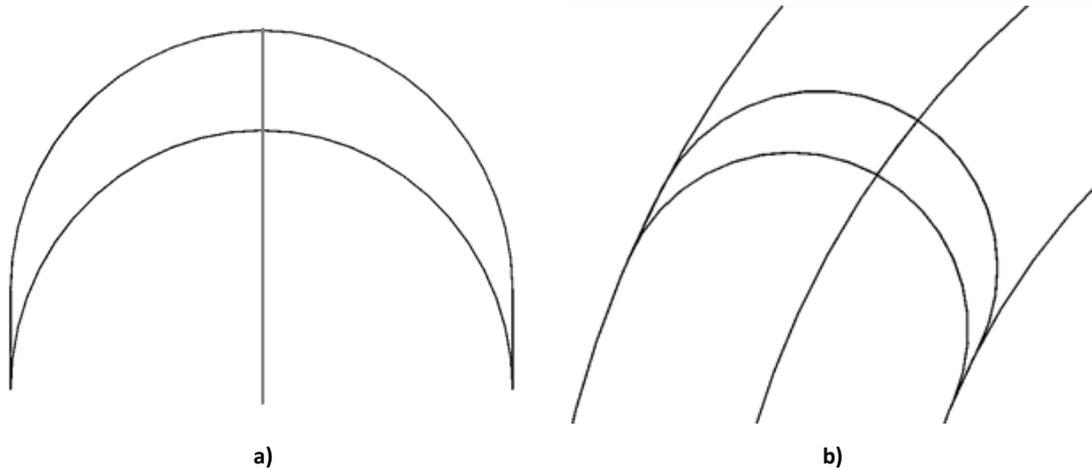


Figura III.5. Área de erosión exterior e interior en: a) un corte recto; b) un corte con cambio de dirección.

Para comprobar este efecto se han calculado estas diferencias de área de erosión para diferentes radios y espesores, realizando una estimación teórica mediante el cálculo del área que erosionaría, en un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ), la suma (Ec. III. 1) del radio del hilo ( $r$ ) y el *gap*, tal y como se muestra en la Figura III.6.

$$d = r + gap$$

Ec. III. 1

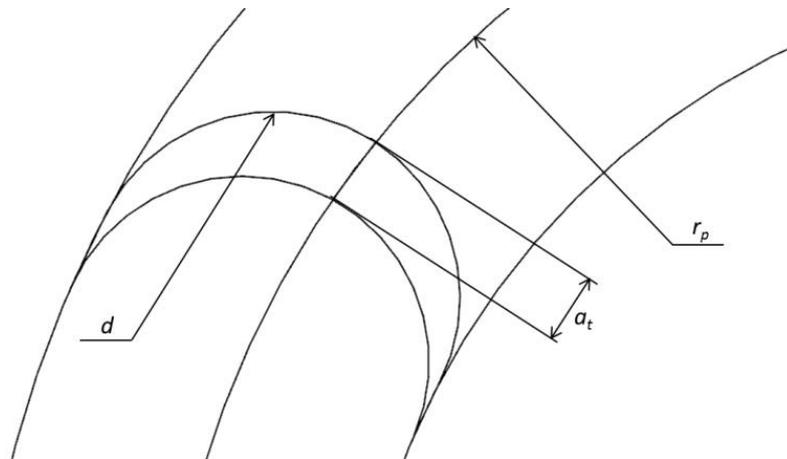


Figura III.6. Esquema de la diferencia de áreas erosionadas en el corte de un círculo entre dos instantes de tiempo.

Así, fijados el radio de erosión ( $r_p$ ) el espesor de pieza ( $h$ ) y  $\Delta t$ , se conocen  $d$  y la velocidad de avance teórica ( $v_T$ ), de forma que se puede calcular el espacio recorrido por el hilo ( $a_T$ ) y, por consiguiente, el área erosionada a un lado y a otro de su centro. Si se expresa el área a cada lado de la trayectoria del centro del hilo en porcentaje con respecto al área total erosionada en dicho intervalo de tiempo en el que el hilo recorre 0,1 mm, en tres espesores diferentes (40 mm, 70 mm y 100 mm), se obtiene la Figura III.7. Se puede observar, a la vista de las barras de dispersión, cómo la tendencia es la misma independientemente del espesor, tanto para el área exterior (Figura III.7.a) como para la interior (Figura III.7.b).

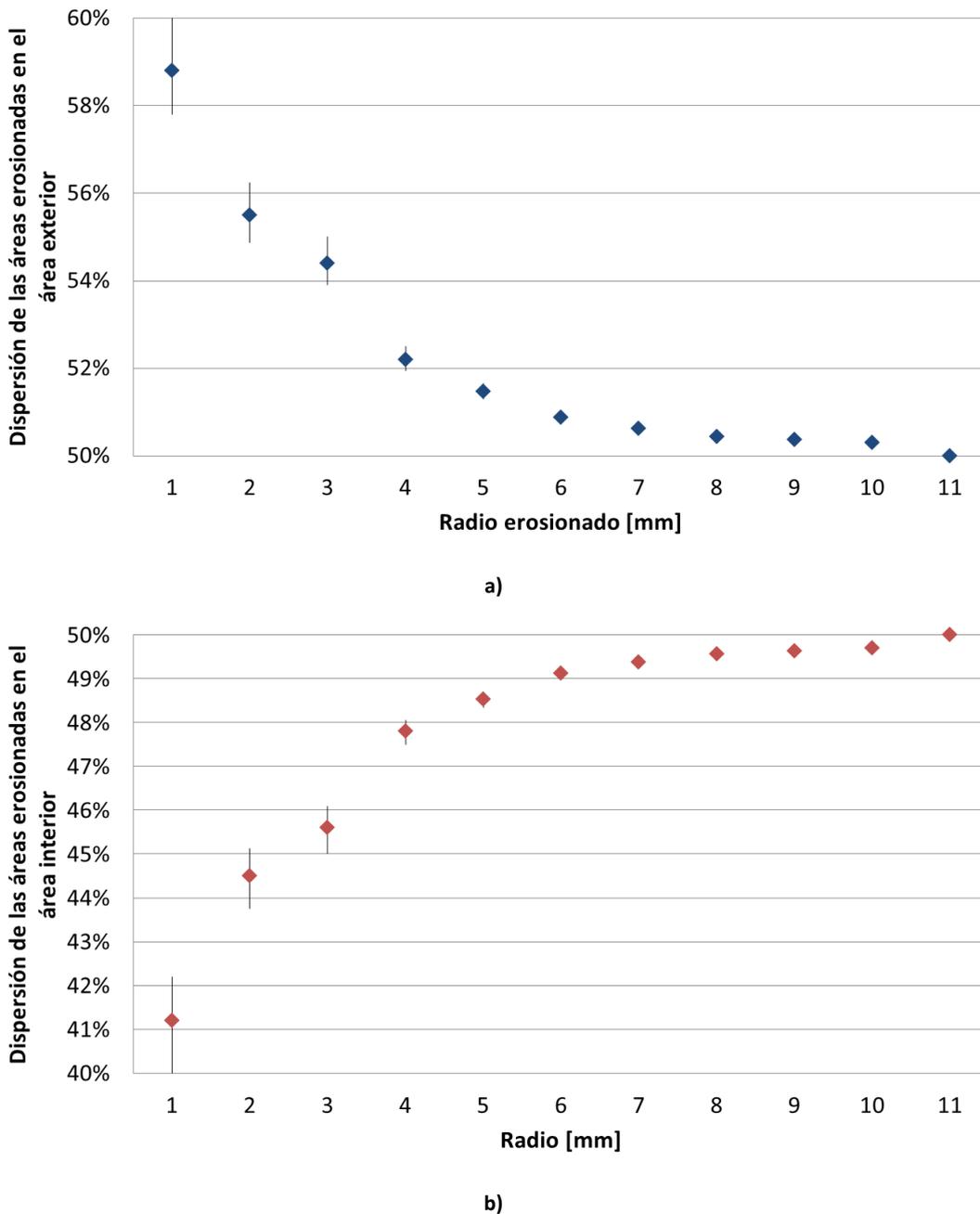


Figura III.7. Tendencia de dispersión del desequilibrio de áreas calculado para diferentes espesores: a) área exterior; b) área interior.

Para observar mejor la evolución de este desequilibrio se representa, en la Figura III.8, únicamente el espesor de 100 mm.

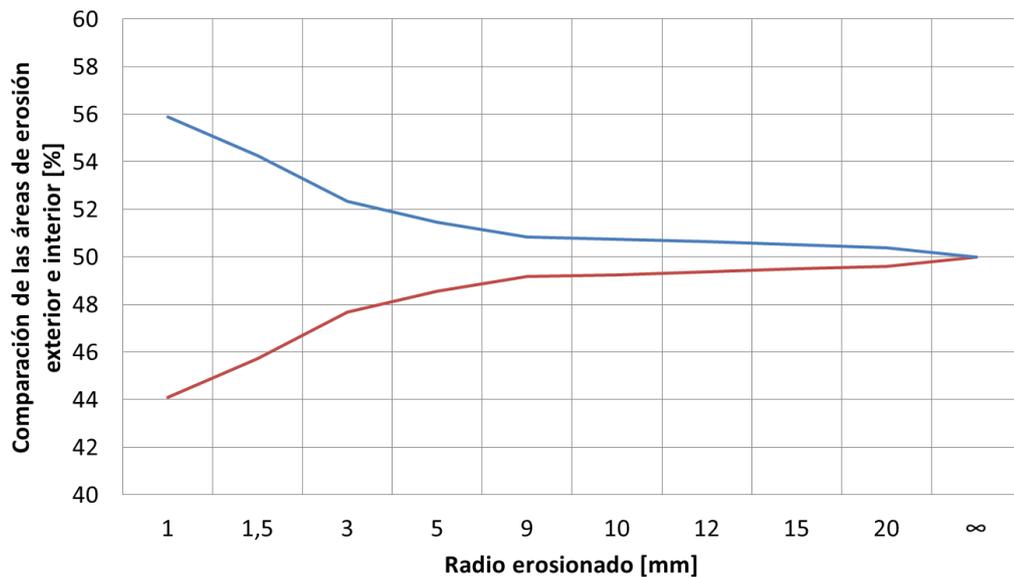


Figura III.8. Ejemplo del desequilibrio de áreas en función del radio erosionado para un espesor de pieza de 100 mm: área exterior (azul) y área interior (rojo).

El desequilibrio de áreas comienza a apreciarse por debajo de un radio de 9 mm, pero no es hasta llegar a un radio menor a 4 mm cuando la diferencia porcentual de las áreas supera los 2 puntos, pudiendo llegar a alcanzar un porcentaje de 60 % - 40 % (ver de nuevo la Figura III.8). Cuanto menor es el radio, más pronunciada es esta diferencia. Si a esto se le añaden otros factores como el *wire-lag* o la falta de presión del fluido dieléctrico, el defecto de erosión será considerable. Por eso, en un próximo apartado se tratará de caracterizar la importancia que tiene el *wire-lag* en el proceso de corte.

### III.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS DESVIACIONES EN TRAYECTORIAS CIRCULARES

Durante los próximos párrafos se verá un estudio preliminar del corte de círculos (sección III.3.1), con el que se observa la necesidad de realizar un estudio experimental para la caracterización de su error (apartado III.3.2). Los resultados muestran que la aplicación de una compensación geométrica es posible (capítulo III.3.3).

### III.3.1 ESTUDIO PRELIMINAR

Se ha llevado a cabo un estudio preliminar para caracterizar el corte de trayectorias circulares y ver cuál es la forma del error en este tipo de trayectorias. Para ello, se han cortado círculos de distinto radio, desde 3 mm (valor por debajo del cual aparecen otros fenómenos debido a la pérdida de presión del fluido dieléctrico) hasta 20 mm, en tres espesores diferentes (40 mm, 70 mm y 100 mm), tal y como se resume en la Tabla III.1.

**Tabla III.1. Ensayos realizados para la caracterización del error en trayectorias circulares.**

Piezas erosionadas para la caracterización del error en círculos						
Esesor de pieza [mm]	40,0		70,0		100,0	
Radio [mm]	3,0	5,0	9,0	12,0	15,0	20,0

Los cortes se han realizado en una máquina de electroerosión por hilo ONA AX 3, con un hilo de latón recubierto de 0,25 mm de diámetro (de 900 N/mm<sup>2</sup> de resistencia a rotura y un 1 % de elongación) y los parámetros de las condiciones de corte estándar para desbaste que se muestran en la Tabla III.2. En cuanto al material se ha utilizado un acero AISI D2 (ISO 160CrMoV12) templado y revenido de 62 HRC de dureza. Para la medición de las probetas se ha utilizado la CMM Zeiss 850, la cual tiene una incertidumbre de medida de  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

**Tabla III.2. Parámetros utilizados para el corte de trayectorias circulares.**

Parámetros utilizados	Valor		
Esesor de pieza [mm]	40,0	70,0	100,0
Tiempo de pausa [ $\mu\text{s}$ ]	9,0	12,0	13,0
Intensidad [A]	5,0	5,0	5,0
Tensión de servo de referencia [V]	80,0	80,0	80,0
Presión del dieléctrico [bar]	17,0	17,0	17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2	1,2	1,2
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10,0	10,0	10,0

La geometría utilizada se muestra en la Figura III.9.a, donde se han elegido las paredes de los ejes X e Y como las superficies de referencia para la medición. Además, en la Figura III.9.b se pueden observar los planos de medición: un plano a 1,5 mm de cada extremo de la pieza y otros 8 distribuidos por toda su longitud. En la interpolación circular se han medido entre 20 y 40 puntos en función del tamaño del radio de la probeta.

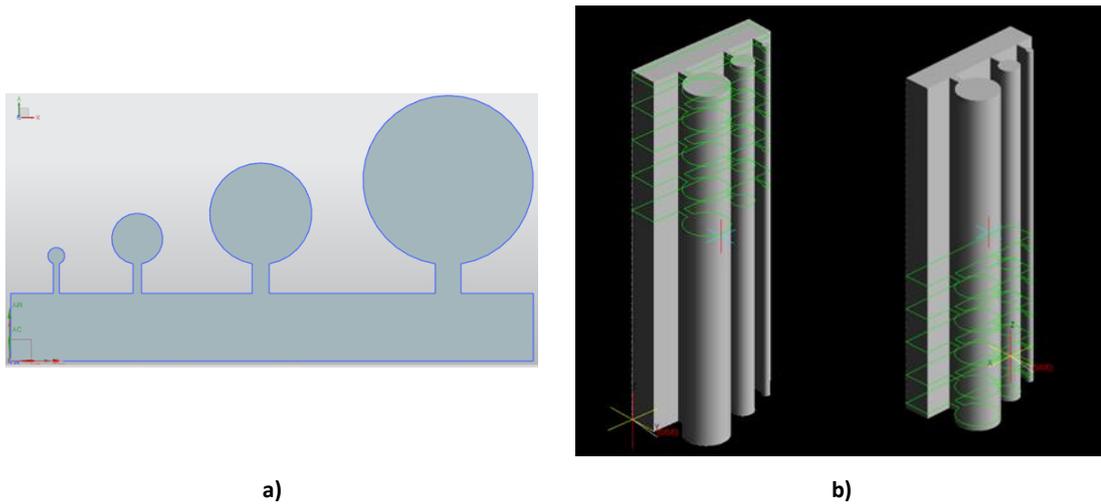


Figura III.9. Ejemplo de la: a) geometría utilizada para la erosión de los círculos; b) secuencia de planos medidos.

En la Figura III.10 se observa un ejemplo de la evolución del error (la tendencia es la misma en todas las probetas realizadas). Por una parte, la inexactitud en la zona intermedia de la interpolación circular es muy reducida: los valores máximos son de  $-39 \mu\text{m}$  en un radio de 20 mm y espesor 100 mm, y en radios menores a 9 mm este defecto siempre es menor de  $10 \mu\text{m}$ . Sin embargo, al acercarse a los extremos el error crece paulatinamente pudiendo alcanzar incluso los  $150 \mu\text{m}$  de defecto de material (en una probeta de 70 mm de espesor y 20 mm de radio).

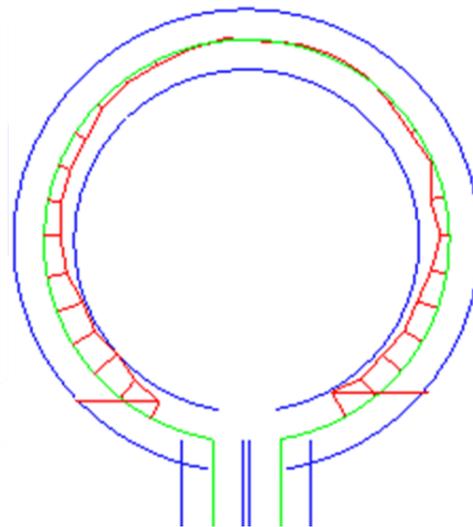


Figura III.10. Ejemplo de la evolución del error en el corte de un círculo cortado por WEDM.

Los resultados promedio acompañados de su desviación estándar (*Standard Deviation, SD*) en cada plano y radio, para cada uno de los tres espesores, se muestran tabulados a continuación (ver Tabla III.3, Tabla III.4 y Tabla III.5).

**Tabla III.3. Desviaciones en círculos realizados en H = 40 mm.**

	R = 3 mm		R = 5 mm		R = 9 mm		R = 12 mm		R = 15 mm		R = 20 mm	
	Desv [ $\mu\text{m}$ ]	<i>SD</i>										
P 1	-9	6	-5	4	-4	4	-3	4	-6	4	-8	4
P 2	-10	8	-9	5	-7	5	-8	5	-8	5	-8	4
P 3	-11	10	-10	6	-9	6	-8	5	-9	7	-9	4
P 4	-10	8	-11	5	-10	6	-10	5	-8	6	-8	3
P 5	-10	11	-12	6	-10	7	-9	5	-8	7	-8	3
P 6	-10	8	-11	5	-8	6	-7	6	-11	6	-5	3
P 7	-15	10	-10	4	-7	6	-7	6	-10	5	-5	3
P 8	-12	10	-9	4	-5	6	-5	6	-10	5	-4	2
P 9	-12	11	-8	3	-4	5	-3	7	-8	4	-2	2
P 10	-7	6	-7	3	-3	5	-2	7	-8	4	-2	2

**Tabla III.4. Desviaciones en círculos realizados en H = 70 mm.**

	R = 3 mm		R = 5 mm		R = 9 mm		R = 12 mm		R = 15 mm		R = 20 mm	
	Desv [ $\mu\text{m}$ ]	<i>SD</i>										
P 1	-13	12	-11	10	-12	10	-12	9	-10	6	-75	36
P 2	-16	14	-15	10	-17	12	-19	11	-17	9	-78	40
P 3	-19	16	-22	17	-20	15	-21	13	-21	12	-80	42
P 4	-20	19	-18	17	-22	18	-22	14	-22	14	-81	43
P 5	-23	21	-21	18	-21	17	-22	14	-22	15	-81	42
P 6	-26	19	-22	18	-24	17	-26	10	-21	18	-81	40
P 7	-26	19	-21	16	-23	15	-24	9	-20	19	-79	42
P 8	-24	17	-21	17	-20	13	-21	8	-14	20	-78	38
P 9	-20	13	-14	16	-18	18	-19	14	-12	21	-77	33
P 10	-12	8	-17	15	-16	11	-18	7	-8	22	-75	30

**Tabla III.5. Desviaciones en círculos realizados en H = 100 mm.**

	R = 3 mm		R = 5 mm		R = 9 mm		R = 12 mm		R = 15 mm		R = 20 mm	
	Desv [μm]	SD										
P 1	-13	12	-11	10	-12	10	-12	9	-10	6	-75	36
P 2	-16	14	-15	10	-17	12	-19	11	-17	9	-78	40
P 3	-19	16	-22	17	-20	15	-21	13	-21	12	-80	42
P 4	-20	19	-18	17	-22	18	-22	14	-22	14	-81	43
P 5	-23	21	-21	18	-21	17	-22	14	-22	15	-81	42
P 6	-26	19	-22	18	-24	17	-26	10	-21	18	-81	40
P 7	-26	19	-21	16	-23	15	-24	9	-20	19	-79	42
P 8	-24	17	-21	17	-20	13	-21	8	-14	20	-78	38
P 9	-20	13	-14	16	-18	18	-19	14	-12	21	-77	33
P 10	-12	8	-17	15	-16	11	-18	7	-8	22	-75	30

Por otro lado, en la Tabla III.6 se muestra el defecto relativo al radio erosionado, es decir, el error promedio máximo en cada radio con respecto al valor de dicho radio, de donde se deduce que el error cometido en radios pequeños es más importante: el factor de defecto a partir de un radio de 9 mm no supera el 0,25 % (salvo en el caso excepcional de 70 mm y radio 20 mm, en el que no se alcanza la mitad del valor máximo correspondiente a 0,93 %).

**Tabla III.6. Factor de defecto de las probetas erosionadas.**

R [mm]	Factor de defecto [%]					
	3	5	9	12	15	20
H = 40 mm	0,50	0,24	0,11	0,08	0,07	0,05
H = 70 mm	0,87	0,44	0,27	0,22	0,15	0,41
H = 100 mm	0,93	0,54	0,29	0,21	0,15	0,13

Para poder comprender de forma más intuitiva estos datos se muestra, en la Figura III.11, la evolución del error promedio del radio de 3 mm en función de los distintos espesores. De este gráfico se pueden obtener las siguientes conclusiones: el error promedio en los planos medios es superior al de los extremos en las probetas erosionadas, lo cual concuerda con la hipótesis planteada en el apartado III.2.1. Además, de acuerdo con la evolución mostrada en la Figura III.10, en cada plano, el error aumenta paulatinamente según se acerca a las zonas extremas del círculo erosionado, lo que podría ser explicado por el desequilibrio de fuerzas que causarían un desequilibrio en las áreas erosionadas (ver las hipótesis de la sección III.2.2).

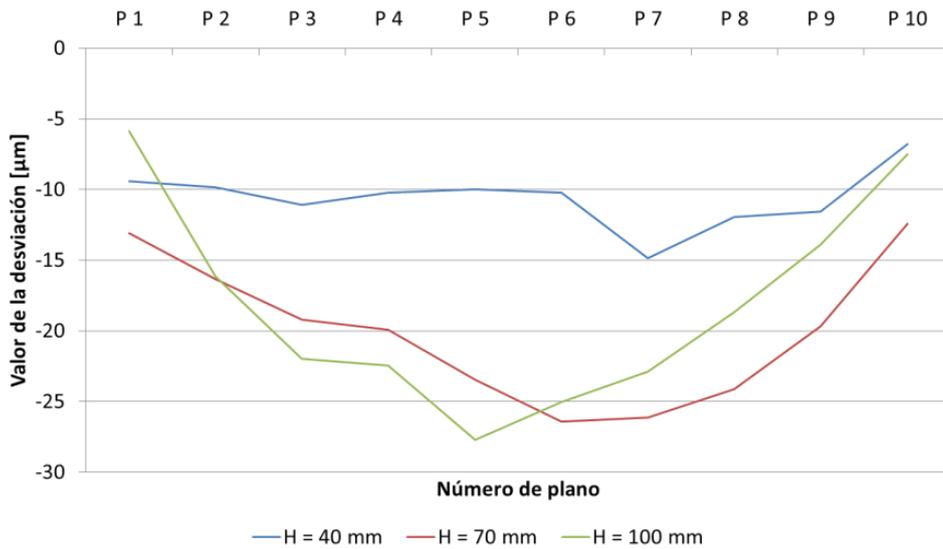


Figura III.11. Evolución del error de la probeta de 3 mm de radio en función del espesor para cada plano medido.

Sin embargo, el error mostrado en las probetas está condicionado por el corte de una esquina al principio y al final de la interpolación circular, en la que existen cambios de los parámetros y condiciones de corte introducidos por el hardware de la máquina e incluso una variación de la presión del fluido dieléctrico y, por tanto, el defecto de erosión en la geometría de la pieza puede quedar afectado por ello. Es por esta razón que se decide realizar un estudio experimental sobre el defecto generado, con otro tipo de geometría que permita excluir estos problemas y la medición se realice de forma más sistemática.

### III.3.2 ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL DEFECTO DE EROSIÓN GENERADO EN EL CORTE DE TRAYECTORIAS CIRCULARES

A continuación se analiza y cuantifica, partiendo de las hipótesis expuestas en el apartado III.2, y teniendo en cuenta el estudio preliminar de la sección III.3.1, el error cometido al cortar piezas con trayectorias circulares. Para realizar un estudio experimental que contemple todos los casos sería necesario cortar y medir 120 probetas; es decir, ensayos que abarcarían espesores de entre 20 mm y 150 mm (los contemplados en las tablas tecnológicas de la máquina) y radios ( $r_p$ ) entre 1 mm y 15 mm, considerando que este radio es suficientemente amplio como para dejar de hablar de un cambio brusco de dirección. En un caso ideal, en el que no se tengan en cuenta los tiempos de preparación, las averías de la máquina ni el descenso de velocidad con respecto al valor teórico suministrado por la empresa fabricante, elaborar estas probetas supondrían aproximadamente 30 días de trabajo (realizando un promedio del tiempo necesario de

fabricación de cada una, ver Figura III.12). A este tiempo sería necesario sumar el tiempo de medición de las mismas.

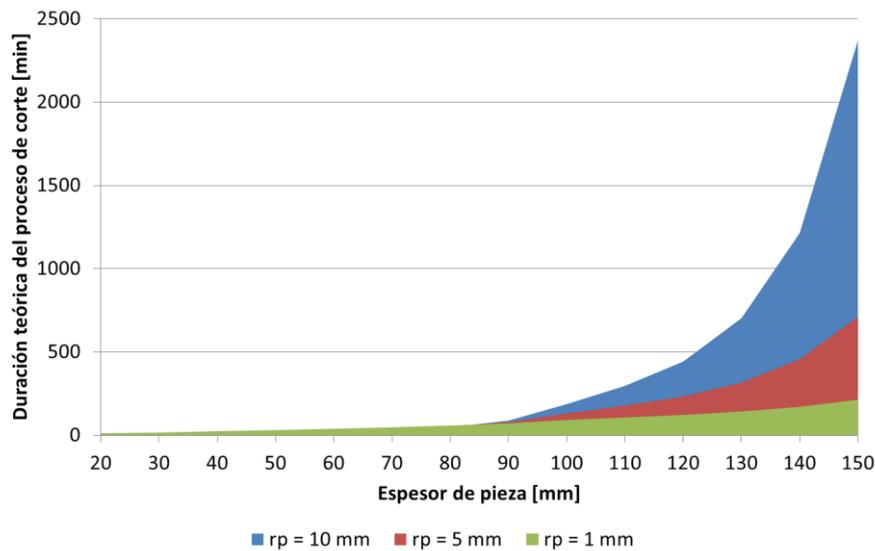


Figura III.12. Comparación del tiempo necesario para la fabricación de una probeta en función del espesor y radio.

Por otra parte, se estudia la posibilidad del uso de un diseño de experimentos (*Design of Experiments*, DoE) para minimizar el número de ensayos a realizar. Según Diamond et al. [Diamond, 1989], existen cuatro principales problemas en ingeniería en los que el DoE resulta eficaz: la comparativa para observar cómo influye un factor en el proceso, caracterización de las variables de proceso para una mejor comprensión del mismo, como herramienta predictiva y la optimización para cuantificar las variables. Identificadas las condiciones del proceso y la configuración de factores que optimiza los resultados se descarta el uso del DoE.

La carga experimental del estudio preliminar, el factor de defecto observado en la Tabla III.6 y las razones expuestas en este apartado llevan a la necesidad de acordar, junto con la empresa ONA Electroerosión, la selección del mínimo número de probetas para realizar los ensayos de manera que se caracterice la forma del error de este tipo de trayectorias y determine una metodología de medición de su error: tres espesores y tres radios diferentes (ver la Tabla III.7). Los espesores se han elegido de acuerdo al siguiente criterio: un espesor de 40 mm, dado que por debajo de 20 mm o 30 mm existen diferencias en el comportamiento del fluido dieléctrico, el espesor mayor contemplado en las tablas tecnológicas de 150 mm y un espesor intermedio de 100 mm.

**Tabla III.7. Casos analizados en el defecto de erosión de trayectorias circulares.**

Ensayo	Espesor [mm]	Radio [mm]
Ensayo 1	100	5
Ensayo 2	150	5
Ensayo 3	40	5
Ensayo 4	100	3
Ensayo 5	100	8

Los cortes llevados a cabo, al igual que en los ensayos preliminares, se han realizado en la máquina ONA AX 3, con un hilo de latón recubierto de 0,25 mm y los parámetros de las condiciones de corte estándar para desbaste que se muestran en la Tabla III.8. En cuanto al material se ha utilizado de nuevo el acero AISI D2 (ISO 160CrMoV12) y la CMM Zeiss 850 para su medición.

**Tabla III.8. Parámetros utilizados para el corte de trayectorias circulares.**

Parámetros utilizados	Valor		
Espesor de pieza [mm]	150,0	100,0	40,0
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	21,0	13,0	9,0
Intensidad [A]	5,0	5,0	5,0
Tensión de servo de referencia [V]	80,0	80,0	80,0
Presión del dieléctrico [bar]	17,0	17,0	17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2	1,2	1,2
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10,0	10,0	10,0

Para cuantificar el defecto de erosión generado en el corte de trayectorias circulares a lo largo del espesor de la pieza se cortan probetas con la geometría de la Figura III.13. En rojo aparecen representadas la entrada y salida de pieza. Si bien es usual entrar en la pieza con una primera interpolación perpendicular, se realiza de esta manera para que un cambio de dirección de las guías no afecte a la realización del semicírculo. Asimismo, en azul se pueden apreciar las dos rectas que servirán para utilizarlas como superficies de referencia a la hora de llevar a cabo las mediciones en la máquina de medir por coordenadas. Se han denominado las diferentes trayectorias como zonas de interpolación lineal (*Linear Interpolation Zones*, LIZ 1 y LIZ 2) y zona de interpolación circular (*Circular Interpolation Zone*, CIZ 1).

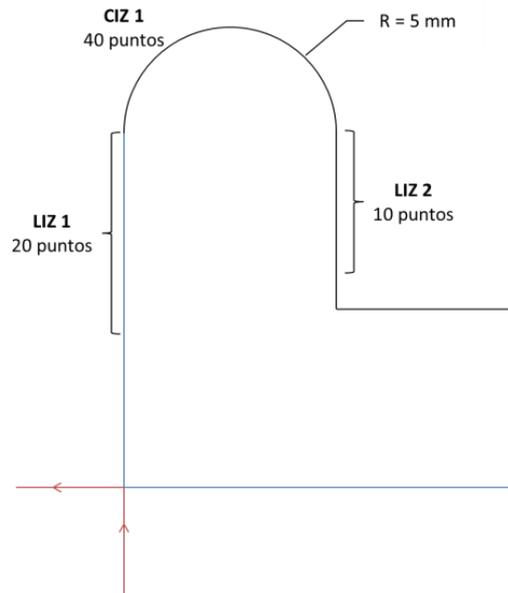


Figura III.13. Geometría de la probeta analizada.

Estas probetas se miden en 4 planos diferentes (ver Figura III.14) y, sobre cada uno de ellos, se palpan 70 puntos, de los cuales 40 se toman en la zona circular o CIZ 1. Las bandas de tolerancia en las medidas se han fijado en  $\pm 30 \mu\text{m}$ . La razón por la que se ha elegido este valor es precisamente que, como se verá más adelante, el menor de los ejes de la envolvente del hilo, el  $ce$ , ronda esta cifra a la salida de la interpolación circular; por encima de este valor aparecerá la superposición de otro factor como es el *wire-lag*.

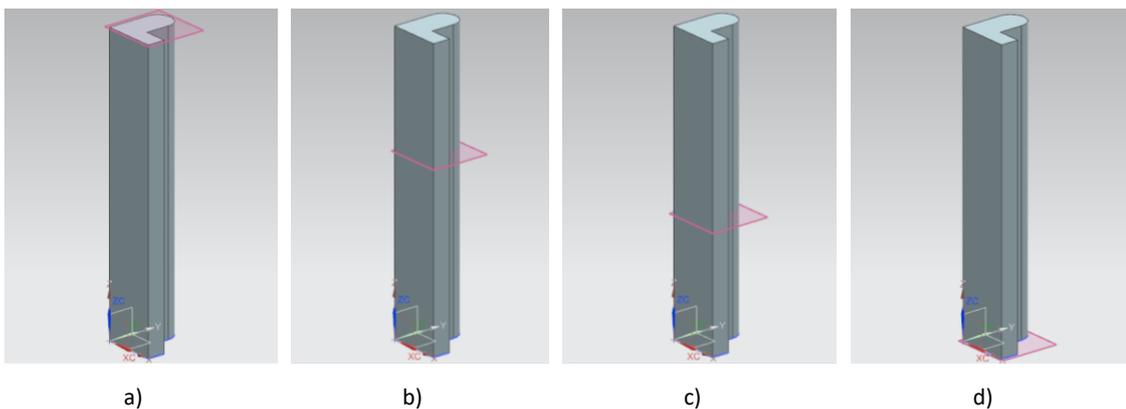


Figura III.14. Planos de medición: a) superior (a 1,5 mm de la superficie superior); b) medio-superior (a 40 mm de la superficie superior o en la sección intermedia de la probeta); c) medio-inferior (a 40 mm de la superficie inferior o en la sección intermedia de la probeta); d) inferior (a 1,5 mm de la superficie inferior).

III.3.2.1 *Resultados obtenidos*

Los resultados de las probetas medidas se muestran en las siguientes tablas (desde la Tabla III.9 hasta la Tabla III.13), donde se cuantifica el error promedio y máximo en cada zona en la que se han separado las medidas (ver de nuevo la Figura III.13). Un valor positivo implica una demasía de material, mientras que un valor negativo es indicativo de un defecto del mismo.

**Tabla III.9. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 1 (100 mm de espesor y radio 5 mm).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	12	16	6	11
CIZ 1	-21	-39	-43	-65
LIZ 2	-33	-34	-60	-63

**Tabla III.10. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 2 (150 mm de espesor y radio 5 mm).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	11	19	-2	-9
CIZ 1	-9	-23	-36	-50
LIZ 2	-12	-12	-39	-39

**Tabla III.11. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 3 (40 mm de espesor y radio 5 mm).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -20 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	6	10	-8	-16
CIZ 1	-12	-27	-1	-19
LIZ 2	-19	-21	-2	-5

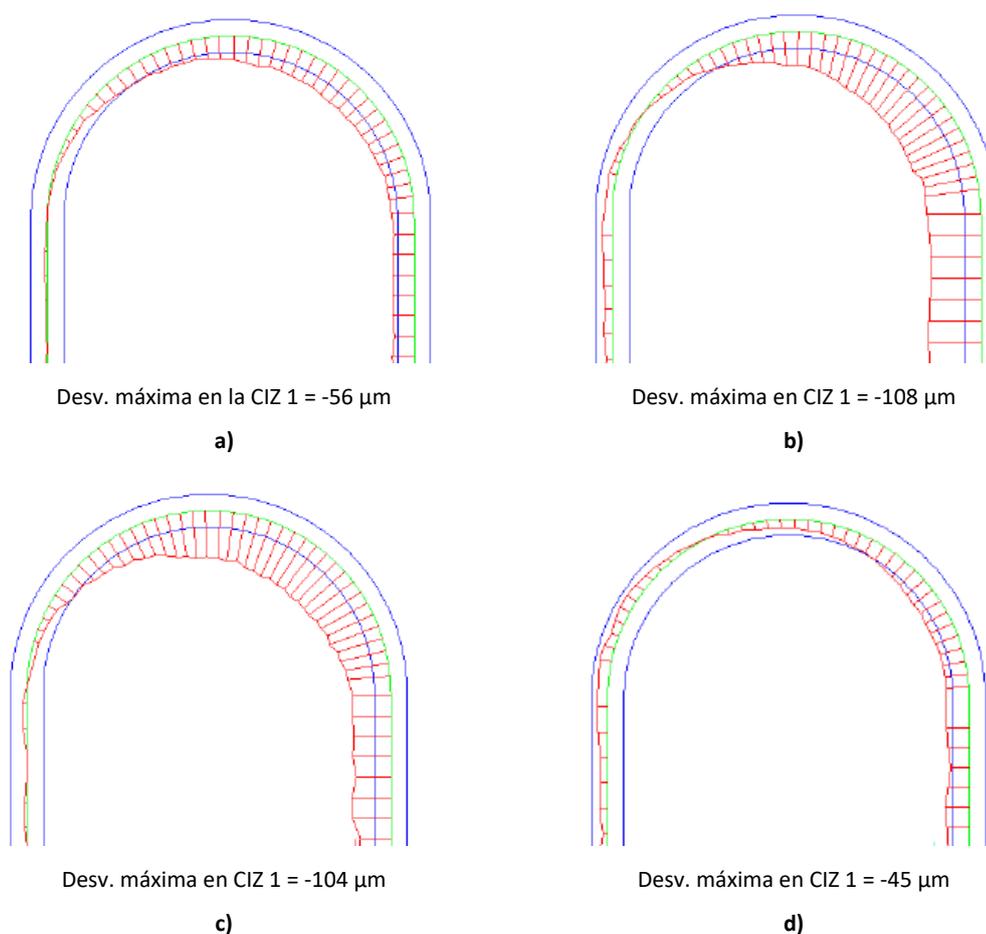
**Tabla III.12. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 4 (100 mm de espesor y radio 8 mm).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	4	13	11	18
CIZ 1	-25	-44	-42	-71
LIZ 2	-36	-39	-52	-55

**Tabla III.13. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 5 (100 mm de espesor y radio 3 mm).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	2	10	8	15
CIZ 1	-20	-33	-51	-72
LIZ 2	-31	-34	-56	-58

Puesto que todas las probetas tienen una evolución del error similar se muestra, en la Figura III.15, un ejemplo de la medición realizada en una pieza de 100 mm de espesor y radio 5 mm.



**Figura III.15. Ejemplo del resultado de la medición de una probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm en el plano: a) superior; b) medio-superior; c) medio-inferior; d) inferior.**

Más concretamente, en la Figura III.15.a se observa cómo la pared inicial (a la izquierda) no presenta apenas error, ya que representa una de las paredes de referencia. Sin embargo, a medida que comienza a realizarse el círculo, el defecto de erosión aumenta paulatinamente hasta llegar a un máximo (-56  $\mu\text{m}$  en este caso) que sobrepasa los  $\pm 30 \mu\text{m}$  de la banda de tolerancia indicada en color azul. Una vez se termina la interpolación circular este error se estabiliza y se mantiene constante a lo largo de la recta de salida en torno a los 33  $\mu\text{m}$ . Tanto la

Figura III.15.b como la Figura III.15.c muestran un comportamiento similar entre ellas, agudizando el error mostrado en la zona superior: esto es así debido a que la deformación del hilo es máxima en esta zona. Por último, en la Figura III.15.d, el error vuelve a ser parecido al del plano superior. Debido a esta simetría se han presentado los resultados únicamente de la mitad superior de la pieza.

A la vista de los resultados y de que estos presentan la misma tendencia, en el próximo apartado se propone realizar una compensación geométrica para corregir el error observado en los párrafos anteriores.

### III.3.3 PROPUESTA DE MEJORA MEDIANTE UNA COMPENSACIÓN GEOMÉTRICA

En la Figura III.16.a se presenta, de nuevo, un ejemplo del error cometido en las trayectorias circulares; y en la Figura III.16.b la propuesta de una compensación geométrica a realizar en las mismas probetas utilizadas en el apartado anterior. Esta corrección geométrica consiste en una compensación progresiva (empezando con un valor nulo al principio de la interpolación circular y aumentando esta corrección a medida que se erosiona la misma, terminando en el valor convenido).

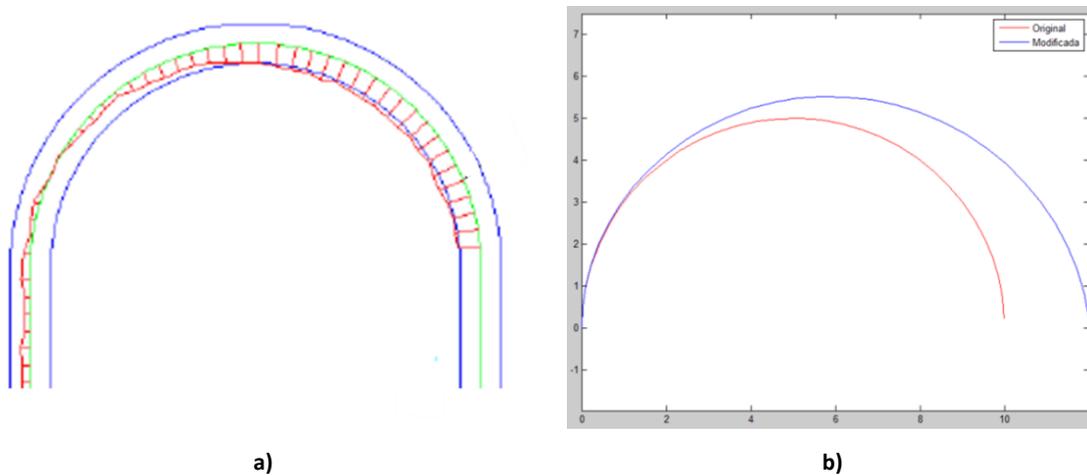


Figura III.16. Propuesta de corrección geométrica: a) ejemplo de medición; b) modelización mediante Matlab® de la corrección geométrica.

Los puntos de la evolución de esta compensación y, por tanto, la trayectoria a seguir, se consiguen mediante el software Matlab® y el máximo valor viene dado en Tabla III.14, obtenido mediante el promedio de cinco puntos consecutivos entre la CIZ 1 y LIZ 2.

**Tabla III.14. Compensación geométrica aplicada.**

Ensayo	Espesor [mm]	Radio [mm]	Compensación máxima aplicada [ $\mu\text{m}$ ]
Ensayo 1.c	100	5	40
Ensayo 2.c	150	5	40
Ensayo 3.c	40	5	40
Ensayo 4.c	100	3	35
Ensayo 5.c	100	8	45

Los resultados de cada una de las compensaciones aplicadas se muestran a continuación.

**Tabla III.15. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 1.c (100 mm de espesor, radio 5 mm y corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$ ).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	6	12	7	13
CIZ 1	-2	-19	-25	-45
LIZ 2	-5	-8	-9	-13

**Tabla III.16. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 2.c (150 mm de espesor, radio 5 mm y corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$ ).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	-1	-5	0	8
CIZ 1	2	6	-17	-25
LIZ 2	11	17	-7	-14

**Tabla III.17. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 3.c (40 mm de espesor, radio 5 mm y corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$ ).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -20 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	9	18	2	6
CIZ 1	11	17	0	8
LIZ 2	18	22	22	40

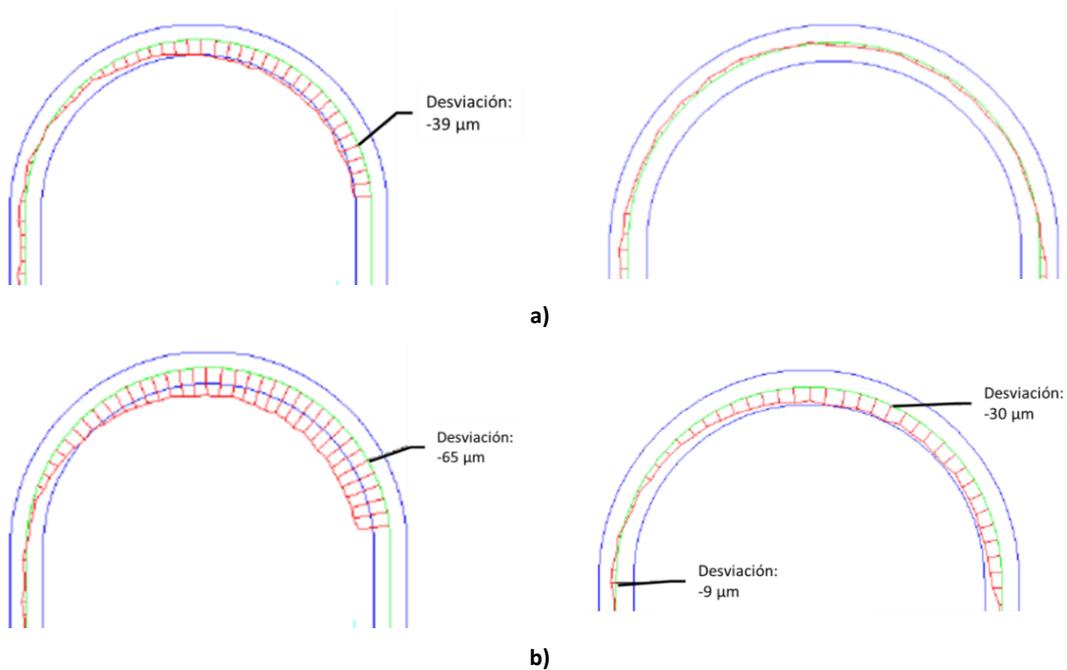
**Tabla III.18. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 4.c (100 mm de espesor, radio 3 mm y corrección geométrica de 35  $\mu\text{m}$ ).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	-9	-16	-20	-36
CIZ 1	-3	-20	-35	-55
LIZ 2	5	9	5	14

**Tabla III.19. Desviaciones medias y máximas en el corte del Ensayo 5.c (100 mm de espesor, radio 8 mm y corrección geométrica de 45  $\mu\text{m}$ ).**

Desviación	Z = -1,5 mm		Z = -40 mm	
	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Máxima [ $\mu\text{m}$ ]
LIZ 1	8	12	5	9
CIZ 1	3	17	-12	-27
LIZ 2	3	6	7	12

Puesto que la tendencia de todas las probetas compensadas es la misma, se muestra en la Figura III.17, como ejemplo de los resultados, la comparación entre el ensayo sin la aplicación de la compensación geométrica y una vez realizada la misma (ver los valores numéricos en la Tabla III.15).



**Figura III.17. Resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$  en una probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm: a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior.**

La Figura III.17.a representa las mediciones antes y después de compensar el radio, observando cómo se ha resuelto el problema del defecto de material (que llegaba a ser de un valor de hasta 39  $\mu\text{m}$ ). Este error no es compensado en la zona media de la probeta (ver Figura III.17.b), tal y como cabría esperar, debido a que los ejes de la envolvente adquieren la amplitud máxima en esta zona.

Para poder analizar la mejora en la precisión de las probetas fabricadas aplicando una compensación geométrica, en el próximo apartado se realiza una comparativa numérica de las medidas con respecto a las probetas originales de la sección III.3.2.

### III.3.3.1 Comparativa de los resultados de aplicación de la compensación geométrica

A continuación se muestran los gráficos comparativos de la propuesta realizada, en los que se comparan los errores promedio en ambos casos para las tres zonas diferenciadas y en dos planos diferentes (el superior y el medio-superior).

En la Figura III.18 se comprueba que el error se reduce aplicando la corrección geométrica al Ensayo 1 (espesor 100 mm y radio 5 mm), disminuyendo drásticamente además el defecto de material existente. Así, en el plano superior de la CIZ 1, se reduce el defecto de erosión desde los 21  $\mu\text{m}$  hasta los 2  $\mu\text{m}$ , generando una salida con menor error (desde los 33  $\mu\text{m}$  hasta los 5  $\mu\text{m}$ ).

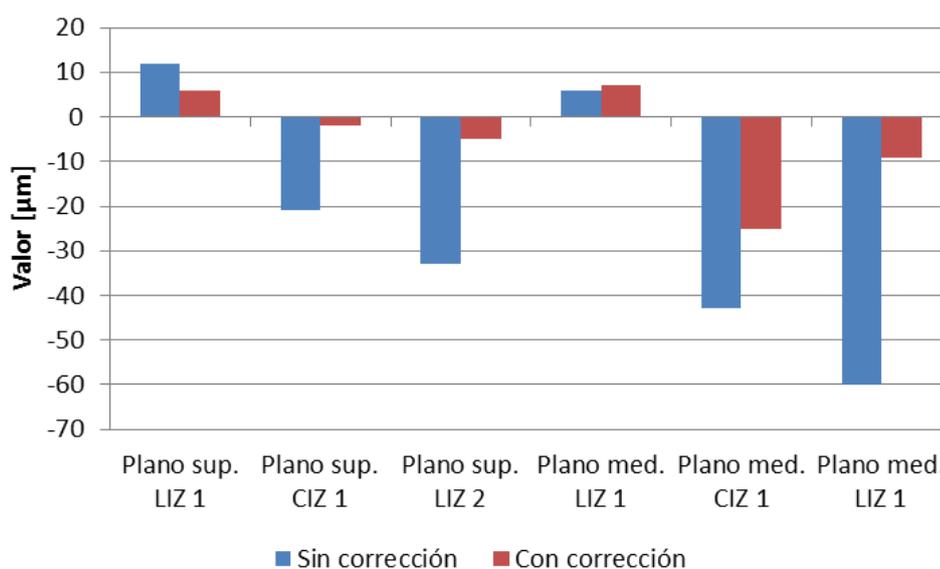


Figura III.18. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$  en una probeta de espesor 100 mm y radio 5 mm (Ensayo 1 y Ensayo 1.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior.

Estos resultados suponen una mejora de la CIZ 1 y la LIZ 2 del 90,48 % y 84,84 %, respectivamente. Este efecto tiene consecuencias también en la CIZ 1 del plano medio, donde el error promedio disminuye de 43  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$  (41,86 % de mejora). La explicación de este aumento del defecto de material en la zona media de la probeta con respecto al extremo superior viene dado por la amplitud de la envolvente generada por el hilo, que alcanza su máximo valor en el plano más alejado de las guías. Este efecto se estudiará más detenidamente en el próximo apartado III.4.

Análogamente (ver la Figura III.19), haciendo hincapié de nuevo en la CIZ 1 (la más interesante por ser la que contiene a la interpolación circular) en el espesor de 150 mm, el defecto de erosión de 9  $\mu\text{m}$  se reduce a una demasía de 2  $\mu\text{m}$  en el plano superior, lo que supone un 77,78 % de mejora, siendo en el plano medio de 52,78 % (una disminución del error de 19  $\mu\text{m}$ ). El único resultado en el que empeora la aplicación de la compensación geométrica es el plano superior de la LIZ 2; sin embargo, se debe observar que el valor absoluto de este error únicamente difiere en 1  $\mu\text{m}$  y, además, pasa de ser un defecto de material a una demasía, lo que implica que puede ser fácilmente corregido al aplicar un repaso.

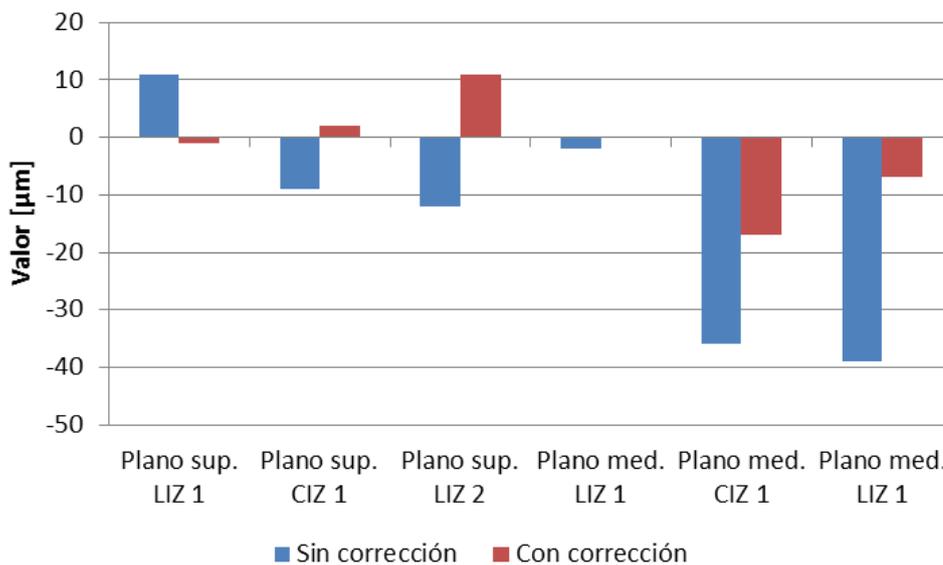
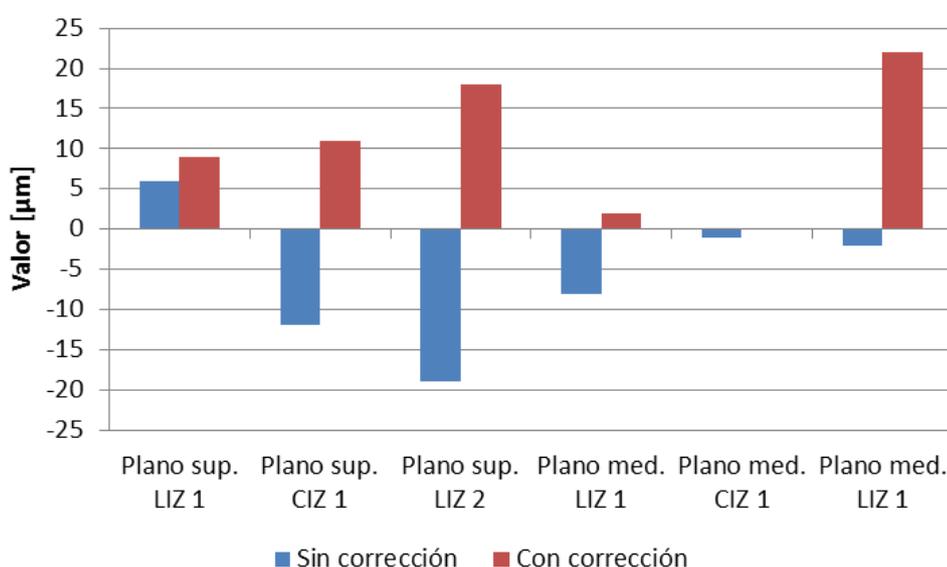


Figura III.19. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$  en una probeta de espesor 150 mm y radio 5 mm (Ensayo 2 y Ensayo 2.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior.

En el Ensayo 3, de espesor de 40 mm (ver Figura III.20), al ser menor la distancia entre guías, el comportamiento del hilo difiere con respecto a espesores más grandes. El defecto de erosión de 12  $\mu\text{m}$  pasa a ser una demasía de 11  $\mu\text{m}$  en la CIZ 1 (8,33 %) del plano superior, mientras que en el medio la mejora es del 100 % (de 1  $\mu\text{m}$  el error pasa a ser nulo). Sin embargo, este valor de la corrección no es del todo cierto, puesto que debe tenerse en cuenta la incertidumbre existente (11  $\mu\text{m}$  mencionados anteriormente). Por último, se debe tener en cuenta también el empeoramiento de la pared de salida en el plano medio: el error aumenta en un 90,91 % (de 2  $\mu\text{m}$  a 22  $\mu\text{m}$ ), si bien en el plano superior existe una mejora del 5,26 % en valor absoluto (teniendo en cuenta que además pasa a ser una demasía).



**Figura III.20. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 40  $\mu\text{m}$  en una probeta de espesor 40 mm y radio 5 mm (Ensayo 3 y Ensayo 3.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior.**

En la Figura III.21 se muestran los resultados del Ensayo 4, esto es, una probeta de 3 mm de radio y 100 mm de espesor. En la CIZ 1 del plano superior se corrige el error en 17  $\mu\text{m}$  (de 20  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ ), lo que supone un 85 % de mejora, y a la salida de esta interpolación circular el defecto pasa ser de 31  $\mu\text{m}$  a una demasía de 5  $\mu\text{m}$ . En el plano medio la corrección es del 31,37 % (51  $\mu\text{m}$  a 35  $\mu\text{m}$ ).

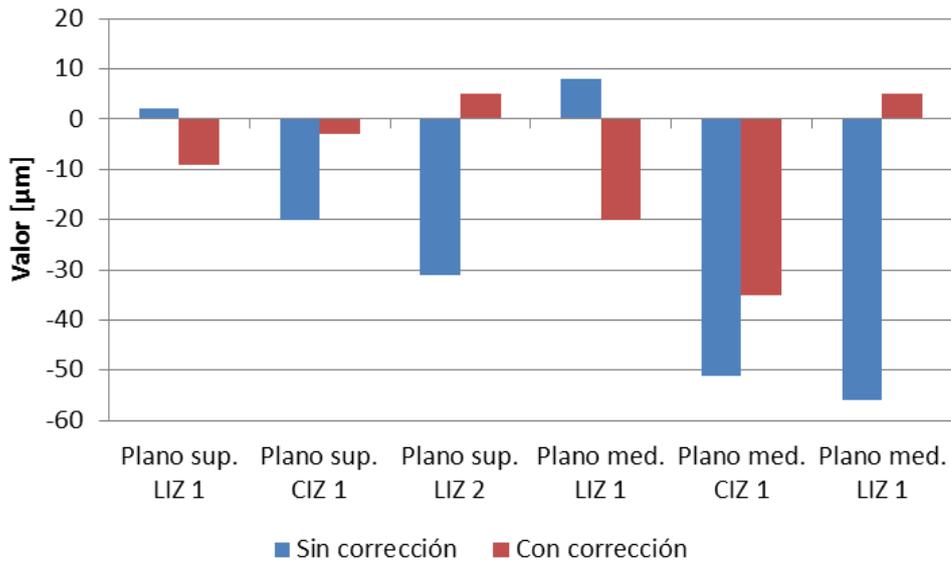


Figura III.21. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 35 µm en una probeta de espesor 100 mm y radio 3 mm (Ensayo 4 y Ensayo 4.c): a) en el plano superior; b) en el plano medio-superior.

Por último, en el Ensayo 5 (radio de 8 mm), se obtiene un error promedio de 3 µm en la CIZ 1, mejorando la desviación de 25 µm de la probeta sin compensación geométrica (88 %). Asimismo, los resultados a la salida se corrigen en 33 µm (71,43 %).

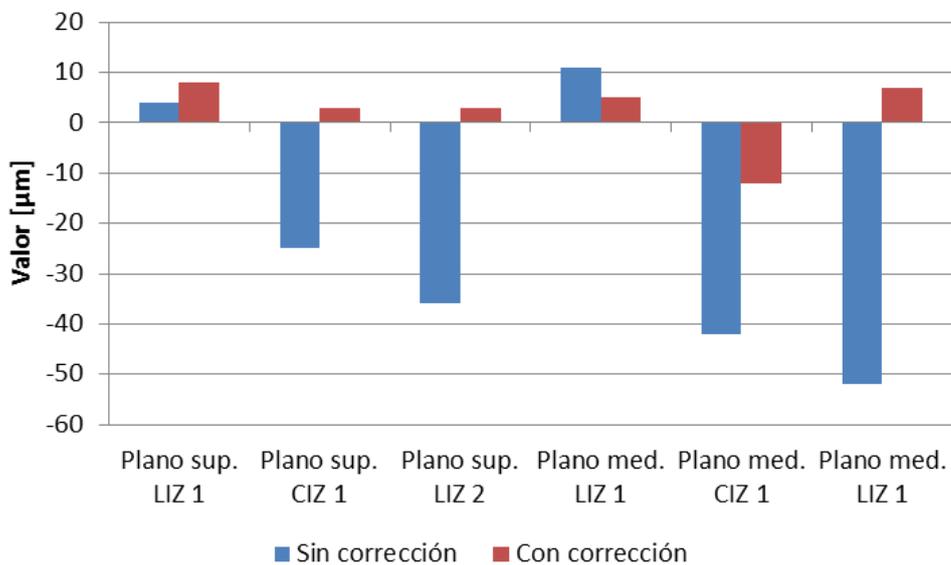


Figura III.22. Comparación del resultado de la aplicación de la corrección geométrica de 45 µm en una probeta de espesor 100 mm y radio 8 mm (Ensayo 5 y Ensayo 5.c): a) En el plano superior; b) En el plano medio-superior.

En la Tabla III.20 y en la Tabla III.21 se resumen todos estos resultados:

**Tabla III.20. Comparativa de los resultados de la aplicación de la corrección geométrica en el plano superior.**

Comparativa	Error promedio en el plano superior [ $\mu\text{m}$ ]				Mejora [%]	
	CIZ 1	CIZ 1.c	LIZ 2	LIZ 2.c	CIZ 1	LIZ 2
Ensayo 1	-21	-2	-33	-5	90,48	84,84
Ensayo 2	-9	2	-12	11	77,78	8,33
Ensayo 3	-12	11	-19	18	8,33	5,26
Ensayo 4	-20	-3	-31	5	85,00	83,87
Ensayo 5	-25	3	-36	3	88,00	91,67

**Tabla III.21. Comparativa de los resultados de la aplicación de la corrección geométrica en el plano medio.**

Comparativa	Error promedio en el plano medio [ $\mu\text{m}$ ]				Mejora [%]	
	CIZ 1	CIZ 1.c	LIZ 2	LIZ 2.c	CIZ 1	LIZ 2
Ensayo 1	-43	-25	-60	-9	41,86	85,00
Ensayo 2	-36	-17	-39	-7	52,78	82,05
Ensayo 3	-1	0	-2	22	100,00	-90,91
Ensayo 4	-51	-35	-56	5	31,37	91,07
Ensayo 5	-42	-12	-52	7	71,43	86,54

A la vista de los resultados de este estudio se puede concluir que la compensación geométrica progresiva para la erosión de probetas circulares es una solución sencilla y viable que no produce pérdidas de productividad como ocurriría con un cambio de los parámetros de corte. Además, permite obtener una demasía controlada de material (en lugar de un defecto en la pieza) que puede ser eliminada en los cortes consecutivos.

Como contrapartida cabe destacar, tal y como se ha apuntado al comienzo del apartado III.3.2, que la carga experimental requerida para compensar cada radio y espesor es muy alta. Sin embargo, mediante este trabajo se ha conseguido establecer una metodología para compensar el error generado en las trayectorias circulares fácilmente extrapolable. Por tanto, es necesario abordar la predicción del error en trayectorias circulares, evitando generar una batería de ensayos tan amplia. Este tema se tratará en el capítulo IV.

### III.4 DEFECTO DE EROSIÓN GENERADO POR LA ENVOLVENTE DEL HILO

En las figuras anteriores (desde la Figura III.18 hasta la Figura III.22) se ha observado cómo la corrección geométrica reduce el error en los extremos de la pieza, pero aún sigue existiendo una desviación en los planos intermedios; es por ello que, en los próximos párrafos, se analiza este error.

#### III.4.1 ESTUDIO EXPERIMENTAL

Para caracterizar el error debido a la envolvente generada por el hilo durante el corte se analizan cada uno de los ejes de la elipse para el espesor intermedio de 100 mm de los tres utilizados anteriormente. El valor del *wire-lag* ( $\delta$ ) para un corte de desbaste se ha medido mediante pruebas experimentales, erosionando una interpolación lineal y haciendo un contacto posterior en esa misma dirección: la diferencia entre la posición de las guías en ambos casos definirá el retraso del hilo. De esta forma se ha obtenido, para este espesor de pieza, el valor de 200  $\mu\text{m}$  de  $\delta$ . Con este dato, se obtiene la simulación de distintos radios de corte programados ( $r_p$ ) y el valor de *wle* mostrados en la Tabla III.22.

Tabla III.22. Generalización de la curva tractriz.

$r_p$ [mm]	$\delta$ [ $\mu\text{m}$ ]	<i>wle</i> [ $\mu\text{m}$ ]
Esquinas a 90°	200	$\approx 70$ (a 45°)
0,5	200	$\approx 40$ (a 90°)
1	200	$\approx 20$ (a 90°)
2	200	$\approx 10$ (a 90°)
5	200	$\approx 3$ (a 90°)

Aunque durante años ha sido común esta forma de medición del *wire-lag*, como se comprobará en los resultados y se verá posteriormente en la sección III.4.2, este valor obtenido independientemente de la trayectoria descrita por el hilo no es exacto: el valor de  $\delta$  depende de la trayectoria que se esté erosionando, por tanto, no será del mismo valor cuando se está realizando una interpolación lineal o una circular. Sin embargo, la metodología que se expone a continuación sigue siendo válida y estos resultados son los que determinan la necesidad de cuantificar  $\delta$  de nuevo y hacen posible la comparación entre ambas estrategias.

Con este resultado se pueden modelar diferentes casos de radios de redondeo. A la vista de los mismos, a su vez, se puede afirmar que, aun realizando los cálculos con un retraso del hilo constante, su efecto en la falta de precisión de la pieza aumenta a medida que el radio a

erosionar disminuye. Así, para un radio de 3 mm el error es menor de 10  $\mu\text{m}$ , es decir, el error generado por el *wire-lag* no es predominante y es de menor valor que el generado por el *ce*, tal y como se comprobará en los próximos párrafos (ver Figura III.23).

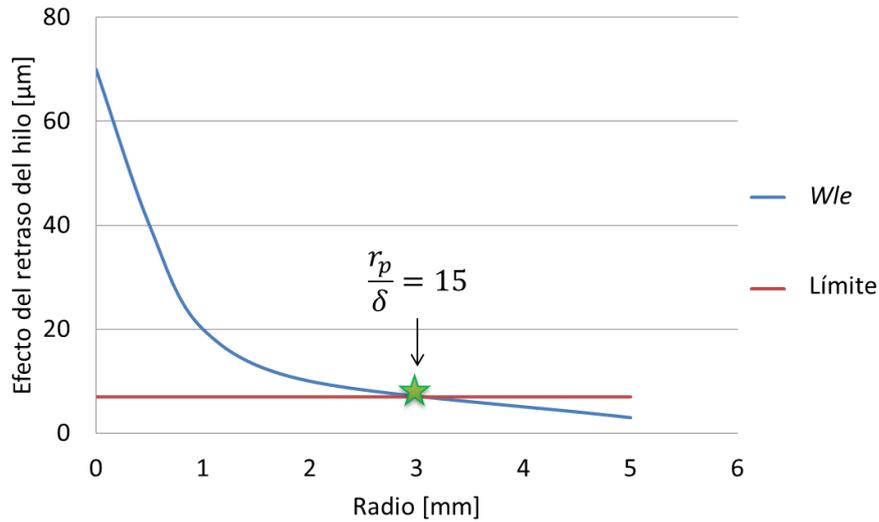


Figura III.23. Efecto del *wire-lag* generado en la pieza en función del radio erosionado.

Por consiguiente, se ha establecido un límite generalista, válido para cualquier espesor puesto que solo depende del valor de  $\delta$ , para este estudio por encima del cual su efecto se considera despreciable (Ec. III. 2).

$$\frac{r_p}{\delta} \leq 15$$

Ec. III. 2

A partir de estos resultados se ha confeccionado una clasificación de los radios considerando el fenómeno principal que está teniendo lugar durante su erosión. Para el valor de  $\delta$  correspondiente a las condiciones de corte de este trabajo y espesor de pieza se genera la Tabla III.23, de la que se puede destacar que, para valores de radio mayores de 3 mm, el efecto del retraso del hilo se considera despreciable. Asimismo, el valor mínimo de 0,138 mm es el radio más pequeño erosionable debido al propio diámetro del hilo y su *gap*.

Tabla III.23. Clasificación de los radios en función del fenómeno principal a tener en cuenta en espesor 100 mm.

Nombre	Radio	Simulación realizada mediante
Esquina	Esquinas y $r_p < 0,138$ mm	Curva de persecución (tractriz)
Círculo de pequeño radio	$0,138$ mm $< r_p < 3$ mm	Curva de persecución
Círculo	$r_p > 3$ mm	Despreciable

Con esta información se realiza un estudio para entender qué es lo que sucede en el corte de este tipo de trayectorias y obtener el valor del  $ce$  a partir del de  $\delta$ : se ha definido la geometría de las probetas a ensayar, conteniendo una o tres interpolaciones circulares concatenadas (ver Figura III.24), desde 0,8 mm a 5 mm de radio en un espesor de pieza de 100 mm, erosionadas con las condiciones de corte para desbaste de Tabla III.24 y utilizando como material un acero AISI D2 (ISO 160CrMoV12).

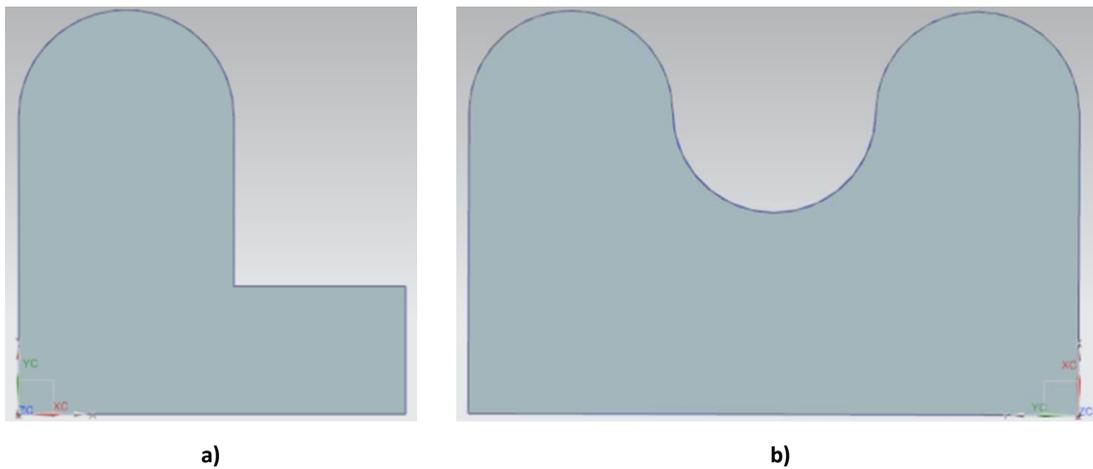


Figura III.24. Geometrías de pieza para la evaluación del *wire-lag* y el  $ce$  consistente en: a) una interpolación circular; b) tres interpolaciones circulares concatenadas.

Tabla III.24. Parámetros utilizados en el corte de las piezas.

Parámetros utilizados	Valor
Espesor de pieza [mm]	100,0
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	13,0
Intensidad [A]	5,0
Tensión de servo de referencia [V]	80,0
Presión del dieléctrico [bar]	17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10,0
<i>Gap</i>	183,0

En estas piezas se miden dos planos diferentes (ver la Figura III.25). Por un lado, el plano superior o plano de referencia, por estar cercano a las guías y, por tanto, verse mínimamente afectado por la deformación del hilo; y, por otro, el plano medio-superior, donde se asume la mayor amplitud de los ejes de la envolvente generada por el hilo. La comparación entre ambos planos definirá el valor del  $ce$ , sabiendo el valor teórico del error que genera el *wire-lag* (ver de nuevo la Tabla III.22).

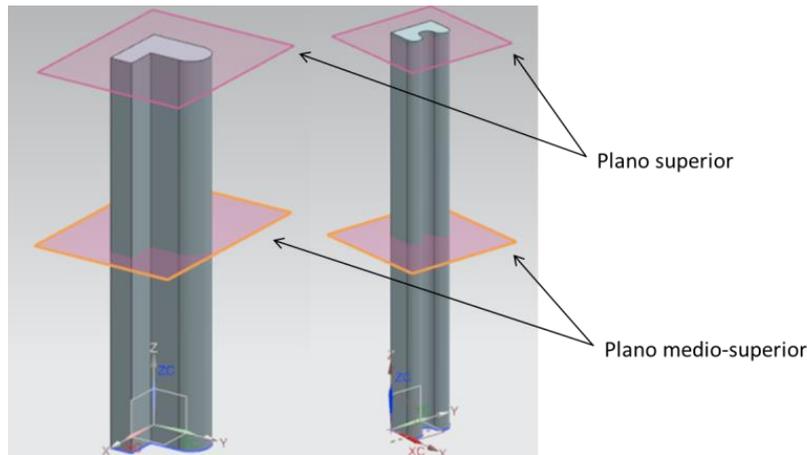


Figura III.25. Planos de medición para la evaluación del *wire-lag*.

Para medir la contribución de este fenómeno a la pérdida de precisión se han erosionado piezas que contienen interpolaciones circulares de entre 0,8 mm y 5 mm (es decir, interpolaciones circulares en las cuales el desequilibrio de áreas es apreciable en base a la Figura III.8). En la Figura III.26 se muestran dos ejemplos del resultado de la medición mediante la CMM Zeiss 850 donde, de nuevo, el color verde representa la geometría nominal de la probeta, el azul las bandas de tolerancia fijadas a  $\pm 30 \mu\text{m}$  y el rojo los valores reales de la medida. Más concretamente, en la Figura III.26.a se aprecia el ejemplo de una pieza de radio 3 mm de una interpolación circular y en la Figura III.26.b una pieza de tres interpolaciones circulares de radio 2 mm.

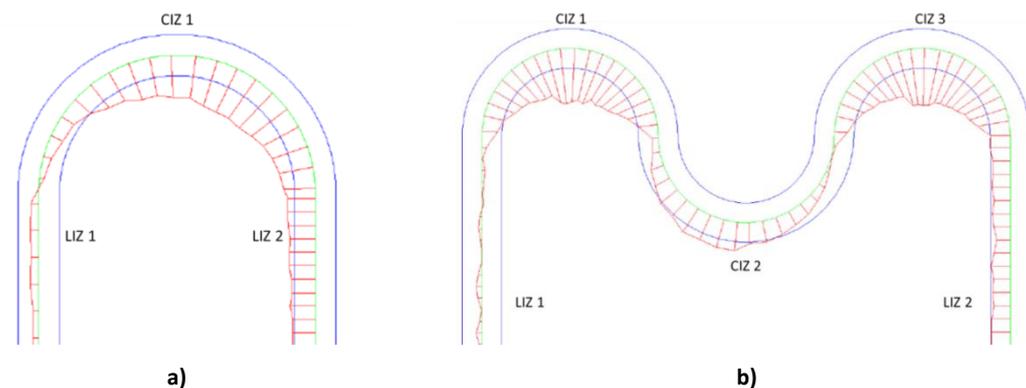


Figura III.26. Ejemplo de medición del plano medio-superior de una pieza de: a) Espesor 100 mm y radio 3 mm; b) Espesor 100 mm y radios de 2 mm.

La variación del  $ce$  se cuantifica mediante el establecimiento de un nuevo parámetro denominado factor de incremento de concavidad (*Concavity Increase Factor, CIF*), que se define según la Ec. III. 3.

$$CIF = \frac{ce_{CIZ}}{ce_{LIZ}}$$

Ec. III. 3

donde  $ce_{CIZ}$  es el valor medio de los valores máximos del efecto de concavidad en la CIZ y  $ce_{LIZ}$  es el valor medio del efecto de concavidad en la LIZ. Estos valores, junto con los valores promedio de la desviación total y del  $ce$ , aparecen a continuación.

**Tabla III.25. Resultados en una probeta de radio 5 mm y espesor de 100 mm.**

Zona	Desviación total [ $\mu\text{m}$ ]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	CIF
LIZ 1	20	20	-
LIZ 2	20	20	-
CIZ 1	31	31	1,65

**Tabla III.26. Resultados en una probeta de radio 3 mm y espesor de 100 mm.**

Zona	Desviación total [ $\mu\text{m}$ ]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	CIF
LIZ 1	22	22	-
LIZ 2	22	22	-
CIZ 1	41	41	1,98

**Tabla III.27. Resultados en una probeta de radio 2 mm y espesor de 100 mm.**

Zona	Desviación total [ $\mu\text{m}$ ]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	CIF
LIZ 1	19	19	-
LIZ 2	19	19	-
CIZ 1	35	42	2,21
CIZ 2	52	48	1,99
CIZ 3	29	38	2,05

**Tabla III.28. Resultados en una probeta de radio 1 mm y espesor de 100 mm.**

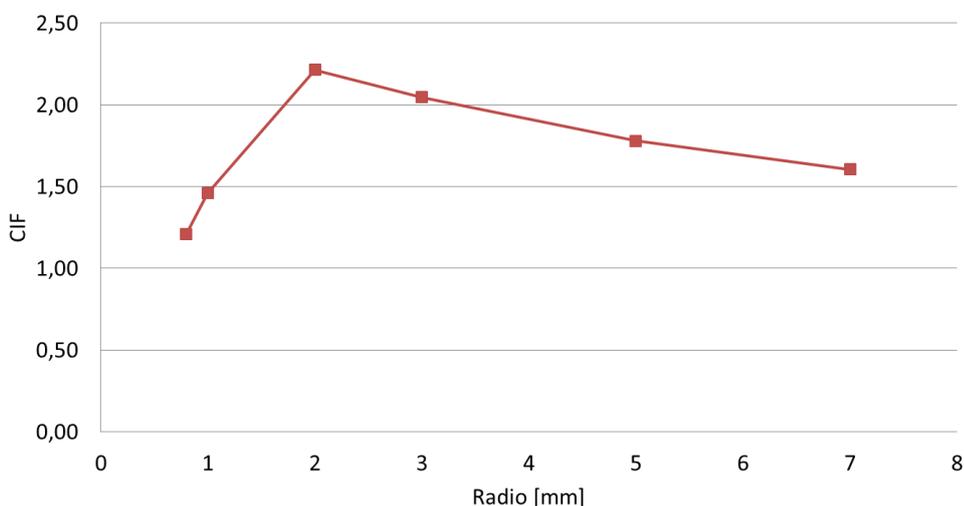
Zona	Desviación total [ $\mu\text{m}$ ]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	CIF
LIZ 1	24	24	-
LIZ 2	24	24	-
CIZ 1	36	27	1,84
CIZ 2	50	40	2,08
CIZ 3	34	25	1,65

**Tabla III.29. Resultados en una probeta de radio 0,8 mm y espesor de 100 mm.**

Zona	Desviación total [ $\mu\text{m}$ ]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	CIF
LIZ 1	24	24	-
LIZ 2	24	24	-
CIZ 1	37	15	1,21
CIZ 2	41	15	1,79
CIZ 3	38	16	1,22

Así, se puede observar en los valores numéricos (desde la Tabla III.25 hasta la Tabla III.29) cómo las LIZ 1 y LIZ 2 tienen un valor medio de concavidad de 20  $\mu\text{m}$ . La contribución del efecto del retraso del hilo, desde 40  $\mu\text{m}$  para un radio de 0,5 mm hasta 3  $\mu\text{m}$  para uno de 5 mm (ver de nuevo la Figura III.23) obtenida de la simulación mencionada previamente, se puede utilizar para extraerla del error total y saber cuál es la contribución del efecto de concavidad o  $ce$ .

En cuanto a los círculos convexos, este efecto de concavidad aumenta hasta los valores de 31  $\mu\text{m}$  – 41  $\mu\text{m}$ . esto es, en la CIZ 1 los resultados muestran que el  $CIF$  alcanza un valor de 1,65 en un radio de 5 mm, aumentándose hasta un valor de 1,98 en el radio de 3 mm; es decir, de la propia definición del  $CIF$  se concluye que, cuanto mayor sea el radio a erosionar, más cerca estará su valor del valor unidad. Por otra parte, en los círculos convexos la evolución del error es similar a los cóncavos (la diferencia máxima entre ambos es de 13  $\mu\text{m}$  según la Tabla III.28).



**Figura III.27. Resultados del  $CIF$  en función del radio erosionado.**

Sin embargo, cabría esperar que el  $CIF$  creciera según el radio del círculo decrece y esto no es así: los resultados muestran que, a partir de un máximo de 2 para un radio de 2 mm, los valores de  $CIF$  comienzan a disminuir (ver Figura III.27). La razón que explicaría esta tendencia es la variación del conjunto de fuerzas actuantes en el sistema: cuando se erosionan pequeños radios,

la relación entre  $ce$  y el *wire-lag* varía, estando las causas de esta tendencia probablemente relacionadas con la falta de presión de dieléctrico y la diferencia de áreas de erosión cuando se cortan este tipo de pequeños radios.

El desequilibrio de áreas durante la erosión de trayectorias circulares y el efecto de velocidad es relevante a la hora de analizar su influencia en el efecto geométrico en radios pequeños. Así, el efecto de concavidad en los CIZ parece ser menor según el radio a erosionar decrece: desde valores medios de desviación de  $38\ \mu\text{m} - 42\ \mu\text{m}$  para un radio de 2 mm hasta  $15\ \mu\text{m} - 16\ \mu\text{m}$  para radios de 0,8 mm.

Se concluye que el  $ce$  generado en la pieza es función del radio erosionado, incrementándose la falta de precisión según el radio decrece, y siendo el valor de este error menos significativo en un corte recto que en una interpolación circular. Además, la clasificación de las interpolaciones circulares muestra cómo, solo por debajo del valor de 3 mm en el caso estudiado, el efecto del retraso del hilo afecta a la precisión. Esta falta de precisión puede representarse mediante la simulación matemática de la curva de persecución, cuya importancia radica en la capacidad de predecir la falta de precisión de las interpolaciones circulares de radios pequeños.

Por último, a la vista de los resultados, el valor de  $CIF$  llega a un máximo para un cierto valor de radio; por debajo de éste, el  $CIF$  vuelve a decrecer. Para las condiciones empleadas en este trabajo, este valor máximo se da para un  $CIF$  de 2 en un radio de 2 mm. Este comportamiento está probablemente relacionado con la falta de presión del fluido dieléctrico y la diferencia de áreas de erosión a la que debe enfrentarse el hilo durante cada instante del proceso.

#### III.4.2 NUEVA METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DEL ERROR EN CÍRCULOS

Este análisis provoca la necesidad de cuantificar de una forma más exacta las dos componentes que generan este error en la pieza, puesto que los resultados de la sección III.4.1 llevan a pensar que dependen de la trayectoria que se está erosionando. En los próximos párrafos se explica una nueva metodología que posibilita la medición directa que la deformación del hilo deja en la pieza, tanto para el *wire-lag* como para el efecto de concavidad (apartado III.4.2.1).

La medición del *wire-lag* tal y como se ha realizado hasta la fecha no es fiable por los siguientes motivos: realizar un contacto supone la existencia de descargas que, por muy pequeñas que estas sean, pueden alterar la verticalidad del hilo de nuevo. Además, las mediciones se realizan por medio de la resta de la posición de las guías, por lo que no es una medida directa. Se propone, por tanto, una nueva forma de medición que, si bien no mide el *wire-lag*, sí cuantifica

directamente el efecto que este deja impreso en la pieza. De forma análoga esta metodología es extensible a la medida del efecto de concavidad en la pieza.

#### III.4.2.1 Metodología para el cálculo del efecto del *wire-lag* y del efecto de concavidad

La metodología para medir el efecto del *wire-lag* es la siguiente: se realiza primero una interpolación lineal representada por la línea roja de la Figura III.28.a, se detiene la erosión y, de esta forma, la huella del hilo queda impresa sobre la pieza (*wle*); posteriormente, se corta el contorno de la pieza (línea discontinua de la figura) de forma que se garantiza disponer de una superficie de referencia para que la medición sea correcta. La distancia entre el contorno de la probeta y el material de partida debe ser mayor de 4 mm para garantizar que la presión del fluido dieléctrico sea la idónea. De forma análoga, también se puede medir el *wire-lag* en una interpolación circular (ver Figura III.28.b).

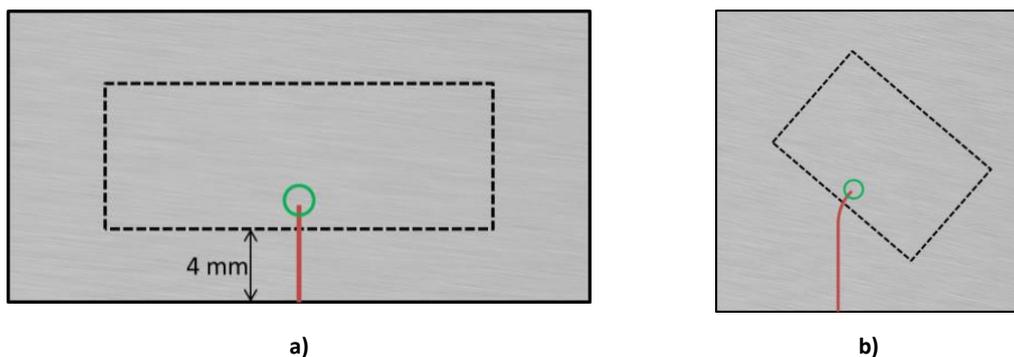


Figura III.28. Geometría de las piezas erosionadas para la medición del *wle* en: a) un corte recto; b) una interpolación circular.

Esta metodología difiere a la propuesta por otros autores [Liang, 2014] en que es válida no sólo para trayectorias rectas sino también para la medición del *wle* en las circulares. Además, el hilo erosiona una única vez y de forma limpia la zona de medición, sin el peligro de que una erosión anormal o el desgarro del material influyan en el resultado final y, por consiguiente, sea menos fiable (ver de nuevo Figura II.15 de la página 33).

En lo que respecta al *ce*, para medirlo en una trayectoria recta únicamente es necesario disponer de una pieza rectangular para obtener una buena referencia de medición, con una distancia de entrada de, al menos, 4 mm por la razón comentada anteriormente (ver Figura III.29.a). De igual manera, en la Figura III.29.b, se muestra la pieza que debe ser fabricada para medir el *ce* en un radio programado a especificar. En ambas ilustraciones se muestra con un círculo verde la zona en la que debe tomarse la medida.

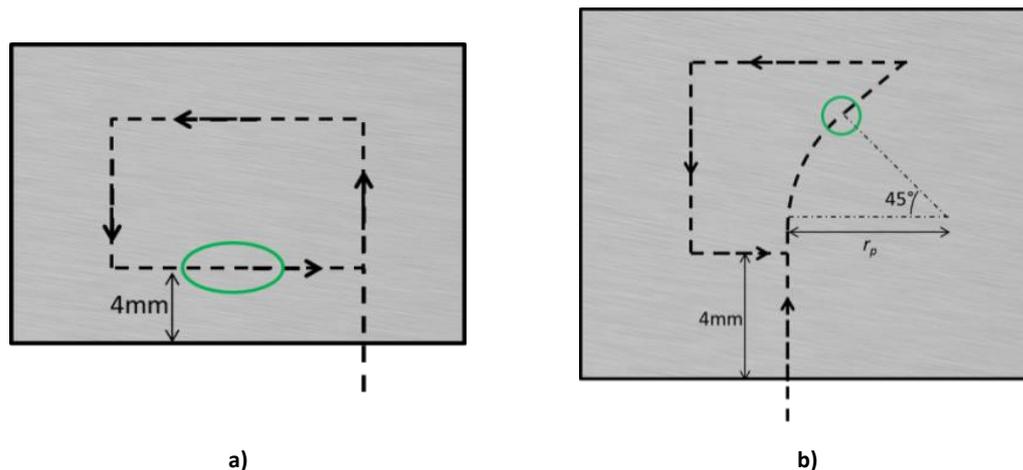


Figura III.29. Geometría de las piezas erosionadas para la medición del  $ce$  en: a) un corte recto; b) una interpolación circular.

Puesto que los pasos a seguir son idénticos, la explicación se realizará con una medida de  $wle$  en un corte recto. Para comprobar que los cortes donde se harán las medidas están hechos adecuadamente se fabrica una primera probeta (similar a la de la Figura III.28.a) en la que se realizan varios cortes finalizándolos de formas diferentes, para comprobar que al llegar al final de la erosión no siguen existiendo descargas que minimicen o modifiquen el surco. Así, la primera muestra se corta mediante una interpolación de entrada y otra de salida (es decir, existen descargas a la entrada y a la salida del corte), la segunda realizando una travesía a la salida (no hay descargas a la salida), una tercera cortando el hilo automáticamente al finalizar la interpolación de entrada y, la última, provocando la parada del generador (ver Tabla III.30).

Tabla III.30. Diferentes formas de terminar el corte para la medición del  $wle$ .

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
$L_c = 4\text{mm}$	Interpolación a la salida	Travesía a la salida	Corte del hilo al final de la entrada	Parada del generador
$Wle$	$< 15\ \mu\text{m}$	$72,9\ \mu\text{m}$	$52,74\ \mu\text{m}$	$53,46\ \mu\text{m}$

A la vista de los resultados se puede descartar la Alternativa 1 puesto que, como ya se predecía, existen descargas a la salida de la interpolación que alteran la forma del *wire-lag*. Con la segunda de las opciones (Alternativa 2), se obtiene un surco mayor, que puede ser debido a las descargas parásitas existentes entre hilo y pieza hasta que vuelve a alejarse suficientemente. Por último, las opciones tercera y cuarta producen un resultado prácticamente idéntico. Dada la similitud entre el valor obtenido mediante el corte del hilo al final de la trayectoria y la parada del generador, por simplicidad, se decide utilizar la Alternativa 3.

Mediante un sistema de medición óptico, en este caso se ha utilizado un microscopio confocal Leica 3DCM, se cuantifica dicha deformación. Para ello, se coloca y alinea la pieza y se realiza

una topografía tridimensional extendida con una lente de 5 aumentos. Posteriormente, para estudiar las topografías realizadas, se utiliza un software de procesamiento de imágenes de superficies y metrología *Leica Map*.

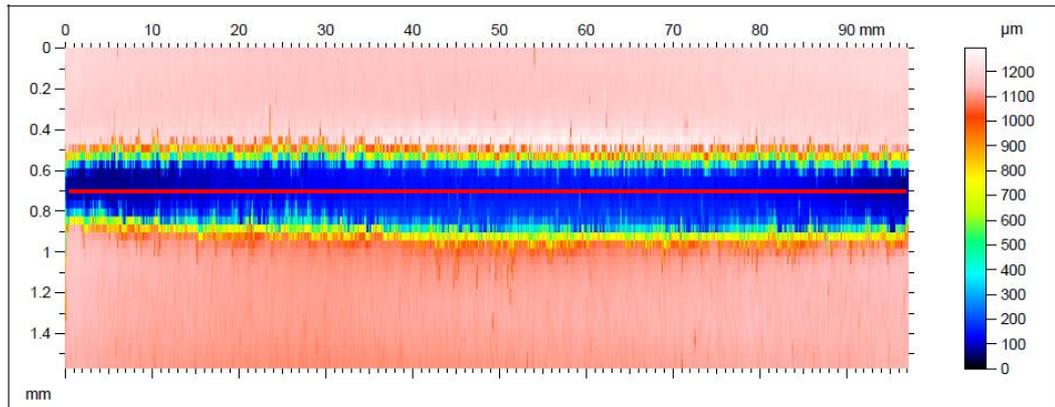


Figura III.30. Ejemplo de topografía rotada y nivelada.

El primer paso es rotar y nivelar la imagen para que la diferencia de altura que pudiera haber entre los extremos de la misma sea mínima. Posteriormente, se obtiene un perfil en dos dimensiones del plano medio de la pieza (ver Figura III.31), tal y como puede verse representado mediante la línea roja de la Figura III.30.

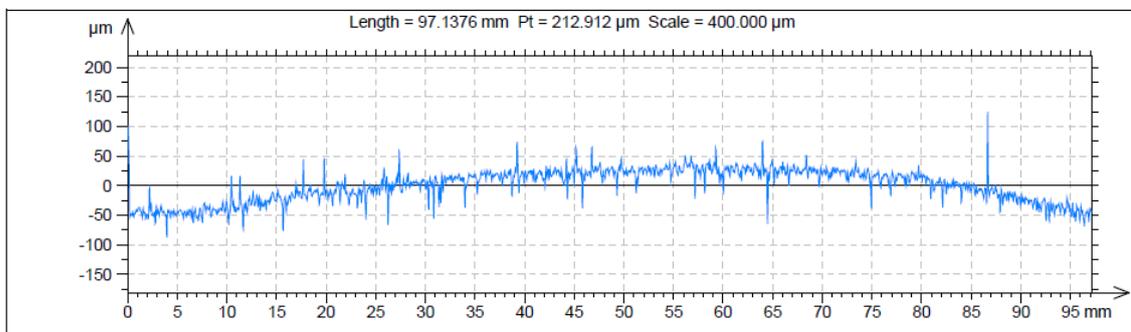


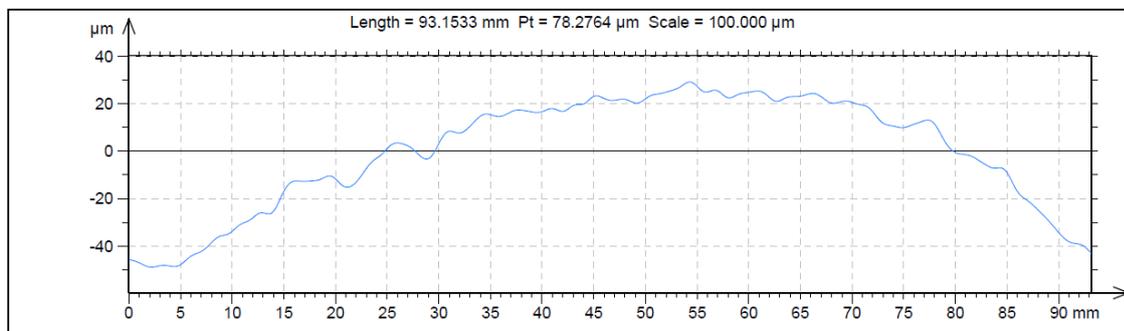
Figura III.31. Perfil medio extraído.

Este perfil se filtra para obtener únicamente la ondulación del mismo y eliminar la componente de rugosidad. Se han probado diferentes filtros con el objetivo de resaltar el efecto del *wire-lag* sobre la propia rugosidad característica del proceso. Para ello, se ha extraído únicamente la medida filtrada de la ondulación, eliminando de la misma la rugosidad del perfil. El resultado de los diferentes filtros aplicados puede observarse en Tabla III.31.

**Tabla III.31. Resultado de los filtros utilizados para la medición del wle.**

Lc [mm]	0,8	1	2	4	10	16
Lr [mm]	0,4 x 2 = 0,8	0,5 x 2 = 1	1 x 2 = 2	2 x 2 = 4	5 x 2 = 10	8 x 2 = 16
wle 1	68,23	66,38	58,36	45,82	47,71	5,77
wle 2	77,40	67,85	65,42	31,15	86,98	4,82
wle 3	83,09	71,84	64,11	61,72		
wle 4	106,27	95,51	107,34	110,23		
wle 5	98,77	96,34	86,59	77,98		

La forma del wle queda mejor definida cuanto mayor es el filtro; sin embargo, a medida que este aumenta se pierde mayor cantidad de información en los extremos de la medida debido al filtrado realizado (ver Figura III.32). Adicionalmente, existen dos opciones de representación del perfil: una primera manteniendo la información pérdida en los extremos (ajuste que realiza el propio programa) y una segunda en la que esta información se elimina del perfil. En cualquiera de los casos, es inviable no disponer de los datos de los extremos y, dado que la variabilidad de las medidas es bastante grande incluso aplicando filtros de longitud de corte más amplios, se decide sacrificar la claridad en la medición y aplicar un filtro con una longitud de corte menor (de 0,8 mm). Es por esta misma razón, dado que no tienen sentido los valores con una longitud de corte demasiado amplia, que los valores de 10 mm y 16 mm no se han tenido en cuenta.



**Figura III.32. Perfil medio extraído filtrado con una longitud de corte de 4 mm.**

Por último, se aplica una función propia del programa para calcular el valor medio de la diferencia de alturas entre dos zonas delimitadas (ver Figura III.33). Se ha establecido el siguiente criterio: se selecciona la primera de las zonas, siendo el extremo más bajo del perfil, con una anchura de 2 mm y la zona con cotas más elevadas tendrá una extensión del 10 % de la longitud total del perfil (esta segunda zona se encontrará aproximadamente en la mitad del perfil).

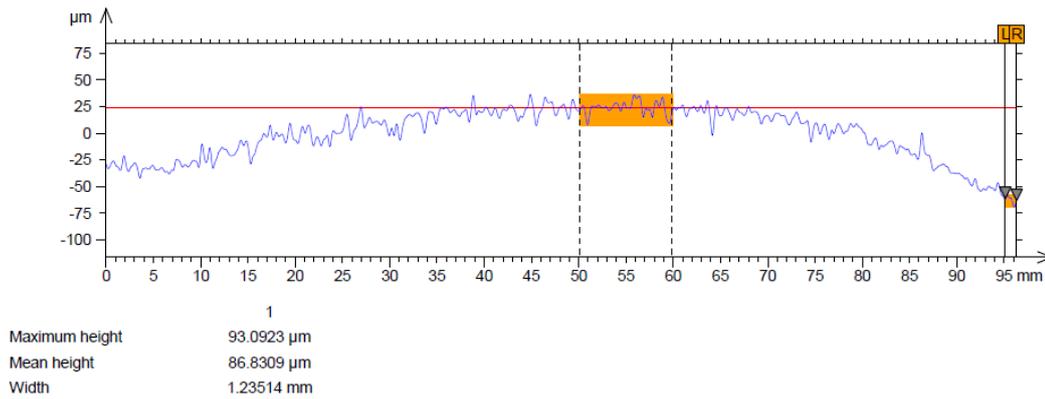


Figura III.33. Ejemplo de la función de estimación de cambio de altura aplicando una longitud de corte de 0,8 mm.

Este valor entre la diferencia de alturas será el correspondiente al  $wle$  (o  $ce$  en su caso). Una vez establecida la metodología para su medición, en el apartado siguiente (sección III.4.2.2), se realizan los ensayos experimentales necesarios para validarla y compararla con la metodología tradicional (sección III.4.3).

#### III.4.2.2 Ensayos experimentales

Una vez fijados todos los criterios de medición se analizan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales. Con esta metodología se ha realizado una batería de ensayos con piezas de diferentes espesores y radios (ver Tabla III.32). Gracias al estudio previo realizado en el apartado III.4.1 se descartan los radios en los que el resultado será prácticamente idéntico al corte recto por ser el efecto del cambio de dirección despreciable.

Tabla III.32. Ensayos realizados para cuantificar el  $wle$  y el  $ce$ .

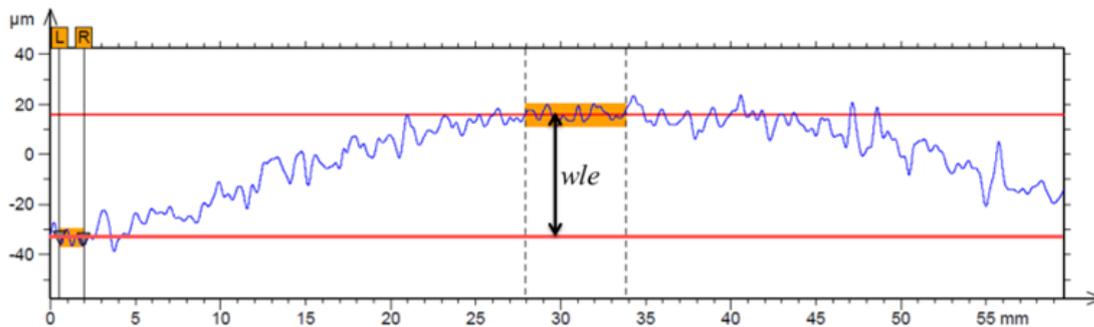
R [mm]	H [mm]	P [bar]
0,8	20	5
1	60	17
3	100	
∞ (corte recto)		

Los cortes se han llevado a cabo en la misma máquina de WEDM ONA AX 3, utilizando el hilo de latón recubierto de 0,25 mm de diámetro y los parámetros que se muestran en la Tabla III.33. En cuanto al material se ha utilizado de nuevo un acero AISI D2 (ISO 160CrMoV12). Tal y como ya se ha dicho, para las medidas se ha utilizado el microscopio confocal Leica DCM 3D.

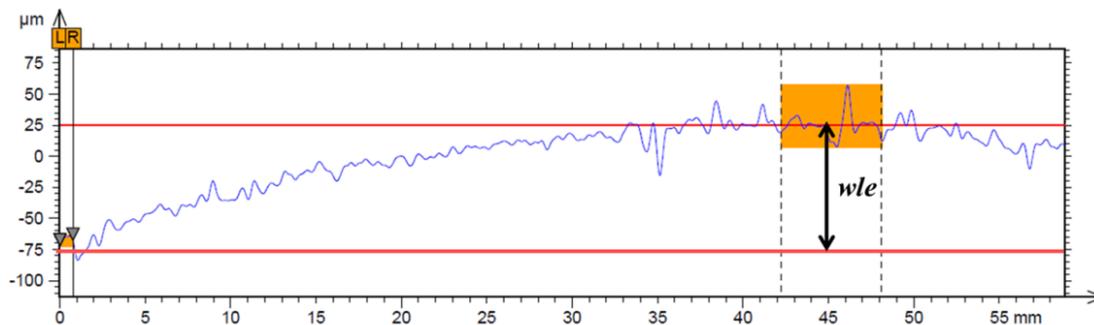
**Tabla III.33. Parámetros utilizados para cuantificar el  $wle$  y el  $ce$ .**

Parámetros utilizados	Valor		
Espesor de pieza [mm]	100,0	60,0	20,0
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	9,0	8,0	7,0
Intensidad [A]	5,0	5,0	5,0
Tensión de servo de referencia [V]	60,0	60,0	60,0
Presión del dieléctrico [bar]	5,0 / 17,0	5,0 / 17,0	5,0 / 17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2	1,2	1,2
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10,0	10,0	10,0

En la Figura III.34.a se expone un ejemplo del  $wle$  en una pieza de 60 mm de espesor cuando la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar (es decir, la distancia entre guías es la menor posible), que no es sino la distancia vertical entre uno de los extremos de la pieza y el punto más alto de la deformación que ha sufrido la misma debido al hilo. La Figura III.34.b representa la misma medición cuando la distancia entre guías era mayor (50 mm por encima del caso en el que se alcanzan los 17 bar) y, por tanto, la presión alcanza únicamente los 5 bar.



a)



b)

**Figura III.34. Resultado de medición del  $wle$  en un espesor de pieza de 60 mm cuando: a) la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar; b) la presión del dieléctrico es de 5 bar.**

La razón por la cual se tienen en cuenta ambas posibilidades es que en las aplicaciones industriales es muy común cortar piezas de diferentes espesores (por ejemplo, en las geometrías de tipo *firtree* [Klocke, 2014 2]) y, por tanto, es imposible alcanzar las condiciones óptimas de corte que implican una presión de dieléctrico de 17 bar.

### III.4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla III.34 se muestran los resultados del  $w/e$  las piezas erosionadas. Como cabría esperar, su valor aumenta con el espesor de pieza: esto es debido a que la rigidez del hilo es menor cuanto mayor es la distancia entre las guías. Sin embargo, se puede encontrar poca o ninguna información en la literatura sobre la variación de la amplitud de la vibración con el radio de la trayectoria.

**Tabla III.34. Resultado de medición del  $w/e$  y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar.**

R [mm]	H [mm]	$w/e$ [ $\mu\text{m}$ ]	SD
0,8	20	53	0,32
	60	89	3,59
	100	134	3,84
1	20	42	0,69
	60	72	0,84
	100	103	3,42
3	20	34	3,23
	60	58	1,17
	100	91	2,18
$\infty$	20	32	1,90
	60	47	3,06
	100	92	1,80

La influencia del radio en la deformación del hilo también se representa en Figura III.35. Como se puede observar, por una parte, para un espesor de pieza de 100 mm, este valor varía de 92  $\mu\text{m}$  en un corte recto hasta los 134  $\mu\text{m}$  en un radio de 0,8 mm, lo que significa un incremento del 46 %. Por otro lado, para un espesor de 20 mm hay un aumento de un 66 % (de 32  $\mu\text{m}$  a 53  $\mu\text{m}$ ).

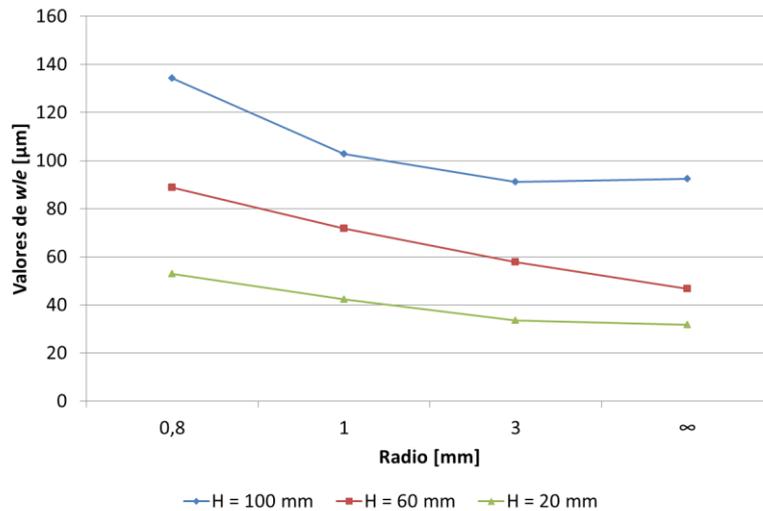


Figura III.35. Resultado de medición del  $w/e$  en función del radio erosionado para diferentes espesores de pieza.

Análogamente se obtienen los resultados del  $w/e$  para el caso en el que la presión del dieléctrico es de 5 bar. En esta ocasión, la huella que el hilo deja impresa en la pieza difiere a la del caso anterior, tal y como puede verse en la Figura III.34.b: la distancia máxima ahora se encuentra más cercana a la superficie superior de la pieza, en lugar de hacerlo en el centro de la misma. Esto es debido a que, además de existir una mayor distancia entre guías, la viruta generada tiende a moverse hacia arriba, esperando más descargas en esa zona y generando, por tanto, el patrón de comportamiento de la figura. A pesar de que la geometría es diferente, la evolución de los valores del  $w/e$  en función del radio y el espesor (ver Tabla III.35) son similares a los recogidos en la Tabla III.34.

Tabla III.35. Resultado de medición del  $w/e$  y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico es de 5 bar.

R [mm]	H [mm]	$w/e$ [µm]	SD
0,8	20	84	4,82
	60	136	4,25
	100	151	5,58
1	20	66	2,89
	60	133	7,51
	100	132	2,76
3	20	68	2,54
	60	124	3,23
	100	124	3,36
∞	20	42	4,67
	60	107	3,53
	100	116	5,63

En el apartado III.4.1 (ver de nuevo Figura III.23) se ha calculado el error teórico generado por el *wire-lag*, habiendo obtenido un único valor experimental del mismo para un corte recto. Sin embargo, se ha comprobado cómo la vibración y deformación del hilo muestran una dependencia muy fuerte con el radio programado para su erosión, lo cual tiene una implicación directa en el error generado en la consecución el mismo: es decir, es necesario disponer de un valor de *wire-lag* para cada tipo de trayectoria.

Así, se representan de nuevo en Matlab® tanto el recorrido teórico seguido por las guías como el que llevaría el centro del hilo debido a este retraso y se obtiene el valor de este error a 90° del comienzo del cambio de dirección. Si se compara el error estimado cuando se utiliza un único valor de *wire-lag*, esto es, el del corte recto (tal y como se ha hecho en la sección III.4.1), con el que se obtiene al ajustar este valor para cada radio erosionado se obtiene la Figura III.36. En dicha ilustración se observa que el error teórico máximo predicho por la curva de tractriz sería de 8 μm. Sin embargo, si se considera la dependencia del *wire-lag* con el radio, este error máximo aumenta hasta los 18 μm.

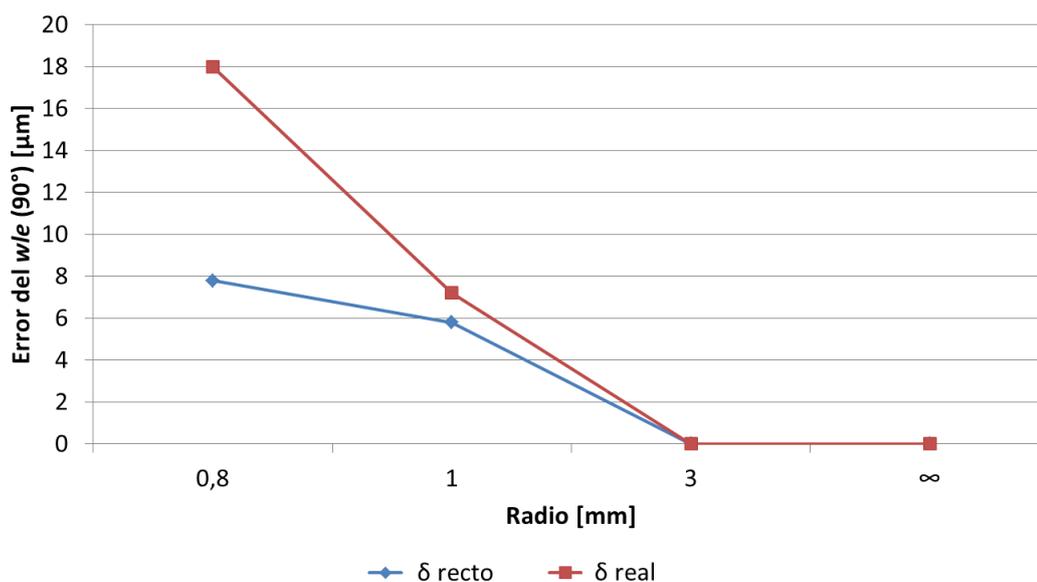


Figura III.36. Error en el corte de esquina predicho por la curva tractriz como una función del radio erosionado: predicción usando el valor del *wire-lag* de un corte recto (azul) y usando valor dependiente del radio (rojo).

Con este nuevo método para la medición del efecto del *wire-lag* en la pieza se puede cuantificar de forma rápida y sencilla la contribución de este efecto en el error de la pieza en cualquier tipo de trayectoria. Además, es necesario disponer del dato del *w/e* para cada tipo de trayectoria, puesto que es variable y, por tanto, generará un error mayor al cuantificado hasta la fecha.

**Tabla III.36. Resultado de medición del  $ce$  y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico alcanza los 17 bar.**

R [mm]	H [mm]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	SD
0,8	20	-	-
	60	12	3,89
	100	42	2,88
1	20	-	-
	60	9	1,20
	100	41	6,37
3	20	-	-
	60	11	3,31
	100	29	4,55
$\infty$	20	-	-
	60	13	0,58
	100	34	3,86

Los resultados del  $ce$  en los cortes con una presión del fluido dieléctrico de 17 bar se presentan en la Tabla III.36: los valores más altos se corresponden con el de 42  $\mu\text{m}$  para 100 mm de espesor de pieza y 12  $\mu\text{m}$  en 60 mm, ambos para el radio mínimo erosionado de 0,8 mm. Por el contrario, el  $ce$  se vuelve insignificante para espesores pequeños como el de 20 mm, donde este efecto queda encubierto con la rugosidad inherente al propio proceso.

Los valores obtenidos del efecto de concavidad en diferentes espesores parecen ser independientes del radio mecanizado (queda reflejado en la Figura III.37). Sin embargo, en el caso de 100 mm, para radios inferiores a 1 mm, este valor comienza a mostrar una tendencia creciente con la disminución del radio. Esto puede deberse a que, para un espesor de 60 mm, la rigidez del hilo es suficientemente alta como para que la vibración desequilibrada del mismo (provocada por la curvatura de la trayectoria) sea perceptible. Sin embargo, al aumentar el espesor hasta los 100 mm y, por tanto, reducir la rigidez del hilo, este efecto es influyente en las mediciones.

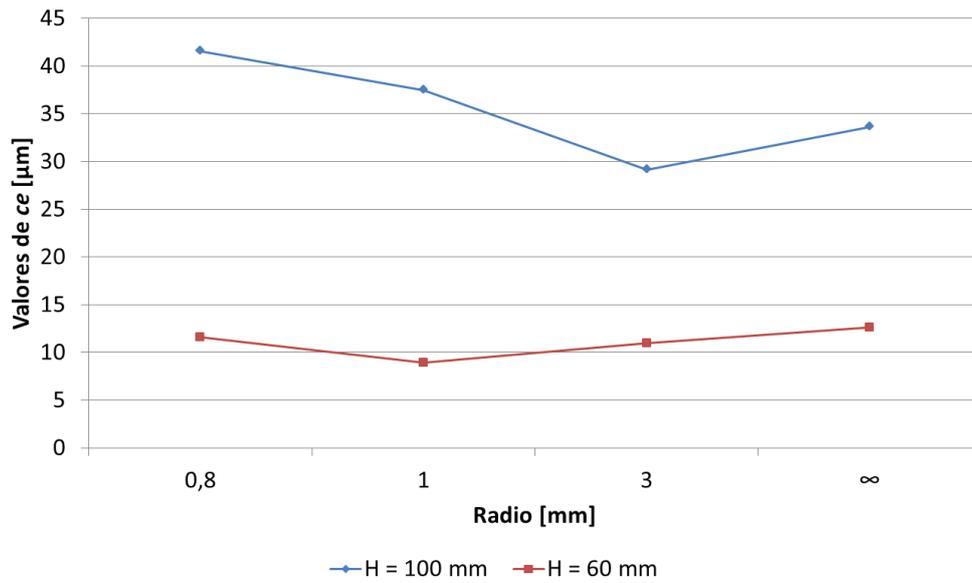


Figura III.37. Resultado de medición del  $ce$  en función del radio erosionado para diferentes espesores de pieza.

Por último, se muestran en la Tabla III.37 los resultados del  $ce$  cuando la distancia entre guías es mayor (presión de 5 bar), los cuales muestran una tendencia similar a los resultados con presión, si bien su valor es algo más alto.

Tabla III.37. Resultado de medición del  $ce$  y desviación estándar cuando la presión del dieléctrico es de 5 bar.

R [mm]	H [mm]	$ce$ [ $\mu\text{m}$ ]	SD
0,8	20	-	-
	60	22	6,90
	100	46	32,55
1	20	-	-
	60	16	7,98
	100	48	4,61
3	20	-	-
	60	10	4,48
	100	35	5,92
$\infty$	20	-	-
	60	15	3,82
	100	38	4,33

En vista de los resultados se puede decir que el  $ce$  es prácticamente constante para un valor de espesor de pieza dado, ya que sus fluctuaciones, las cuales pueden confundirse con la rugosidad propia del criterio de erosión, pueden ser producidas por las incertidumbres inherentes al proceso.

### III.5 RELACIÓN DEL TIEMPO DE IONIZACIÓN CON EL CORTE DE TRAYECTORIAS CIRCULARES

En los capítulos anteriores se ha observado que el comportamiento del hilo varía durante el corte de trayectorias con cambios bruscos de dirección. Estas variaciones deberían reflejarse también en las variables del proceso. Puesto que todos los valores están fijados por los parámetros establecidos en el criterio de erosión, el único que puede variar es el tiempo de ionización ( $t_{on}$ ), el cual queda reflejado en el análisis de las descargas. Por lo tanto, se decide ver si existe alguna relación entre las descargas y el comportamiento del hilo.

Se han clasificado cuatro tipos de descargas en función del tiempo de ionización: las descargas tipo  $N_0$  son aquellas que tienen un tiempo de ionización menor de 3  $\mu s$ ; las de tipo  $N_1$ , de entre 3  $\mu s$  y 5  $\mu s$ ; las de tipo  $N_2$ , de entre 5  $\mu s$  y 10  $\mu s$ ; y, por último, las de tipo  $N_3$ , con un tiempo de ionización mayor de 10  $\mu s$  de duración.

En la Tabla III.38 se reúnen los porcentajes de los tipos de descarga en función del radio erosionado y la presión del fluido dieléctrico establecido: en ambas condiciones de presión del fluido dieléctrico los resultados muestran una tendencia similar. Por un lado, el porcentaje de descargas tipo  $N_0$  (las de menor tiempo de ionización) disminuye con el radio a costa de aumentar el porcentaje de las de tipo  $N_3$  (las de más de 10  $\mu s$  de tiempo de ionización); por otro, las variaciones en las descargas tipo  $N_1$  y  $N_2$  no son significativas. El desequilibrio del material evaporado en el canal al cortar un radio pequeño puede explicar esta fluctuación en el tiempo de ionización.

Tabla III.38. Porcentaje de diferentes tipos de descarga en función del radio y la presión.

Presión [bar]	Radio [mm]	$N_0$ (%)	$N_1$ (%)	$N_2$ (%)	$N_3$ (%)	Número total de descargas por segundo
	$t_{on}$ [ $\mu s$ ]	0-3	3-5	5-10	>10	
17	0.8	52	16	10	22	468
	1	52	16	10	22	489
	3	53	18	10	19	599
	$\infty$	56	18	10	16	690
5	0.8	45	11	9	35	187
	1	49	12	9	30	242
	3	49	14	10	27	304
	$\infty$	51	14	10	25	343

A partir de los resultados se puede pensar en una relación entre la amplitud de la deformación del hilo y las variaciones en los porcentajes de  $N_0$  y  $N_3$  (ver Figura III.38). Sin embargo, la presencia del desequilibrio de áreas a erosionar y por lo tanto, la oscilación en el sistema de fuerzas actuantes sobre el hilo, cuando se corta círculo de radio pequeño imposibilitan afirmar que el aumento de la deformación del hilo sea consecuencia únicamente de la variación de los diferentes tipos de descargas. De hecho, lo más probable es que exista una combinación de ambos efectos (una variación del patrón de descargas y un desequilibrio de fuerzas) que explique la mayor deformación del hilo: para poder confirmar estas afirmaciones se deberán estudiar estos dos efectos simultáneamente con mayor detenimiento.

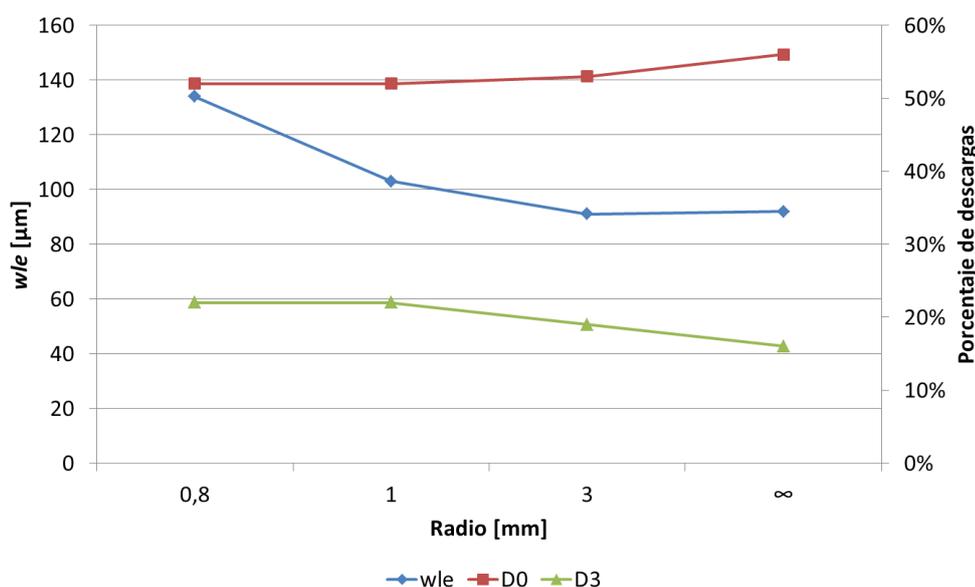


Figura III.38. Resultado de medición del  $w/e$  en función del radio erosionado para diferentes espesores de pieza.

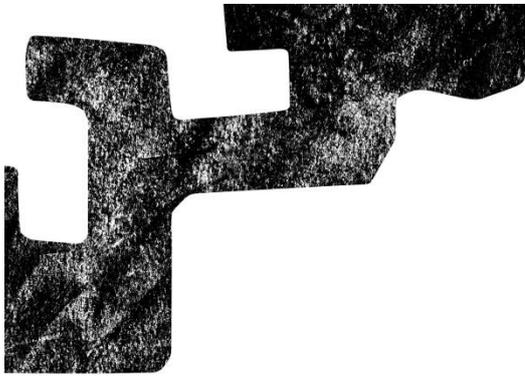
Al comparar experimentos con presión de dieléctrico alto y bajo, se han observado variaciones importantes en el número total de descargas por segundo: el número promedio de descargas cuando se corta con una presión de 5 bar es aproximadamente la mitad del número total de descargas al cortar en condiciones de presión óptimas (17 bar). Esto se debe al hecho de que el propio control de la máquina introduce pausas de protección porque está cortando en condiciones más inestables. Aun y todo, como se explica en la sección III.4, los valores absolutos de  $w/e$  son similares en ambas situaciones; por esta razón se puede concluir que la frecuencia de descarga no tiene un efecto significativo en la amplitud de la vibración del hilo.

### III.6 CONCLUSIONES

De la caracterización del error en trayectorias circulares se concluye que:

- Se han definido dos hipótesis por las cuales existirían los errores en la erosión de círculos mediante WEDM: el desequilibrio de áreas de erosión causado por el desequilibrio de fuerzas y la envolvente generada por la vibración del hilo.
- Se ha caracterizado el error de las trayectorias circulares, tanto en el plano superior como en el plano medio de las probetas erosionadas (el valor máximo del promedio del error es de 25  $\mu\text{m}$  y 51  $\mu\text{m}$ , respectivamente).
- En base a la morfología del error obtenido se ha propuesto una compensación geométrica que mejora la precisión en el plano superior en un 70 % de valor promedio. En el plano medio, aun siendo la mejora del 60 %, el error sigue siendo significativo (un defecto medio de entre 12  $\mu\text{m}$  y 35  $\mu\text{m}$ , cuyos máximos sobrepasan los 50  $\mu\text{m}$ ).
- El defecto de erosión causado por la envolvente del hilo ha sido estudiado como consecuencia de los resultados del punto anterior. Se concluye que el *wire-lag* depende de la trayectoria erosionada y que el error que causa puede calcularse mediante la curva de persecución. Por esta razón se propone una nueva metodología para el cálculo del efecto del *wire-lag* como del efecto de concavidad. Así, se ha determinado que el *wle* crece con el espesor de pieza (de 53  $\mu\text{m}$  en un espesor de 20 mm hasta 134  $\mu\text{m}$  en uno de 100 mm para un radio 0,8 mm) y con la disminución del radio (de 92  $\mu\text{m}$  en un corte recto hasta los 134  $\mu\text{m}$  en un radio de 0,8 mm en un espesor de 100 mm). El *ce*, sin embargo, es aproximadamente constante para un espesor dado (en torno a los 35  $\mu\text{m}$  para 100 mm y 10  $\mu\text{m}$  para 60 mm y es imperceptible para el de 20 mm).
- Por último, se ha estudiado la relación entre el tiempo de ionización y la erosión de los círculos de pequeño radio. Las descargas de menor tiempo de ionización aumentan con el radio (entre 4 y 6 puntos porcentuales en función de la presión del fluido dieléctrico) a costa de la disminución de las de mayor tiempo de ionización (entre 6 y 10 puntos). Sin embargo, debido a la superposición de diferentes efectos como el desequilibrio de áreas a erosionar (causada por la resultante de las fuerzas inherentes al proceso) y la variación en la presión del fluido dieléctrico, resulta imposible generar una relación sin realizar un estudio más profundo teniendo en cuenta ambos factores.

Una vez analizada la geometría del error en el corte de trayectorias circulares, en el siguiente capítulo se propone un nuevo método para la corrección del mismo.



**Capítulo IV.  
Predicción y  
corrección del error  
en trayectorias  
circulares mediante  
ANNs y métodos de  
optimización**

---



## **IV. PREDICCIÓN Y CORRECCIÓN DEL ERROR EN TRAYECTORIAS CIRCULARES MEDIANTE ANNS Y MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN**

*A lo largo de este capítulo se presenta un enfoque original basado en la AI para predecir el error y mejorar la precisión del corte de círculos mediante WEDM abordado en el capítulo 671. Para tal fin se ha utilizado una nueva configuración de una ANN. El entrenamiento de la red se ha llevado a cabo utilizando la información extraída de diferentes cortes realizados en condiciones industriales. Posteriormente, se han combinado las predicciones de la configuración de la ANN seleccionada con una técnica de optimización denominada Simulated Annealing (SA). De esta manera se han conseguido diseñar trayectorias del hilo de radio variable, aumentando la precisión del proceso.*

### **IV.1 INTRODUCCIÓN**

La corrección geométrica aplicada en el capítulo III.3.3 pone de manifiesto la gran carga experimental necesaria para predecir el error en el corte de las trayectorias circulares. Es por eso que, en este capítulo, se aborda la predicción de la evolución de este error mediante el uso de las ANNs.

En las primeras tres subsecciones del apartado IV.3, se muestra el procedimiento experimental seguido para el corte de las probetas necesarias, explicando la configuración de entradas y salidas que requiere la red y la validación de la misma. Una vez visto el grado de precisión en la predicción del error que muestra la red, se opta por optimizar la trayectoria seguida por el hilo en este tipo de cortes (punto IV.3.4) mediante la técnica de optimización SA. Con esta propuesta se discuten los resultados (subcapítulo IV.4) de tres situaciones diferentes (tres probetas de radio y espesor distintos) que demuestran el rendimiento conseguido en este estudio.

## IV.2 OBJETIVO

El objetivo principal de este capítulo es utilizar la gran cantidad de datos extraíbles del proceso de corte de electroerosión por hilo, mediante una herramienta como las redes neuronales, para predecir el error en las trayectorias con cambios de dirección, evitando así la batería de ensayos necesaria (mencionada al comienzo del capítulo I).

Posteriormente, utilizando estos mismos datos, se pretende mejorar la precisión en el corte de interpolaciones circulares utilizando una técnica de optimización que propone una trayectoria alternativa que minimice el error cometido.

## IV.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el capítulo correspondiente al aprendizaje automático del estado del arte (sección II.4) se han presentado diversos trabajos que han utilizado las ANNs para resolver problemas del sector del mecanizado, siempre teniendo en cuenta que existen diferentes arquitecturas que deben diseñarse para cada una de las cuestiones a tratar. Además, en algunos de ellos se han aplicado diferentes técnicas de optimización. Por este motivo, parece razonable pensar que el proceso de WEDM también puede beneficiarse de estos métodos computacionales para resolver algunos de sus problemas actuales.

Así, se ha seleccionado un tipo de red neuronal recurrente (RNN) para este estudio: la red neuronal de tipo Elman, en la que el bucle de realimentación empieza en la salida de la capa oculta y termina a la entrada de la misma. La razón por la cual se ha hecho esta elección es la siguiente: su retroalimentación hace que la red adquiera una memoria de los eventos inmediatamente anteriores que afectan a las actualizaciones sucesivas de los pesos en cada capa de la red, mejorando el sistema y consiguiendo mejores porcentajes generales al final de una sesión de entrenamientos del conjunto de datos. Así, es capaz de manejar mejor las evoluciones dinámicas ( $u$ ). Las evoluciones dinámicas hacen referencia a los sistemas en los que unos estados dependen de los eventos anteriores, como sucede en meteorología, en las finanzas o en el desgaste de las herramientas [Arriandiaga, 2014]. Aunque es habitual hablar de series temporales (históricas de datos), otras no se miden en función del tiempo (entonces se denominan series pseudo-temporales) y en ellas los datos están basados en parámetros no relacionados con el mismo, que es lo que ocurre en este caso.

Por otra parte, el algoritmo SA se ha elegido por el amplio uso que se le ha dado desde que Kirkpatrick et al. [Kirkpatrick, 1983] lo propusieron en 1983 [Rasdi Rere, 2015] [Palacios, 2018] [Hu, 2018], junto con el de PSO, tal y como se ha visto en alguna aplicación del apartado II. La metodología experimental empleada se resume en el organigrama de la Figura IV.1.

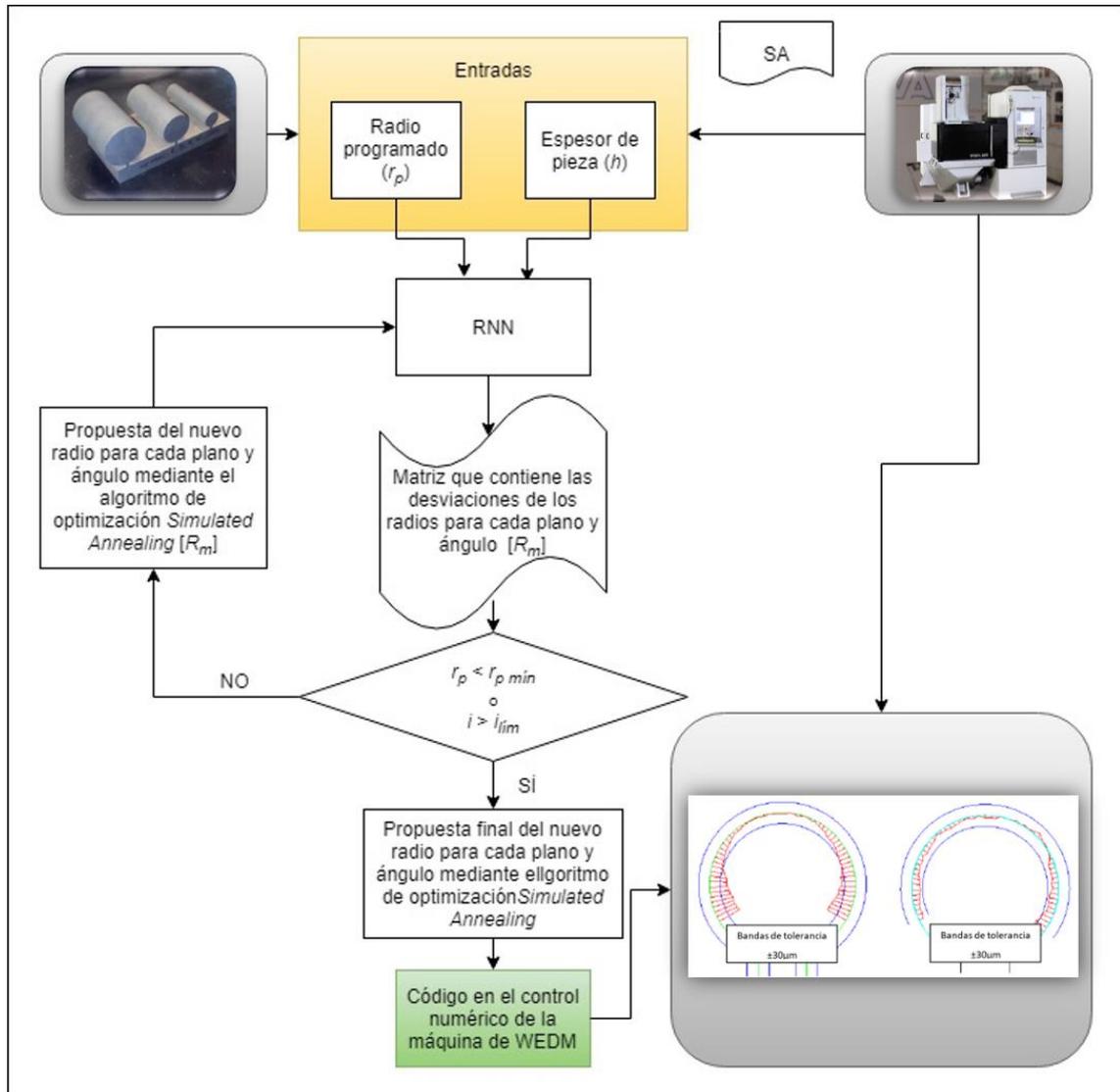


Figura IV.1. Uso de la RNN y la técnica de optimización SA para la corrección de círculos realizados mediante WEDM.

En este organigrama se explica la metodología de trabajo seguida. Las entradas a la red neuronal son dos: el radio programado y el espesor de pieza. Gracias al entrenamiento de la RNN (el cual se ha realizado con los valores de radio medidos en diferentes ángulos y planos del espesor de pieza) esta es capaz de generar una matriz que contiene las desviaciones de los radios para diferentes ángulos del radio en los diferentes planos. Si estas desviaciones están por encima de un valor establecido la red, con la técnica de optimización SA, propone una nueva matriz de los

radios (en lugar de los nominales) que minimizan estas desviaciones. La generación de la nueva matriz es un proceso iterativo que termina cuando, o bien se ha realizado un número de iteraciones límite o bien se han reducido las desviaciones por debajo del valor establecido. Por tanto, si bien los datos de entrada son estáticos, la matriz después de aplicar la técnica SA genera un conjunto de datos dinámico, variante en cada iteración. Con esta información se programa el código que se introducirá en el control numérico de la máquina de WEDM que erosionará el círculo de forma óptima.

#### IV.3.1 CONFIGURACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LA ANN Y GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS PARA ENTRENARLA

Una vez definido el tipo de red y la técnica de optimización que va a utilizarse en este estudio se definen las ecuaciones (Ec. IV. 1 y Ec. IV. 2) que muestran las expresiones matemáticas de la capa de salida y de la capa oculta, respectivamente, con la función de activación tangente hiperbólica:

$$o(t) = \text{purelin}(LW^{2,1}a_1(t) + b_2) \quad \text{Ec. IV. 1}$$

$$a_1(t) = \text{tansig}(IW^{1,1}i(t) + LW^{1,1}a_1(t - 1) + b_1) \quad \text{Ec. IV. 2}$$

donde  $o(t)$  es la salida de la red,  $a_1(t)$  es la salida de la capa oculta,  $W$  son los pesos de cada capa e  $i(t)$  es la entrada a dicha red neuronal.

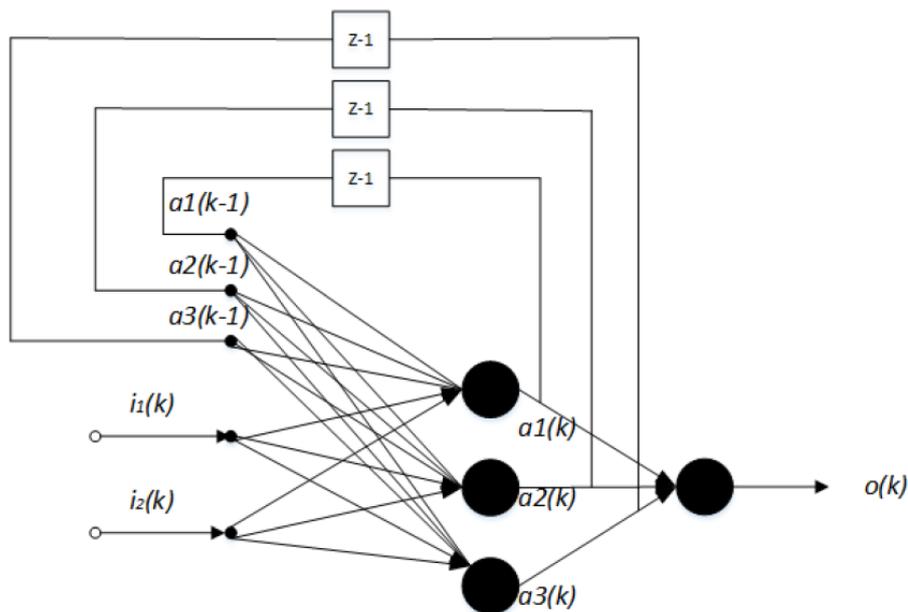


Figura IV.2. Arquitectura de la RNN utilizada.

Los cortes del estudio preliminar realizado en el capítulo anterior (sección III.3.1) han servido para generar la base de datos de entrada a la red. Este es el primer paso necesario para su entrenamiento. Por tanto, a continuación, se definen tanto la batería de ensayos como las mediciones realizadas, junto con la configuración que deben seguir los datos obtenidos para que conformen adecuadamente las entradas a la red. En la Figura IV.3 se muestra un ejemplo de las probetas fabricadas y su geometría.

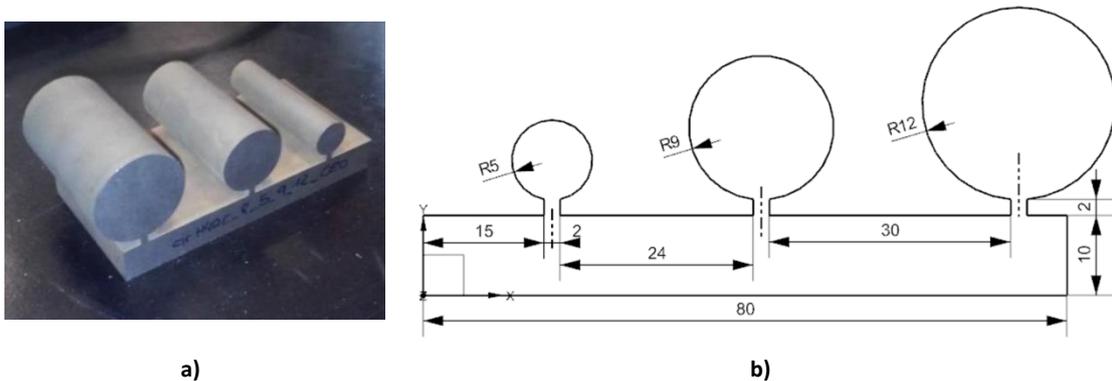


Figura IV.3. Ejemplo de geometría de pieza (radios 5 mm, 9 mm y 12 mm en espesor de 70 mm).

Al igual que en el apartado III.3.1, el material utilizado es un acero de herramientas AISI D2 (ISO 160CrMoV12) templado y revenido de 62 HRC. Las probetas están formadas por círculos de diferentes radios de entre 3 mm y 20 mm, en espesores de pieza de 40 mm, 70 mm y 100 mm, tal y como se muestra en la Tabla IV.1. La razón para utilizar este rango de radios es el mismo que en el capítulo I: por debajo de 3 mm existe la superposición de otros fenómenos, como la falta de presión de dieléctrico; por encima de 20 mm el radio es suficientemente grande como para considerar que el cambio de dirección es apenas apreciable.

Asimismo, la base en la que estos se apoyan tiene una dimensión mínima de 10 mm para poder utilizarla como superficie de referencia en la medición (paredes verticales de los ejes X e Y de la Figura IV.3.b). En concreto, se han erosionado en una máquina ONA AX3 18 círculos cuyas medidas se han utilizado para el entrenamiento y validación de la red.

Tabla IV.1. Valores de espesores y radios de las probetas generadas.

H [mm]	R [mm]	H [mm]	R [mm]	H [mm]	R [mm]
	3		3		3
	5		5		5
40	9	70	9	100	9
	12		12		12
	15		15		15
	20		20		20

El hilo empleado es uno de latón sin recubrimiento (CuZn37) de 0,25 mm de diámetro, con una resistencia a rotura de 900 N/mm<sup>2</sup> y un límite elástico del 1 %. Los parámetros eléctricos (enumerados en la Tabla IV.2) corresponden a los empleados en condiciones de desbaste para cada uno de los espesores utilizados.

Tabla IV.2. Parámetros utilizados para el corte de las probetas.

Parámetros utilizados	Valor		
Espesor de pieza [mm]	40,0	70,0	100,0
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	9,0	12,0	13,0
Intensidad [A]	5,0	5,0	5,0
Tensión de servo de referencia [V]	80,0	80,0	80,0
Presión del dieléctrico [bar]	17,0	17,0	17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2	1,2	1,2
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10,0	10,0	10,0
Gap [ $\mu$ m]	170,0	175,0	183,0

En cuanto a las mediciones, se ha usado la CMM Zeiss 850, midiendo 10 planos ( $j$ ) diferentes (ver Figura IV.4): 4 planos equidistantes en la sección media superior, 4 planos equidistantes en la sección media inferior y otros 2 en la parte superior e inferior, a 1,5 mm desde las superficies horizontales.

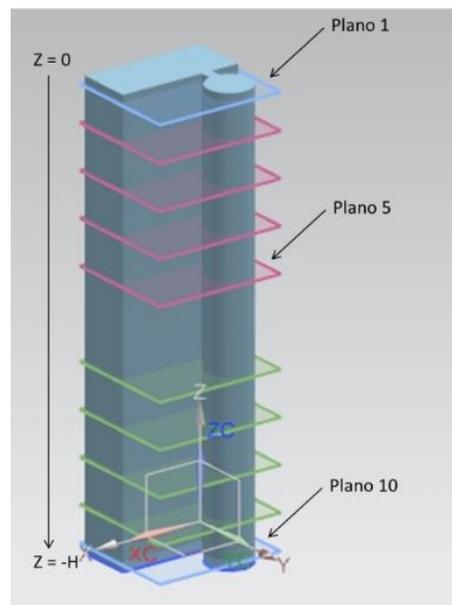


Figura IV.4. Metodología de medida: planos medidos.

En cada plano se han medido hasta 30 puntos, variando el ángulo ( $\alpha$ ) de posición del radio erosionado entre  $45^\circ$  y  $320^\circ$ , tal y como se muestra en la Figura IV.5. Los resultados se representan en la misma ilustración, donde el contorno nominal de la pieza se representa en verde, las bandas de tolerancia de  $\pm 30 \mu\text{m}$  (manteniendo el mismo criterio de la página 81 del capítulo anterior) se colorean en azul y los puntos medidos se muestran en rojo. Por lo tanto, se recogen 300 puntos por pieza, divididos en 10 planos, con una evolución dinámica ( $u$ ) de 30 puntos por plano.

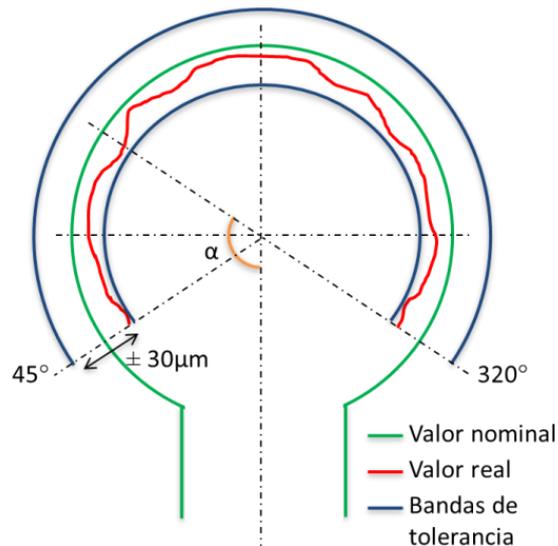


Figura IV.5. Metodología de medida: resultado de medida y bandas de tolerancia.

Cada círculo erosionado es un elemento de entrada para el entrenamiento de la red. Por consiguiente, es necesario caracterizarlos de alguna manera: en este caso se utilizan los parámetros de espesor ( $h$ ) y radio ( $r_p$ ). Como para cada círculo se han recogido datos de 10 ángulos ( $\alpha$ ) diferentes (a lo largo de  $h$ ), se obtiene una cantidad total de 300 puntos por probeta: esto es, 300 puntos divididos en 10 planos con una evolución dinámica ( $u$ ) de 30 puntos por plano. Por lo tanto, el número de plano también se utiliza como una entrada a la red (en lugar de la cota), dado que es un valor relativo y no depende del espesor de pieza. Además, dado que se recogen medidas de 10 planos por cada círculo, en este trabajo se han considerado como una muestra las 10 evoluciones dinámicas de 30 puntos correspondientes a cada plano.

Por otro lado, la red tiene una salida: la desviación radial en un punto dado. Cabe destacar que, debido a la naturaleza de la red, un requisito de la RNN es tener el mismo número de puntos en las entradas y en la salida; es decir, una evolución dinámica ( $u$ ) de 30 puntos. Por lo tanto, los valores de entrada estáticos se convierten en secuencias estáticas de 30 puntos. Un ejemplo de las entradas introducidas se puede encontrar en la Tabla IV.3.

**Tabla IV.3. Ejemplo de las entradas y salidas de la ANN para un espesor de pieza de 100 mm y 3 mm de radio.**

$k$	Ángulo [°]	Valor del radio [mm] según el número de plano ( $j$ )									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	45,00	3,009	2,958	2,956	2,941	2,948	2,926	2,964	2,942	2,953	2,979
2	54,48	3,008	2,963	2,960	2,947	2,948	2,936	2,958	2,948	2,959	2,982
3	63,97	3,006	2,969	2,965	2,953	2,948	2,946	2,953	2,953	2,965	2,985
4	73,45	3,000	2,973	2,965	2,958	2,951	2,955	2,954	2,959	2,971	2,987
5	82,93	2,999	2,975	2,965	2,959	2,959	2,959	2,958	2,967	2,977	2,987
6	92,41	2,997	2,978	2,972	2,968	2,965	2,966	2,971	2,975	2,987	2,991
7	101,90	3,001	2,983	2,977	2,970	2,970	2,973	2,974	2,980	2,989	2,995
8	111,38	2,998	2,985	2,985	2,977	2,976	2,980	2,980	2,986	2,991	2,995
9	120,86	2,996	2,990	2,987	2,985	2,984	2,987	2,984	2,990	2,997	2,996
10	130,34	3,001	2,995	2,990	2,988	2,991	2,993	2,990	2,994	2,998	3,000
11	139,83	3,000	2,999	2,996	2,992	2,995	2,996	2,993	3,001	3,001	3,002
12	149,31	2,998	3,001	2,998	3,000	2,999	3,003	3,002	3,000	3,005	3,002
13	158,79	3,000	3,003	3,000	3,000	3,003	3,003	3,000	3,003	3,003	3,000
14	168,28	2,997	3,004	3,002	3,000	3,006	3,006	3,004	3,003	3,001	3,004
15	177,76	2,999	3,003	2,998	3,003	3,006	3,008	3,006	3,009	3,007	3,007
16	187,24	2,998	3,004	2,997	3,001	3,003	3,005	3,001	3,006	3,005	3,003
17	196,72	2,995	2,999	2,996	3,001	3,001	3,006	2,999	3,002	3,004	2,999
18	206,21	2,992	2,999	2,993	2,999	2,998	2,998	2,998	2,998	3,000	3,001
19	215,69	2,994	2,995	2,990	2,994	2,993	2,992	2,993	2,997	2,997	2,995
20	225,17	2,991	2,990	2,986	2,987	2,988	2,985	2,990	2,990	2,993	2,991
21	234,66	2,992	2,986	2,985	2,983	2,988	2,984	2,985	2,989	2,990	2,987
22	244,14	2,991	2,984	2,981	2,980	2,979	2,977	2,979	2,984	2,985	2,989
23	253,62	2,989	2,980	2,973	2,975	2,973	2,974	2,976	2,982	2,981	2,985
24	263,10	2,988	2,977	2,970	2,967	2,965	2,964	2,968	2,975	2,980	2,982
25	272,59	2,987	2,973	2,966	2,963	2,958	2,956	2,964	2,971	2,974	2,982
26	282,07	2,986	2,970	2,963	2,960	2,953	2,951	2,959	2,969	2,977	2,983
27	291,55	2,985	2,973	2,960	2,954	2,945	2,949	2,954	2,962	2,978	2,984
28	301,03	2,992	2,978	2,959	2,951	2,939	2,947	2,948	2,955	2,980	2,988
29	310,52	2,999	2,983	2,960	2,951	2,933	2,946	2,942	2,948	2,981	2,993
30	320,00	3,006	2,988	2,961	2,951	2,927	2,944	2,936	2,942	2,983	2,998

Por último, la arquitectura de la red neuronal seleccionada, es decir, la configuración de la RNN, requiere la definición del número de neuronas en la capa oculta ( $HN$ ) y el número de unidades de retardo ( $D$ ). En base a trabajos anteriores [Werbos, 1990] se ha decidido usar una única capa oculta.

### IV.3.2 ESTRATEGIA DE ENTRENAMIENTO DE LA ANN

El objetivo del entrenamiento de una ANN es encontrar los pesos y *bias* más adecuados para modelar la relación no lineal entre las entradas y las salidas. Pero, además, tal y como se ha explicado, se ha llevado a cabo con diferentes valores de  $HN$  y  $D$ , para elegir el valor que mejor resultado proporcione. La base de datos utilizada para este fin se ha dividido en dos grupos: un conjunto de los mismos se ha utilizado para el entrenamiento y otro para la validación (ver Tabla IV.4).

**Tabla IV.4. Datos utilizados para entrenar y testear la ANN.**

Entrenamiento		Validación	
$h$ [mm]	$r_p$ [mm]	$h$ [mm]	$r_p$ [mm]
40	5	70	3
40	9	70	5
40	12	70	12
40	15	70	15
40	20	70	20

El conjunto de datos utilizado durante el entrenamiento de la ANN sirve para ir ajustando los pesos y los *bias* (parámetro que proporciona un grado de libertad adicional al modelo, pero no es un umbral de disparo, ver sección II.4), mientras que los datos usados en la validación tienen como objetivo medir el rendimiento de la misma. Así, para cada peso se selecciona un radio de ejemplo de validación para analizar la capacidad de generalización a un nuevo radio. Por tanto, se han utilizado 15 valores para el entrenamiento y 3 para su validación (ver Tabla IV.4 de nuevo).

Por otra parte, se ha utilizado la herramienta *back-propagation through time* (BPTT) [Werbos, 1990] para aumentar la velocidad de convergencia en las RNN. Es aconsejable entrenar cada estructura de red (neuronas en la capa oculta y unidades de retardo) más de una vez, debido a la dependencia del error con los valores de peso iniciales. Con el fin de reducir este proceso, en lugar de utilizar una inicialización aleatoria, se ha usado el método de Nguyen-Widrow [Nguyen, 1990], cuya idea es elegir los pesos de forma que las capas ocultas estén dispersas por el espacio de entrada. Así, cada estructura de red se ha entrenado 10 veces.

### IV.3.3 VALIDACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE LA ANN Y EVALUACIÓN DE SU RENDIMIENTO

La selección de la arquitectura de la ANN más conveniente incluye, tal y como ya se ha explicado en el apartado anterior, la definición de las  $HN$  y de las  $D$ , de forma que minimicen el error en el rendimiento de la RNN. Para evaluar este error se utiliza un indicador de confianza como es el porcentaje del error medio absoluto (*Mean Absolute Percentage Error, MAPE*), cuya expresión viene dada por la Ec. IV. 3.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \left| \frac{T_u - P_u}{T_u} \cdot 100 \right| \quad \text{Ec. IV. 3}$$

donde  $T_u$  representa el valor objetivo para un punto  $u$  de la evolución dinámica y  $P_u$  es el valor predicho por la ANN para ese mismo punto.

La razón por la que se ha utilizado el *MAPE* es que es ampliamente utilizado en diferentes predicciones y predicciones de series temporales en las ANNs [Wang, 2015] [Laboissiere, 2015] [Arriandiaga, 2016 2]. Sin embargo, en este caso, en lugar de medir el *MAPE* correspondiente a una evolución dinámica, se mide el promedio del *MAPE* (*mMAPE*) o, lo que es lo mismo, el valor para las evoluciones dinámicas del conjunto de los datos de entrenamiento. De hecho, el valor *mMAPE* de cada pieza utilizada en el entrenamiento corresponde a la media del valor de *MAPE* (*mMAPE*) de cada una de las 10 evoluciones dinámicas.

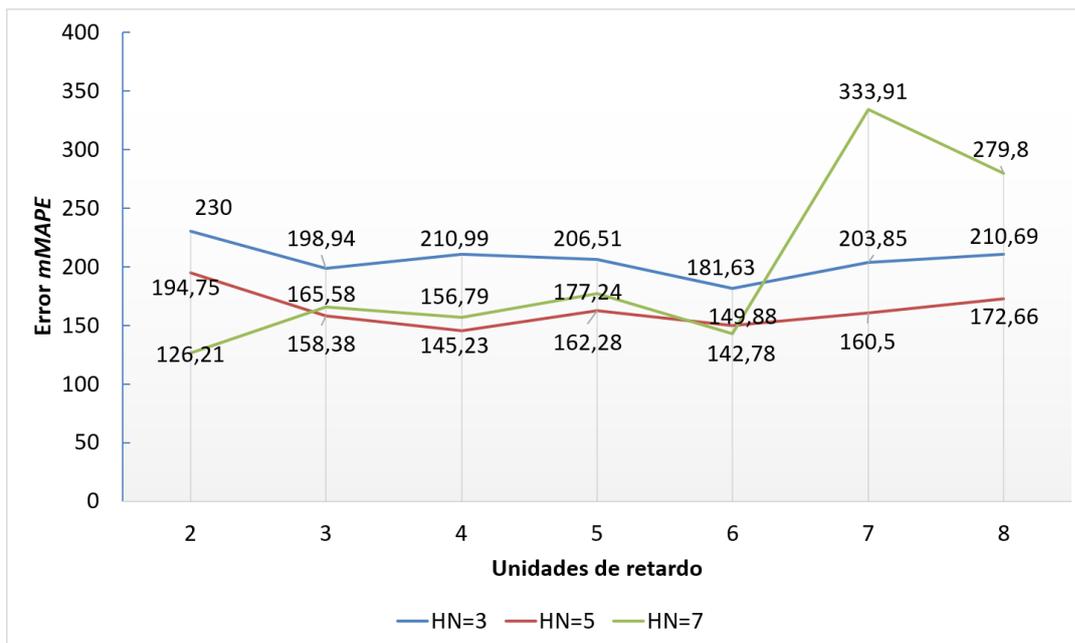


Figura IV.6. Error *mMAPE* para la mejor red para todas las combinaciones de  $HN$  y  $D$ .

Cada una de las estructuras de la red probadas (combinación de  $HN$  y  $D$ ) se ha entrenado 10 veces, tal y como se ha comentado anteriormente. La Figura IV.6 representa los resultados del valor de  $mMAPE$  para las mejores de estas combinaciones.

Estos resultados muestran que, en la mayoría de los entrenamientos, la peor de las opciones es usar tres neuronas en la capa oculta. Es decir, se puede observar que tres neuronas no son suficientes para representar la relación entre la entrada y la salida de la RNN. Por otra parte, además, cuando se utilizan cinco neuronas en la capa oculta, la red predice la desviación radial de forma más precisa para cualquiera de los valores de  $D$  de la capa oculta, lo que demuestra que un mayor número de neuronas en la capa oculta mejora el comportamiento de la red. De forma similar, con siete  $HN$  y un valor de  $D$  menor de este mismo número, el comportamiento de la red es bastante similar al que muestra con cinco  $HN$ . Sin embargo, cuando se utilizan más de siete unidades de retardo en la retroalimentación de la red ( $D$ ), el rendimiento disminuye.

Se puede concluir que la mejor configuración de red (es decir, la que tiene el menor error  $mMAPE$ ) es aquella que dispone de siete neuronas en la capa oculta y dos unidades de retardo, por lo que será la arquitectura seleccionada.

Una vez elegida la arquitectura de red óptima, se ha realizado una evaluación del rendimiento de la RNN en términos de predicción de los errores dimensionales generados en las piezas erosionadas. Es decir, se han cortado dos probetas diferentes: una primera de radio 4 mm en 50 mm de espesor y una segunda de 10 mm de radio para un espesor de pieza de 80 mm. Estas probetas son diferentes a las utilizadas para el entrenamiento y validación de la red, lo cual permite una evaluación efectiva del rendimiento de la misma para diferentes situaciones. Por tanto, en la Tabla IV.5 se muestran los nuevos parámetros utilizados en el corte de estas dos piezas ya que, al ser de diferente espesor, varían con respecto a los mostrados en la Tabla IV.2.

**Tabla IV.5. Parámetros utilizados para el corte de probetas en espesores 50 mm y 80 mm.**

Parámetros utilizados	Valor	
Espesor de pieza [mm]	50,0	80,0
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	10,0	12,0
Intensidad [A]	5,0	5,0
Tensión de servo de referencia [V]	80,0	80,0
Presión del dieléctrico [bar]	17,0	17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2	1,2
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10,0	10,0
Gap [ $\mu$ m]	174,0	176,0

Por un lado, la Figura IV.7 muestra la comparación entre las predicciones de error generadas por la RNN y las mediciones recogidas de las pruebas experimentales llevadas a cabo en las condiciones descritas en la Tabla IV.5 para el plano  $j = 5$  (correspondiente a una cota de  $Z = -20$  mm) en un radio programado de 4 mm. Más concretamente, este gráfico representa la evolución del radio frente al ángulo ( $\alpha$ ) del círculo erosionado para el plano más cercano a la zona media de la probeta, donde las desviaciones son más altas.

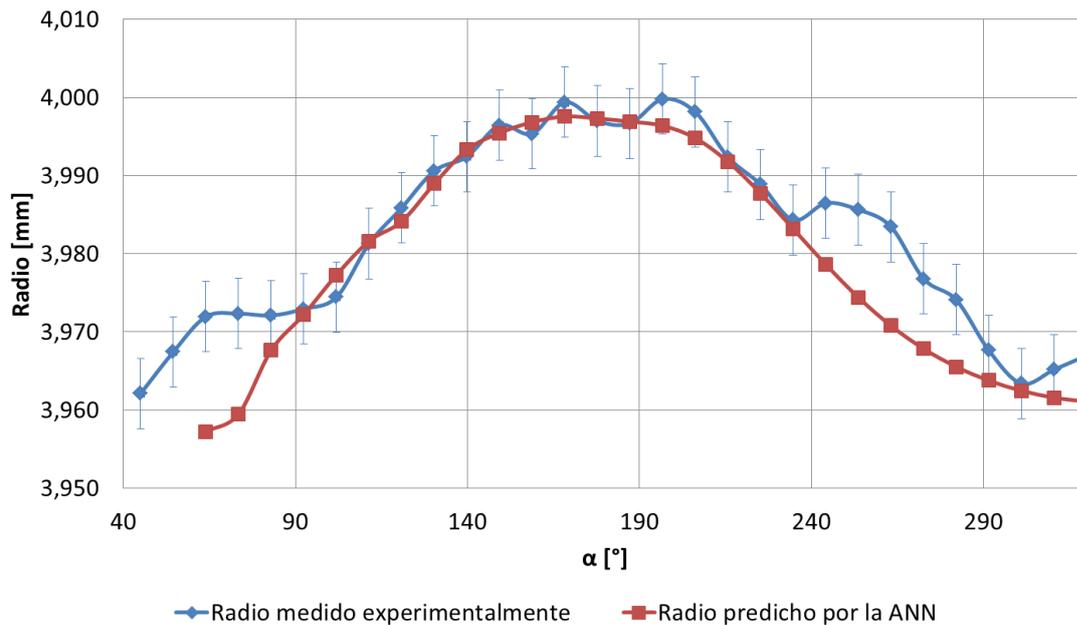


Figura IV.7. Evolución del radio del círculo en función del ángulo para los valores predichos por la RNN y los valores medidos experimentalmente. Los resultados pertenecen a un círculo de radio 4 mm y un espesor de 50 mm en el plano  $j = 5$  ( $Z = -20$  mm).

Los resultados predichos muestran una buena correspondencia con los valores de radio medidos experimentalmente, ya que la desviación promedio (considerando todos los valores) es de  $4,5 \mu\text{m}$ , siendo la máxima de  $12,7 \mu\text{m}$ . Los resultados experimentales muestran que este radio está aproximadamente  $10 \mu\text{m}$  por debajo del radio programado al comienzo del círculo, aumentando después para alcanzar su valor nominal en la zona central del mismo (para ángulos de  $\alpha$  entre  $170^\circ$  y  $180^\circ$ ) y volviendo a disminuir nuevamente a la salida.

La evolución del radio según lo predicho por la RNN sigue la misma tendencia, con pequeñas desviaciones en los valores, como acaba de analizarse. Teniendo en cuenta que la incertidumbre de las mediciones de la MMC es de  $\pm 5 \mu\text{m}$ , se puede concluir que las predicciones muestran un alto nivel de acuerdo con los valores experimentales.

Por otro lado, en la Figura IV.8 se representa la comparación entre los valores pronosticados y medidos para la segunda probeta realizada. Aunque al final del círculo (para un ángulo superior

a 290°) se observan grandes desviaciones (la máxima es de 53  $\mu\text{m}$ ), el gráfico muestra nuevamente un grado muy alto de concordancia en el resto de ángulos, siendo la desviación promedio de 5,6  $\mu\text{m}$  (incluso teniendo en cuenta las desviaciones locales observadas).

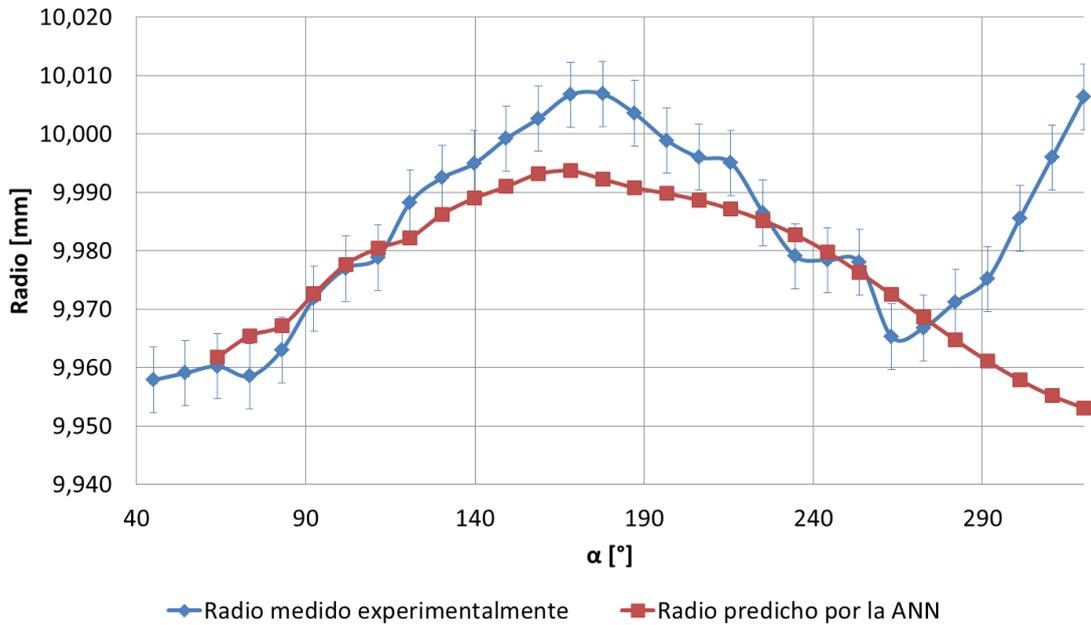


Figura IV.8. Evolución del radio del círculo en función del ángulo para los valores predichos por la RNN y los valores medidos experimentalmente. Los resultados pertenecen a un círculo de radio 10 mm y un espesor de 80 mm en el plano  $j = 5$  ( $Z = -32$  mm).

De nuevo, considerando la incertidumbre de la máquina de medición para las mediciones experimentales, se puede concluir que la red proporciona una predicción muy cercana al proceso de erosión real. Esto implica que el uso de la red desarrollada puede reducir considerablemente las costosas y largas pruebas experimentales de WEDM.

Dados los resultados obtenidos, se decide combinar la RNN desarrollada con una técnica de optimización. En este caso, se usa la técnica de optimización SA, con el objetivo de proponer una trayectoria del hilo alternativa que minimice el error dimensional en las piezas erosionadas. En otras palabras, en lugar de usar un valor constante del radio en el código de la máquina como ocurre en la programación convencional, se plantea el uso de una trayectoria de radio variable para compensar la deformación del hilo en cada ángulo del círculo. Para hacerlo, como ya se ha explicado en el apartado correspondiente del capítulo III, es necesario definir una función objetivo: esta función se usará en combinación con las predicciones de la RNN para alimentar el algoritmo de optimización.

#### IV.3.4 OPTIMIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA DEL HILO MEDIANTE EL USO DE LA TÉCNICA DE SIMULATED ANNEALING

La RNN se ha utilizado para predecir la desviación en las interpolaciones circulares. Y dado que estas predicciones han dado buen resultado, el objetivo final de este trabajo es ir un paso más allá y estimar una nueva trayectoria del hilo (la programada en el control numérico de la máquina) que minimice esta desviación.

El método de optimización SA requiere definir, en primer lugar, la función objetivo que se desea minimizar. Como en este trabajo el objetivo es encontrar las coordenadas óptimas de la trayectoria del hilo que minimice la desviación del radio programado ( $r_p$ ), se puede proponer la minimización del error radial cuadrado para cada posición angular ( $\alpha$ ) en cada plano de medición (ver Figura IV.4 y Figura IV.5).

Por lo tanto, se utiliza una matriz solución ( $R_m$ ) que contiene los valores del radio a programar en cada posición angular  $\alpha$  para cada plano (Ec. IV. 4).

$$R_m(j, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,\alpha} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,\alpha} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{j,1} & r_{j,2} & \cdots & r_{j,\alpha} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. IV. 4}$$

De hecho, siguiendo los mismos criterios usados para modelar el error con la RNN, cada dato se compondrá de los resultados combinados de los 10 planos de medición (ver nuevamente la Figura IV.4). Se ha calculado y minimizado el error cuadrático para todos los planos, de modo que se optimizan todos los radios para todos los resultados de un mismo plano.

Para calcular el error se utiliza el modelo de ANN seleccionado en la sección anterior. De hecho, la solución propuesta por la SA se introduce como una entrada en la red y se calcula el nuevo error. La SA propone otra solución y nuevamente la red se alimenta con la misma. Es decir, se trata de un proceso iterativo que se detiene cuando se cumple una de estas dos opciones: el número de iteraciones ( $i$ ) excede un cierto valor ( $i_{lim}$ ) o las desviaciones ( $R_{j\alpha}$ ) son más pequeñas a un umbral establecido ( $R_{min}$ ). El algoritmo simplificado se muestra en la Figura IV.1 (página 117).

Cabe destacar que, en este caso, los límites establecidos son muy importantes. Tal y como se ha comentado en la sección anterior, la red ha sido entrenada con entradas estáticas (las desviaciones era unos valores medidos); sin embargo, las soluciones del proceso de SA no lo son y, para cada coordenada, la solución es diferente (puesto que trata de optimizar el radio en cada

punto de medición). Por lo tanto, durante el proceso de validación, la red no aprende la relación entre las entradas no estáticas y la salida, es decir, si no se utilizan los límites, el procedimiento de optimización puede encontrar mínimos relativos de la función (matemáticamente posibles) pero que no tienen correlación con los fenómenos físicos (en otras palabras, sin sentido desde el punto de vista del proceso de electroerosión). Esta es la razón por la que se ha establecido una variabilidad del 10 % con respecto del valor del radio nominal como límite para el procedimiento de optimización.

El algoritmo SA proporciona el radio óptimo para cada plano y ángulo. Sin embargo, como el código de la máquina solo requiere un valor del radio para cada posición angular, el radio que se programa finalmente en cada posición angular (en la Figura IV.9 y posteriores) se obtiene al minimizar el error para todos los planos para la posición angular dada (ver Ec. IV. 5 y Ec. IV. 6):

$$e(r_0) = \sqrt{\sum_{j=1}^{10} (r_j - r_0)^2} \quad \text{Ec. IV. 5}$$

$$\frac{\partial e(r_0)}{\partial r_0} = \frac{\partial \sqrt{\sum_{j=1}^{10} (r_j - r_0)^2}}{\partial r_0} = 0 \quad \text{Ec. IV. 6}$$

donde  $r_0$  es el valor óptimo del valor del radio y  $r_j$  es el radio de cada plano.

#### IV.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para validar este método de predicción y corrección del error en círculos se examinan tres casos diferentes, los cuales pueden verse en la Tabla IV.6. Estos tres escenarios, que combinan diferentes radios y espesores, pretenden registrar las situaciones vistas en la sección III.2.2. Las tres probetas (Caso 1, Caso 2 y Caso 3) se han erosionado en la misma máquina de WEDM del apartado IV.3 y en las mismas condiciones de desbaste (ver de nuevo la Tabla IV.2 y la Tabla IV.5), con la trayectoria convencional y, posteriormente, con la trayectoria propuesta por la ANN.

Tabla IV.6. Ensayos de validación.

Ensayo	$h$ [mm]	$r_p$ [mm]
Caso 1	80	10
Caso 2	50	4
Caso 3	100	3

El primero de los casos estudiados (Caso 1) es un círculo de radio 10 mm en un espesor de pieza de 80 mm. Este binomio radio espesor se relaciona con una situación de pequeño error en la pieza, incluso cuando se usa la tecnología convencional. Esto es así porque el radio erosionado es lo suficientemente grande como para que la deformación del hilo debido a esta causa sea pequeña, similar a la que ocurre al cortar una línea recta. El Caso 2 se corresponde con una situación intermedia de erosión de un círculo de radio 4 mm y espesor de pieza de 50 mm. Por último, en el Caso 3 se corta en un espesor de pieza de 100 mm un círculo de radio 3 mm. Esta sería una situación en la que la envolvente del hilo tiene más probabilidad de generar un error en la pieza debido a la brusca variación en la dirección del mismo.

Los indicadores seleccionados para la validación de esta propuesta son dos. Por un lado, la desviación promedio y máxima del radio  $\sigma$ , lo que es lo mismo, la comparación entre las probetas cortadas con la trayectoria convencional del hilo y las erosionadas con la trayectoria optimizada y variable propuesta. Las desviaciones promedio y máxima se representan para cada plano de medición (ver Figura IV.4), y se obtienen promediando o maximizando, respectivamente, las desviaciones para cada posición angular a lo largo del círculo en cada plano (ver Figura IV.5). Por otro, el coeficiente de variación (*Coefficient of Variation, CV*) para cada probeta en el plano medio, definido mediante la Ec. IV. 7,

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \qquad \text{Ec. IV. 7}$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar de los puntos medidos en el plano medio (plano número 5) y  $\mu$  es el valor medio de los datos en dicho plano.

La Figura IV.9.a y la Figura IV.9.b representan las desviaciones promedio y máxima del radio para cada plano de medición, correspondientes al Caso 1 (radio 10 mm y espesor de pieza 80 mm).

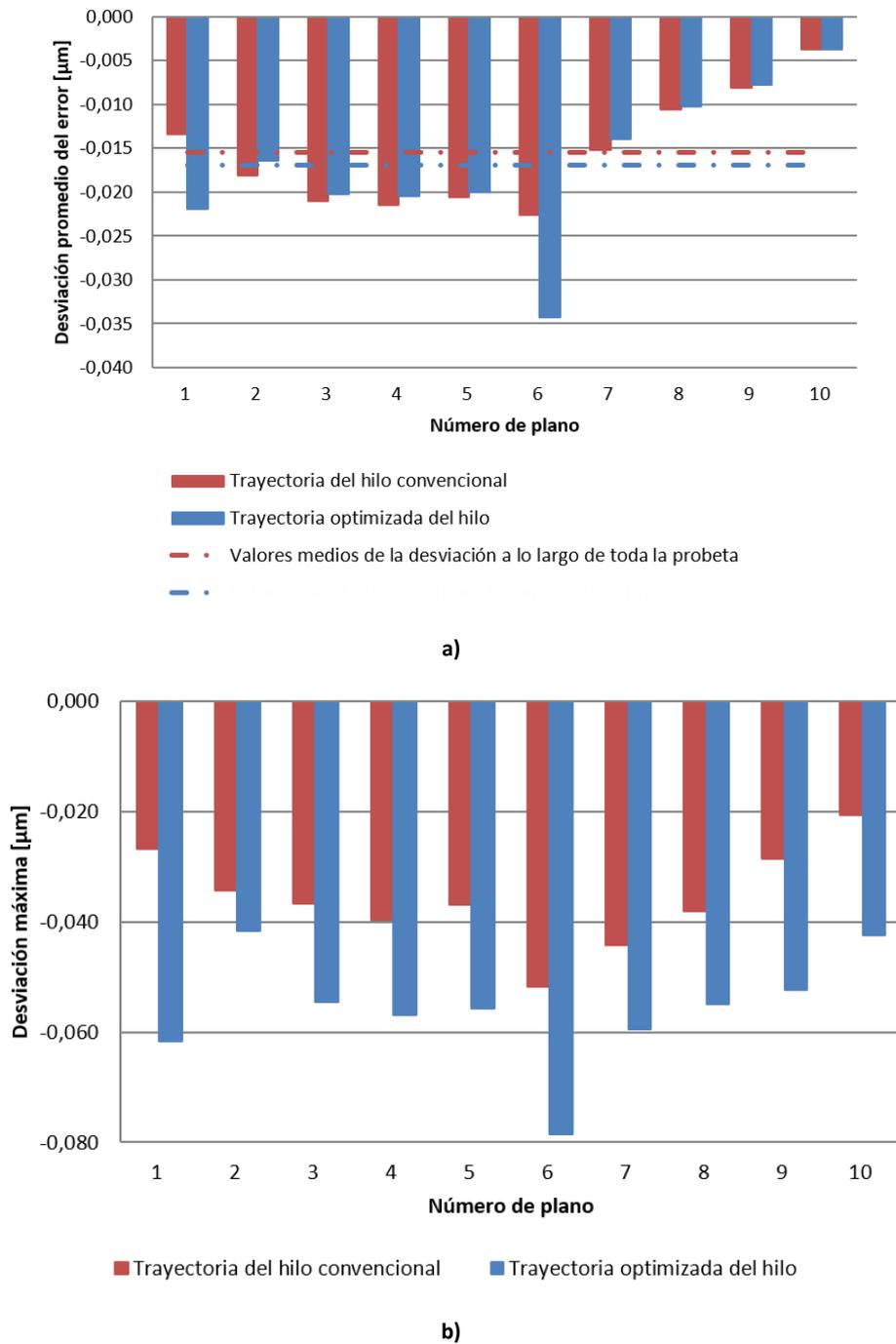


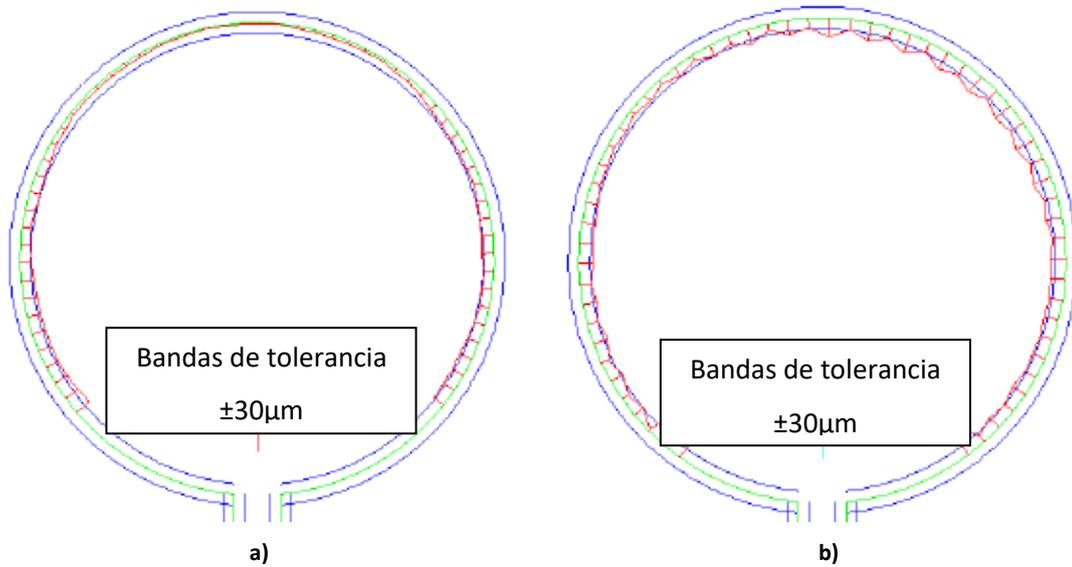
Figura IV.9. Desviación del radio en función del plano medido a lo largo del círculo para el Caso 1 (radio de 10 mm y espesor de 80 mm): a) desviación promedio; b) desviación máxima. Rojo: probeta cortada con la trayectoria del hilo convencional. Azul: probeta cortada con la trayectoria optimizada del hilo.

Los planos 1 y 10 corresponden a los planos superior e inferior de la probeta, mientras que el plano 5 representa un plano central de la misma. Los resultados mostrados en color rojo representan la desviación radial de las medidas en las muestras cortadas usando la trayectoria convencional, mientras que los resultados en color azul corresponden al corte realizado con la trayectoria optimizada de radio variable. Tal y como ya se ha indicado en un párrafo anterior, esta es una situación de bajo riesgo de error en la pieza, debido a que la curvatura de la trayectoria es baja, cercana a la de una interpolación lineal.

El error en la pieza es muy similar usando ambas estrategias: se observa el patrón habitual en este tipo de geometría, en el cual las desviaciones son más pequeñas en el centro del círculo, aumentando en las zonas de entrada y salida del mismo. La desviación promedio (ver líneas discontinuas de la Figura IV.9.a) para los diez planos es de  $-15\ \mu\text{m}$  para la probeta erosionada con la trayectoria convencional, mientras que asciende a  $-17\ \mu\text{m}$  en la cortada con la trayectoria optimizada.

En cuanto al otro indicador, el coeficiente de variación (CV), es de 0,11 % para la probeta convencional, siendo ligeramente mayor (0,16 %) en el caso de la trayectoria optimizada. Estos datos son coherentes con la explicación anterior, en la que se argumentaba que para un radio grande hay poco margen de mejora. En la mayoría de los planos, los resultados promedio son solo ligeramente mejores cuando se usa la estrategia optimizada. Se observa un efecto local en solo dos de los planos (planos 1 y 6), en los que las desviaciones son claramente mayores en el caso optimizado. Estos errores puntuales, sin embargo, no afectan a la medición general y a la funcionalidad de la pieza.

La Figura IV.9.b recoge la información correspondiente a los valores de desviación máxima. Se puede observar que estos valores siguen una tendencia similar a la de los valores promedio. A la vista de los resultados, se puede confirmar que se puede lograr poca o ninguna mejora con respecto a la tecnología existente al cortar radios de baja curvatura.



**Figura IV.10. Desviación radial a lo largo del círculo en el plano de medida número 5 (plano central de la probeta) para el Caso 1: a) probeta cortada con la trayectoria convencional; b) probeta cortada con la trayectoria optimizada.**

Para visualizar y comprender mejor el significado de los resultados, en la Figura IV.10 se representa la desviación radial para cada posición angular a lo largo del círculo para el plano de medición número 5, es decir, un plano central del espesor de la pieza. Más concretamente, en la Figura IV.10.a se presentan los resultados de la trayectoria convencional y en la Figura IV.10.b la optimizada. Ambos círculos siguen un patrón similar. Los errores más grandes tienden a concentrarse en la entrada y en la salida del círculo. Inspeccionando más detenidamente estas regiones, es posible observar que las desviaciones promedio son muy similares:  $-30\ \mu\text{m}$  en el caso de las probetas cortadas utilizando la trayectoria convencional y  $-31\ \mu\text{m}$  en el caso de las cortadas con la optimizada. La región central del círculo presenta desviaciones menores:  $-11\ \mu\text{m}$  como promedio para la estrategia convencional y  $-9\ \mu\text{m}$  para la nueva propuesta.

Como ya se ha comentado, el Caso 1 no impone condiciones estrictas y puede resolverse de manera óptima con la estrategia de erosión convencional. Sin embargo, cuando el radio es más pequeño hay grandes desviaciones, lo que puede provocar que la pieza no esté dentro de unas tolerancias aceptables. El Caso 2 representa una situación intermedia en la que el radio se ha reducido a 4 mm junto con el espesor (50 mm), lo que aumenta la rigidez y reduce la deformación del hilo. La Figura IV.11 y la Figura IV.12 representan los resultados obtenidos para este ensayo.

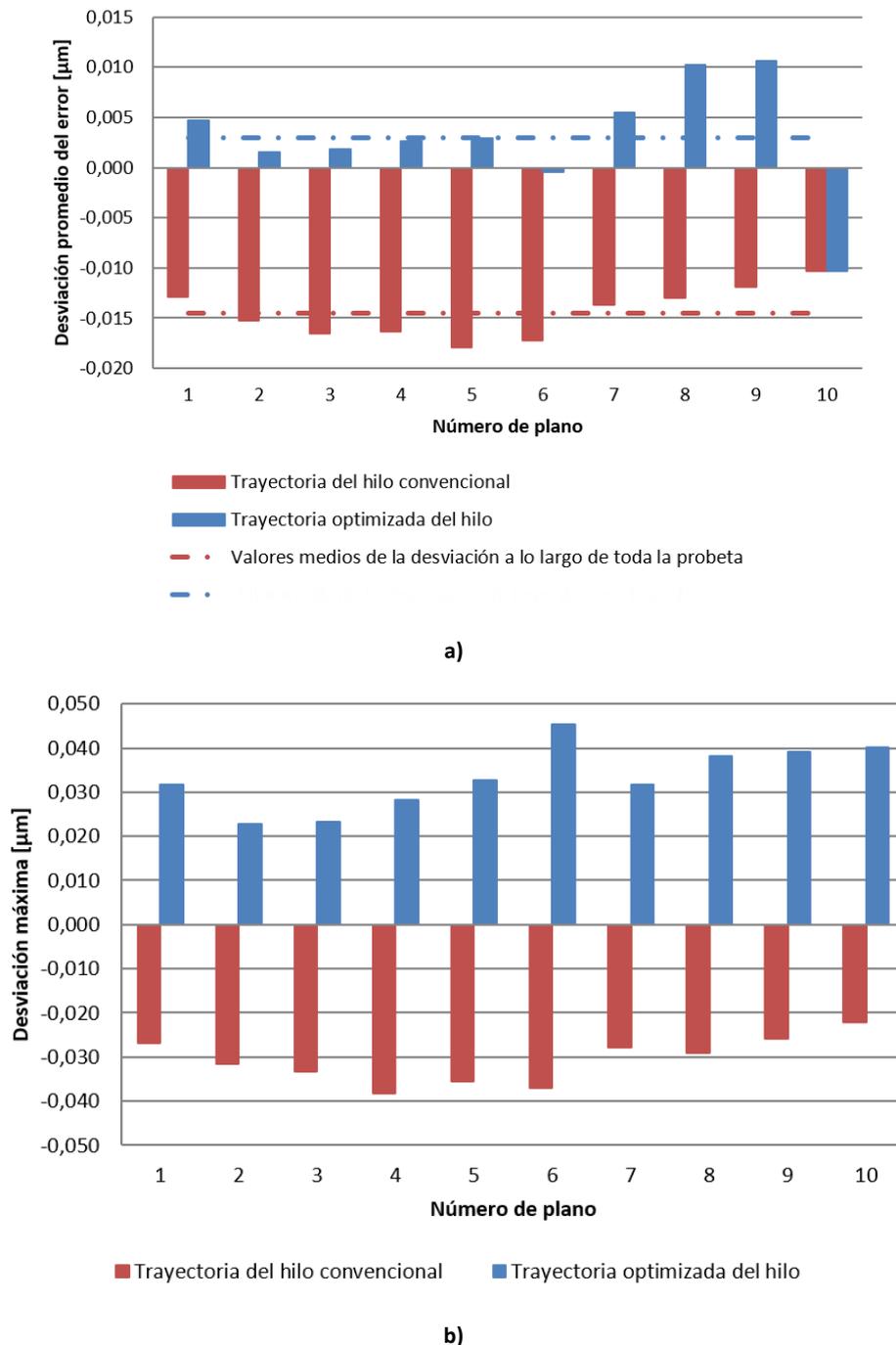


Figura IV.11. Desviación del radio en función del plano medido a lo largo del círculo para el Caso 2 (radio de 4 mm y espesor de 50 mm): a) desviación promedio; b) desviación máxima. Rojo: probeta cortada con la trayectoria del hilo convencional. Azul: probeta cortada con la trayectoria optimizada del hilo.

En este caso sí pueden observarse las mejoras de la aplicación de esta técnica de optimización. La desviación promedio, como se muestra en la Figura IV.11, se ha reducido hasta en un 80 % (de -15 μm a 3 μm), mientras que la desviación en cada plano individual también se ha reducido significativamente. El CV para las probetas convencionales es ahora de 0,27 % (mayor que en el Caso 1, lo que significa que las desviaciones en este caso son más altas), mientras que para la estrategia de optimización de radio variable se reduce a un 0,23 %.

Un efecto positivo adicional que debe tenerse en cuenta es el hecho de que, al utilizar esta estrategia, todos los errores (excepto el correspondiente al plano 10) están por encima del valor nominal mientras que, en la convencional, todos lo están por debajo. Esto significa que, al igual que se ha explicado en el capítulo I, después del corte de desbaste queda un exceso de material que puede ser eliminado mediante los cortes de repaso.

El corte de la sección transversal del plano número 5 confirma las mejoras observadas en la Figura IV.12. Es apreciable cómo, algunos de los resultados de la trayectoria convencional que quedan fuera de la banda de tolerancia en la Figura IV.12.a se han reducido eficazmente con la nueva estrategia y, además, también se mitiga el efecto de un mayor error en la entrada y la salida del círculo. Así, el error promedio en esa zona crítica se ha reducido de  $27\ \mu\text{m}$  a  $9\ \mu\text{m}$ .

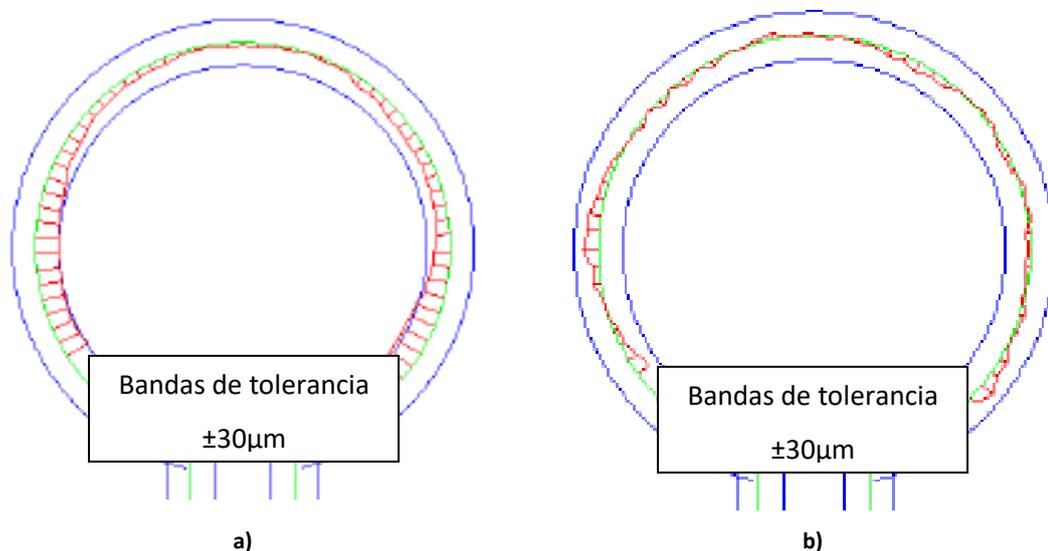


Figura IV.12. Desviación radial a lo largo del círculo en el plano de medida número 5 (plano central de la probeta) para el Caso 2: a) probeta cortada con la trayectoria convencional; b) probeta cortada con la trayectoria optimizada.

Por último, se muestran los resultados correspondientes al Caso 3. Como se ha explicado, este es el caso más exigente, con un radio de 3 mm (lo que supone un cambio de dirección más brusco) y un espesor de pieza de 100 mm, que se traduce en una disminución de la rigidez del hilo, aumentando su deformación. La Figura IV.13y la Figura IV.14 resumen los resultados de este ensayo.

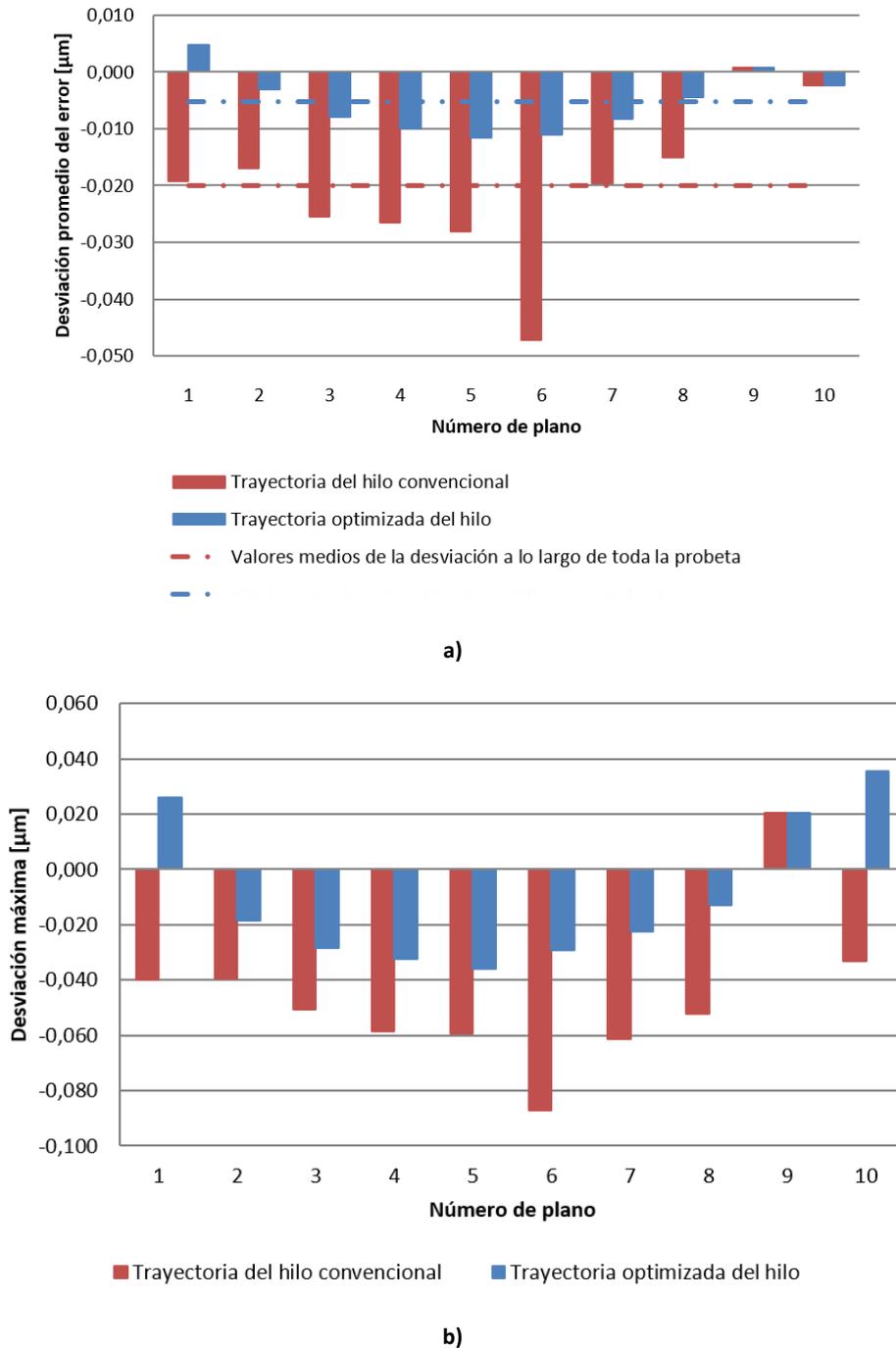
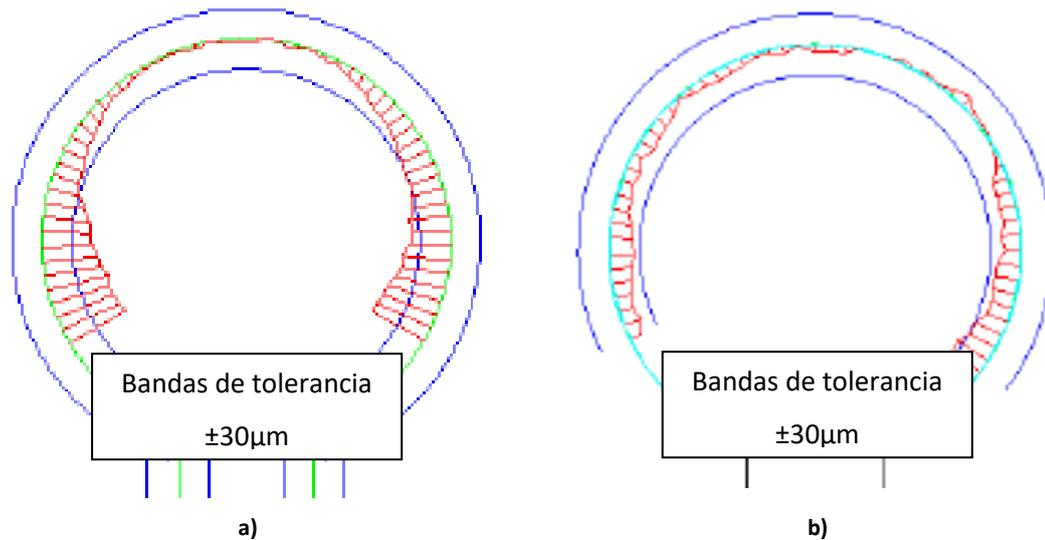


Figura IV.13. Desviación del radio en función del plano medido a lo largo del círculo para el Caso 3 (radio de 3 mm y espesor de 100 mm): a) desviación promedio; b) desviación máxima. Rojo: probeta cortada con la trayectoria del hilo convencional. Azul: probeta cortada con la trayectoria optimizada del hilo.

De nuevo, las mejoras logradas son apreciables: el error absoluto en todos los planos en el caso de la trayectoria optimizada es inferior a 12 μm (cuando utilizando un radio de erosión constante, hasta en 7 de los planos existen errores superiores a 15 μm).



**Figura IV.14. Desviación radial a lo largo del círculo en el plano de medida número 5 (plano central de la probeta) para el Caso 3: a) probeta cortada con la trayectoria convencional; b) probeta cortada con la trayectoria optimizada.**

El valor promedio de las desviaciones se ha reducido de  $-20\ \mu\text{m}$  a  $-5\ \mu\text{m}$ , lo que implica una reducción del 75 %. Los mayores errores se pueden encontrar en los planos centrales de las probetas (planos 4, 5 y 6), con una desviación media de  $47\ \mu\text{m}$  en el caso de la estrategia convencional y de  $12\ \mu\text{m}$  en la optimizada. El CV se ha reducido del 0,61 % al 0,35 %, lo que significa una disminución de un 43 %.

Sin embargo, los casos 2 y 3 presentan patrones de comportamiento similares, es decir, cuanto menor es el radio más pronunciadas son las desviaciones. Las variaciones promedio entre valores nominales y valores reales en la zona de entrada y/o salida son de  $-43\ \mu\text{m}$  en el caso de las probetas convencionales y de  $-20\ \mu\text{m}$  en el caso de las muestras erosionadas con la trayectoria optimizada. Como en los dos casos anteriores, la región central del círculo presenta desviaciones menores: un valor promedio de  $-13\ \mu\text{m}$  en la estrategia convencional y de  $3\ \mu\text{m}$  para la nueva propuesta de radio optimizado.

En la Tabla IV.7 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en este apartado: a partir de las pruebas de validación de esta propuesta se puede concluir que la nueva estrategia de radio variable es particularmente efectiva en aquellos casos en los que el error inducido en la pieza debido a la deformación del hilo es mayor.

Tabla IV.7. Resumen de los resultados de validación.

Caso	R [mm]	H [mm]	Desviación media [ $\mu\text{m}$ ]			CV [%]	
			Trayectoria convencional del hilo	Trayectoria optimizada del hilo	Reducción de la desviación [%]	Trayectoria convencional del hilo	Trayectoria optimizada del hilo
1	10	80	-15	-17	-13	0,11	0,16
2	4	50	-15	3	80	0,27	0,23
3	3	100	-20	-5	75	0,61	0,35

En otras palabras, cuando el radio es suficientemente grande, la tecnología está optimizada para las trayectorias en cortes rectos. En estos casos no se aprecian progresos evidentes con la nueva estrategia, aunque queda demostrado que el error puede predecirse con precisión utilizando la RNN propuesta (evitando así la gran batería de ensayos necesaria de la página 73). Sin embargo, cuando el hilo debe erosionar un radio pequeño o un gran espesor (casos en los que aumenta su deformación) la nueva estrategia reduce, en gran medida, el error con respecto a la técnica de corte convencional. En el caso más exigente (Caso 3) la Tabla IV.7 muestra que el CV se ha reducido hasta en un 43 %.

## IV.5 CONCLUSIONES

De la predicción del error y posterior optimización de la trayectoria realizada en este capítulo sobre las interpolaciones circulares se pueden extraer las conclusiones siguientes:

- Puesto que la precisión del proceso de WEDM solo puede predecirse mediante pruebas experimentales costosas y que requieren mucho tiempo, y dado que las ANNs han demostrado su capacidad para modelar fenómenos altamente no lineales en otros procesos de fabricación, se ha utilizado una red de tipo Elman-RNN para la predicción del error de las trayectorias circulares.
- El entrenamiento de la red se ha llevado a cabo utilizando información de las medidas realizadas en el corte de probetas con trayectorias circulares y los resultados revelan que la topología de red con el menor error de *mMAPE* tiene siete neuronas en la capa oculta y dos unidades de retardo en la retroalimentación.
- Al comparar las predicciones generadas por la red con las desviaciones medidas en las probetas se observan desviaciones medias máximas por debajo de  $5,6 \mu\text{m}$ . Teniendo en cuenta que la incertidumbre expandida de las mediciones con la MMC es  $\pm 5 \mu\text{m}$ , se

puede concluir que las predicciones muestran un alto grado de concordancia con los valores experimentales.

- Combinando las predicciones de la RNN con la técnica de optimización *Simulated Annealing*, se pueden diseñar trayectorias de radio optimizado, minimizando las desviaciones debidas a las deformaciones del hilo. El algoritmo sigue un proceso iterativo que optimiza la solución obtenida por la RNN minimizando el error.
- Se ha comparado la precisión de las probetas erosionadas utilizando esta estrategia con las realizadas de forma convencional (radio constante). Se analizan tres casos de estudio. Los resultados muestran que, en radios amplios (Caso 1), no se han registrado mejoras notables. Sin embargo, cuando el radio es pequeño y el espesor de pieza es grande la eficiencia de la propuesta mejora, en otras palabras, el error disminuye en las situaciones en las que la envolvente del hilo sufre mayores deformaciones: en estos casos (Caso 3) la desviación promedio ha disminuido hasta en un 80 % (reduciendo el CV en un 43 %).

En este capítulo ha quedado demostrada la eficiencia de utilización de las ANNs para resolver un problema en WEDM por lo que, en el siguiente (apartado I), se propone utilizar de nuevo esta herramienta para clasificar la estabilidad del proceso.







## V. DETECCIÓN DE EVENTOS EN WEDM EN FUNCIÓN DE LAS SEÑALES OBTENIDAS DEL PROCESO

*Se ha adelantado, tanto en el estado del arte (sección II.3.1) como el capítulo III.5, la importancia de clasificar las descargas, que hasta ahora se ha realizado en función del tiempo de ionización. Sin embargo, esta clasificación es arbitraria, puesto que es dependiente de los criterios de cada autor. Es por ello que, en este apartado, se propone el uso de una ANN, más concretamente una de DL, para la detección de eventos durante el proceso de corte mediante WEDM, de forma que los patrones de comportamiento sean agrupados por este sistema (apartado V.4). Para comprobar la factibilidad de la propuesta se elige como ejemplo de validación un cambio de espesor durante el corte. Por otro lado, se pretende detectar el espesor de pieza mediante el uso, únicamente, del tiempo de ionización de las descargas (apartado V.5).*

### V.1 INTRODUCCIÓN

Durante los próximos apartados, después de resumir el objetivo de este capítulo, se realizará una clasificación de las descargas teniendo en cuenta el tiempo de ionización (apartado V.3), de forma que este análisis ratificará lo que la literatura expuesta en el capítulo II ya ha discutido. Así, a lo largo de la sección V.4, se desarrollará el procedimiento experimental seguido para el uso de las ANNs en la detección de patrones de comportamiento durante el proceso de corte y los resultados derivados del entrenamiento realizado. Para ello se utilizará una arquitectura de aprendizaje profundo o DL, que consta de múltiples capas de procesamiento no lineal. Con esta aplicación se evita la clasificación arbitraria de las señales empleadas hasta la fecha, puesto que es la arquitectura de la red la que la realizará. Por otra parte, se utilizará este tiempo de ionización en la predicción del espesor de pieza (apartado V.5). Finalmente, se presentarán las conclusiones que se pueden extraer de ambas aplicaciones (título V.6).

## **V.2 OBJETIVO**

El objetivo de este capítulo es la propuesta de dos aplicaciones diferentes para la detección de eventos durante el proceso de corte por WEDM, en función de las señales obtenidas durante el mismo. Para ello se va a proceder de la siguiente forma:

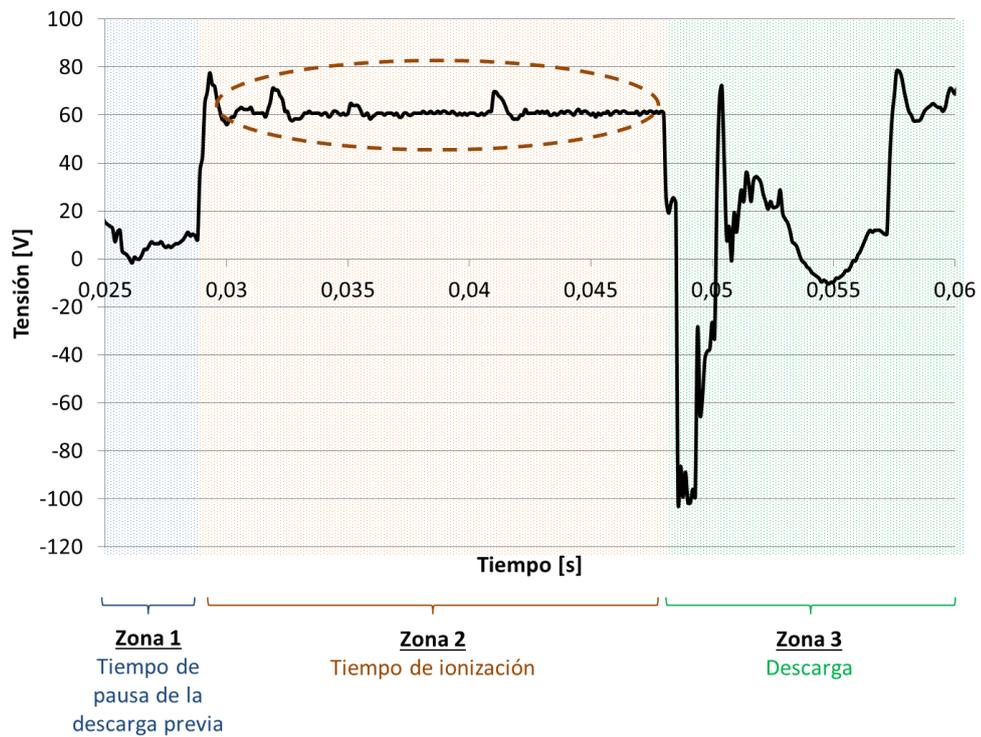
- se introducen las señales recogidas en una ANN para que sea esta la que detecte cambios en los patrones de comportamiento durante un evento del proceso y;
- se detecta el espesor de pieza utilizando únicamente el tiempo de ionización de las señales obtenidas.

Por tanto, y como paso previo a la descripción del procedimiento experimental empleado para la consecución de estos dos objetivos, en el próximo apartado se comprobará la clasificación de las descargas propuesta en la literatura.

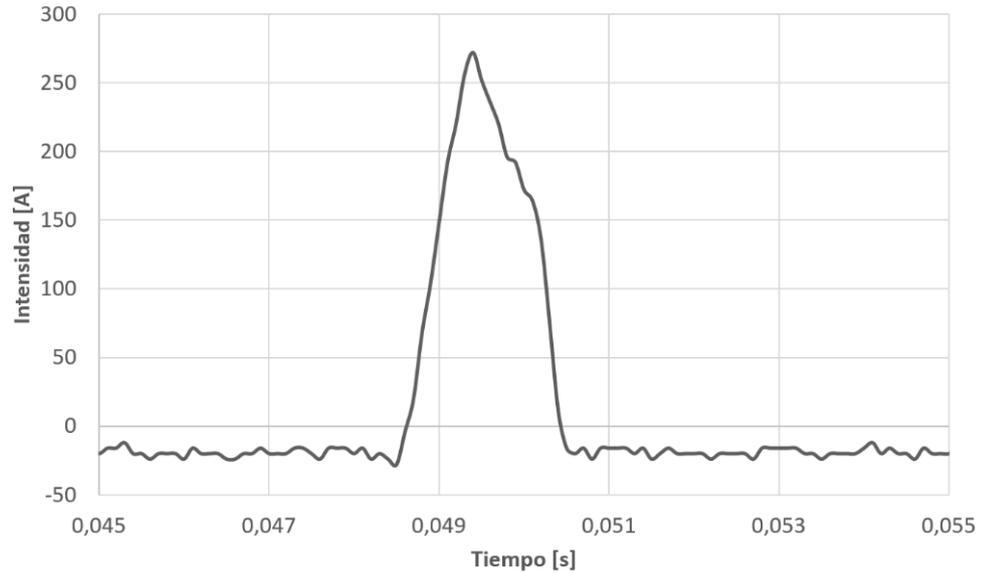
## **V.3 COMPROBACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS DESCARGAS PROPUESTA EN LA LITERATURA**

A lo largo de estas líneas se recogen los diferentes tipos de descargas obtenidos en el proceso de corte, con la finalidad de comprobar la clasificación de las descargas propuesta en la literatura, como es el caso de la realizada recientemente por Caggiano et al. [Caggiano, 2015].

Como ejemplo, en la Figura V.1.a se muestra la señal de tensión de una descarga, donde se pueden visualizar tres zonas: la Zona 2 es el tiempo de ionización de la misma (tiempo en el que el valor de tensión se sitúa por encima del valor umbral establecido por las tablas de tecnología, 60 V para este caso), la Zona 3 es la propia descarga y, por último, si se le suma el tiempo de pausa asociado (en la figura se representa el de la descarga anterior mediante la Zona 1) se obtiene una descarga completa. Asimismo, en la Figura V.1.b se observa la forma característica de la señal de intensidad, aunque no será estudiada en este trabajo.



a)



b)

Figura V.1. Evolución durante una descarga singular de: a) la señal tensión; b) la señal de intensidad.

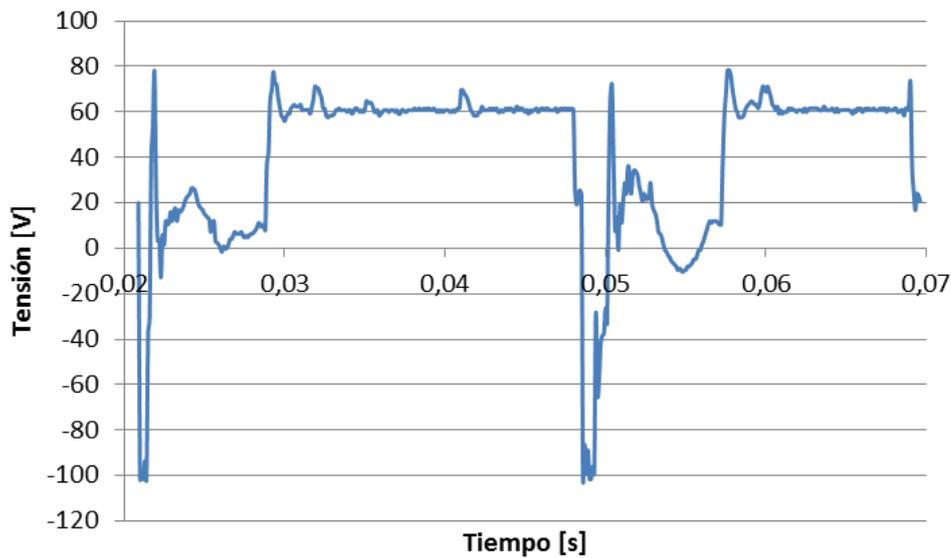
Así, se han diferenciado los tipos de señal que aparecen en la Tabla V.1. Para elaborar esta tabla se han tenido en cuenta, a su vez, la clasificación de las señales de tensión previa realizada en el apartado III.5.

**Tabla V.1. Tipos de descargas según el tiempo de ionización.**

Tipo de descarga	Tiempo de ionización [ $\mu\text{m}$ ]
<i>D00</i>	$t_{on} = 0$
<i>D0</i>	$0 < t_{on} < 3$
<i>D1</i>	$3 < t_{on} < 5$
<i>D2</i>	$5 < t_{on} < 10$
<i>D3</i>	$10 < t_{on}$

Los ejemplos gráficos de las descargas de tensión pueden verse en las figuras que se muestran a continuación (empezando por la Figura V.2 hasta la Figura V.6). Una primera diferenciación radica en si el tiempo de ionización es nulo (*D00*) o no: una sub-clasificación de las mismas se realiza en función de cuánto mayor es este tiempo de ionización.

El primer grupo de descargas analizadas son las de tipo *D3*, que se caracterizan por disponer de un tiempo de ionización mayor de 10  $\mu\text{s}$ , tal y como puede observarse en la Figura V.2.



**Figura V.2. Señal de tensión de la descarga de tipo *D3*.**

Asimismo, las descargas tipo *D2* son aquellas que disponen de un tiempo de ionización que oscila entre los 5  $\mu$ s y los 10  $\mu$ s (Figura V.3), mientras que, en las descargas de tipo *D1*, este tiempo es menor de 5  $\mu$ s pero mayor a 3  $\mu$ s (Figura V.4).

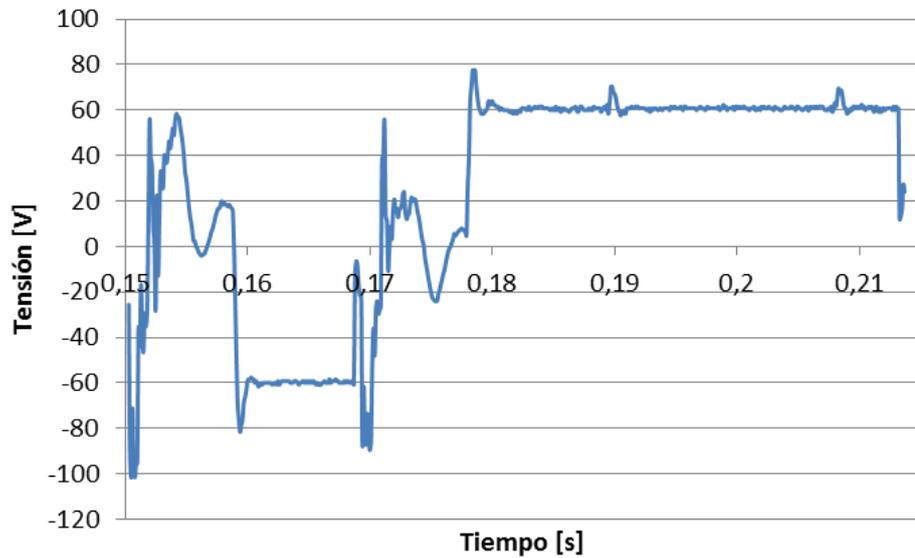


Figura V.3. Señal de tensión de la descarga de tipo *D2*.

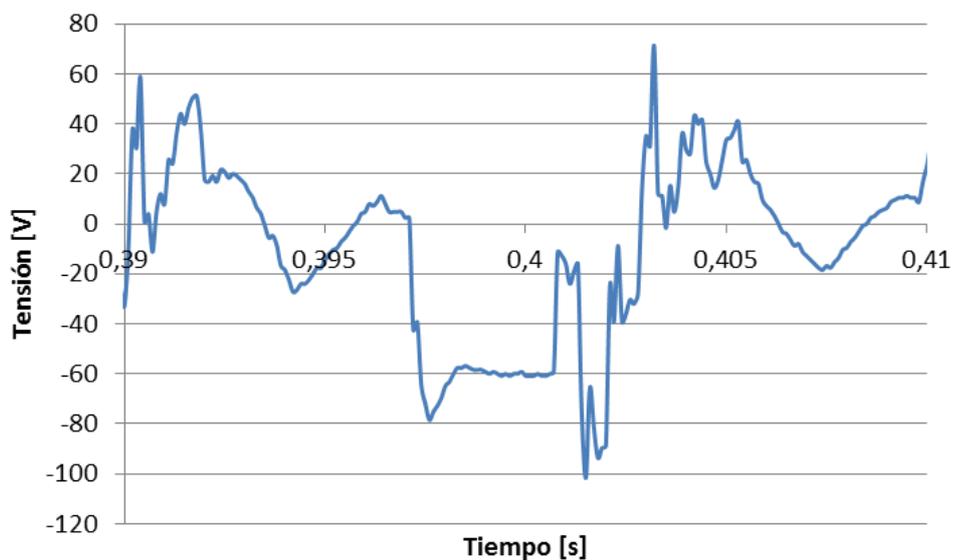


Figura V.4. Señal de tensión de la descarga de tipo *D1*.

Cuando el tiempo de ionización es no nulo, pero no supera el valor de  $3 \mu\text{s}$ , la descarga es de tipo *D0*. Así, en la Figura V.5 se representa el ejemplo de una señal de este tipo.

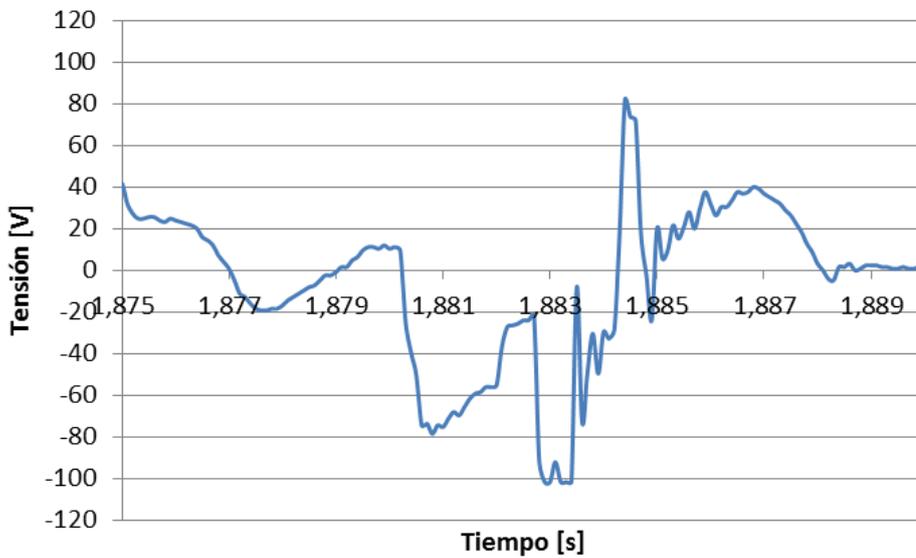


Figura V.5. Señal de tensión de la descarga de tipo *D0*.

Por último, las descargas con tiempo de ionización nulo, como ya se ha comentado, vienen definidas por la denominación *D00* (ver Figura V.6).

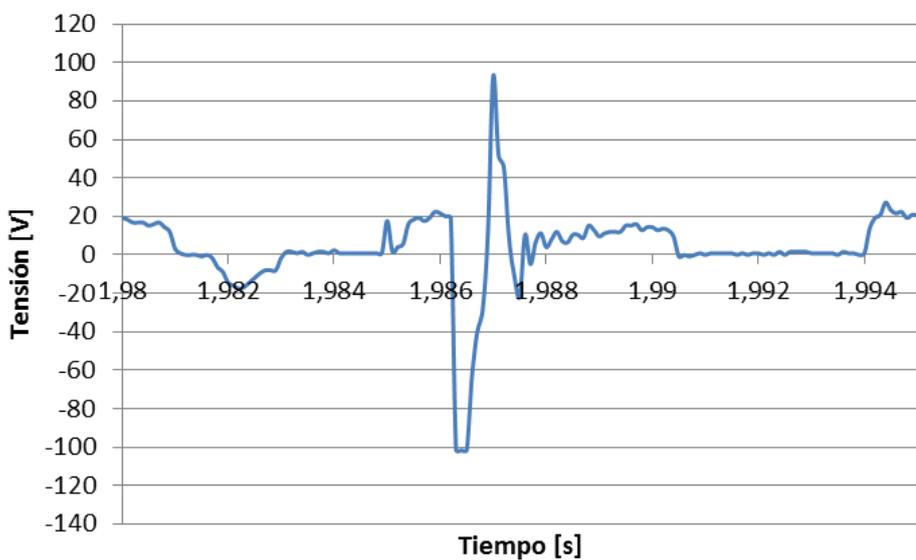


Figura V.6. Señal de tensión de la descarga de tipo *D00*.

Esta misma clasificación se puede aplicar a las descargas existentes en una secuencia de señales. Como ejemplo, se muestra en la Figura V.7, las señales recogidas durante 2 ms de corte de una pieza de acero de 100 mm de espesor, según las características de corte de desbaste de la Tabla V.2.

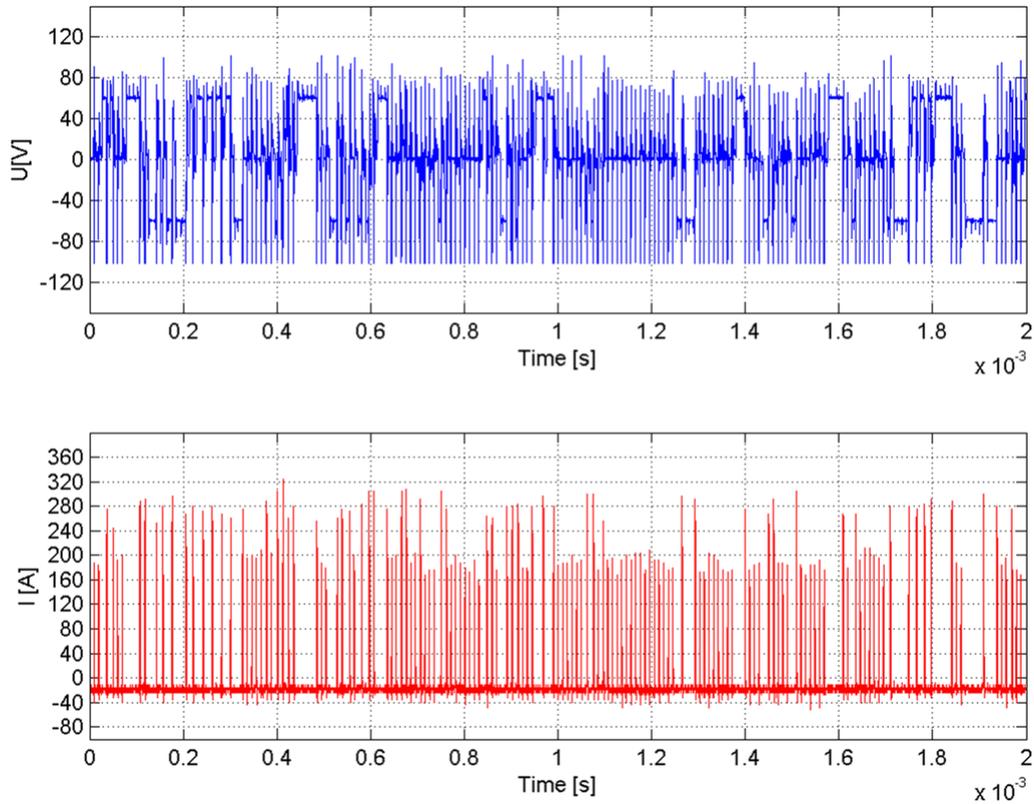


Figura V.7. Ejemplo de una secuencia de descargas recogida mediante un osciloscopio: señal de tensión (azul) y señal de intensidad (rojo).

Tabla V.2. Parámetros de corte utilizados en el ejemplo de la secuencia de descargas.

Parámetros de corte	Valor
Espesor [mm]	100,0
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	9,0
Tiempo de impulso [ $\mu$ s]	1,2
Intensidad [A]	5,0
Tensión de circuito abierto [V]	60,0
Presión del dieléctrico [bar]	17,0
Tensión del hilo [kg]	1,2

Estas señales han sido registradas mediante el uso de un osciloscopio de alta frecuencia (Tektronix DPO 5034B) con sus respectivas sondas: una de tensión (Tektronix TMDPO200) y otra de intensidad (PEM CWT 6), con las condiciones mostradas en la Tabla V.3. Obtener una

secuencia en lugar de una descarga puntual posibilita el registro de cualquier evento durante el periodo de ionización de la misma.

**Tabla V.3. Parámetros del osciloscopio utilizados.**

Parámetros del osciloscopio		Valor
Frecuencia de muestreo [MS/s]		10,0
Longitud de muestreo [-]		20.000,0
Escala horizontal [ $\mu$ s]		200,0
Resolución [ns]		100,0
Duración del ensayo [ms]		2,0
Rango de tensión [V]		$\pm 120,0$
Escala vertical [V/div]	Tensión	20,0
	Intensidad	0,5

Para poder analizar de forma más eficiente estas descargas se ha desarrollado un programa con el software Matlab® que, para cada secuencia registrada, permite obtener el conjunto de datos que se indican a continuación:

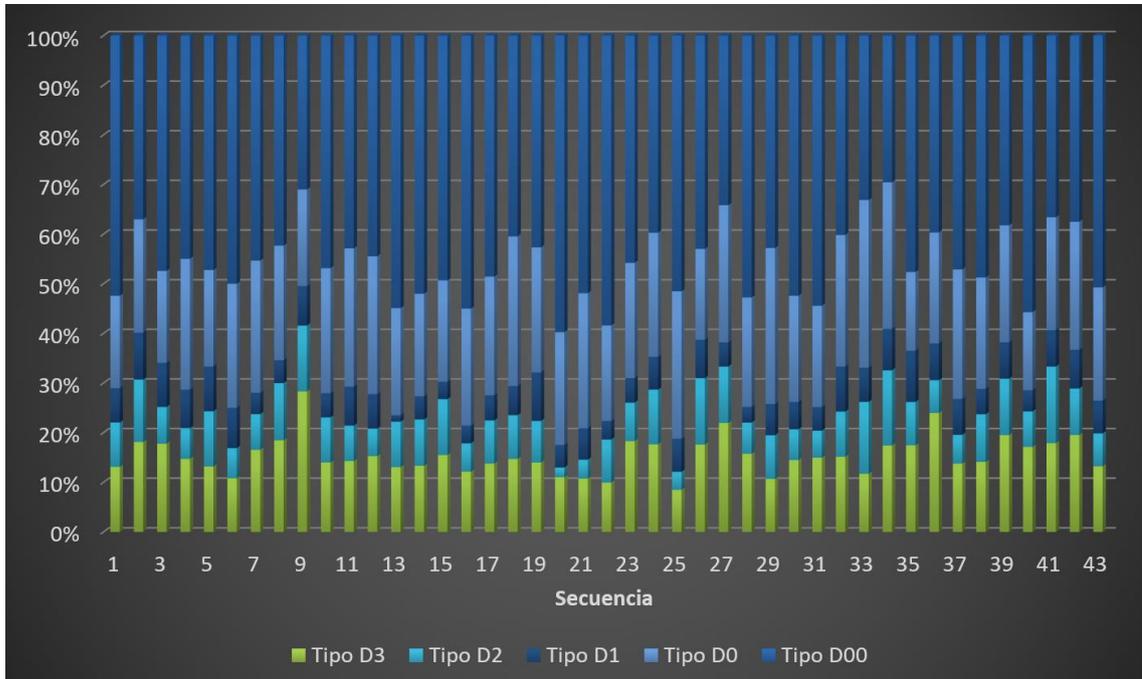
- enumeración de cada una de las descargas para su identificación
- el tiempo de inicio y final de cada intervalo, es decir, el tiempo que transcurre entre los dos instantes que delimitan la descarga actual
- el tipo de descarga
- el tiempo de ionización

Al realizar esta misma clasificación para un ensayo compuesto por un conjunto de secuencias (en lugar de una única) esta aplicación de software, a su vez, muestra el porcentaje promedio de las diferentes descargas existentes en cada secuencia. Asimismo, genera una tabla resumen de las secuencias registradas para una mayor facilidad de análisis, tal y como muestra Tabla V.4.

**Tabla V.4. Ejemplo del resumen de las secuencias clasificadas en un mismo ensayo.**

Tipo [%]		$t_{on}$ [ns]		
		Mín.	Máx.	Promedio
<i>D3</i>	16,92	10500	60300	27019,05
<i>D2</i>	8,32	5100	8800	6942,86
<i>D1</i>	5,91	3100	4700	3837,50
<i>D0</i>	22,60	100	2900	1500,00
<i>D00</i>	46,25	0	0	0,00
<b>Total</b>	<b>43 sec.</b>	<b>0</b>	<b>60300</b>	<b>5366,18</b>

Por último, con este conjunto de datos también se genera el gráfico de la Figura V.8, que es una forma de ver fácilmente el porcentaje de cada tipo de descargas en cada secuencia extraída y la fluctuación que estas tienen entre las mismas.



**Figura V.8. Ejemplo de un ensayo de 43 secuencias de la señal de tensión en el corte de una pieza de espesor 100 mm.**

Se puede observar en este ejemplo consistente en 43 secuencias, para unas condiciones de corte de desbaste en un espesor de pieza de 100 mm, que las descargas con tiempo de ionización mayor de 3  $\mu$ s forman aproximadamente el 30 % del número total de las mismas (separándolas en D3, 16,92 %; D2, 8,32 %; y D1, 5,91 %). Las descargas tipo D0 son el 22,60 %, mientras que las de tipo D00, las más numerosas, representan casi la mitad (46,25 %). Como ya se ha mencionado, estos resultados son un ejemplo para un espesor de pieza de 100 mm; sin embargo, los ensayos llevados a cabo en otros espesores (20 mm, 40 mm, 60 mm y 80 mm) indican que se obtienen resultados prácticamente idénticos (se ha comprobado que existe una variabilidad menor de 7 puntos porcentuales entre los mismos tipos de descargas en distintos espesores).

Por tanto, se puede afirmar que, en un corte recto en condiciones óptimas, aproximadamente la mitad de las descargas tienen tiempo de ionización nulo. Por el contrario, casi un tercio de las mismas tienen un tiempo de ionización mayor a 3  $\mu$ s, de las cuales entorno al 15 % tienen un tiempo mayor a 10  $\mu$ s.

## **V.4 USO DE REDES NEURONALES PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DURANTE EL PROCESO DE CORTE POR WEDM**

Como se ha comprobado en el capítulo anterior, la clasificación de las descargas (en función del tiempo de ionización) realizada en este trabajo concuerda con la encontrada en la literatura, si bien los rangos de agrupación son arbitrarios, es decir, quedan completamente a elección del autor. En este apartado se establece como hipótesis que una ANN de tipo DL pueda detectar eventos durante el proceso de corte por WEDM mediante las señales registradas durante el mismo. Por esta razón se propone un ejemplo para validar esta hipótesis: un corte con un cambio de espesor.

Se ha elegido una situación como esta puesto que simula las condiciones de una operación industrial típica de WEDM, en la que los parámetros del proceso no se pueden controlar. En un corte de espesor constante, estos parámetros suministrados por el fabricante de la máquina se aplican a una combinación de factores que incluyen el material y el espesor de la pieza y el tiempo de mecanizado: es decir, la combinación de parámetros es óptima para su aplicación. Sin embargo, estas condiciones pueden variar y, como resultado, los parámetros originalmente seleccionados (que generalmente incluyen más de 30 variables) ya no son la combinación idónea para estas nuevas condiciones de corte en el nuevo espesor.

Cada descarga individual contiene información valiosa sobre el rendimiento del proceso por lo que, si existe una degradación durante el mismo, esta debe manifestarse en el comportamiento de las mismas. Sin embargo, es imposible realizar este estudio mediante técnicas tradicionales, debido a la gran cantidad de datos de naturaleza estocástica existentes, así que se utiliza una ANN para interpretarlos.

### **V.4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

A continuación, se describe el procedimiento experimental empleado para la detección de eventos con una ANN, mediante el uso de reconocimiento de patrones durante el proceso de corte.

Para que este reconocimiento de patrones se realice de forma correcta es indispensable la obtención de una cantidad de datos de entrada suficientemente amplia, por tanto, la evaluación del rendimiento del proceso puede ser mucho más eficiente si se consiguen recopilar grandes cantidades de información durante el corte (con tasas de muestreo de hasta 10,0 MS/s, como

se explica a continuación). Disponer de una gran base de datos abre la posibilidad de entrenar tipos de ANNs de DL, las cuales ya han demostrado su excelencia en otros campos [Krizhevsky, 2012] [Ciresan, 2013 1]. A fin de utilizar la mejor opción se prueban dos tipos de arquitecturas de redes neuronales; sin embargo, puesto que estas ANNs se han utilizado como una herramienta de trabajo, el análisis de su arquitectura no se ha tenido en cuenta en este estudio.

Para adquirir los datos necesarios, los cuales se introducirán en la ANN seleccionada se ha diseñado, como ejemplo de aplicación, un experimento controlado del corte de una pieza con una variación repentina de espesor de 20 mm (de un espesor de partida de 100 mm a otro de 80 mm). La elección de este valor radica en que, si la ANN es capaz de reconocer cambios en el comportamiento en estas señales, lo hará en las que se obtengan de una variación mayor.

La batería de ensayos se ha realizado con las mismas herramientas y material utilizados hasta ahora: una máquina ONA AX3, un hilo de latón recubierto (CuZn37) de 0,25 mm de diámetro y un acero AISI D2. Puesto que el corte comienza en un espesor de 100 mm, se utilizan los mismos parámetros que en el apartado anterior (ver de nuevo la Tabla III.2), correspondientes a un corte de desbaste con las condiciones iniciales de presión de fluido dieléctrico óptimas (17 bar). En la Figura V.9 se muestra el esquema del proceso de corte, que pasa por la recogida de señales en cada una de las zonas delimitadas.

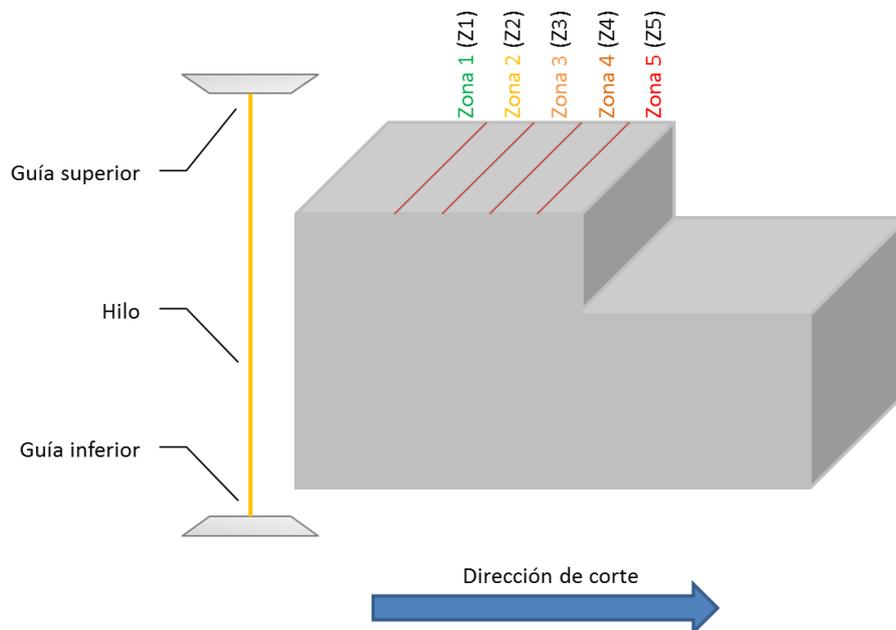


Figura V.9. Esquema del proceso de corte durante el cambio de espesor.

Los ensayos se han llevado a cabo únicamente utilizando señales de tensión (ver de nuevo el conjunto de señales superior de la Figura V.7) cuyos resultados son suficientes, tal y como se verá más adelante; es decir, se están utilizando la mitad de datos disponibles por cada señal recogida (se recuerdan de nuevo las condiciones de registro empleadas, que son las de la Tabla V.3).

Cuando el hilo se acerca al punto de cambio de espesor, el corte comienza a degradarse debido a la falta de presión del fluido dieléctrico. Esto provoca un cambio en el patrón de comportamiento de las descargas de tensión con respecto a las que tienen lugar durante el corte estable, en condiciones óptimas. Con intención de realizar un análisis sistemático de esta conducta, se han recogido diversas señales de tensión en diferentes puntos antes de que se produzca el cambio de espesor. Más concretamente, se han establecido cinco zonas: la primera (Z1) a 5 mm del punto de variación del espesor, la segunda (Z2) a 4 mm, la tercera (Z3) a 3 mm, la cuarta (Z4) a 2 mm y, por último, la quinta (Z5) a 1 mm. En otras palabras, cuanto más se acerque el corte a la zona Z5 más degradado estará el proceso.

En cada una de las zonas de 1 mm de longitud se establece un periodo de grabación de 0,8 mm, para que el osciloscopio pueda reiniciarse durante el tiempo restante. Así, se han registrado un total de 567 secuencias de 2 ms de duración, con una resolución de 100 ns y una velocidad de muestreo de 10,0 MS/s. Esto es, se han podido recoger un valor medio de 140 descargas por secuencia. Además, este proceso se ha repetido 16 veces para acumular un número apropiado de entradas.

Esta base de datos se ha usado para generar tres conjuntos diferentes de los mismos. El primero es el utilizado para estudiar las diferentes arquitecturas de ANNs propuestas para clasificar las secuencias de tensión de cada zona. El segundo conjunto de datos se ha empleado para verificar el funcionamiento de la misma en la clasificación de dichas secuencias para las zonas 1, 3 y 5. Y, finalmente, el tercero de ellos es con el que se ha verificado el rendimiento de la arquitectura de red para la tarea de clasificar las secuencias de las zonas primera y quinta (lo cual es una tarea menos ambiciosa, puesto que la degradación del proceso será más visible). Al estar equilibrado el conjunto de datos (Z\_all), el número de secuencias para cada clase es el mismo. Para los otros dos casos, se han utilizado todos los datos disponibles para evitar la reducción significativa del conjunto de datos de entrenamiento, tal y como se puede ver en la Tabla V.5.

**Tabla V.5. Datos utilizados.**

Notación	Zonas	Secuencias empleadas
Z_all	1, 2, 3, 4, 5	2835 (5 x 567)
Z_135	1, 3, 5	2088 (688 + 677 + 723)
Z_15	1, 5	1411 (688 + 723)

Una vez entrenada la red se muestran, en el apartado siguiente, los resultados obtenidos, tanto desde el punto de vista del rendimiento de la ANN como del proceso, que es el objeto de estudio de este trabajo.

#### V.4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El modelo se ha evaluado dividiendo el conjunto de datos (Z\_all) en las categorías de entrenamiento (70 %), validación (15 %) y testeo (15 %). Estos tres subconjuntos están equilibrados, es decir, la cantidad de secuencias de cada zona es la misma. Una vez entrenado el modelo, se ha medido el rendimiento del mismo utilizando el conjunto de datos de prueba o testeo, evaluando la precisión, la sensibilidad y el *Valor F*, concepto que se explica más adelante. Se han evaluado diferentes tipos de redes neuronales de DL, que son: una CNN, una GRU, una GRU bidireccional (BiGRU) y una CNN combinada con una GRU (CGRU). Los modelos estudiados son los siguientes:

- CNN. Se ha entrenado este tipo de red con una primera capa convolucional de 50 filtros de dimensión 10 x 1 (10 x 1 x 50). Al ser las señales unidimensionales, se utiliza una capa convolucional (1D). La siguiente capa es una capa convolucional apilada compuesta por 100 capas de dimensión 10 x 1. Estas capas convolucionales vuelven más dominantes ciertas características de la secuencia. Después de estas dos capas, se utiliza una capa de agrupación máxima para disminuir la entrada por dos. A continuación, se utilizan otras dos capas convolucionales de 150 filtros, pero con una dimensión más pequeña (5 x 1) y una capa completamente conectada de 150 neuronas.
- GRU. En el caso del modelo con GRU, el modelo tiene tres capas de 50, 50 y 25 unidades. Finalmente, la última capa está completamente conectada.
- BiGRU. El modelo con capas GRU bidireccionales es bastante similar al modelo GRU, pero con menos unidades en cada capa. Por lo tanto, el modelo está compuesto por tres BiGRU de 10, 50 y 25 unidades y una última capa totalmente conectada, como ocurre en el modelo anterior.

- CGRU. El último modelo tiene una primera capa convolucional (para poder extraer características de las señales como ocurre en el primer caso), seguido de dos capas de unidades GRU. Así, la primera capa convolucional tiene 100 filtros de dimensión 10 x 1 seguida de una de agrupamiento máximo. Posteriormente se usan dos capas GRU de 150 y 50. Y, por último, como en el caso de los modelos GRU y BiGRU, se utiliza una capa totalmente conectada.

Para comparar estas cuatro arquitecturas se utiliza el denominado *Valor F*, que es un concepto estadístico para la medida de precisión de un test. Este valor se calcula con la expresión de la Ec. V. 1,

$$F_1 = 2 \cdot \frac{\text{Precisión} \cdot \text{Sensibilidad}}{\text{Precisión} + \text{Sensibilidad}} \quad \text{Ec. V.}$$

donde la precisión es la fracción de instancias recuperadas que son relevantes (en otras palabras y para este caso concreto, serían las secuencias correctamente clasificadas con respecto a las secuencias de ese mismo grupo), mientras que la sensibilidad es la fracción de instancias relevantes que han sido recuperadas (secuencias correctamente clasificadas sobre el total de las posibilidades).

Los resultados de la Tabla V.6 muestran claramente que el modelo que combina una capa convolucional y una red GRU (CGRU) supera al resto de modelos en los parámetros analizados. Por lo tanto, para los demás conjuntos de datos (z\_135 y z\_15), se ha utilizado este mismo modelo para analizar el rendimiento del modelo y la complejidad del conjunto de datos. Debido al reducido conjunto de entradas para clasificar entre las zonas 1 y 5, y al hecho de que la selección del mejor modelo no es objeto de estudio de este trabajo, el conjunto de datos se divide en entrenamiento (70%) y pruebas (30%).

**Tabla V.6. Resultados del modelo para el conjunto de datos Z\_all.**

Modelo	<i>Precisión</i>	<i>Sensibilidad</i>	<i>Valor F</i>
CNN	0,5806	0,5765	0,5785
GRU	0,6969	0,5788	0,6324
BiGRU	0,6968	0,6706	0,6835
CGRU	0,7260	0,7106	0,7182

Los resultados logrados (ver Tabla V.7) con menos zonas son más altos que los obtenidos con todas las zonas. Además, el *Valor F* para el conjunto de datos Z\_135 es 0,9169, mientras que para Z\_15 es 1. Estos resultados destacan la capacidad de la red CGRU para clasificar secuencias de tensión del proceso de WEDM con alta precisión.

**Tabla V.7. Resultados del modelo CGRU para el conjunto de datos Z\_all, Z\_135 y Z\_15.**

	Precisión	Sensibilidad	Valor F
Z_all	0,7260	0,7106	0,7182
Z_135	0,9361	0,9361	0,9169
Z_15	1	1	1

De esta misma tabla (Tabla V.7) se desprende que los modelos con unidades GRU claramente superan a aquellos con CNN, lo cual parece lógico porque las unidades GRU tratan con precisión las secuencias. De hecho, la CNN no puede clasificar secuencias de descargas de WEDM con un *Valor F* inferior al 60 %. Por lo tanto, se concluye que, para clasificar secuencias de descargas en WEDM, se recomienda utilizar DNN con unidades de GRU.

En cuanto a los modelos con unidades GRU es interesante ver que, en términos de precisión, el modelo BiGRU logra casi el mismo resultado que el modelo GRU, pero le supera en términos de *Sensibilidad* y *Valor F*. Esto es interesante porque el modelo BiGRU tiene menos unidades GRU en la capa de entrada (10 en el BiGRU y 50 en el GRU). Sin embargo, los resultados no son lo suficientemente claros como para llegar a la conclusión de que para la clasificación de secuencias el modelo BiGRU supera al modelo GRU en todos los casos.

Del mismo modo, al analizar los resultados de la Tabla V.6, parece que la adición de una capa convolucional a la entrada de un modelo GRU ayuda en la clasificación de las secuencias de las descargas en WEDM. Por lo tanto, la primera capa convolucional ayuda a extraer características de las secuencias de descarga y, posteriormente, las unidades GRU modelan estas nuevas secuencias generadas por la capa convolucional. Por lo tanto, los resultados muestran que un modelo CGRU funciona con alta precisión (0,7260) cuando se clasifican secuencias WEDM. Además, la Tabla V.7 muestra que este modelo clasifica las entradas casi perfectamente cuando se trata de conjuntos de datos menos complicados; de hecho, el modelo es capaz de alcanzar el 100 % de precisión para clasificar las secuencias de las Zonas 1 y 5, que representan una zona de corte eficiente y una en la que, debido a la inminente disminución del espesor, ha disminuido la eficiencia del mismo, respectivamente.

Finalmente, en lo que respecta a la cantidad de datos utilizados, es necesario justificar por qué se ha empleado un número tan pequeño si, según las afirmaciones de autores como Goodfellow, para lograr resultados aceptables en el DL supervisado se necesitan más de 5000 ejemplos etiquetados por categoría y solo con más de 10 millones es posible igualar o superar el rendimiento humano [Goodfellow, 2016]. En este trabajo únicamente se han utilizado

567 ejemplos por cada categoría o zona (un número considerablemente más bajo a los 5000 recomendados), debido a la disponibilidad de los datos extraídos de la propia máquina.

Es importante diferenciar entre la ANN y el proceso: mientras que se podría pensar que hay mucho margen de mejora porque con más ejemplos etiquetados este tipo de redes pueden alcanzar resultados de mayor precisión, desde el punto de vista del proceso los resultados son buenos. Por tanto, para poder aprovechar al máximo las mejoras que ofrece hoy en día la herramienta de DL en el reconocimiento de patrones de comportamiento, es importante que las empresas del sector de fabricación faciliten la recopilación de grandes cantidades de datos en talleres de máquinas-herramienta.

Así, los resultados analizados desde el punto de vista de la red neuronal también tienen una interpretación desde el punto de vista del proceso. Este análisis se realizará mediante una matriz de confusión, representada en la Figura V.10. Esta matriz muestra cómo, a medida que el hilo se acerca al punto de cambio de espesor, el comportamiento de las señales varía. Por ejemplo, sabiendo que la zona 1 (Z1) describe el proceso cuando este se comporta de forma estable y que la zona 5 (Z5) es la más cercana al cambio de espesor, se puede afirmar que no existe ningún error en la clasificación entre ambas zonas. Es decir, el comportamiento degradado de las señales durante el proceso de corte se advierte de forma inequívoca.

**Confusion Matrix**

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	
Z1	54 12.7%	32 7.5%	8 1.9%	0 0.0%	0 0.0%	57.4% 42.6%
Z2	36 8.5%	45 10.6%	9 2.1%	0 0.0%	0 0.0%	50.0% 50.0%
Z3	2 0.5%	4 0.9%	58 13.6%	2 0.5%	0 0.0%	87.9% 12.1%
Z4	0 0.0%	0 0.0%	12 2.8%	71 16.7%	1 0.2%	84.5% 15.5%
Z5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	10 2.4%	81 19.1%	89.0% 11.0%
	58.7% 41.3%	55.6% 44.4%	66.7% 33.3%	85.5% 14.5%	98.8% 1.2%	72.7% 27.3%
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	

**Target Class**

Figura V.10. Matriz de confusión para los datos Z\_all con el modelo CGRU.

Sin embargo, es importante saber no solo que la red es capaz de reconocer un comportamiento degradado, sino también que es válida para predecirlo. Analizando más detenidamente dicha matriz, se puede verificar que tampoco existen errores de clasificación entre las zonas 1 y 2 (Z1 y Z2) con las zonas 4 y 5 (Z4 y Z5) y viceversa, incluso entre las zonas 3 y 5 (Z3 y Z5). Es decir, si se tienen en cuenta los parámetros utilizados durante la erosión (Tabla V.2) y la velocidad promedio del hilo, en el corte de una pieza de un espesor por encima de 50 mm se tendrán, al menos, 30 segundos para actuar antes de que el cambio de espesor ocurra. Además, en la mayoría de los casos, aún se dispondrá de un margen mayor, puesto que la clasificación errónea entre zonas consecutivas (excluyendo las primeras zonas Z1 y Z2) es menor del 3 %; en cualquier caso, esta confusión es siempre menor al 10 %.

Como ya se ha comentado antes, la elección de las zonas ha sido arbitraria, aun habiendo tenido en cuenta ciertas consideraciones como el diámetro de la boquilla que afectará a la presión del fluido dieléctrico. Por eso se presentan también los resultados cuando se han tenido en cuenta únicamente tres zonas: una zona completamente estable (Z1), una zona de degradación intermedia (Z3) y la zona en la que se produce el cambio de espesor (Z5): con este conjunto de datos se obtiene la matriz de confusión mostrada en Figura V.11.

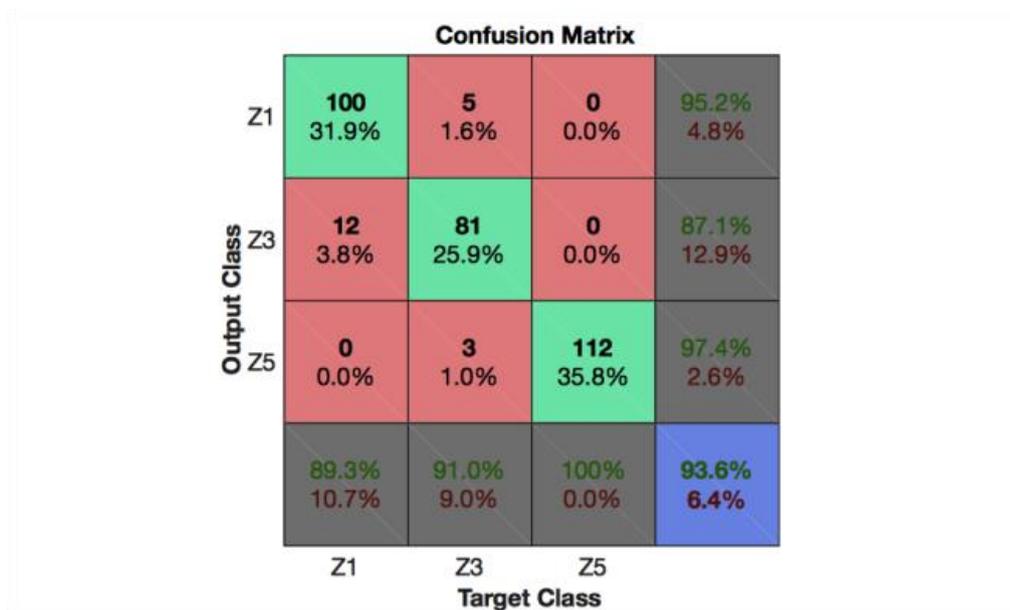


Figura V.11. Matriz de confusión para los datos Z\_135 con el modelo CGRU.

De nuevo, la primera y más obvia conclusión que puede obtenerse de esta matriz es que no existe ningún error en la clasificación entre los comportamientos extremos de erosión, es decir, la zona estable (Z1) y la zona completamente degradada (Z5). Sin embargo, este es un dato que ya se observaba en la Figura V.10.

La razón por la que es interesante plantear esta nueva matriz es saber si existe una diferencia en la detección de las zonas de clasificación por estar demasiado próximas las unas de las otras. Las confusiones entre las zonas 1 y 3 (Z1 y Z3) ocurren en menos del 4 % de los casos. Sin embargo, es más probable que la zona parcialmente degradada se confunda con un corte estable (Z3 con Z1) que viceversa (Z1 con Z3, que ocurre en un 1,6 % de los casos). Esto implica que solo en cuatro ocasiones de cada cien no podría observarse un comportamiento degradado 3 mm antes de que ocurra el cambio de espesor. Por último, es necesario comentar que solo se confunde la Zona 5 con la Zona 3 en un 1 % de las veces.

En conclusión, aunque únicamente en el 4 % de los casos no es posible predecir el cambio de espesor con 3 mm de antelación, siempre puede hacerse 2 mm antes de que este ocurra. Además, es necesario repetir que las zonas han sido arbitrariamente seleccionadas, por lo que los patrones de comportamiento podrían variar con otro método de selección de las regiones.

Por tanto, se puede afirmar que la red será capaz de predecir el cambio de espesor con total seguridad, al menos con 30 segundos de antelación para, por ejemplo, poder actuar sobre los parámetros de corte impidiendo que se produzca una rotura del hilo o incrementando la productividad del proceso durante la inestabilidad.

## **V.5 DETECCIÓN DEL ESPESOR DE PIEZA DURANTE EL CORTE POR WEDM MEDIANTE EL USO DEL TIEMPO DE IONIZACIÓN DE LAS DESCARGAS**

La segunda de las aplicaciones planteada en los objetivos de este capítulo es la detección de espesor mediante el uso, únicamente, del tiempo de ionización. En los próximos párrafos se explica el procedimiento experimental seguido para comprobar si es posible esta detección durante el corte mediante WEDM y los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

### **V.5.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

La detección del espesor en el corte por WEDM parte de la hipótesis de que puede obtenerse mediante la aplicación de lo que se denominará, a partir de ahora, la Ecuación de Continuidad de WEDM (ver Ec. V. 2). Esta ecuación relaciona la tasa de arranque ( $U$ ) del número total de descargas ( $N$ ) con el espesor ( $h$ ) y la velocidad ( $v$ ).

$$N \left[ \frac{desc}{s} \right] \cdot U \left[ \frac{mm^2}{desc} \right] = h [mm] \cdot v \left[ \frac{mm}{s} \right] \quad \text{Ec. V. 2}$$

Como se ha comentado ya en el apartado anterior, los parámetros óptimos a emplear se establecen desde la tecnología proporcionada por la compañía fabricante de este tipo de máquinas, teniendo en cuenta el binomio hilo-material y, además, el espesor de pieza, la cual se denominará a partir de ahora espesor de tecnología (*machine thickness, mt*). Obteniendo, para un corte de desbaste con condiciones de presión del fluido dieléctrico de 17 bar, el número de descargas en un determinado intervalo de tiempo, junto con la velocidad media del intervalo en el que se han registrado las mismas, puede despejarse de la ecuación anterior la tasa de arranque superficial por descarga ( $U$ ) para dicho espesor.

Sin embargo, en piezas de espesor variable no siempre se realiza el corte en estas condiciones de presión (17 bar) y con un espesor real coincidente con el  $mt$ , por lo que la ecuación anterior se convierte en una ecuación matricial con la siguiente estructura, en la cual se han de diferenciar las descargas en función del tiempo de ionización, en lugar de utilizar el número total de las mismas (Ec. V. 3):

$$\begin{bmatrix} N_{T_{1,0}} & N_{T_{1,1}} & N_{T_{1,2}} & N_{T_{1,3}} \\ N_{T_{2,0}} & N_{T_{2,1}} & N_{T_{2,2}} & N_{T_{2,3}} \\ N_{T_{3,0}} & N_{T_{3,1}} & N_{T_{3,2}} & N_{T_{3,3}} \\ N_{T_{4,0}} & N_{T_{4,1}} & N_{T_{4,2}} & N_{T_{4,3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \cdot v_1 \\ h_2 \cdot v_2 \\ h_3 \cdot v_3 \\ h_4 \cdot v_4 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. V. 3}$$

donde  $N_{T_{1,j}}$  representa el número de descargas del grupo  $D3$ ,  $N_{T_{2,j}}$  las del grupo  $D2$ ,  $N_{T_{3,j}}$  las del grupo  $D1$ , y  $N_{T_{4,j}}$  las del grupo  $DO$  y  $DOO$ , para cada uno de los espesores  $h_j$  en los que se realizan los cortes.

Puesto que los valores de  $U$  no pueden ser negativos, es necesario establecer, como condiciones de contorno, que dichos valores deben ser mayores que cero. Una vez establecida esta relación, se puede realizar el cálculo de los valores de  $U$  ( $U_0, U_1, U_2$  y  $U_3$ ) para diferentes  $mt$ , de forma que la metodología queda completamente definida.

Para llevar a la práctica este procedimiento teórico, se realiza un ejemplo disponiendo de tres piezas de acero AISI D2 de la geometría representada mediante la Figura V.12, con las dimensiones de la Tabla V.8. Se ha elegido una geometría compleja, con diferentes cambios instantáneos de espesor y de regiones invariantes del mismo de, al menos, 20 mm de longitud, para que puedan recogerse los datos en un rango estable y con diferentes condiciones de presión de dieléctrico.

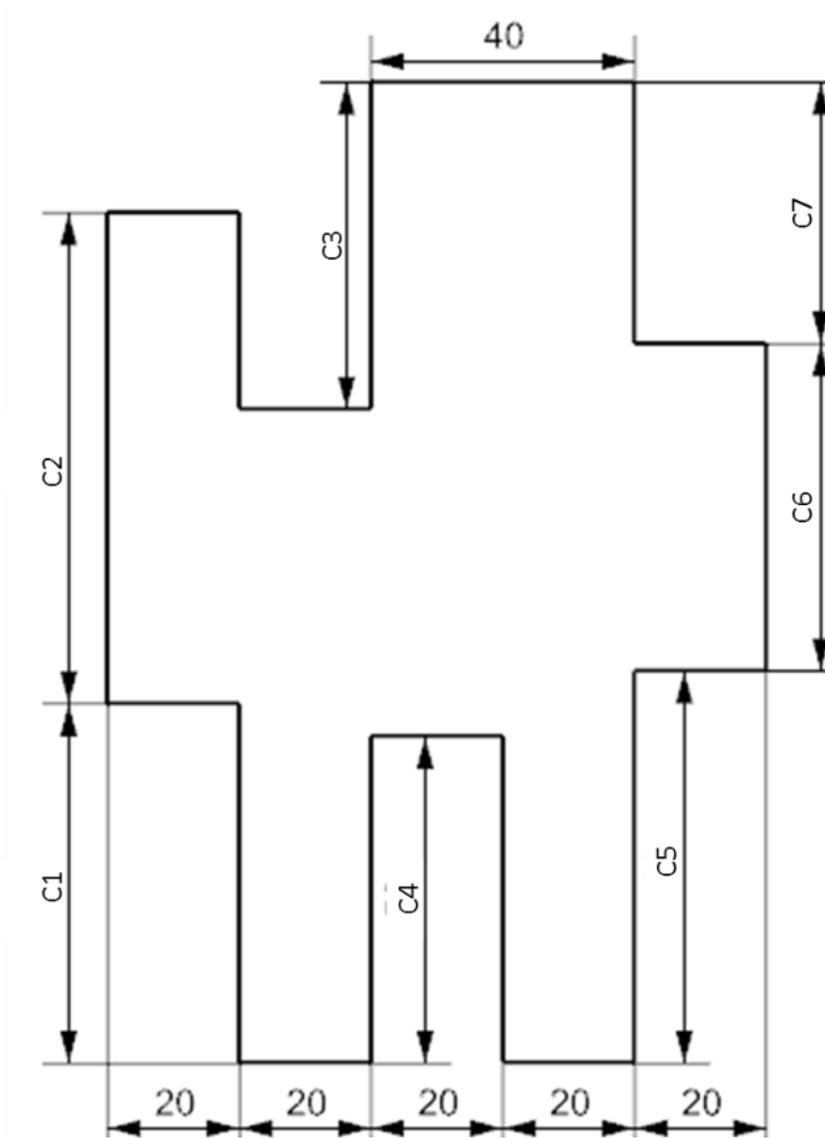


Figura V.12. Geometría de la pieza para la obtención de los parámetros  $U$ .

Tabla V.8. Dimensiones de la pieza de calibración de los parámetros  $U$ .

Dimensión [mm]	$mt = 200$ mm	$mt = 150$ mm	$mt = 100$ mm
C1	73	55	37
C2	100	75	50
C3	67	50	33
C4	67	50	33
C5	80	60	40
C6	53	40	27
C7	67	50	33

En todas estas zonas se han registrado señales durante 4 mm de longitud en diversos espesores utilizando las condiciones de corte de la Tabla V.9, en función del  $mt$  correspondiente.

**Tabla V.9. Parámetros de corte empleados.**

$mt$ [mm]	200	150	100
Tiempo de pausa [ $\mu$ s]	18	14	13
Intensidad [A]	5	5	5
Tensión de servo de referencia [V]	80	80	80
Presión del dieléctrico [bar]	31	31	31
Tensión del hilo [kg]	18	18	18
Velocidad de alimentación del hilo [mm/min]	10	10	10

Con estos registros se han calculado la suma de cada tipo de descarga y los valores medios de velocidades para introducirlos en la Ec. V. 3, de forma que se obtienen las constantes necesarias para la determinación del espesor en cada  $mt$  (ver Tabla V.10).

**Tabla V.10. Calibración de los coeficientes  $U$  de los distintos espesores.**

$mt$ [mm]	$U_0$ [mm <sup>2</sup> /desc]	$U_1$ [mm <sup>2</sup> /desc]	$U_2$ [mm <sup>2</sup> /desc]	$U_3$ [mm <sup>2</sup> /desc]
200	5,6799E-07	0	2,6791E-04	4,4056E-05
150	2,3457E-05	0	1,1833E-04	4,0900 E-05
100	2,3327E-05	0	1,1383E-04	4,0612E-05

Una vez obtenidos los valores de  $U$  se puede calcular el espesor real de pieza mediante la misma ecuación, en la que ahora solo este valor es una incógnita (ver Ec. V. 4).

$$N_0 \cdot U_0 + N_1 \cdot U_1 + N_2 \cdot U_2 + N_3 \cdot U_3 = h_{real} \cdot v \quad \text{Ec. V. 4}$$

Este espesor real se ha calculado con los valores medios de las señales obtenidas durante los 4 mm de longitud de corte registrados, que son datos suficientes para cualquier espesor (la velocidad teórica para un espesor de 20 mm, por ejemplo, es de 8 mm/min, lo que supone una cantidad de, al menos, 3.000 datos: con un espesor superior esta cantidad será mayor debido a la disminución de la velocidad). Por esta variabilidad en la velocidad, y con el fin de minimizar el ruido de la señal y perder la menor cantidad de información posible, se ha realizado el cálculo del espesor de pieza utilizando un mayor número de puntos para espesores más altos, donde las fluctuaciones de las señales son mayores (ver Tabla V.11).

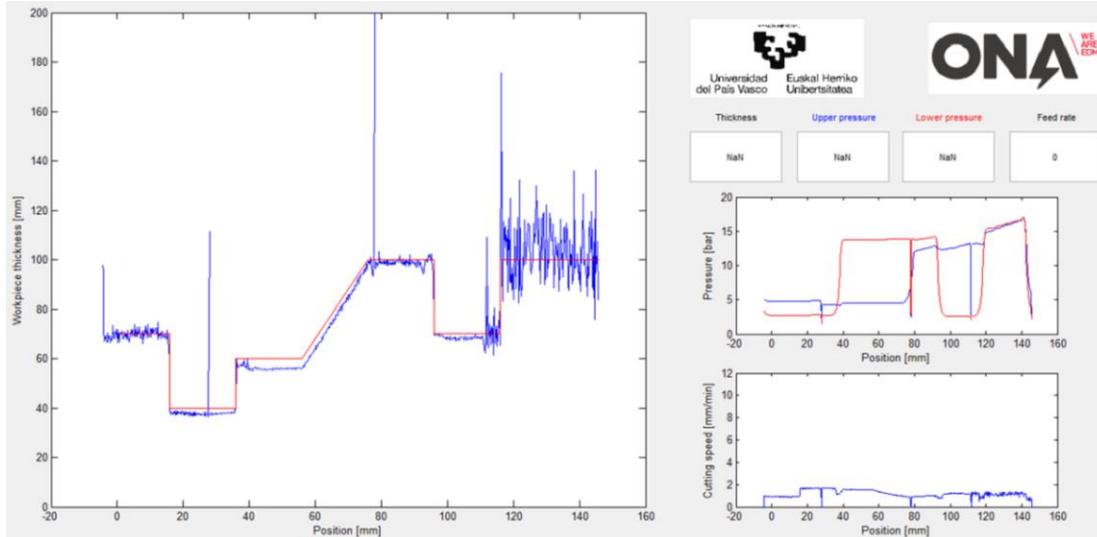
**Tabla V.11. Número de datos en función del rango de espesor.**

Rango de espesor [mm]	Número de datos
$h < 20$	1000
$20 < h < 50$	5000
$50 < h < 100$	10000
$100 < h < 150$	15000
$150 < h$	20000

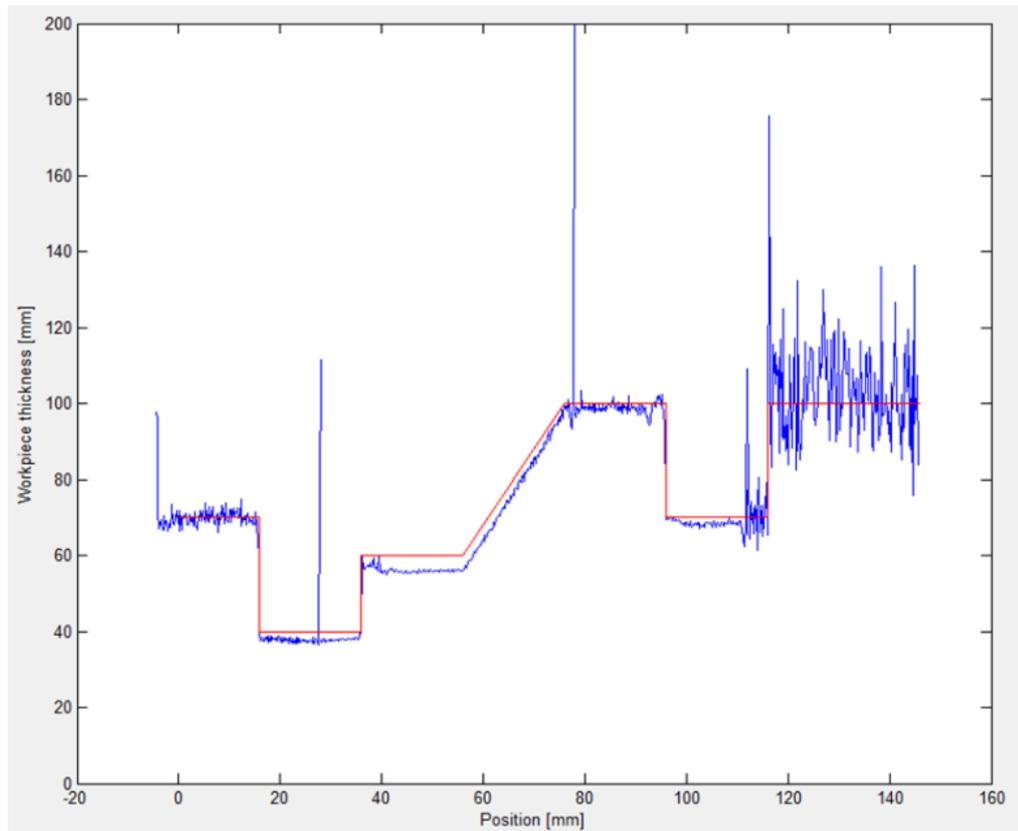
Con esta información se ha generado una aplicación en Matlab® en la que, para que funcione correctamente, se debe proporcionar como dato de partida el *mt*. Así, se representan las siguientes variables (ver Figura IV.13.a):

- espesor real de la pieza (en la Figura IV.13.b se observa la comparativa entre el espesor real y el teórico de la misma) con respecto a la posición de las guías
- presión superior e inferior del fluido dieléctrico (Figura IV.13.d) con respecto a la posición de las guías
- velocidad (Figura IV.13.e) con respecto a la posición de las guías

Asimismo, también se representa el valor instantáneo de todas ellas (Figura IV.13.c).



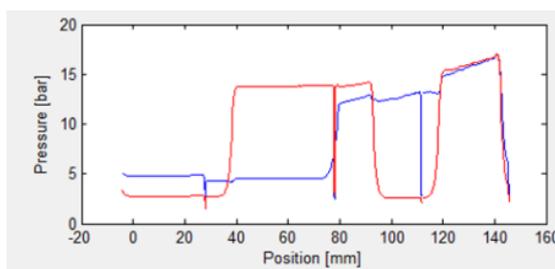
a)



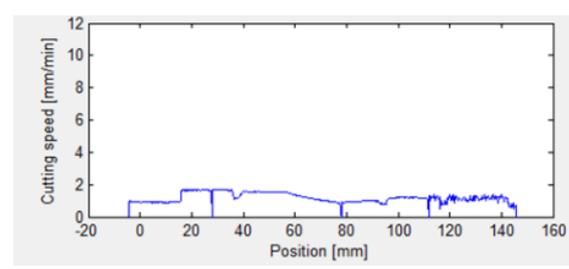
b)



c)



d)



e)

Figura V.13. Aplicación generada con el software Matlab® para la detección del espesor.

Mediante esta aplicación se puede observar el espesor predicho por la Ecuación de Continuidad de WEDM (Ec. V. 3) y analizar, por tanto, la validez de los resultados obtenidos, lo cual se realizará en el siguiente apartado.

### V.5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La comprobación de la teoría expuesta hasta ahora se corrobora mediante dos ejemplos de piezas complejas. La primera de ellas (Caso de validación 1) se trata de una pieza cuya geometría se muestra en la Figura V.14, que consta, además de las regiones de 20 mm de longitud en diferentes espesores y condiciones de presión del dieléctrico, de un cambio de espesor progresivo.

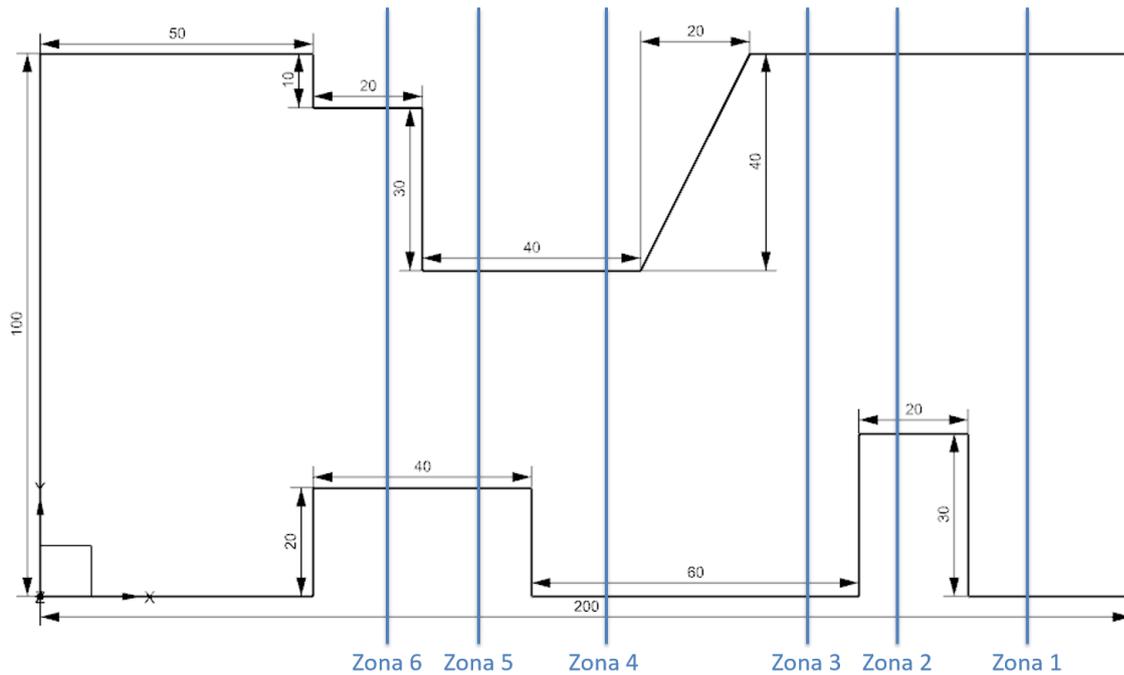


Figura V.14. Geometría de pieza y zonas de registro del Caso de validación 1.

En la Figura IV.13.b, donde se mostraba la información proporcionada por la aplicación de Matlab®, se puede observar, además, la predicción del espesor (en azul) para este ejemplo con respecto al espesor teórico de la pieza (en rojo), con el fin de visualizar mejor esta comparativa. Para comprobar el grado de precisión de la estimación del espesor se comparan, en la Tabla V.12, los valores medios de espesor de cada zona registrada con el valor teórico o de diseño de la pieza; así, se obtiene el porcentaje de error. Además, se muestra la velocidad media real por zona registrada.

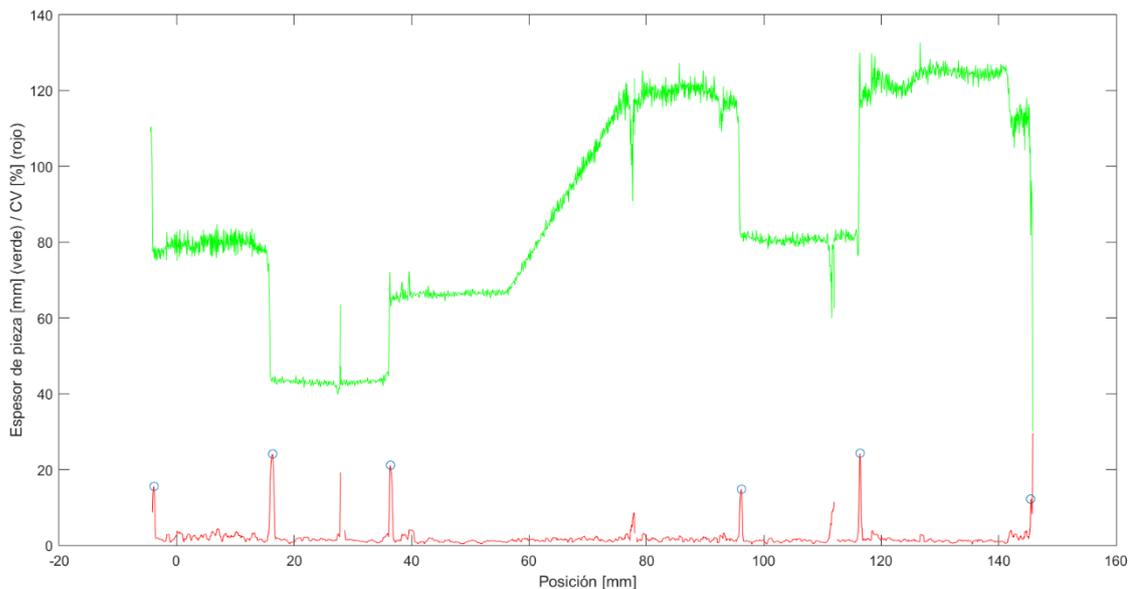
**Tabla V.12. Estimación del espesor y velocidad media en el Caso de validación 1.**

Zona	Espesor		Error [%]	Velocidad media [mm/min]
	medio [mm]	teórico [mm]		
1	102,85	100,00	2,85	1,04
2	71,27	70,00	1,81	1,13
3	98,87	100,00	1,13	0,94
4	56,40	60,00	6,00	1,48
5	38,32	40,00	4,20	1,63
6	69,38	70,00	0,89	0,92

El siguiente paso es comprobar si esta estimación del espesor genera información suficiente para predecir su cambio con antelación. Si bien es cierto que la variación de presión del fluido dieléctrico no genera información válida para predecir dicho cambio, como se verá a continuación, el Coeficiente de Variación (CV) sí. Este parámetro se define de la siguiente forma:

$$CV [\%] = \frac{SD}{h} \cdot 100 \quad \text{Ec. V. 5}$$

En la Figura V.15 se muestra de forma conjunta el espesor de pieza predicho en cada momento (en color verde) junto con el CV (en color rojo). Además, redondeados en color azul, pueden observarse los puntos en los que este coeficiente tiene una fluctuación mayor del 10 %. La comparación de cotas entre estos puntos y el cambio de espesor mostrará la antelación con la que puede predecirse el cambio.



**Figura V.15. Ilustración conjunta de la predicción del espesor (verde) y el CV (rojo) para la posible predicción del espesor (azul).**

La Tabla V.13 muestra la antelación con la que puede saberse el cambio de espesor:

**Tabla V.13. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 1.**

Zona	Cota de variación de espesor [mm]	Cota de variación del CV [mm]	Antelación	
			espacial [mm]	temporal [s]
1-2	116,30	116,30	0,40	23
2-3	96,04	96,42	0,38	20
4-5	36,27	36,44	0,17	6
5-6	16,10	16,24	0,14	5

La anticipación media es de 0,17 mm y 13 s. Tal y como se ha mencionado con anterioridad, utilizar un menor número de datos para calcular la predicción de espesor cuando este es suficientemente grande puede generar una reducción en la precisión de cálculo; sin embargo, para predecirlo, es mejor utilizar el número mínimo de datos. Así, usando siempre un conjunto de 1000 datos (el correspondiente a espesores menores de 20 mm) se obtiene una antelación mayor (ver la Tabla V.14): los valores medios pasan a ser de 0,41 mm y 18 s.

**Tabla V.14. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 1 utilizando un conjunto de datos independiente del espesor.**

Zona	Cota de variación de espesor [mm]	Cota de variación del CV [mm]	Antelación	
			espacial [mm]	temporal [s]
1-2	116,10	116,30	0,20	11
2-3	95,46	96,15	0,69	36
4-5	36,07	36,39	0,32	12
5-6	15,93	16,34	0,41	15

Por otro lado, el Caso de validación 2 es la propia pieza para el cálculo de los valores de  $U$  para el  $mt$  de 100 mm (ver de nuevo Figura V.12 y Tabla V.8). Para ello, se analiza el registro de nueve archivos diferentes y consecutivos de la pieza en espesores diferentes, como se muestra en la Figura V.16.

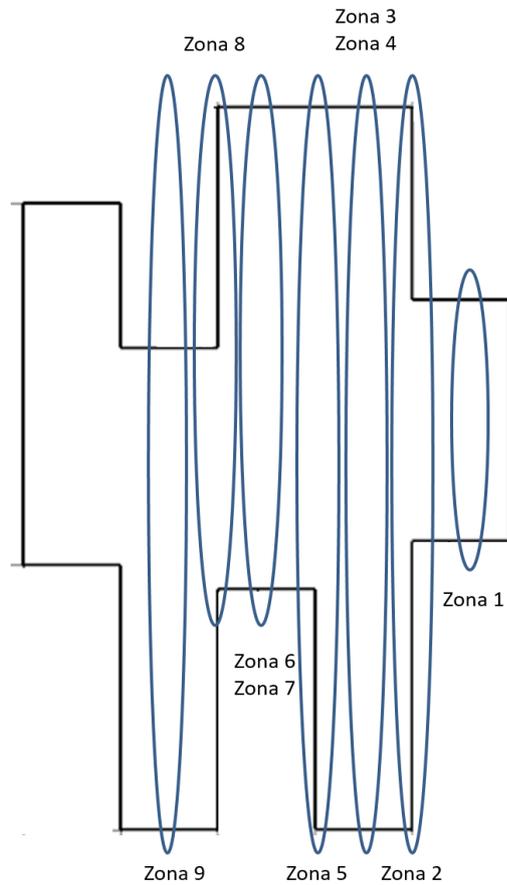


Figura V.16. Zonas de registro para el Caso de validación 2.

El resultado obtenido de la aplicación se muestra en Figura V.17.

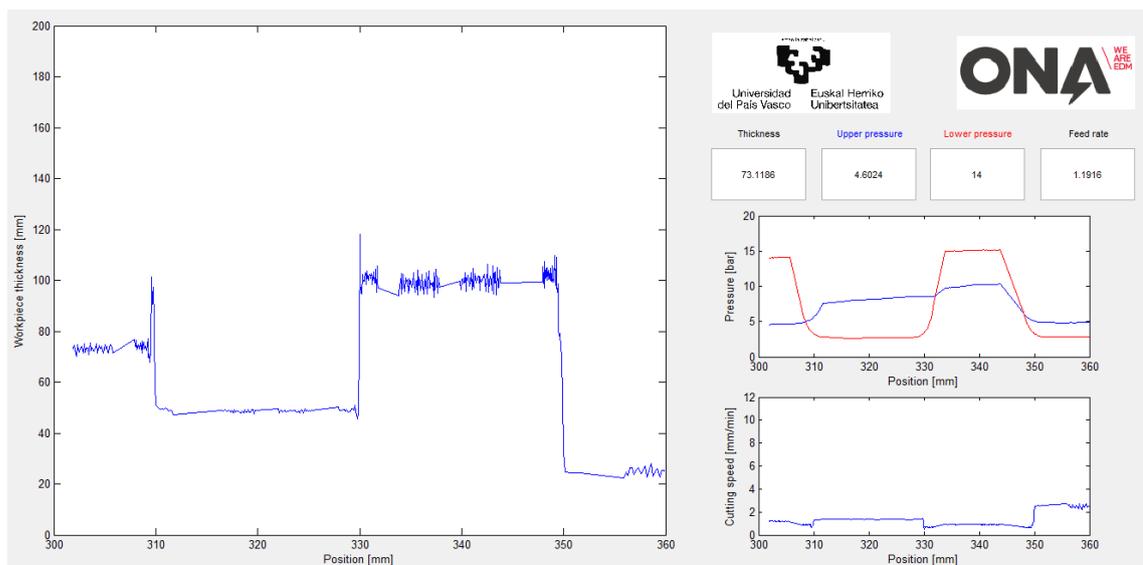


Figura V.17. Resultado obtenido de la aplicación para el reconocimiento de espesor.

Al igual que en el Caso de validación 1, en la Tabla V.15, se muestra la comparativa de espesores medio y teórico, junto con el porcentaje de error y la velocidad media por zona registrada.

**Tabla V.15. Estimación del espesor y velocidad media en el Caso de validación 2.**

Zona	Espesor		Error [%]	Velocidad media [mm/min]
	medio [mm]	teórico [mm]		
1	25,07	25,00	0,28	2,50
2	69,02	-	-	1,35
3	99,57	100,00	0,43	0,90
4	98,53	100,00	1,47	0,92
5	71,67	-	-	1,05
6	48,66	50,00	2,68	1,36
7	48,61	50,00	2,78	1,36
8	63,04	-	-	1,10
9	72,97	70,00	4,24	1,19

El porcentaje de error no supera en ningún caso el 5 %, siendo la desviación máxima menor de 3 mm, lo que supone un muy buen resultado puesto que las tablas tecnológicas proporcionadas por el fabricante proporcionan parámetros cada 10 mm de espesor. Por otra parte, no se dispone de valores para las zonas 2, 5 y 8 debido a que en ellas existe un cambio de espesor y, por tanto, no tiene sentido realizar dicha comparación.

Análogamente, se han calculado el CV de cada registro para las zonas en las que existe una variación de espesor (zonas 2, 5 y 8). Estos resultados aparecen en la Tabla V.16, siendo el valor medio de anticipación de 0,23 mm y 7 s.

**Tabla V.16. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 2.**

Zona	Cota de variación de espesor [mm]	Cota de variación del CV [mm]	Antelación	
			espacial [mm]	temporal [s]
2	350,10	350,50	0,40	9
5	330,20	330,20	0,00	0
8	310,10	310,40	0,30	13

Si este cálculo se realiza siempre con un conjunto de 1000 datos, independientemente del espesor, se obtienen los valores de la Tabla V.17: los valores medios de anticipación son ahora de 0,33 mm y 9 s. Esto significa que utilizar un número menor de datos mejora la predicción del cambio de espesor.

**Tabla V.17. Antelación en la predicción del cambio de espesor en el Caso de validación 2 utilizando un conjunto de datos independiente del espesor.**

Zona	Cota de variación de espesor [mm]	Cota de variación del CV [mm]	Antelación [mm]	
			espacial [mm]	temporal [s]
2	349,90	350,70	0,80	19
5	330,00	330,00	0,00	0
8	310,00	310,20	0,20	8

Se puede concluir, por tanto, que el espesor puede determinarse mediante la Ecuación de Continuidad de WEDM, con un error menor al 5 %. Además, la predicción del cambio de espesor puede anticiparse con una antelación de, al menos, 7 s, en función del salto de espesor ante el que se enfrenta el proceso.

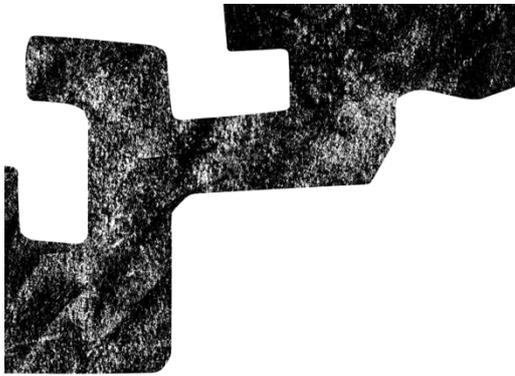
## V.6 CONCLUSIONES

De la detección de eventos en WEDM en función de las señales obtenidas del proceso se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

- Se ha verificado la clasificación de las señales del proceso propuesta por la literatura, de la que se destaca que, en unas condiciones de corte óptimas, aproximadamente la mitad de las descargas tienen tiempo de ionización nulo, y casi un tercio de las mismas tienen un tiempo de ionización mayor a 3  $\mu$ s.
- Puesto que la clasificación de estas señales depende del criterio de cada autor, se ha propuesto el uso de una ANN para reconocer cambios en los patrones de las señales obtenidas durante el proceso de corte de WEDM ante un evento.
- Como ejemplo de validación de esta teoría se ha elegido como evento un cambio de espesor, en el que se han utilizado las señales de tensión obtenidas para comprobar si la ANN es capaz de detectarlo. Así, se han probado diferentes arquitecturas y se han comparado sus resultados, los cuales muestran un rendimiento sobresaliente, con una precisión de alrededor del 100 %. Por otro lado, desde el punto de vista del proceso, las matrices de confusión indican que la variación de espesor puede predecirse con, al menos, 2 mm de antelación, lo que supone suficiente tiempo para actuar sobre los parámetros de erosión.
- Se ha establecido una Ecuación de Continuidad de WEDM, que relaciona la erosión de las descargas con la velocidad y el espesor de pieza, de forma que se puede establecer el espesor en cada punto de corte del proceso. Para ello únicamente es necesario saber

el tiempo de ionización de las descargas. Mediante una aplicación programada en Matlab® se ha visualizado que el error cometido en la predicción es menor al 5 %. Además, con los resultados obtenidos y mediante la misma aplicación, se han analizado diferentes parámetros que puedan predecir el cambio de espesor con antelación. El coeficiente de variación lo hace con una anticipación de, al menos, 7 s, en función del salto de espesor ante el que se enfrenta el proceso.

De este trabajo se desprende que existen nuevas posibilidades en el campo de la fabricación avanzada y las máquinas-herramienta de alto rendimiento aplicando diferentes estructuras de ANNs para cada problema específico. Esta línea de investigación será una realidad cuando se disponga de grandes cantidades de datos, puesto que hoy en día es difícil recopilarlos en procesos de mecanizado.



**Capítulo VI.  
Conclusiones y líneas  
futuras**

---



## VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

*En este capítulo se presentarán las conclusiones derivadas de este trabajo y las líneas futuras que podrán llevarse a cabo.*

### VI.1 CONCLUSIONES

A lo largo de los capítulos anteriores se ha presentado la necesidad por parte de la industria de ajustar aún más las tolerancias ya de por sí estrechas de la electroerosión por hilo, para poder hacer frente a la fabricación de piezas de sectores tan exigentes como el aeronáutico, entre otros, caracterizadas por geometrías complejas con cambios bruscos de dirección y radios de acuerdo pequeños, como son los *firtrees*. Sin embargo, la comprensión del comportamiento vibratorio del hilo, pese a haber sido del interés de la comunidad científica durante muchos años, no es completa. Por ello, se ha propuesto en esta tesis el uso de diferentes técnicas para medir el defecto generado en las piezas fabricadas mediante este proceso, como son las medidas experimentales o el uso de redes neuronales artificiales. Asimismo, se han aplicado estas últimas a la detección de eventos durante el corte.

A partir del trabajo realizado se han podido extraer las siguientes aportaciones:

- I. La **revisión del estado del arte y la práctica industrial** muestran la necesidad de avanzar en el desarrollo de la mejora de la precisión en el corte por electroerosión por hilo, puesto que cada vez requieren tolerancias más ajustadas para las aplicaciones a las que se pretende dar soporte, como son el sector aeronáutico o médico. Poder realizar algunas de las piezas del sector aeronáutico, como son los *firtrees*, mediante este proceso (en lugar del usado actualmente, que es el brochado) facilita la flexibilidad del mismo, tal y como ya se ha comentado en el párrafo anterior.
- II. La precisión del proceso está muy ligada a la elección de los parámetros de corte óptimos, tarea que se ha estudiado a lo largo de los años. La combinación de variables idóneas seleccionadas para la fabricación de piezas es dependiente del espesor, por lo que detectarlo es un paso imprescindible para no perder rendimiento en aquellos casos en los que las condiciones varían a lo largo del corte. Esta es la razón por la cual se han analizado las diferentes propuestas para la detección del mismo.
- III. El capítulo finaliza abordando los trabajos basados en la inteligencia artificial como alternativa para resolver algunos problemas del sector de la máquina-herramienta,

después de haber obtenido un gran éxito en otros campos como es el de las comunicaciones. La razón para utilizar estas herramientas informáticas es, precisamente, la gran cantidad de datos disponibles en el proceso de electroerosión que hasta la fecha han sido difícilmente analizados y no han podido ser utilizados. Además, la batería de ensayos necesaria para caracterizar cualquier problema en este proceso de forma puramente experimental es elevada, y sin embargo podrían evitarse o minimizarse empleando estas herramientas.

- IV. A la vista de las conclusiones obtenidas en la revisión del estado del arte, por tanto, se plantea la necesidad de desarrollar nuevas soluciones tanto para la caracterización del error generado por la deformación y vibración del hilo como para corregir su defecto, que se magnifica con los cambios bruscos de dirección. Asimismo, se extiende esta propuesta a la detección de eventos durante el proceso de corte.
- V. En el capítulo III se ha estudiado la **caracterización del error en trayectorias circulares**, partiendo de la definición de dos hipótesis por las cuales existirían los errores en la erosión de círculos mediante WEDM: el desequilibrio de áreas de erosión (el cual puede llegar a tener una diferencia porcentual de 40 % y 60 %) causado por el desequilibrio de fuerzas y la envolvente generada por la vibración del hilo.
- VI. Para poder ratificar estas dos hipótesis se ha generado una batería de ensayos, cuyo resultado ha generado la caracterización de la morfología del error obtenido, el cual está influenciado por los cambios de dirección producidos al inicio y al final de la trayectoria circular en cuestión.
- VII. Una vez visto el patrón generado, y en base al mismo, se ha propuesto una compensación geométrica de forma que, sin disminuir el rendimiento del proceso, se ha conseguido una mejora de la precisión promedio en el plano superior en un 70 %. En el plano medio, sin embargo, aun siendo la mejora del 60 %, el error sigue siendo significativo (un defecto medio de entre 12  $\mu\text{m}$  y 35  $\mu\text{m}$ , cuyos máximos sobrepasan los 50  $\mu\text{m}$ ).
- VIII. Como consecuencia del punto anterior se ha estudiado el defecto de erosión causado por la envolvente del hilo o *wire-lag*, la cual tiene su máximo efecto en la zona central del espesor de pieza. Por ello, se ha decidido evaluar el error que genera el hilo en el plano medio mediante la curva de persecución. Además, se ha comprobado cómo su valor depende de si la trayectoria es recta o se está erosionando un radio. Por tanto, esta afirmación hace necesario estimar el valor del *wire-lag* para cada uno de los casos.

- IX. Así, se ha propuesto una nueva metodología tanto para el cálculo del efecto del *wire-lag* como para el efecto de concavidad generados en la pieza. Esta metodología difiere de las establecidas hasta el momento en que, si bien no es una medida del valor de la deformación del hilo, sí lo es del defecto que este genera en las piezas, y es aplicable a cualquier tipo de trayectoria.
- X. Los resultados de los ensayos realizados muestran que el efecto del *wire-lag* crece con el espesor de pieza (de 53  $\mu\text{m}$  en un espesor de 20 mm hasta 134  $\mu\text{m}$  en uno de 100 mm para un radio 0,8 mm) y con la disminución del radio (de 92  $\mu\text{m}$  en un corte recto hasta los 134  $\mu\text{m}$  en un radio de 0,8 mm en un espesor de 100 mm). Sin embargo, el efecto de concavidad es aproximadamente constante para un espesor dado (en torno a los 35  $\mu\text{m}$  para 100 mm y 10  $\mu\text{m}$  para 60 mm y es imperceptible para el de 20 mm).
- XI. Como consecuencia, esto significa que el defecto de erosión en las piezas (tanto en la dirección de corte como en la perpendicular a la misma) es medible en cualquier máquina y para cualquier trayectoria.
- XII. Por último, se ha analizado la relación entre el tiempo de ionización de las descargas y la erosión de los círculos de pequeño radio, y se ha concluido que las descargas de menor tiempo de ionización aumentan con el radio (entre 4 y 6 puntos porcentuales en función de la presión del fluido dieléctrico) a la vez que disminuyen las de mayor tiempo de ionización (entre 6 y 10 puntos). Debido a la superposición de diferentes efectos como el desequilibrio de áreas a erosionar, causada por la resultante de las fuerzas inherentes al proceso, y la variación en la presión del fluido dieléctrico, resulta imposible generar una relación sin realizar un estudio más profundo teniendo en cuenta ambos factores.
- XIII. A lo largo del capítulo IV se ha estudiado la **predicción del error y optimización de las trayectorias circulares**, intentando minimizar las pruebas experimentales que deberían realizarse para tal fin. Para ello, se ha utilizado una red neuronal recurrente de tipo Elman, puesto que ha demostrado su capacidad para modelar fenómenos altamente no lineales en otros procesos de fabricación.
- XIV. Las predicciones de la red han mostrado unas desviaciones medias por debajo de 5,6  $\mu\text{m}$  en relación a las medidas realizadas en las probetas, lo que supone un resultado aceptable para un corte de desbaste. Es decir, la red neuronal es capaz de predecir el error que se va a generar en el corte de una interpolación circular.
- XV. Estas predicciones se han combinado con una técnica de optimización (*Simulated Annealing*) aplicada de forma iterativa, de manera que ha sido capaz de diseñar

trayectorias de radio optimizado minimizando las desviaciones provocadas en la pieza. Para validar esta metodología se han erosionado tres probetas utilizando esta estrategia y se han comparado con las cortadas de forma convencional (radio constante), mostrando que, cuando el radio es pequeño y el espesor de pieza es grande, la eficiencia de la propuesta mejora y el error disminuye hasta en un 80 %.

- XVI. Se ha demostrado que cuanto más brusco es el cambio de dirección mayor defecto de erosión se genera, y este procedimiento permite reducirlo precisamente en estas ocasiones.
- XVII. En el capítulo V se estudia la **detección de eventos en el proceso de electroerosión por hilo**. Para ello se han utilizado las señales obtenidas del proceso, cuya clasificación (propuesta por la literatura) se ha verificado como paso previo al trabajo desarrollado en este apartado. Así, se ha evidenciado que, en condiciones óptimas de corte e independientemente del espesor, la mitad de las descargas tienen tiempo de ionización nulo y, aproximadamente un tercio de las mismas, tienen un tiempo de ionización mayor a 3  $\mu$ s.
- XVIII. Se ha propuesto el uso de una ANN para predecir un evento mediante el cambio en los patrones de las señales obtenidas durante el corte. Esta teoría se ha validado mediante un ejemplo de aplicación práctica muy típico en la fabricación de piezas mediante WEDM: el cambio de espesor.
- XIX. Se han recogido señales de tensión durante diferentes zonas antes de llegar al punto de variación de espesor y se han introducido en una ANN. Los resultados muestran un rendimiento de la red sobresaliente, con una precisión próxima al 100 % desde el punto de vista de la misma.
- XX. Por otra parte, desde el punto de vista del proceso, se ha analizado el rendimiento de la red mediante las denominadas matrices de confusión, las cuales han indicado que la variación de espesor puede predecirse con, al menos, 2 mm de antelación en todos los casos estudiados. Esta distancia, teniendo en cuenta la velocidad de corte, es espacio suficiente para actuar, por ejemplo, sobre las variables del proceso para minimizar la pérdida de efectividad.
- XXI. Aprovechando la recogida de las señales de tensión y, por tanto, la variable tiempo de ionización, se ha establecido la Ecuación de Continuidad de WEDM. Esta ecuación relaciona el tiempo de ionización de las descargas con la velocidad para establecer el espesor de pieza en cada punto del proceso de corte. De los ensayos llevados a cabo, el error cometido en la predicción con el uso de esta ecuación es menor al 5 %.

XXII. Finalmente, se estudia la existencia de alguna variable que prediga el cambio de espesor con antelación aplicando esta ecuación. Y es precisamente el coeficiente de variación la variable que predice este cambio con una anticipación de, al menos, 7 segundos en los saltos estudiados. Sin embargo, este tiempo es dependiente del valor de la variación de espesor.

Como resumen final de este trabajo de tesis se concluye que ha quedado demostrada la posibilidad de mejorar aspectos concretos del proceso mediante el uso de herramientas de analítica de cantidades masivas de datos y técnicas experimentales, como alternativa a los modelos teóricos existentes en la revisión del estado del arte realizada. La metodología empleada en este trabajo de tesis abre la posibilidad a utilizarla en un futuro para corregir otros problemas, tal y como se describe en el próximo punto.

## VI.2 LÍNEAS FUTURAS

Tomando como referencia las conclusiones obtenidas, las líneas futuras de investigación que se desprenden de este trabajo son las siguientes:

- I. La vibración y deformación del hilo en círculos de radio pequeño sigue siendo un concepto que debe seguir siendo estudiado. La superposición de diferentes efectos como el desequilibrio de áreas a erosionar (causada por la resultante de las fuerzas inherentes al proceso) y la variación en la presión del fluido dieléctrico comentados en el apartado anterior, hacen imposible generar una relación entre estos efectos y el cambio en el comportamiento de las descargas sin realizar un estudio más profundo teniendo en cuenta ambos factores.
- II. Queda patente la necesidad de adquirir una mayor cantidad de información de los procesos de mecanizado, de forma que puedan seguir generándose bases de datos e históricos que se utilicen en las distintas herramientas computacionales que hoy en día son capaces de resolver problemas de diferente índole.
- III. Así, existe otra línea futura de investigación muy amplia, puesto que de este trabajo se desprenden las nuevas posibilidades existentes en el campo de la fabricación avanzada y las máquinas-herramienta de alto rendimiento aplicando diferentes estructuras de ANNs para resolver cada problema específico. Las diferentes estructuras utilizadas y validadas para las técnicas de la comunicación son ahora objeto de estudio para resolver problemas en otros sectores como el de la máquina-herramienta.
- IV. Por último, en cuanto a la detección del espesor durante el proceso de corte y la predicción de su cambio con la mayor antelación posible, son dos temas que deben seguir estudiándose para poder realizarla en tiempo real, una vez se ha analizado la existencia de una relación entre diferentes variables del proceso que posibilitan su conocimiento. Para ello, sería necesario analizar la posible implementación del sistema de detección en la propia máquina.

---

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- [ADMAPGAS] ADMAP-GAS project  
[http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/admap\\_gas\\_en.htm](http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/admap_gas_en.htm)
- [Arriandiaga, 2014] A. Arriandiaga, E. Portillo, J. A. Sánchez, I. Cabanes, I. Pombo. Virtual sensors for on-line wheel wear and part roughness measurement in the grinding process. *Sensors*, 14-5 (2014) 8756–8778.
- [Arriandiaga, 2016 1] A. Arriandiaga, E. Portillo, J. A. Sánchez, I. Cabanes, I. Pombo. A new approach for dynamic modelling of energy consumption in the grinding process using recurrent neural networks. *Neural Computing and Applications*, 27 (2016) 1577–1592.
- [Arriandiaga, 2016 2] A. Arriandiaga. Recurrent Neural Network Based Approach for Estimating the Dynamic Evolution of Grinding Process Variables. Tesis doctoral (2016). Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).
- [Arriandiaga, 2017] A. Arriandiaga, E. Portillo, J. A. Sánchez, I. Cabanes, A. Zubizarreta. Downsizing training data with weighted FCM for predicting the evolution of specific grinding energy with RNNs. *Applied Soft Computing*, 61 (2017) 211-221.
- [Arunachalam, 2001] C. Arunachalam, M. Aulia, B. Bozkurt, and P. T. Eubank. Wire vibration, bowing, and breakage in wire electrical discharge machining. *Journal of Applied Physics* 89 (2001) 4255.
- [Attanasio, 2013] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, C. Analytical models for tool wear prediction during AISI 1045 turning operations. *Procedia CIRP*, 8 (2013) 218-223.
- [Beltrami, 1996] I. Beltrami, A. Berthoolds, D. Dauw. A simplified post process for wire cut EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 58 (1996) 385–389.
- [Benardos, 2006] P. G. Benardos, S. Mosialos, G. C. Vosniakos. Prediction of workpiece elastic deflections under cutting forces in turning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22 (2006) 505-514.
- [BIEMH] Bienal Española de Máquina Herramienta  
<http://biemh.bilbaoexhibitioncentre.com/eu>
- [Cabanes, 2008 1] Cabanes, I., E. Portillo, M. Marcos, y J.A. Sánchez. Industrial application for on-line detection of instability and wire breakage in wire EDM). *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 1-3 (2008) 101-109.

- [Cabanes, 2008 2] I. Cabanes, E. Portillo, M. Marcos, J. A. Sánchez. On-line prevention of wire breakage in wire electro-discharge machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24-2 (2008) 287.
- [Caggiano, 2015] A. Caggiano, R. Teti, R. Perez, P. Xirouchakis. Wire EDM Monitoring for Zero-defect Manufacturing based on Advanced Sensor Signal Processing. *Procedia CIRP*, 33 (2015) 315-320.
- [Caggiano, 2016] A. Caggiano, R. Perez, T. Segreto, R. Teti, P. Xirouchakis. Advanced Sensor Signal Feature Extraction and Pattern Recognition for Wire EDM Process Monitoring. *Procedia CIRP*, 42 (2016) 34-39.
- [Chen, 2010] H. C. Chen, J. C. Lin, Y. K. Yang, C. H. Tsai. Optimization of wire electrical discharge machining for pure tungsten using a neural network integrated simulated annealing approach. *Expert Systems with Applications*, 37 (2010) 7147-7153.
- [Chen, 2014] Z. Chen, Y. Huang, Z. Zhang, H. Li, W. Ming, G. Zhang. An analysis and optimization of the geometrical inaccuracy in WEDM rough corner cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* 74 (2014) 917–929.
- [Chen, 2015] Z. Chen, Y. Huang, H. Huang, Z. Zhang, G. Zhang. Three-dimensional characteristics analysis of the wire-tool vibration considering spatial temperature field and electromagnetic field in WEDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 92 (2015) 85–96.
- [Ciresan, 2013 1] D. C. Cireşan, A. Giusti, L. M. Gambardella, J. Schmidhuber. Mitosis detection in breast cancer histology images with deep neural networks. *Proceedings MICCAI*, 2 (2013) 411–418.
- [Ciresan, 2013 2] D.C. Cireşan, J. Schmidhuber. Multi-Column Deep Neural Networks for Offline Handwritten Chinese Character Classification (2013) Preprint arXiv:1309.0261
- [D'Addona, 2013] D.M. D'Addona, R. Teti. Image data processing via neural networks for tool wear prediction. *Procedia CIRP*, 12 (2013) 252-257.
- [Dauw, 1994] D. F. Dauw, I. Beltrami. High-precision wire-EDM by on-line wire positioning control. *Annals of th CIRP*, 43 (1994) 193-199.
- [Dekeyser, 1989] W. L. Dekeyser, R. Snoeys. Geometrial Accuray of Wire-EDM. IX International Symposium of Electro Machining, Laussane (1989) 226-232.
- [Diamond, 1989] W. J. Diamond. *Practical Experiment Designs*. Third edition (1989).
- [Dodun, 2009] O. Dodun, A. Gonçalves-Coelho, L. Slătineanu, G. Nagîţ. Using wire electrical discharge machining for improved corner cutting accuracy of thin parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 41,9-10 (2009) 858-864.

- 
- [Dou, 2016] D. Dou, S. Zhou. Comparison of four direct classification methods for intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Applied Soft Computing*, 46 (2016) 459-468.
- [Elman, 1990] J. Elman. Finding Structure in Time. *Cognitive Science*, 14 (1990) 179-211.
- [EMO] EMO Hannover  
<http://www.emo-hannover.de/home>
- [ETSIB] Escuela de Ingeniería de Bilbao  
<http://www.ehu.es/es/web/ingeniaritza-bilbao>
- [Fanuc] Fanuc, Eelectroerosión por hilo con ROBOCUT  
<http://www.fanuc.eu/es/es/robocut-ib>
- [Firouzabadi, 2015] H. A. Firouzabadi, J. Parvizian, A. Abdullah. Improving accuracy of curved corners in wire EDM successive cutting. *International Advanced Manufacturing Technologies* 76 (2015) 447-459.
- [Gajate, 2012] A. Gajate, R. Haber, R.D. Toro, P. Vega, A. Bustillo. Tool wear monitoring using neuro-fuzzy techniques: a comparative study in a turning process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (2012) 869-882.
- [GFMS] GF Machining Solutions  
<http://www.gfms.com>
- [Goodfellow, 2016] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. *Deep Learning*. MIT Press (2016) [www.deeplearningbook.org/](http://www.deeplearningbook.org/)
- [Guangwei, 2018] H. Guangwei, X. Weiwen, Z. Wansheng. Online workpiece height estimation for reciprocated travelig wire EDM based on support vector machine. *Procedia CIRP*, 68 (2018) 126-131.
- [Habib, 2016] S. Habib, A. Okada. Study on the movement of wire electrode during fine wire electrical discharge machining process. *Journal of Materials Processing Technology*, 227 (2016) 147-152.
- [Hada, 2013] K. Hada, M. Kunieda. Analysis of Wire Impedance in Wire-EDM Considering Electromagnetic Fields Generated around Wire Electrode. *Procedia CIRP*, 6 (2013) 244-249.
- [Hagan, 2014] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale, O. de Jesús. *Neural Network Design* (2014) 2nd edition, United States. Martin Hagan.
- [Han, 2007] F. Han, J. Zhang, I. Soichiro. Corner error simulation of rough cutting in wire EDM. *Precision Engineering*, 31 (2007) 331-336.
- [Haykin, 1998] S. Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.

- [Hinduja, 2013] S. Hinduja, M. Kunieda. Modelling of ECM and EDM processes. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 62 (2013) 775-797.
- [Hochreiter, 1997] S. Hochreiter, J. Schmidhuber. Long Short-Term Memory. Neural Computation, 9-8 (1997) 1735-1780.
- [Hsue, 1999] A. W. J. Hsue, Y. S. Liaio, S. S. Lu. Fundamental geometry analysis of wire electrical discharge machining in corner cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39-4 (1999) 651-667.
- [Hu, 2018] W. Hu, Y. Yu, W. Gu. Parameter estimation of fractional-order arbitrary dimensional hyperchaotic systems via a hybrid adaptive artificial bee colony algorithm with simulated annealing algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 68 (2018) 172-191.
- [IMTEX] Indian Machine Tool Exhibition  
<http://www.imtex.in/>
- [IMTS] International Manufacturing Technology Show  
<https://www.imts.com/>
- [JIMTOF] Japan International Machine Tool Fair  
<http://www.jimtof.org/en/>
- [Jawaid, 1999] A. Jawaid, C.H. Che-Haron, A. Abdullah. Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246. Journal of Materials Processing Technology, 92–93 (1999) 329-334.
- [Juwet, 1987] M. Juwet, B. Lauwers. Geometrische en Technologische Programmering van Draadvonkerosiemachines vanuit CAD/CAM Systemen. K. U. Leuven, Belgium, Dept. of Mechanical Engineering, 87E7, 1987.
- [Kamei, 2016] T. Kamei, A. Okada, Y. Okamoto. High-speed Observation of Thin Wire Movement in Fine Wire EDM. Procedia CIRP, 42 (2016) 596-600.
- [Kinoshita, 1984] N. Kinoshita, M. Fukui, Y. Kimura. Study on Wire-EDM: inprocess measurement of mechanical behaviour of electrode-wire. Annals of the CIRP 33:1 (1984) 89–92.
- [Kirkpatrick, 1983] S. Kirkparick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. Optimization by simulated ennealing. Science, new series 220-4598 (1983) 671-680.
- [Klocke, 2013] F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, D. Veselovac. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, Sinking-EDM, Wire-EDM and ECM for Titanium- and Nickel-Based Blisks. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 6 (2013) 198-203.

- [Klocke, 2014 1] F. Klocke, A. Klink, D. Veselovac, D.K. Aspinwall, S. L. Soo, M. Schmidt, J. Schilp, G. Levy, J.P. Kruth. Turbomachinery Component Manufacture by Application of Electrochemical, Electro-Physical and Photonic Processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 63 (2014) 703-726.
- [Klocke, 2014 2] F. Klocke, D. Welling, A. Klink, D. Veselovac, T. Nöthe, R. Perez. Evaluation of Advanced Wire-EDM Capabilities for the Manufacture of Fir Tree Slots in Inconel 718. *Procedia CIRP* 14 (2014) 430–435.
- [Klocke, 2014 3] F. Klocke, D. Welling, A. Klink, R. Perez. Quality Assessment through In-Process Monitoring of Wire-EDM for Fir Tree Slot Production. *Procedia CIRP* 24 (2014) 97-102.
- [Krizhevsky, 2012] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Proceedings NIPS*, 25 (2012) 1106–1114.
- [Laboissiere, 2015] L. A. Laboissiere, R. A. S. Fernandes, G. G. Lage. Maximum and minimum stock price forecasting of Brazilian power distribution companies based on artificial neural networks. *Applied Soft Computing*, 35 (2015) 66-74.
- [Lee, 2007] W. M. Lee, Y. S. Liao. Adaptive control of the WEDM process using a self–turning fuzzy logic algorithm with grey prediction. *International Journal of Advance Manufacturing Technologies*, 34 (2007) 527-537.
- [Liang, 2014] J. F. Liang, Y. S. Liao. Methods to Measure Wire Deflection in Wire EDM Machining. *International Journal Automation Technology*, 8-3 (2014) 461-467.
- [Liao, 1997] Y. S. Liao, Y. Y. Chiu, M. T. Yan. Study of wire breaking process and monitoring of WEDM. *International Journal of Machine Tool and Manufacturing*, 37 (1997) 555-567.
- [Liao, 2002] Y. S. Liao, M. T. Yan, C. C. Chang. A neural network approach for the on-line estimation of workpiece height in WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 121 (2002) 252-258.
- [Liao, 2013] Y.S. Liao, T.J. Chuang, Y.P. Yu. On-line workpiece height estimation and its application in servo feed control of WEDM process. *Procedia CIRP* 6 (2013) 226–231.
- [Mateo, 2014] A. Mateo. On the feasibility of BLISK produced by linear friction welding. *Revista de Metalurgia* (2014) DOI: 10.3989/revmetalm.023
- [Mikołajczyk, 2017] T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Kłodowski, D.Yu. Pimenov. Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 88 (2017) 100-110.

- [Mikołajczyk, 2018] T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Bustillo, D. Yu Pimenov. Predicting tool life in turning operations using neural networks and image processing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104 (2018) 503-513.
- [Mitsubishi] Mitsubishi Electric, EDM  
<http://www.mitsubishi-edm.de/>
- [Mori, 2016] A. Mori, M. Kunieda, K. Abeb. Clarification of Gap Phenomena in Wire EDM Using Transparent Electrodes. *Procedia CIRP*, 42 (2016) 601-605.
- [Murphy, 2000] K. D. Murphy, Z. Lin. The influence of spatially non uniform temperature fields on the vibration and stability characteristics of EDM wires. *International Journal of Mechanical Sciences* 42:7 (2000) 1369–1390.
- [Nguyen, 1990] D. Nguyen, B. Widrow. Improving the Learning Speed of 2-Layer Neural Networks by Choosing Initial Values of the Adaptive Weights. San Diego, IEEE, (1990) 21-26.
- [Obara, 1995] H. Obara, Y. Makino, T. Ohsumi. Single discharging force and single machining volumen of wire EDM. XI International Symposium of Electro Machining, Laussane (1995) 85-93.
- [Okada, 2009] A. Okada, Y. Uno, S. Onoda, S. Habib. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *CIRP Annals*, 58-1 (2009) 209-212.
- [Okada, 2010] A. Okada, Y. Uno, M. Nakazawa, T. Yamauchi. Evaluations of spark distribution and wire vibration in wire EDM by high-speed observation. *Procedia CIRP*, 59-1 (2010) 231-234.
- [Okada, 2013] A. Okada, S. Ichii, Y. Okamoto. Investigation of Wire Movement in Fine Wire EDM by High-Speed Observation. *International Journal of Electrical Machining*, 18 (2013) 43-48.
- [Okada, 2015] A. Okada, T. Konishi, Y. Okamoto, H. Kurihara. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM. *Procedia CIRP*, 64-1 (2015) 233-236.
- [ONA] ONA EDM  
<http://www.onaedm.com/>
- [Oßwald, 2018] K. Oßwald, I. Lochmahr, H. P. Schulze, O. Kröning. Automated Analysis of Pulse Types in High Speed Wire EDM. *Procedia CIRP*, 68 (2018) 796-801.
- [Palacios, 2018] J. A. Palacios, D. Olvera, G. Urbikain, A. Elías-Zúñiga, O. Martínez-Romero, L. N. López de Lacalle, C. Rodríguez, H. Martínez-Alfaro. Combination of simulated annealing and pseudo spectral methods for the optimum removal rate in turning operations of nickel-based alloys. *Advances in Engineering Software*, 115 (2018) 391-397.

- [Panschow, 1974] R. Panschow. Über Die Kräfte und ihre Wirkungen beim elektroeroiven Schneiden mit ablaufender Drahtelektrode. Dissertation, T.U. Hannover, Germany (1974).
- [Plaza, 2008] S. Plaza. Modelos numéricos y experimentales para la optimización de la precisión en corte cónico por electroerosión por hilo. Tesis doctoral (2008). Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España.
- [Plaza, 2009] S. Plaza, N. Ortega, J. A. Sanchez, I. Pombo, A. Mendikute. Orginal models for the prediction of angular error in wire-EDM taper-cutting. International Journal of Advance Manufacture Technologies, 44: 5-6 (2009) 529-538.
- [Portillo, 2009] E. Portillo, M. Marcos, I. Cabanes, D. Orive. Real-time monitoring and diagnosing in wire-electro discharge machining. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 44 (2009) 273-282.
- [Puri, 2003 1] A. B. Puri, B. Bhattacharyya. Modelling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM. Journal of Materials Processing Technology (2003) 295–301.
- [Puri, 2003 2] A. B. Puri, B. Bhattacharyya. An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM. International Journal of Machine Tools and Manufacture (2003) 151–159.
- [Rajurkar, 1997] K.P. Rajurkar, W.M. Wang, W.S. Zhao. WEDM-adaptive control with a multiple input model for identification of workpiece height. University of Nebraska, Lincoln, USA (1997).
- [Rasdi Rere, 2015] L. M. Rasdi Rere, M. I. Fanany, A. M. Arymurthy. Simulated Annealing Algorithm for Deep Learning. Procedia Computer Science, 72 (2015) 137-144.
- [ROO] ROO S.A.  
<http://utilidadesroo.com/utilidades-para-estampacion-en-frio/>
- [Sanchez, 2007 1] J. A. Sanchez, J. L. Rodil, A. Herrero, L. N. Lopez de La callea, A. Lamikiz. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting. Journal of Materials Processing Technology, 182-1-3 (2007) 574-579.
- [Sanchez, 2007 2] A new strategy for the optimisation of the accuracy of wire EDM corner-cutting. Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, ISEM (2007) 177-182.
- [Sarkar, 2011] S. Sarkar, M. Sekh, S. Mitra, B. Bhattacharyya. A novel method of determination of wire lag for enhanced profile accuracy in WEDM. Precision Engineering 25 (2011) 339–347.

- [*ScienceDirect*] ScienceDirect, peer-reviewed journals, articles, book chapters and open access content  
<http://www.sciencedirect.com/>
- [*Shakeri, 2016*] S. Shakeri, A. Ghassemi, M. Hassani, A. Hajian. Investigation of material removal rate and surface roughness in wire electrical discharge machining process for cementation alloy steel using artificial neural network. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82-1 (2016) 549–557.
- [*Sodick*] Sodick  
<https://www.sodick.com/products/wire-edm>
- [*Tecma*] Tecnología en Máquinas Herramienta  
<http://tecma.org.mx/>
- [*TeBa*] Technologie-Entwicklung Baumgart  
<http://www.technologie-entwicklung.de/>
- [*Tomura, 2008*] S. Tomura, M. Kunieda. Study on electromagnetic force during wire-EDM. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 74-4 (2008) 364-368.
- [*Tomura, 2009*] S. Tomura, M. Kunieda. Analysis of electromagnetic force in wire-EDM. Precision Engineering 33:3 (2009) 255–262.
- [*Wang, 2015*] Y. Wang, J. Li, J. Gu, Z. Zhou, Z. Wang. Artificial neural networks for infectious diarrhea prediction using meteorological factors in Shanghai (China). Applied Soft Computing, 35 (2015) 280-290.
- [*Wang, 2018*] L. Wang, Y. Guo, G. Zhang, D. Kelie. A Novel Discharge Status Inspection Method for EDM of Thermal-barrier-coated Nickel-based Superalloys. Procedia CIRP, 68 (2018) 40-45.
- [*Watanabe, 1990*] H. Watanabe, T. Sato, I. Suzuki, N. Kinoshita. WEDM Monitoring with a Statistical Pulse-Classification Method. CIRP annals Manufacturing Technology, 39-1 (1990) 175-178.
- [*Wentai, 2016*] S. Wentai, L. Zhidong, Q. Mingbong, T. Zongjun. Wire tension in high-speed wire electrical discharge machining. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 82 (2016), 379–389. DOI 10.1007/s00170-015-7352-3.
- [*Werbos, 1990*] P. J. Werbos. Backpropagation through time: What it does and how to do it. Proceedings IEEE, 78 (1990) 1550-1560.
- [*Wickert, 1990*] J. Wickert, CD. Mote Jr. Classical vibration analysis of axially moving continua. Journal of Applied Mechanics, 57 (1990) 738-44.
- [*Yan, 2004*] M. T. Yan, P. H. Huang. Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 44 (2004) 807-814.

*[Yin, 2016]*

J. Yin, W. Zhao. Fault diagnosis network design for vehicle on-board equipments of high speed railway: A deep learning approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 56 (2016) 250-259.

*[Zhang, 2014]*

G. Zhang, Z. Chen, Z. Zhang, Y. Huang, W. Minga. H. Li. A macroscopic mechanical model of wire electrode deflection considering temperature increment in MS-WEDM process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 78 (2014) 41-53.