

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN  
MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Modelado del proceso de maquinado ECDM mediante lógica difusa**

**TESIS**

**Que para obtener el grado académico de**

**Maestro en Ciencia y Tecnología en Manufactura Avanzada**

**POR**

**Jansel Leyva Bravo**

**SALTILLO, COAHUILA.**

**11 de Diciembre de 2018**

Modelado del proceso de maquinado ECDM mediante lógica  
difusa

Por

Jansel Leyva Bravo

TESIS

Presentada al programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología

Sede

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.**

Como requisito parcial para obtener el grado académico de

**Maestro en Ciencia y Tecnología en Manufactura Avanzada**

**Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología COMIMSA**

Saltillo Coahuila, 11 de Diciembre de 2018

Modelado del proceso de maquinado ECDM mediante lógica difusa

Por

Jansel Leyva Bravo

Comité Revisor

**Director de Tesis / Tutor Académico:**

Dra. Pamela Chiñas Sánchez  
Instituto Tecnológico de Saltillo

**Revisor No. 1:**

Dr. Ismael López Juárez.  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico  
Nacional Unidad Saltillo (CINVESTAV)

**Revisor No.2:**

Dr. David Salvador González González  
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.  
(COMIMSA)

**Tutor de Planta:**

Dr. Pedro Pérez Villanueva  
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.  
(COMIMSA)

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A de C.V**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “**MODELADO DEL PROCESO DE MAQUINADO ECDM MEDIANTE LÓGICA DIFUSA**”, realizada por el alumno **JANSEL LEYVA BRAVO** matrícula **1506IM1122** sea aceptada para su defensa como Maestro en Ciencia y Tecnología en Manufactura Avanzada

El Comité Tutorial

---

**Dra. Pamela Chiñas Sánchez**

Tutora Académica / Directora de Tesis

---

**Dr. Pedro Pérez Villanueva**

Tutor en Planta

---

**Dra. Alejandra Hernández Rodríguez**

Asesora

---

Vo. Bo

**Dr. Pedro Pérez Villanueva**

Coordinación General de Estudios de Posgrado

COMIMSA

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A de C.V**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis **“MODELADO DEL PROCESO DE MAQUINADO ECDM MEDIANTE LÓGICA DIFUSA”**, realizada por el alumno **JANSEL LEYVA BRAVO** matrícula **1506IM1122** sea aceptada para su defensa como Maestro en Ciencia y Tecnología en Manufactura Avanzada durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 11 días del mes de Diciembre del año 2018.

---

Dr. Ismael López Juárez  
Presidente

---

Dr. David Salvador González González  
Secretario

---

Dra. Pamela Chiñas Sánchez  
Vocal

# Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional en Ciencia y Tecnología (CONACYT), por darme la oportunidad de venir a estudiar y permitir mi desarrollo profesional a través de la beca otorgada.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA), por aceptarme y darme la oportunidad de desarrollarme en el programa de maestría a través de la beca otorgada.

A mi tutora Dra. Pamela Chiñas Sánchez por todo su apoyo.

A mi asesora Dra. Alejandra Hernández Rodríguez por estar siempre presente.

A mis compañeros del laboratorio de Electromaquinado de COMIMSA en especial a Gerardo Galo Hernández.

A todos los doctores, maestros y trabajadores de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA) que de una forma u otra influyeron en mi formación y brindaron su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis amigos que hacen cada día diferente, muchas gracias.

## **Dedicatoria**

A toda mi familia: a mi abuelo, mis padres, hermana, sobrinos,  
tíos y mis primas.

A mi esposa por su comprensión y cariño incondicional.

Sin todos ellos no hubiese sido posible.

# Contenido

Contenido .....	8
Abreviaturas .....	13
Resumen .....	1
Capítulo 1 .....	2
1. Introducción .....	2
Capítulo 2 .....	5
2. Planteamiento del Problema .....	5
2.1. Descripción del problema .....	5
2.2. Hipótesis .....	7
2.3. Objetivos .....	7
2.3.1. Objetivo General .....	7
2.3.2. Objetivos Específicos .....	7
2.4. Preguntas de Investigación .....	7
2.5. Justificación .....	8
2.6. Alcance y Delimitaciones .....	9
2.7. Resultados y Entregables .....	9
Capítulo 3 .....	10
3. Revisión Bibliográfica .....	10
3.1. Estado del Arte .....	10
Capítulo 4 .....	22
4. Marco teórico .....	22
4.1. Procesos de Electromaquinado .....	22
4.1.1. Maquinado por Descarga Eléctrica (EDM) .....	23
4.1.2. Maquinado Electroquímico (ECM) .....	24
4.1.3. Maquinado Electroquímico por Descarga Eléctrica (ECDM) .....	25
4.1.3.1. Parámetros del proceso ECDM .....	28
4.1.3.2. Relación de parámetros de entrada respecto a los parámetros de salida del proceso ECDM .....	32
4.2. Lógica Difusa .....	37
4.2.1. Conjuntos Difusos .....	39



4.2.2.	Operaciones entre conjuntos difusos en un mismo universo de discurso.....	41
4.2.3.	Operaciones entre conjuntos difusos en diferentes universos de discurso ....	42
4.2.3.1.	Producto cartesiano .....	42
4.2.3.2.	Relación difusa .....	42
4.2.3.3.	Composición.....	43
4.2.4.	Principio de extensión.....	43
4.2.5.	Variables lingüísticas .....	44
4.2.6.	Funciones de membresía.....	45
4.2.7.	Razonamiento difuso .....	50
4.2.7.1.	Implicación difusa .....	50
4.2.7.2.	Métodos de razonamiento difuso .....	51
4.2.8.	Agregación de reglas difusas .....	52
4.2.9.	Etapas de los sistemas difusos .....	52
Capítulo 5.....		55
5. Metodología.....		55
Capítulo 6.....		57
6. Procedimiento Experimental.....		57
6.1. Preparación metalográfica .....		57
6.1.1. Determinación de la microdureza del material de trabajo. ....		58
6.2. Técnica experimental.....		59
6.3. Etapa experimental .....		64
6.3.1. Obtención de los parámetros de salida.....		69
6.3.1.1. Tasa de Remoción de Material (MRR) .....		69
6.3.1.2. Diámetro del Sobrecorte (DOC).....		70
6.4. Análisis y discusión de resultados del diseño de experimentos .....		73
6.5. Modelación con Lógica Difusa .....		76
6.6. Análisis y Discusión de resultados del modelo difuso .....		85
6.7. Validación del modelo difuso.....		95
7 Conclusiones.....		100
Bibliografía .....		103
Anexos .....		112

Anexo 1: Reglas heurísticas del modelo difuso. ....	112
Anexo 2: Código de programación del modelo difuso en MATLAB®. ....	114
Anexo 3: Publicaciones. ....	117

## Listado de tablas

Tabla 4.1: Operación difusa unión. ....	41
Tabla 4.2: Operación difusa intersección. ....	41
Tabla 4.3: Operación difusa complemento. ....	42
Tabla 4.4: Función de membresía Singleton. ....	47
Tabla 4.5: Función de membresía Trapezoidal. ....	47
Tabla 4.6: Función de membresía Triangular. ....	47
Tabla 4.7: Función de membresía Gaussiana. ....	48
Tabla 4.8: Función de membresía Sigmoidal. ....	48
Tabla 4.9: Funciones de membresía Hombro o Saturación. ....	49
Tabla 6.1: Composición Química del material de trabajo HSS (% e. p.). ....	57
Tabla 6.2: Valores de la velocidad de rotación (SFeed) y la velocidad de avance de la herramienta (Feed). ....	63
Tabla 6.3: Niveles de los factores para el diseño de experimentos. ....	65
Tabla 6.4: Diseño de experimento generado. ....	65
Tabla 6.5: Parámetros constantes y sus valores. ....	67
Tabla 6.6: Composición Química Latón (% e. p.). ....	68
Tabla 6.7: Diseño de experimento. ....	72
Tabla 6.8: Análisis de Correlación entre MRR y DOC. ....	73
Tabla 6.9: Comparación entre MRR en ambas réplicas. ....	74
Tabla 6.10: Comparación entre DOC en ambas réplicas. ....	75
Tabla 6.11: Corridas de los puntos centrales. ....	75
Tabla 6.12: Variables lingüísticas, conjuntos difusos y funciones de membresía de la variable de entrada: voltaje de gap ( $V_g$ ). ....	78
Tabla 6.13: Términos lingüísticos, conjuntos difusos y funciones de membresía de la variable de entrada: corriente pico ( $I_p$ ). ....	79
Tabla 6.14: Términos lingüísticos, conjuntos difusos y funciones de membresía de la variable de entrada: frecuencia de la señal ( $f$ ). ....	81
Tabla 6.15: Variable lingüística, conjuntos difusos y funciones de membresía de MRR. ....	83
Tabla 6.16: Términos lingüísticos, conjuntos difusos y funciones de membresía de DOC. ....	84
Tabla 6.17: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para la Tasa de Remoción de Materia (MRR) con el método de centro de área. ....	86

Tabla 6.18: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para el Diámetro de Sobrecorte (DOC) con el método de centro de área. ....	87
Tabla 6.19: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para la Tasa de Remoción de Materia (MRR) con el método de bisectriz.....	88
Tabla 6.20: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para el Diámetro de Sobrecorte (DOC) con el método de bisectriz. ....	88
Tabla 6.21: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para la Tasa de Remoción de Materia (MRR) con el método de media de máximos.....	89
Tabla 6.22: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para el Diámetro de Sobrecorte (DOC) con el método de media de máximos.....	90
Tabla 6.23: Comparación de resultados de MAPE y exactitud para los métodos de defusificación. ....	91
Tabla 6.24: Corridas experimentales para la validación del modelo. ....	96
Tabla 6.25: MAPE y exactitud de la MRR en las corridas de validación.....	96
Tabla 6.26: MAPE y exactitud de la DOC en las corridas de validación. ....	97

## Listado de figuras

Figura 4.1: Arquitectura general para los procesos ECM, EDM y ECDM.....	23
Figura 4.2: Esquema de variables de entrada del proceso ECDM.....	28
Figura 4.3: Representación de una perforación en ECDM .....	32
Figura 4.4: Comparación entre lógica booleana y lógica difusa.....	39
Figura 4.5: Ejemplo de conjunto difuso para la estatura de una persona.....	40
Figura 4.6: Ejemplo de particiones difusas para la variable lingüística “estatura” .....	45
Figura 4.7: Características de las funciones de membresía .....	46
Figura 4.8: Etapas de un sistema difuso.....	53
Figura 5.1: Metodología.....	55
Figura 6.1: Muestra de las piezas de trabajo con acabado espejo.....	58
Figura 6.2: (a) Pieza procesada en el análisis de microdureza. (b) Resultados del análisis de microdureza .....	59
Figura 6.3: (a) Máquina EDM River 3 (elaboración propia). (b) Panel de control maquina EDM River 3 .....	60
Figura 6.4: (a) Osciloscopio Tektronix TDS 2004C (elaboración propia). (b) Esquema eléctrico de conexión.....	61
Figura 6.5: Sonda de corriente Tektronix A622.....	62
Figura 6.6: Instrumentos de medición utilizados en las experimentaciones. (a) Balanza de alta precisión marca OHAUS modelo Scout Pro SP602. (b) Medidor de resistividad marca HANNA Instruments modelo HI 87314. (c) Vernier Mitutoyo Absolute Digimatic .....	64

Figura 6.7: Vista frontal de formas de herramienta de trabajo. (a) Electrodo de tubo o simple. (b) Electrodo de doble agujero o tipo H. ....	68
Figura 6.8: Vista lateral del orificio de entrada de una pieza maquinada. (a) Niveles máximos, $t_{maq}=1:05$ min. (b) Niveles medios, $t_{maq}=1:52$ min. (c) Niveles bajos, $t_{maq}=11:03$ min. ....	70
Figura 6.9: Imagen procesada en Image-Pro Plus 4.1 con la medición del diámetro del orificio de entrada .....	71
Figura 6.10: Comparación entre los resultados experimentales y los valores obtenidos con el modelo difuso. (a) Tasa de Remoción de Material. (b) Diámetro del Sobrecorte.	92
Figura 6.11: Superficies difusas para la Tasa de Remoción de Material en relación con el cambio de los parámetros de entrada. (a) Respecto a $Vg$ e $Ip$ . (b) Respecto a $Vg$ y $f$ . (c) Respecto a $Ip$ y $f$ .....	94
Figura 6.12: Superficies difusas para el Diámetro de Sobrecorte en relación con el cambio de los parámetros de entrada. (a) Respecto a $Vg$ e $Ip$ . (b) Respecto a $Vg$ y $f$ . (c) Respecto a $Ip$ y $f$ .....	95
Figura 6.13: Comparación entre los resultados experimentales de validación y los valores obtenidos con el modelo difuso. (a) Tasa de Remoción de Material. (b) Diámetro del Sobrecorte.....	99

# Abreviaturas

ANFIS	Sistema de Inferencia Neuro Difuso
ANOVA	Análisis de Varianza
COMIMSA	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
DOC	Diámetro de Sobrecorte
DoE	Diseño de Experimentos
DF	Ciclo de Trabajo o Ciclo Útil
ECAM	Maquinado Electroquímico por Arco
ECDM	Electroquímico por Descarga Eléctrica
ECM	Maquinado Electroquímico
ECSM	Maquinado Electroquímico por Chispa
EDM	Maquinado por Descarga Eléctrica o Electroerosión
EEDM	Maquinado de Electroerosión por Disolución
f	Frecuencia
HAZ	Zona Afectada por el Calor
HSS	Acero de Alta Resistencia
IEG	Separación entre los Electroodos
Ip	Corriente Pico
MANOVA	Análisis de Varianza Multivariado
MAPE	Error Porcentual Absoluto Medio
MEB	Microscopio Electrónico por Barrido
MMC	Compuestos de Matriz Metálica
MRR	Tasa de Remoción de Material
NaCl	Cloruro de Sodio
PSO	Optimización por Enjambre de Partículas
RSM	Metodología de Superficie de Respuesta
SACE	Maquinado por Chispa de Grabado Químico
SR	Rugosidad de la Superficie
$t_{maq}$	Tiempo de maquinado
$t_{off}$	Pulso no Activo
$t_{on}$	Pulso Activo
TWR	Tasa de Desgaste de la Herramienta
Vg	Voltaje de Gap

# Resumen

La modelación de procesos es un aspecto importante en la industria, ya que permite obtener una alta productividad aunado al ahorro de energía y recursos materiales. Los procesos de electromaquinado se aplican en la industria, por lo que su modelación es un aspecto de gran importancia. En este sentido, el proceso híbrido de Maquinado Electroquímico por Descarga Eléctrica (ECDM) está sujeto a que los parámetros presenten niveles de incertidumbre e imprecisiones, por lo cual una opción viable de modelar este proceso es a través de técnicas heurísticas como lógica difusa. En la presente investigación se desarrolla un modelo difuso para la predicción de la Tasa de Remoción de Material (MRR) y el Diámetro de Sobrecorte (DOC), tomando como parámetros de entrada el voltaje de gap ( $V_g$ ), corriente pico ( $I_p$ ) y frecuencia ( $f$ ). Se desarrolló un diseño de experimentos factorial completo de 3 factores con 2 niveles ( $2^3$ ) con dos réplicas y 4 puntos centrales, el cual contribuyó para establecer la base de conocimientos del sistema difuso. Con el modelo difuso que se presenta se obtuvo más del 90% de exactitud respecto a los resultados experimentales para ambas salidas del modelo en las corridas correspondientes al diseño de experimentos. Mientras que en las corridas de validación el modelo tuvo una capacidad de predicción de 89.26% para la MRR y 92.68% para el DOC, por lo cual fue posible concluir que la lógica difusa es una técnica viable para la modelación del proceso ECDM.

**Palabras Claves:** modelación, proceso ECDM, Tasa de Remoción de Material, Diámetro de Sobrecorte, lógica difusa.

**Materia o campo específico:** Lógica Difusa.

# Capítulo 1

## 1. Introducción

La mayoría de los procesos convencionales de maquinado remueven el material por abrasión formando virutas. Para determinadas características de los materiales, estos procesos no son los más adecuados o no son posibles de aplicar. Por ejemplo, si la dureza y resistencia es elevada, si es frágil, si la forma de la pieza es compleja o si el acabado superficial y la tolerancia dimensional son rigurosos. En este sentido, el constante desarrollo industrial ha demandado la fabricación de moldes y piezas con características como las que se mencionaron anteriormente y con geometrías complicadas. Para lograr el maquinado de los materiales que presentan dichas particularidades surgieron los procesos no convencionales, entre estos se destacan los procesos de electromaquinado los cuales son: Maquinado por Descarga Eléctrica o Electroerosión (EDM, por sus siglas en inglés, *Electrical Discharge Machining*), Maquinado Electroquímico (ECM, por sus siglas en inglés *Electrochemical Machining*) y Maquinado Electroquímico por Descarga Eléctrica (ECDM, por sus siglas en inglés *Electrochemical Discharge Machining*) (El-Hofy, 2005), (Davim, 2013).

La arquitectura general de los procesos de electromaquinado consta de dos electrodos que se denominan herramienta de trabajo (cátodo) conectado al polo negativo de la fuente de voltaje y pieza de trabajo (ánodo) conectado al polo positivo de la fuente de voltaje; dicha polaridad es comúnmente la más empleada. Los electrodos no deben tener contacto ya que esto produce cortocircuitos y como consecuencia se retrae la herramienta de trabajo provocando retardos en el maquinado.

El principio de remoción de material del proceso EDM consiste en sumergir los electrodos en una solución dieléctrica. Este es un proceso térmico y la remoción de material tiene lugar a través de descargas eléctricas (Shabgard et al., 2016), (Xi et al., 2017). Por su parte, ECM es un proceso químico, en el cual los electrodos son sumergidos en una solución electrolítica, y el paso de corriente eléctrica a través de los electrodos da lugar al fenómeno de la electrólisis, produciendo la remoción de metal por el desprendimiento de iones (Rajurkar et al., 2013), (Spieser, 2015).

En comparación con EDM, Chak (2016) expresa que en el proceso ECM se obtienen piezas con mejor calidad superficial ya que reduce la rugosidad de la superficie respecto a las obtenidas en EDM. Sin embargo, en EDM se obtiene mayor tasa de remoción de material y bordes más agudos que en ECM. Estos procesos son empleados para producir piezas para la industria automotriz, aeroespacial, electrónica, entre otras (Krötz et al., 2013), (Zhang et al., 2016). Con el fin de emplear las ventajas y reducir las desventajas de los procesos ECM y EDM, ambos se combinan en el proceso de maquinado híbrido mediante descargas eléctricas en un medio electrolítico (ECDM).

El maquinado ECDM permite alcanzar mayor tasa de remoción de material y calidad superficial que sus dos procesos base por separado (Hocheng, 2011). Este proceso fue introducido por Kurafuji et al. (1968), para el micromaquinado de vidrio, ésta fue la primera aplicación reportada del proceso ECDM. También se ha empleado para maquinar otros materiales no conductores como: granito, alúmina (óxido de aluminio), plásticos reforzados con fibra, cuarzo, materiales cerámicos y compuestos (Antil et al., 2014), (K. Gupta et al., 2016) y (Paul et al., 2016). En cuanto a materiales conductores, algunos autores han desarrollado investigaciones en diferentes tipos de aceros inoxidable como ANSI 304, SUS304, 100Cr6, X5 CrNi18-8, también super aleaciones base níquel y cobalto, sobre el trabajo con estos materiales se profundizará en el capítulo 3.

En diferentes trabajos como (Ranganayakulu et al., 2011), (Rao, 2011), (Paul et al., 2014a), (Rajan et al., 2014), se ha resaltado la variedad de parámetros de entrada y salida que intervienen en el funcionamiento del proceso ECDM. Algunos de los parámetros de entrada empleados en la literatura son: voltaje de la fuente, voltaje de gap, corriente pico de las descargas, duración de los pulsos eléctricos, ciclo útil, separación entre los electrodos, velocidad de avance de la herramienta; la concentración, temperatura, flujo del electrolito, entre otros.

El ajuste y acertada selección de los parámetros de entrada incide en la obtención de un maquinado de calidad. Las métricas de rendimiento o calidad (parámetros de salida) más comúnmente empleadas en la literatura son: la Tasa de Remoción de Material (MRR, por sus siglas en inglés *Material Removal Rate*), la Tasa de Desgaste de la Herramienta (TWR, por sus siglas en inglés, *Tool Wear Ratio*), la Rugosidad de la



Superficie (SR, por sus siglas en inglés, *Surface Roughness* o SQ, por sus siglas en inglés, *Surface Quality*), el Diámetro o Radio del Sobrecorte (DOC, por sus siglas en inglés *Diametral Overcut* o ROC, por sus siglas en inglés *Radial Overcut*), la conicidad (*Tapper*) y la Zona Afectada por el Calor (HAZ, por sus siglas en inglés *Heat Affected Zone*).

Referente a los procesos ECM y EDM varios autores como: Labib et al. (2011), Kohli et al. (2012), Sengottuvel et al. (2013) y Shabgard et al. (2013) han destacado que los parámetros de entrada y salida presentan relaciones que hacen compleja su modelación con técnicas tradicionales, además de que los parámetros están sujetos a presentar incertidumbres. Estas conclusiones también han sido expresadas acerca de ECDM por Mediliyegedara et al. (2004b), Ranganayakulu et al. (2011) y Paul et al. (2013). La complejidad del proceso ECDM se debe a que en su teoría intervienen varias disciplinas de la ciencia y la ingeniería; además de la conjunción de los fenómenos que ocurren en los procesos EDM y ECM (Pawar et al., 2015).

Debido a estos aspectos, aún se encuentra en fase de estudio y no cuenta con una amplia aplicación industrial, por lo que es necesario profundizar en el estudio del funcionamiento del maquinado ECDM. En este sentido, para lograr comprender el comportamiento de un proceso es necesario establecer modelos, los cuales pueden ser matemáticos, heurísticos, experimentales, estadísticos, entre otros, ya que los modelos son una descripción cuantitativa y cualitativa de cómo ocurre un proceso real (Shaw, 2013). Por su parte, Mount et al. (2000) consideraron que los modelos son sistemas abstractos equivalentes al sistema real, que representan las propiedades y características reales. Los modelos pueden ser matemáticos, heurísticos, experimentales, estadísticos, entre otros; Además, se pueden emplear para cálculos, análisis y predicciones que de otra forma serían complejos o en algunos casos imposibles de realizar.

El diseño de modelos para el proceso ECDM permite obtener una perspectiva del comportamiento general del maquinado, además de mostrar cómo influye la variación de los parámetros de entrada en los parámetros de salida. El establecimiento de un modelo de este proceso es el punto de partida para investigaciones e implementaciones de sistemas de control precisos, lo cual es un elemento fundamental para su progreso y consolidación en el mercado.

# Capítulo 2

## 2. Planteamiento del Problema

### 2.1. Descripción del problema

ECDM es un proceso de maquinado no convencional con gran potencial y campo de aplicaciones, pues permite maquinar materiales conductores y no conductores de energía eléctrica, además de lograr mayor tasa de remoción de material y menor rugosidad de la superficie que los procesos EDM y ECM. El maquinado ECDM es un proceso complejo ya que en su funcionamiento interactúan fenómenos de diferente naturaleza que ocurren en sus dos procesos base, dando lugar a incertidumbres tanto en la medición de parámetros como en el proceso general.

Durante el maquinado suceden fenómenos químicos, físicos, térmicos y eléctricos; por ejemplo la electrólisis, la interacción del electrolito con los materiales de los electrodos (Goud, Sharma, et al., 2016). Yong et al. (2003), destacó que en ECM las condiciones en el espacio entre los electrodos son de naturaleza aleatoria debido al estado variable de la condición del electrolito (concentración, temperatura y flujo), además de que el proceso está sujeto a diversas complicaciones prácticas como los desechos de la pieza maquinada que causan cortocircuitos afectando al rendimiento del maquinado. También, la propia complejidad de medir el espaciamiento entre la pieza y la herramienta de trabajo con la mayor exactitud es fuente de investigaciones.

De ambos procesos (ECM y EDM) varios autores como: Labib et al. (2011), Kohli et al. (2012), Sengottuvel et al. (2013) y Shabgard et al. (2013), han destacado que los parámetros de entrada y salida presentan relaciones que complejizan su modelación, además de que los parámetros están sujetos a presentar incertidumbres. Éstas ideas también han sido expresadas acerca de ECDM por Mediliyegedara et al. (2004b), Ranganayakulu et al. (2011) y Paul et al. (2013). Otro elemento fundamental es la propia variabilidad de la máquina que provoca diferentes salidas para las mismas entradas. Una muestra de esto se tiene en (Sarkar et al., 2006), donde los autores realizan 6 corridas con los mismos valores de parámetros de entrada y obtienen valores de salidas diferentes. La variabilidad se debe a la propia variación de los parámetros de entrada, los

cuales no permanecerán constantes en un valor. Por ejemplo, un nivel de voltaje debido a las propiedades de los elementos electrónicos no estará totalmente fijo en el valor indicado, este fluctuará. Además, están las variabilidades producidas por los sistemas de adquisición de datos.

Las variabilidades mencionadas resultan en imprecisión e incertidumbre. Debido a lo anteriormente expuesto, Labib et al. (2011) indica que resulta complicado desarrollar modelos matemáticos tradicionales para controlar estos procesos. Además, resalta que los controles basados en estrategias convencionales de control lineal se vuelven complejos de construir y pueden no modelar adecuadamente el proceso. Como consecuencia, a medida que se incrementa la complejidad, se reduce la capacidad de cumplir con los principios significativos del comportamiento del sistema, lo que resulta en imprecisión del modelo.

La modelación de procesos es un aspecto importante en la industria, ya que permite el ahorro de materiales y energía para así obtener alta productividad. En este sentido los autores mencionados anteriormente concluyen que una opción viable de modelar los procesos de electromaquinado es a través de técnicas heurísticas como lógica difusa, ya que permite modelar elementos que se caractericen por imprecisión, vaguedad, incertidumbre y escasez de la información. Además, su funcionamiento no está restringido al cumplimiento de determinadas distribuciones y supuestos estadísticos de los datos (Dewangan et al., 2013), (Barzani et al., 2015) y (MacGillivray, 2017).

El maquinado ECDM se encuentra en fase de estudio y no cuenta con una amplia aplicación industrial. Precisamente en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. (COMIMSA) existe un laboratorio destinado a la investigación de los procesos de electromaquinado (ECM, EDM y ECDM), con fines de su aplicación en la industria automotriz y aeroespacial. El desarrollo de un modelo difuso permitiría la implementación de controles difusos en el proceso ECDM, proporcionando toma de decisiones inteligentes en tiempo real basadas en el conocimiento humano, lo cual ayudaría a aumentar los niveles de rendimiento en el maquinado, propiciando así una mayor productividad en la industria. En este sentido, es necesario determinar un modelo difuso que reúna algunas de las variables relevantes que intervienen en el proceso ECDM, a partir del cual se puedan establecer futuros mecanismos de control difuso, lo

cual es necesario para su establecimiento en el mercado. A partir de los aspectos expuestos, se plantea el siguiente problema científico:

¿Cómo construir un modelo para el proceso de maquinado ECDM mediante la técnica de lógica difusa?

## **2.2. Hipótesis**

Mediante la aplicación de lógica difusa, será posible obtener un modelo aproximado del proceso ECDM que describa la relación de las variables de entrada: voltaje de gap ( $V_g$ ), corriente pico ( $I_p$ ) y frecuencia ( $f$ ) de la señal de voltaje de la fuente; respecto a las variables de salida: Tasa de Remoción de Material (MRR) y el Diámetro del Sobrecorte (DOC).

## **2.3. Objetivos**

### **2.3.1. Objetivo General**

Diseñar un modelo difuso que describa la relación de las variables establecidas para el proceso de maquinado ECDM aplicado a materiales conductores.

### **2.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar las variables de entrada y salida que serán la base para el modelo difuso.
- Plantear un sistema difuso para el proceso de maquinado en condiciones de ECDM con que cuenta el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA, que represente la relación entre las variables de entrada: voltaje de gap ( $V_g$ ), corriente pico ( $I_p$ ) y frecuencia ( $F$ ) de la señal de voltaje de la fuente y de salida: Tasa de Remoción de Material (MRR) y el Diámetro del Sobrecorte (DOC).
- Evaluar el modelo diseñado del proceso de maquinado ECDM mediante pruebas de laboratorio.

## **2.4. Preguntas de Investigación**

- ¿Cuáles son los principios de funcionamiento del proceso de maquinado ECDM?

- ¿Cómo se ha aplicado la lógica difusa en los procesos de electromaquinado?
- ¿Qué variables de entrada y salida son posibles de adquirir en la máquina del proceso ECDM con que cuenta el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA?
- ¿Qué variables tienen relación con los parámetros de salida del modelo difuso a desarrollar del proceso de maquinado ECDM?
- ¿Cuáles son las variables lingüísticas para el modelo difuso a diseñar para el proceso de maquinado ECDM?
- ¿Cuáles y cuántas son las reglas difusas para el modelo difuso a diseñar?
- ¿Cómo evaluar el modelo difuso a diseñar para el proceso de maquinado ECDM?

## **2.5. Justificación**

Como se ha mencionado en secciones previas, el maquinado ECDM está sujeto a la presencia de incertidumbres e imprecisión en los parámetros, debido a la interacción de variedad de fenómenos en el funcionamiento del proceso. Esto provoca complejidad en el desarrollo de un modelo que describa de manera apropiada este proceso de maquinado. Ante dichas particularidades, en la presente investigación se propone el desarrollo de un modelo difuso. Este modelo permitirá una mejor comprensión sobre el funcionamiento del proceso, así como la investigación de futuros controles inteligentes, aspecto fundamental para su desarrollo. Un modelo del proceso ECDM proporcionaría para la industria un incremento de la productividad y calidad, ya que permitiría el ahorro de materiales, energía, tiempo de corridas preliminares para el ajuste de parámetros, se podrían establecer plazos para compromisos con los clientes, permitiendo una personalización de la producción.

Además, servirá para dotar al proceso de maquinado ECDM de un modelo difuso que permita establecer la relación entre algunas de las variables de entrada y salida que interviene en la obtención de un maquinado con calidad. También, con base en el modelo difuso, se podrá proveer al proceso ECDM de un sistema de toma de decisiones inteligentes en tiempo real. Esta investigación ofrecerá un modelo para el sistema de maquinado en condiciones de ECDM con que cuenta el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA, ya que en este no se ha desarrollado un modelo que establezca

relaciones entre parámetros de entrada y salida; beneficiando así a la Corporación y a la comunidad científica de esta área.

- Aporte Científico: Desarrollo de un modelo difuso para el sistema de maquinado en condiciones de ECDM con que cuenta el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA. Considerando las variables de entrada: voltaje de gap ( $V_g$ ), corriente pico a través del gap ( $I_p$ ) y frecuencia ( $f$ ) de la señal de voltaje de la fuente; y las variables de salida: tasa de remoción de material (MRR) y el diámetro del sobrecorte (DOC). Además de brindar un mejor entendimiento de dicho proceso.
- Aporte Tecnológico: Programación del modelo difuso en MATLAB®.

## **2.6. Alcance y Delimitaciones**

El alcance del presente trabajo se centra en la obtención de un modelo mediante la técnica de lógica difusa que aproxime el comportamiento de las variables de estudio en el proceso ECDM.

Como delimitaciones se tiene que la experimentación se desarrolla en una maquina EDM adaptada para condiciones de maquinado híbrido ECDM. Además, el modelo considera las variables que tienen posibilidad de medición de acuerdo a la logística con que se cuenta en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA. Las pruebas de laboratorio se realizan con materiales que se tienen en dicho laboratorio. Además, el modelo de la presente investigación representa el comportamiento del proceso ECDM en cuanto a las variables de entrada y salida establecidas, así como para los materiales de pieza de trabajo, herramienta de trabajo y electrolito seleccionados.

## **2.7. Resultados y Entregables**

- El resultado será el modelo difuso para el sistema de maquinado en condiciones de ECDM con el que cuenta el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA.
- Como entregable se tendrá el código de programación del modelo difuso en MATLAB®.

# Capítulo 3

## 3. Revisión Bibliográfica

En este capítulo se muestran algunos de los trabajos publicados en los últimos años con información relevante y relacionada con el tema de investigación. Inicialmente, se presentan las investigaciones encontradas hasta el momento que han empleado piezas de trabajo con materiales conductores de energía eléctrica. Luego se exponen los resultados obtenidos por diferentes autores en la aplicación de diferentes técnicas para la modelación del proceso ECDM, así como las conclusiones personales a partir del análisis de los datos expuestos en los trabajos. Además, se profundiza en el empleo de la lógica difusa en el modelaje y control tanto en el maquinado ECDM como en sus procesos base (ECM y EDM).

### 3.1. Estado del Arte

Varios autores han reportado el maquinado de diferentes tipos de metales a través del proceso ECDM, como el caso de Coteață et al. (2011), quienes desarrollaron una investigación en el maquinado de acero con una composición química de 0.91 C, 4.29 Mo, 4.35 Cr, 5.78 W, 0.295 Ni, y 1.54 V, con un espesor de las piezas de 1.4 mm. El material del cátodo empleado fue acero con una composición química de 0.8 C, 4 Cr, 0.85 Mo, 12 W, 2.4 V, con diámetros de 0.5 y 0.9 mm, respectivamente. El electrolito empleado fue silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). En este trabajo toman como variables de entrada el voltaje entre electrodos (35 y 45 V), el diámetro del cátodo, capacitancia del circuito de descarga (33 y 840  $\mu\text{F}$ ) y densidad del líquido de trabajo. Analizaron el efecto de estas variables sobre la profundidad de maquinado y desgaste del electrodo a través de un experimento factorial  $2^4$ . En la experimentación tomaron como variable constante el tiempo de maquinado, el cual fue establecido en 6 minutos. Entre los resultados obtenidos en esta investigación están que, el incremento del voltaje favoreció la remoción de material por disolución electroquímica y obtuvieron descargas eléctricas más intensas; sin embargo, esto provocó un aumento del desgaste de la herramienta de

trabajo. El aumento de la capacitancia del circuito de descarga produjo como resultado una mayor energía de pulso eléctrico y como consecuencia también provocó mayor desgaste del electrodo.

Huang y colaboradores en los artículos: (Huang et al., 2011) y (Huang et al., 2014) maquinaron acero inoxidable ANSI 304 con electrodos de carburo de tungsteno en forma de hélice con diámetros entre 200 y 400  $\mu\text{m}$ , el electrolito que utilizaron fue agua con una conductividad eléctrica de 660 y 680  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una temperatura de 25°C. El objetivo de esta investigación fue medir el efecto de las variables de entrada: conductividad del electrolito (agua), el diámetro del electrodo y su velocidad de rotación; sobre la rugosidad de la superficie, el desgaste del electrodo, el diámetro de las perforaciones y su calidad cilíndrica. Como variables constantes tomaron el voltaje de trabajo (12 V), el tiempo de maquinado (150 s), con una separación entre electrodos de 10  $\mu\text{m}$ . Los autores encontraron que mientras mayor fue la velocidad de rotación, mayor fue la perforación provocando sobrecorte. Mientras que la rugosidad de la superficie y el desgaste del electrodo decrecieron, siendo esto lo deseado para el maquinado.

Nguyen y colaboradores expusieron en varios trabajos diferentes experimentos en ECDM con piezas de acero inoxidable SUS 304 con 100 mm de espesor utilizando electrodos de tungsteno con diámetros de 50 y 75  $\mu\text{m}$ , empleando agua desionizada con baja conductividad (2.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), con un voltaje de 60 V. En (Nguyen et al., 2012a) los autores experimentan respecto al uso de corriente directa o pulsada, y la velocidad de avance de la herramienta variándola en 10 y 50  $\mu\text{m}/\text{s}$ . En cuanto al uso de los dos tipos de señales identificaron que la corriente directa permitió una superficie relativamente más lisa que con la señal pulsada. Sin embargo, los autores observaron que el orificio se expandió provocando sobrecorte y por consiguiente baja exactitud, por lo que concluyeron que el uso de una señal pulsada es un factor muy importante para localizar la zona de remoción y evitar que la forma a maquinar se distorsione.

En los experimentos emplearon una señal pulsada a 500 kHz con un ciclo de trabajo de 30-70%. Con la disminución de la velocidad de avance obtuvieron una menor rugosidad de la superficie. En la investigación se observó que en el caso de la velocidad de avance a 50  $\mu\text{m}/\text{s}$ , la superficie maquinada quedó completamente cubierta de cráteres. Los autores atribuyeron este fenómeno a que con un avance más lento, la reacción



electroquímica ocurre durante mayor tiempo logrando un acabado superficial mejor. En este trabajo emplearon agua desionizada con alta conductividad en un rango de 100 a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Otro de los trabajos de estos autores fue el presentado en (Nguyen et al., 2013) variaron los siguientes parámetros: la separación inicial entre los electrodos (GAP) en 5, 7 y 9  $\mu\text{m}$ , la frecuencia en 100, 200 y 300 kHz, así como el ciclo de trabajo de los pulsos eléctricos en 30, 50, 70 y 90 % de tiempo activo ( $t_{\text{on}}$ ). Para el efecto del GAP inicial establecieron la frecuencia en 500 kHz con un  $t_{\text{on}}$  de 30%, obteniendo con 5  $\mu\text{m}$  de distancia un pico máximo de densidad de corriente ( $0.3 \text{ A}/\text{cm}^2$ ), lo cual no ocurrió para mayores distancias. Los investigadores obtuvieron que con el incremento del ciclo de trabajo aumentó la tasa de remoción de material. También observaron que cuando el ciclo de trabajo del  $t_{\text{on}}$  es corto (menor de 300 ns), la velocidad de remoción es despreciable debido a que el tiempo de activación es demasiado corto para que el capacitor de doble capa se cargue significativamente. Al variar la frecuencia obtuvieron aspectos abordados respecto al ciclo de trabajo, con un  $t_{\text{on}}$  más extenso la carga eléctrica total por pulso es más alta y por lo tanto se remueve más material. También permitiría que el capacitor de doble capa se cargue completamente a una separación entre electrodos más alta. Además, observaron que con el aumento de la frecuencia obtuvieron menor sobrecorte; debido a que con menor tiempo activo de la señal la energía de las descargas disminuye.

Krötz et al. (2013) investigaron y simularon el flujo de calor en superficies metálicas debido a descargas individuales en micro-ECDM, basados en el análisis de la Zona Afectada por el Calor. Como piezas de trabajo emplearon acero 100Cr6 (material común para sistemas de inyección de gasolina) y acero X5 CrNi18-8 con 1 mm de espesor, el material del cátodo empleado fue tungsteno, con un diámetro de 100  $\mu\text{m}$ . Además, experimentaron con diferentes electrolitos como:  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KSO}_4$ ,  $\text{Zn}_3(\text{NO}_3)_2$  y  $\text{HNO}_3$  en busca del nivel de voltaje que permitiera la formación de la capa de gas de hidrógeno. Indicaron que el nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) con conductividad de 25 mS/cm brindó resultados adecuados para la formación de la capa de hidrógeno. Además, para mantener el sistema de manufactura lo más simple posible no emplearon ninguna solución ácida o alcalina. Los autores indicaron que esto evita el complejo y costoso

acondicionamiento de los equipos de maquinado para la utilización de esos tipos de electrolitos.

Además, emplearon una corriente pulsada de 1 A para proteger al electrodo de daños térmicos (al ser muy fino), con pulso activo de 1.5  $\mu$ s y pulso no activo de 2  $\mu$ s, lo cual resulta en un período de 3.5  $\mu$ s que significa una frecuencia de 285.7 kHz con un ciclo de trabajo de aproximadamente 40-60 %. Los autores obtuvieron, en el caso del nitrato de sodio, que las primeras descargas que incidieron a través de la capa de gas fueron con un voltaje de 55 V. Por lo que en los experimentos aplicaron un voltaje de 85 V para garantizar la presencia permanente de la película compacta de gas.

Souza (2014) maquinó a través de ECDM piezas de acero inoxidable con espesor de 0.6 mm, el material del electrodo fue tungsteno con 0.1 mm de diámetro. Esta investigación se enfocó en el desgaste del electrodo, el diámetro de las perforaciones y el tiempo de maquinado; en función del tipo y conductividad del electrolito, la velocidad de rotación del electrodo y la capacitancia. Los electrolitos empleados fueron Cloruro de Sodio (NaCl) y Sulfato de Sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), la conductividad fue variada en 0.1, 0.25 y 0.50 mS/cm; las velocidades de rotación empleadas fueron de 100, 1000 y 2000 RPM; las capacitancias fueron de 15 y 25 nF.

Souza obtuvo como resultados que el incremento de la conductividad del electrolito hasta 0.50 mS/cm provoca una reducción del tiempo de maquinado. Mientras que para valores más altos como 1 mS/cm condujo a la ocurrencia de cortocircuitos constantes, lo cual provocó mayor tiempo de maquinado. Por su parte el incremento de la capacitancia causó una minimización del tiempo de maquinado, ya que causó el aumento de la energía de las descargas, pero provocó la aparición de porosidades en la superficie del agujero con la utilización del NaCl.

El incremento de la rotación del electrodo causó una disminución del tiempo de maquinado. De acuerdo al autor, este fenómeno pudo ser originado debido a que la rotación provocó un aumento de la temperatura en la zona lateral del electrodo que condujo a que las reacciones electroquímicas desprendieran más material debido al aumento de la conductividad del electrolito. En cuanto a los dos electrolitos, la utilización de sulfato de sodio permitió la generación de óxidos (capa pasiva o pasividad) en la superficie del orificio, compuesta con elementos químicos del material

de la pieza de trabajo. El autor indica que empleando cloruro de sodio no existe la posibilidad de formación de esta capa, lo cual provocó una menor calidad superficial. Sin embargo, el autor no expresa que en el micromaquinado es deseable la capa de pasividad, ya que provoca que las descargas produzcan cráteres menores, protegiendo así la superficie, aunque con una disminución de la tasa de remoción de material. También, la utilización de sulfato de sodio, permitió una reducción del tiempo de maquinado en aproximadamente 4 segundos. Cabe resaltar que el autor explica la reducción del tiempo de maquinado como una reducción del tiempo de la fase electroquímica (ECM) y un aumento de la fase de electrodescarga (EDM). Sin embargo, no aborda que esto podría provocar un deterioro en la calidad superficial.

Zhang et al. (2015) investigaron acerca del mecanismo de remoción de material en perforaciones por descarga electroquímica de alta velocidad con electrodo de tubo (TSECDD, del inglés *Tube Electrode High-Speed Electrochemical Discharge Drilling*), empleando electrolito con baja conductividad. Precisamente evaluaron el efecto de varias conductividades, desde 0.1 hasta 10 mS/cm. El electrodo empleado fue de latón con un diámetro de 0.5 mm, las piezas de trabajo fueron de aleación de base cobalto (DZ40M) y aleación de base níquel (DZ125L). En los experimentos emplearon un voltaje de 80 V, corriente de 12 A, con tiempo activo de 12  $\mu$ s y tiempo no activo de 36  $\mu$ s, lo cual corresponde a una frecuencia de señal de 20.83 kHz y un ciclo de trabajo de 25-75 %. La presión del electrolito fue de 4 MPa y la rotación del electrodo de 100 RPM.

Los autores concluyeron que existen diferentes mecanismos de eliminación de material en la zona frontal y lateral de la herramienta de trabajo, en esta última, hay una transición de EDM a ECM. Además, confirmaron que el uso de este proceso con una solución de sal de baja conductividad puede mejorar la calidad superficial y eficiencia del maquinado. Los resultados también mostraron que a medida que aumentó la conductividad decreció la tasa de remoción de material, aumentó el diámetro promedio de la perforación y en consecuencia el ángulo de estrechamiento.

En este trabajo los autores demostraron que la variación de la conductividad incide en un predominio de EDM o ECM en el mecanismo de remoción de material. Tanto en esta investigación como en (Zhang et al., 2016) establecieron una comparación entre el

proceso ECDM y el proceso EDM. Comprobaron que la reacción electroquímica disuelve la capa de refundición (*recast*) generada por EDM, con presencia de cierta cantidad en la región de salida, donde el electrodo permanece durante un corto período de tiempo hasta que el maquinado se detiene. La razón principal de esta presencia en la región de salida fue explicada debido al corto tiempo de disolución electroquímica al que fue expuesto esta sección. Los autores concluyeron que sus resultados confirmaron que el proceso combinado EDM y ECM es efectivo en la obtención de perforaciones sin una capa de refundición.

Con el fin de establecer y comprender el funcionamiento de los procesos se desarrollan modelos. A partir de los modelos se pueden realizar diferentes acciones como predicción o control del proceso. Pueden emplearse diferentes técnicas como: matemáticas, experimentales, estadísticas, inteligencia artificial, entre otras. A continuación, se analizan algunas investigaciones orientadas al desarrollo de modelos con algunas de las técnicas mencionadas.

Una de las investigaciones en las que se han empleado técnicas estadísticas, es la presentada por Sarkar et al. (2006). Estos investigadores construyeron un modelo de regresión lineal múltiple tomando factores como: voltaje, concentración del electrolito y separación de los electrodos, con la finalidad de encontrar los niveles de los factores que maximicen la tasa de remoción de material y minimice el radio del sobrecorte y la zona afectada por el calor en el maquinado de materiales cerámicos (nitruro de silicio). Desarrollaron un diseño central compuesto de 20 corridas experimentales para la aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM, por sus siglas en inglés, Response Surface Methodology).

A partir de los datos del diseño de experimentos (DoE, por sus siglas en inglés Design of Experiment) mostrados en (Sarkar et al., 2006) se realizó un análisis obteniendo los resultados que se comentan a continuación. Se evaluó el supuesto de normalidad de los residuales de la tasa de remoción de material, mediante una prueba de bondad y ajuste de Anderson Darling y un valor de probabilidad menor de 0.05, como resultado es posible afirmar con un nivel de confianza del 95% que no es posible ajustar una distribución normal a dichos residuales. Por lo cual no es apropiado realizar conclusiones adecuadas a partir del Análisis de Varianza (ANOVA, por sus siglas en

inglés *Analysis of Variance*). Como los datos no cumplen con el supuesto de normalidad, no es apropiada la aplicación de la regresión lineal.

Además, se realizó una prueba de correlación de Pearson y se determinó la existencia de correlación positiva entre las respuestas MRR, ROC y HAZ. Debido a ello, no es pertinente construir modelos individuales para cada una de las respuestas, por lo que es recomendable trabajar con técnicas que permitan la modelación multivariada de las respuestas. En este caso, Sarkar et al. (2006) realizaron conclusiones a partir de un Análisis de Varianza, sin embargo de acuerdo con Montgomery (2008) no es apropiada su aplicación cuando se tiene la existencia de correlación entre las variables de salida, en su lugar debe analizarse mediante un Análisis de Varianza Multivariado (MANOVA, por sus siglas en inglés *Multivariate Analysis of Variance*).

Se observaron además algunas deficiencias en la construcción del modelo que pueden afectar significativamente a la modelación y las predicciones que se deriven de estos. Fue posible detectar que, debido a las condiciones propias del proceso, existió una significativa variación en la máquina. Dicha variación tiene una influencia en los coeficientes de determinación del modelo, es decir la R cuadrada y la R cuadrada ajustada. No obstante, este trabajo constituye una referencia de información para investigaciones.

Paul et al. (2013), investigaron acerca del maquinado ECDM en vidrio de borosilicato, establecieron tres niveles para los parámetros de entrada: el voltaje aplicado (50, 60 y 70 V), la concentración del electrolito (20, 25 y 30 %wt) y el ciclo útil (50, 60 y 70 %). Emplearon el método de Taguchi para la realización de los experimentos con MRR, TWR y ROC como variables de salida, luego obtuvieron un modelo de regresión lineal múltiple de la RSM para los parámetros de salida MRR, TWR. A partir de un análisis personal de estas ecuaciones, se pudo comprobar mediante una prueba de bondad y ajuste de Anderson Darling con un valor de probabilidad menor de 0.05, y con un nivel de confianza del 95% que no es posible ajustar una distribución normal a los residuales de la Tasa de Remoción de Material. Por lo cual no cumplen con uno de los supuestos estadísticos para realizar conclusiones acertadas y aplicar la RSM. Además, de acuerdo con Montgomery (2008) para la aplicación de la RSM lo adecuado es partir de un diseño central compuesto.

Sathisha et al. (2013), investigaron la significancia estadística de los parámetros: voltaje aplicado, concentración del electrolito y separación entre los electrodos sobre la MRR y el TWR, mediante un Análisis de Varianza. Sin embargo se comprobó que entre los parámetros de salida existe una correlación positiva, a través de una prueba de correlación de Pearson. Por lo que en este caso debió recurrirse a un análisis de varianza multivariado.

Goud and Sharma (2016), realizaron una comparación entre un modelo de regresión lineal múltiple y otro basado en una red neuronal artificial en el maquinado de vidrio sódico-cálcico, con el fin de predecir la MRR y ROC a partir del voltaje aplicado, la concentración del electrolito y la separación entre los electrodos. Las variables de entrada fueron variadas en 3 niveles, para el voltaje emplearon valores de 40, 45 y 50 V; para la concentración del electrolito valores de 20, 25 y 30 wt%; mientras que para la separación entre los electrodos establecieron los valores en 40, 70 y 100 mm. A partir de un análisis personal de los datos expuestos en este trabajo, se pudo comprobar a través de una prueba de correlación de Pearson, la existencia de una correlación negativa entre los parámetros MRR y ROC. Debido a la correlación existente no es pertinente construir modelos individuales para cada una de las respuestas, pues no queda explicada la relación entre las variables de entrada ya que estas afectan en diferentes formas a los parámetros de salida.

Como consecuencia a las complejidades internas del proceso ECDM producidas por los fenómenos que interactúan en este, se puede apreciar que en algunos casos es necesario emplear técnicas avanzadas de estadísticas para llegar a conclusiones acertadas. Cuando los datos no cumplen con los supuestos estadísticos se realizan transformaciones a los datos de salida o se emplean técnicas estadísticas no paramétricas, o técnicas de soft computing como redes neuronales o lógica difusa.

En este sentido, en lógica difusa los datos no necesitan cumplir con determinados supuestos estadísticos como que los datos se ajusten a una distribución normal. También, permite la posibilidad de trabajar tanto con datos correlacionados como no correlacionados, aunque de existir correlación su efecto queda explicado en las reglas difusas. Respecto a las redes neuronales, éstas se emplean principalmente para el aprendizaje, adaptación, reconocimiento o clasificación, y para esto necesitan de un alto

volumen de información (Ponce, 2011). Además, permite modelar incertidumbres en las variables y no necesita tanta información como las redes neuronales artificiales (Adnan et al., 2015).

Algunos autores han realizado investigaciones aplicando técnicas de soft computing basados en los resultados de Sarkar et al. (2006), como Phipon et al. (2012), quienes basándose en las ecuaciones con los coeficientes codificados desarrollaron un modelo aplicando código genético. Además, Shanmukhi et al. (2014) emplearon las ecuaciones con los coeficientes no codificados para entrenar redes neuronales con función de base radial en combinación con código genético y optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés *Particle Swarm Optimization*) para determinar cuál de las dos podía predecir mejor el comportamiento del maquinado ECDM de materiales cerámicos de nitruro de silicio. Estos últimos reportaron que la combinación con el PSO brindó mejores resultados. Sobre estos dos últimos trabajos se tiene la apreciación de que al estar basados en las ecuaciones de regresión presentadas por Sakar et al., (2006), de igual manera que con ese trabajo, estos modelos no permitirían modelar o predecir de manera apropiada el proceso.

En la literatura se muestra que la aplicación de la lógica difusa en la modelación de las métricas de calidad para los procesos EDM y ECM es positiva, brindando altos grados de ajuste en comparación con los resultados experimentales. Para el proceso ECM, Rao et al. (2009) presentaron un modelo difuso tomando como base las ecuaciones de regresión lineal múltiple del diseño central compuesto de Mount et al. (2000). Como parámetros de salidas tomaron MRR y SR, las entradas fueron corriente, voltaje, flujo del electrolito y la separación entre electrodos. Emplearon el sistema de inferencia Mamdani y funciones de membresía triangulares para todas las variables, estableciendo tres conjuntos difusos para cada variable de entrada y salida. Optimizaron las reglas del modelo empleando un algoritmo de código genético, no mencionaron el método de defusificación empleado y obtuvieron un error porcentual absoluto medio (MAPE, por sus siglas en inglés *Mean Absolute Percentage Error*) en la predicción de 8.256 (91.74% de exactitud) para SR y 4.618 (95.38% de exactitud) para MRR. Labib et al. (2011) diseñaron un control difuso en el *Toolbox* de Lógica Difusa de MATLAB®, para controlar la tasa de flujo del electrolito (con 9 reglas) y la velocidad de avance del

cátodo (con 6 reglas) mediante la corriente y el flujo de electrolito medido como entradas. En las corridas de evaluación el proceso culminó sin la ocurrencia de cortocircuitos, sin embargo, detectaron un deterioro en el acabado superficial.

Entre los estudios de lógica difusa en EDM se encuentra la investigación presentada por Kohli et al. (2012), quienes optimizaron la MRR mediante parámetros de entrada como la corriente de descarga, el pulso activo y el pulso no activo. Emplearon seis conjuntos difusos para todas las variables y 20 reglas difusas, no indicaron el método de defusificación utilizado. Obtuvieron a través del error porcentual absoluto medio (MAPE) de predicción una exactitud respecto a los resultados experimentales de 97.36%. En (Shabgard et al., 2013), los autores aplicaron un modelo difuso tomando como entradas la corriente y la duración del pulso para modelar MRR, TWR y SR. Para describir las variables emplearon cinco conjuntos difusos, excepto para la duración del pulso donde utilizaron tres. Establecieron 15 reglas difusas, el método de defusificación empleado fue el del centro de área y obtuvieron resultados con una exactitud de más del 90% en comparación con los resultados experimentales. Tanto Kohli et al., (2012) como Shabgard et al., (2013) diseñaron los modelos en el *Toolbox* de Lógica Difusa de MATLAB®, utilizaron el sistema de inferencia de Mamdani. Kohli et al., (2012) utilizaron funciones de membresía triangulares para todas las variables, mientras que Shabgard et al., (2013) establecieron funciones triangulares para todas las variables excepto para la TWR donde emplearon una función trapezoidal para un conjunto difuso.

También para EDM, Sengottuvel et al. (2013) investigaron mediante FL los efectos de los parámetros pulso activo, pulso no activo, corriente pico, flujo del electrolito y geometría del cátodo en la MRR, TWR y SR. Para esto experimentaron con 4 niveles en cada variable de entrada a través de un diseño de experimento de Taguchi L16, el cual consta de 16 corridas experimentales. El modelo difuso fue diseñado en el *Toolbox* de Lógica Difusa de MATLAB®, establecieron 16 reglas difusas, el método de defusificación empleado fue el del centro de área y obtuvieron una exactitud del 95% respecto a los resultados experimentales.

Unune et al. (2016) desarrollaron un modelo difuso para predecir la tasa de remoción de material y la rugosidad de la superficie en el pulido de Nimonic 80A mediante EDM. Tomaron como variables de entrada: las revoluciones por minuto de la rueda, la



concentración del dieléctrico, la corriente y el pulso activo. Para establecer el modelo aplicaron un diseño central compuesto. El modelo difuso fue desarrollado en el *Toolbox* de Lógica Difusa de MATLAB® y no mencionan el sistema de inferencia utilizado. Para cada variable de entrada y salida emplearon 5 conjuntos difusos. Las variables de entrada fueron representadas con funciones de membresía gaussianas y las variables de salida con funciones triangulares. Establecieron 25 reglas difusas y el método de defusificación empleado fue el del centro de área. Obtuvieron a través del MAPE una exactitud respecto a los datos experimentales de 93.89%.

Bhuyan et al. (2017) realizaron un estudio comparativo entre dos modelos, uno con RSM y otro con lógica difusa para la predicción de la rugosidad de la superficie en el maquinado EDM de piezas de composites de matriz metálica de Al-SiC<sub>p</sub>. Para los modelos tomaron como parámetros de entrada: pulso activo, corriente pico y flujo del electrolito. Para establecer los modelos aplicaron un diseño central compuesto. El modelo difuso fue desarrollado en el *Toolbox* de Lógica Difusa de MATLAB® y utilizaron el sistema de inferencia Mamdani. Representaron todas las variables de entrada a través de tres conjuntos difusos con funciones de membresía triangulares. Sin embargo, para las variables de salida emplearon 9 conjuntos difusos con funciones de membresía triangulares, lo cual incide en la complejidad del modelo. En este trabajo no se reporta información acerca de las reglas difusas utilizadas. Los modelos fueron comparados a través del MAPE, donde obtuvieron mayor exactitud para el modelo difuso con más del 95 %.

A partir de la revisión bibliográfica realizada y la consulta de artículos de revisión bibliográfica como: (Ranganayakulu et al., 2011), (Mohd Adnan et al., 2013), (Pawar et al., 2015) y (Goud, Sharma, et al., 2016), se concluye que hasta el momento el único antecedente de modelado difuso del proceso ECDM es el presentado por Skrabalak et al. (2004), donde presentaron un control para la velocidad de avance del cátodo, con corriente y voltaje como parámetros de entrada, estableciendo 9 reglas difusas. Sin embargo, para el modelado asumió que los procesos ECM y EDM tienen lugar al mismo tiempo, pero en diferentes zonas de los electrodos. Además, no empleó datos reales sino simulados en el entorno *Simulink*.

La lógica difusa se ha empleado en el proceso de maquinado ECDM con otros fines y en combinación con otras técnicas. Tal es el caso del trabajo: (Mediliyedara et al., 2004a), donde hacen uso de la lógica difusa para la clasificación de diferentes pulsos eléctricos que tienen lugar durante el proceso, la experimentación se realizó en una máquina EDM modificada. A partir de este trabajo, los autores desarrollaron otra investigación: (Mediliyedara et al., 2004c), donde presentaron un control neuro-difuso para la separación entre los electrodos mediante el avance de la herramienta de trabajo, las variables de entrada fueron el voltaje pico, voltaje promedio, corriente pico y corriente promedio entre los electrodos. La salida simulada del controlador mostró alta estabilidad para varias condiciones en el espacio entre los electrodos.

Ranganayakulu et al. (2011), modelaron la MRR en el maquinado de acrílico mediante ECDM a través de un Sistema de Inferencia Adaptativo Neurodifuso (ANFIS), tomando como parámetros de entrada la concentración del electrolito, el voltaje y la tasa de alimentación de la herramienta. A partir de los resultados experimentales obtenidos observaron que la MRR tenía un comportamiento no lineal pues disminuía con el aumento de la profundidad del maquinado, por lo que concluyeron que la modelación matemática tradicional presentaba alta complejidad. Debido a esto emplearon un motor de inferencia tipo Sugeno para las reglas difusas, con el cual obtuvieron un error medio de 0.27 en la estimación de la MRR.

Como se ha comentado anteriormente en la literatura se refleja que el proceso ECDM es complejo de modelar, algunos autores han aplicado técnicas estadísticas pero los datos no cumplen con los supuestos estadísticos necesarios para poder emplearlas, por lo que los modelos no se adecuarán certeramente a la realidad. Por otra parte, el empleo de la lógica difusa en los procesos ECM y EDM ha mostrado resultados satisfactorios con altos grados de ajuste. Los trabajos analizados concluyen que para modelar estos procesos, la lógica difusa en comparación con los modelos experimentales tiene la ventaja de ser más simple de evaluar, considera la incertidumbre, además de brindar respuestas rápidas y satisfactorias para su aplicación. Sin embargo en la literatura no se ha encontrado, hasta el momento, un modelo difuso del proceso ECDM, lo cual muestra la necesidad de la presente investigación para el desarrollo de controles inteligentes en este maquinado, así como también de su aplicación práctica en la industria.

# Capítulo 4

## 4. Marco teórico

En el presente capítulo se profundiza en el análisis de los procesos de electromaquinado, abordando acerca de sus principios de funcionamiento y los parámetros que influyen durante el proceso. Luego se profundiza en la teoría de la lógica difusa, con los conjuntos difusos, funciones de membresía, así como las etapas de un sistema difuso.

### 4.1. Procesos de Electromaquinado

Los procesos de maquinado convencional o tradicional, requieren que el material de la herramienta tenga mayor dureza que el de la pieza a maquinar, para que cuando entren en contacto la herramienta penetre en la pieza a una cierta profundidad. Estos maquinados pueden clasificarse según la acción que realice por corte y por abrasión mecánica. La evolución de la industria provocó el surgimiento de materiales mejorados en cuanto a propiedades térmicas, químicas y mecánicas impidiendo su maquinado mediante los procesos convencionales (El-Hofy, 2005).

Este desarrollo ha propiciado la necesidad de piezas con geometrías más complejas y componentes maquinados a escala de micrómetros (micromaquinado), con tolerancias ajustadas, así como acabados superficiales de alta calidad. Los maquinados no convencionales se aplican en los casos comentados anteriormente. Los procesos de electromaquinado se destacan entre los procesos no convencionales por su aplicación en la obtención de piezas para la industria automotriz, aeronáutica, espacial, electrónica, médica, entre otras.

La arquitectura general de los procesos de electromaquinado se puede observar en la figura 4.1, esta consta de dos electrodos que se denominan herramienta de trabajo (cátodo) conectado al polo negativo de la fuente de voltaje y pieza de trabajo (ánodo) conectado al polo positivo de la fuente de voltaje; dicha polaridad es comúnmente la más empleada.

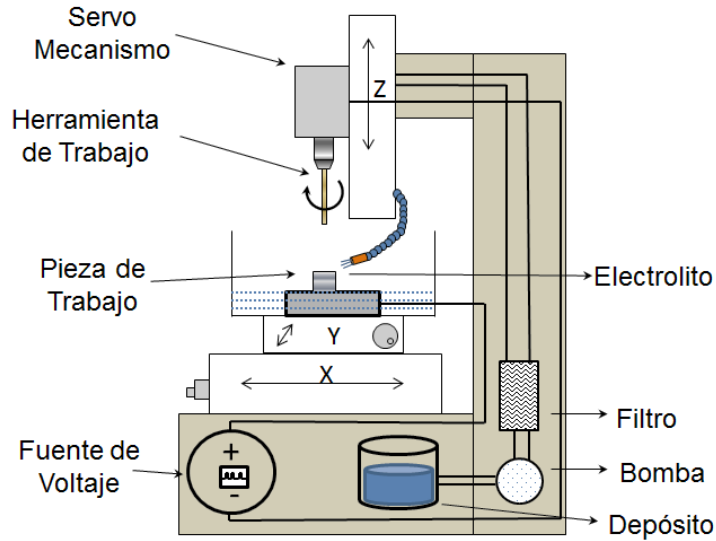


Figura 4.1: Arquitectura general para los procesos ECM, EDM y ECDM (elaboración propia).

Con el sistema hidráulico se garantiza que los electrodos queden inmersos en el medio correspondiente a cada proceso. En EDM se emplea un medio de baja conductividad como agua desionizada, mientras que en ECM y ECDM se emplea un electrolito. Los electrodos no deben tener contacto ya que esto produce cortocircuitos y como consecuencia se retrae el avance de la herramienta de trabajo y el maquinado se detiene (Hocheng, 2011). A continuación, se profundiza en las características de cada uno de estos tres procesos.

#### 4.1.1. Maquinado por Descarga Eléctrica (EDM)

La técnica de maquinado por descarga eléctrica tuvo sus inicios hacia 1943, introducida por los rusos B. R. Lazarenko y N. I. Lazarenko. Entre 1948 y 1950 surgen las primeras máquinas, en las décadas de 1960 y 1970 alcanzó un gran desarrollo (Sanghani et al., 2014), (Shabgard et al., 2016). En la década de los años 2000 tuvo grandes avances, como un aumento en 20 veces de la velocidad de mecanizado, reduciendo los costes del proceso en al menos un 30%; así como mejoras en el acabado superficial en un factor de 15 (El-Hofy, 2005).

El maquinado EDM es un proceso térmico, su principio de remoción de material radica en sumergir los electrodos, denominados herramienta de trabajo (cátodo, cargado

negativamente) y pieza de trabajo (ánodo, cargado positivamente); sin que tengan contacto, en una solución dieléctrica (comúnmente agua desionizada). Luego se les aplica una corriente, provocando descargas eléctricas entre los electrodos, dando lugar a un arco eléctrico, que provoca un aumento elevado de temperatura en las áreas donde las chispas tienen lugar, lo cual conduce a que estas pequeñas áreas de la pieza de trabajo lleguen a la fusión.

#### **4.1.2. Maquinado Electroquímico (ECM)**

ECM es un proceso químico ya que su principio de funcionamiento se basa en la electrólisis, la cual se define en (González-Ibarra, 2014) como la producción de cambios químicos por el paso de corriente eléctrica a través de un electrolito, que consiste en un conductor eléctrico no metálico a través del cual la corriente es transportada por el movimiento de iones agitados. La reacción electroquímica tiene lugar al alimentarse con corriente eléctrica continua una solución de electrolito depositada entre dos electrodos, denominados herramienta de trabajo (cátodo, cargado negativamente) y pieza de trabajo (ánodo, cargado positivamente). En este proceso se ponen en práctica dos leyes de Faraday (McGeough, 2005):

1. La cantidad de cualquier sustancia disuelta o depositada es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha fluido.
2. Las cantidades de sustancias depositadas o disueltas por la misma cantidad de electricidad, son proporcionales al peso químico equivalente de las sustancias.

ECM emplea corriente continua a una alta densidad de 0.5 a 5 A/mm<sup>2</sup> y baja tensión (entre 10 y 30 V). La reacción química ocasionada por la elevada corriente continua en el electrolito (hasta 40,000 A), produce la remoción de metal por el desprendimiento de iones. La herramienta de trabajo y la pieza de trabajo no deben tocarse pues esto produciría un corto circuito. La velocidad del cátodo es proporcional a la densidad de corriente que se le aplica y no se afecta por la resistencia, dureza, o la tenacidad de la pieza de trabajo. La cantidad de remoción del metal es directamente proporcional a la corriente que pasa entre los electrodos, una corriente elevada producirá una rápida

remoción del metal y en dependencia de la tasa de remoción de material está la velocidad de avance de la herramienta de trabajo (Bingham, 2014) y (Spieser, 2015).

#### **4.1.3. Maquinado Electroquímico por Descarga Eléctrica (ECDM)**

Algunos autores como (Zhang et al., 2015) y (Chak, 2016) han investigado acerca de establecer comparaciones entre los maquinados EDM y ECM. Ambos procesos son considerados como uno de los métodos más versátiles de maquinado ya que permite trabajar sobre varios tipos de metal y aleaciones quedando libres de tensión a la tracción residual. ECM se caracteriza por brindar piezas con acabado superficial de mayor calidad que el proceso EDM. Además, dado que EDM es un proceso térmico, la superficie mecanizada se caracteriza por capas de refundición, que incluyen grietas y esfuerzos de tracción residuales, que provocan la degeneración general de las capacidades mecánicas del componente. Sin embargo, en el proceso EDM se obtiene mayor tasa de remoción de material con un incremento en el desgaste del electrodo respecto a ECM.

Otra de las ventajas del proceso EDM es que reproduce las piezas con mayor exactitud respecto a la forma del electrodo que el maquinado ECM, debido a un ligero sobre corte que produce el electrolito al erosionar alrededor del electrodo, por esta razón ECM no es conveniente para producir aristas agudas o curvaturas exactas. Aunque el proceso ECM no produce capas de refundición y microgrietas. Con el fin de emplear las ventajas de ambos procesos y mitigar sus desventajas surgió el proceso híbrido: Maquinado Electroquímico por Descarga Eléctrica (ECDM), también conocido como: Maquinado de Electroerosión por Disolución (EEDM, por sus siglas en inglés Electroerosion Dissolution Machining), Maquinado Electroquímico por Chispa (ECSM, por sus siglas en inglés Electrochemical Spark Machining), Maquinado Electroquímico por Arco (ECAM, por sus siglas en inglés Electrochemical Arc Machining) y Maquinado por Chispa de Grabado Químico (SACE, por sus siglas en inglés Spark-Assisted Chemical Engraving)

El proceso ECDM surge de la hibridación de los procesos ECM y EDM, al igual que en estos, está constituido por un electrodo denominado como herramienta de trabajo, que

es el cátodo cargado negativamente; y la pieza de trabajo, ánodo, con carga positiva. Al igual que en sus procesos base se puede establecer una polaridad inversa, pero no es muy empleada. Además la herramienta de trabajo puede ser de diferentes tipos como: de cable, un molde sólido fijo, o molde sólido rotatorio (Goud, Sharma, et al., 2016). ECDM es un proceso de conformación reproductivo, en el que la forma del electrodo se refleja en la pieza de trabajo, al ser sumergidos en una solución electrolítica en una cámara de maquinado, donde tienen lugar una serie de fenómenos físicos, químicos, eléctricos y otros.

Uno de estos fenómenos es la electrólisis, la cual ocurre a bajo voltaje (entre 20 y 30 V) provocando la generación de iones cargados positivamente, así como burbujas de gas de hidrógeno que se acumulan alrededor de la herramienta y de oxígeno que envuelven a la pieza de trabajo. Según incrementa el voltaje, aumenta la densidad de corriente, lo que provoca un aumento del tamaño de las burbujas. Cuando el voltaje supera cierto valor crítico las burbujas se fusionan, conformando una fina capa de gas de hidrógeno alrededor del cátodo, que actúa como un dieléctrico y genera suficiente resistencia para crear una alta diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos. La uniformidad y espesor de la capa de gas dependen de la temperatura del electrolito, mientras más alta sea la temperatura más uniforme y fina será. También dependen de la humectabilidad del cátodo, así como del tipo y concentración del electrolito. Un aumento en el voltaje de alimentación conduce al aumento en la diferencia de potencial, cuando se sobrepasa el voltaje de ruptura de la capa aislante de burbujas de gas ocurren las descargas eléctricas (chispas) entre el cátodo y el electrolito a través de la capa de burbujas de gas. La intensidad y energía de la chispa aumenta con el incremento del voltaje entre los electrodos (Paul et al., 2014b) y (Goud, Sharma, et al., 2016).

La remoción de material sucede cuando la pieza de trabajo se encuentra en la zona de las descargas, debido a la transmisión de una fracción de energía de la chispa hacia la pieza, lo que provoca una elevación drástica de la temperatura en dicha región. La remoción ocurre mediante derretido, vaporización y erosión, una parte del material fundido se retira debido al choque mecánico resultante del cambio repentino de fase y a la descarga eléctrica. En el caso de piezas de trabajo como la cerámica o compuestos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés Metal Matrix Composite), existe una vía

adicional de remoción de material, la cual es debida al desprendimiento térmico, que se define como un fallo mecánico del material producido por un esfuerzo interno inducido térmicamente, causado por un cambio rápido de temperatura que excede la resistencia de unión de los materiales (Hocheng, 2011).

Durante el proceso ECDM pueden ocurrir cortos circuitos debido a dos posibles situaciones. Una de ellas es que la herramienta de trabajo avance hasta tal punto que haga contacto con la pieza de trabajo, por dicha razón, el sistema de control debe monitorear esta situación he indicar al sistema de avance del cátodo una retracción de este. Otra causa de cortocircuitos es debida a que los restos removidos de la pieza maquinada, comúnmente arrastrados por el flujo del electrolito, permanezcan entre los electrodos (Rao, 2011).

El funcionamiento del proceso depende del tipo de materiales que se empleen para la herramienta de trabajo, la pieza de trabajo y el electrolito. A continuación se muestra los resultados recopilados por Pawar et al. (2015) y Goud, Sharma, et al. (2016) sobre los materiales más empleados en la literatura. Los materiales que más se han empleado como pieza de trabajo son por este orden: vidrios sódico-cálcicos, vidrio de borosilicato, cuarzo, cerámicos, MMCs, vidrio pírex, acero inoxidable, vidrio óptico, sílice y otros. Entre los materiales de herramientas de trabajo están: carburo de tungsteno, acero inoxidable, cobre, latón y otros. Por su parte entre los electrolitos más utilizados en la literatura están: primeramente, el hidróxido de sodio (NaOH) y luego el hidróxido de potasio (KOH); menos frecuentes el nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>), el cloruro de sodio (NaCl) y otros.

El maquinado híbrido ECDM presenta mejoras respecto a sus procesos base. Según Hocheng (2011), la principal ventaja sobre EDM, además de brindar mayor razón de remoción de material, es que presenta una naturaleza más estable, pues en ECDM se utiliza electrolito conductor como medio de trabajo, en lugar de un dieléctrico como es el caso de EDM. Esto da lugar a un espacio de maquinado relativamente más amplio para la descarga eléctrica y tal condición facilita la eliminación de desechos en el orificio. Respecto a ECM, ECDM también proporciona una mayor razón de remoción de material.



#### 4.1.3.1. Parámetros del proceso ECDM

Debido a que en el maquinado electroquímico por descargas eléctricas está compuesto por dos procesos (ECM y EDM), existen varios parámetros de entrada y salida, cuyos valores y comportamientos afectan de forma significativa la calidad del proceso. Varios autores como Ranganayakulu et al. (2011), Rao (2011), Paul et al. (2014a), Rajan et al. (2014) y otros, han delimitado algunos de éstos. En la figura 4.2 se muestran varios de los parámetros de entrada del proceso ECDM.

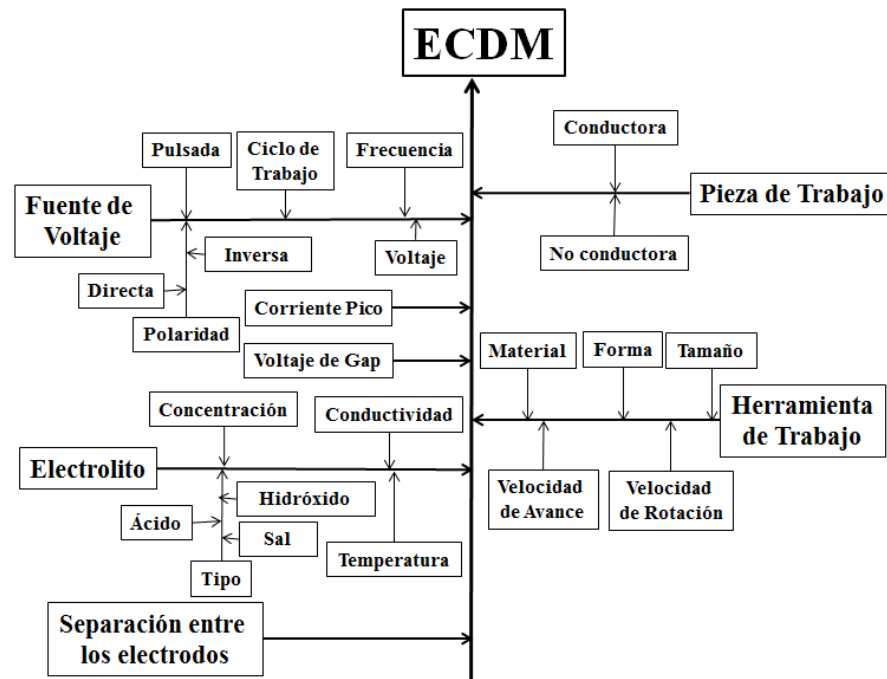


Figura 4.2: Esquema de variables de entrada del proceso ECDM (elaboración propia).

Entre los parámetros de entrada están los relacionados con los electrodos como: su forma, tamaño, material, velocidad de rotación del cátodo (en caso de rotación) y su humectabilidad (tendencia a hacer que los líquidos se extiendan sobre la superficie del material); otros de los parámetros de entrada son:

- Voltaje de la fuente: nivel de voltaje que entrega la fuente de alimentación al cátodo durante las distintas fases del maquinado.
- Voltaje de gap: voltaje generado entre los electrodos.
- Corriente pico: corriente máxima generada entre los electrodos (corriente de gap).
- Frecuencia ( $f$ ): es la frecuencia a la cual se pulsa la señal eléctrica.

- Separación entre los electrodos (IEG, por sus siglas en inglés Interelectrode Gap): distancia entre los electrodos durante el proceso.
- Tiempo de maquinado ( $t_{maq}$ ): Tiempo de duración del maquinado, por ejemplo tiempo que demoraría en realizar una perforación.
- Duración de pulsos eléctricos: tiempo que la señal eléctrica es aplicada al cátodo en cada ciclo (la forma de onda típica es un tren de pulsos cuadrados), se identifica el pulso activo ( $t_{on}$ ) y pulso no activo ( $t_{off}$ ).
- Ciclo de trabajo o ciclo útil (DF, por sus siglas en inglés Duty Factor): es otra forma de expresar la duración de los pulsos eléctricos, ya que es la relación que existe entre el  $t_{on}$ ,  $t_{off}$  y el periodo de la señal, se expresa en porcentaje (%). Por ejemplo 30-70 %, significa 30 % de  $t_{on}$  y 70 % de  $t_{off}$ .
- Tasa de avance de la herramienta: es la velocidad a la cual el cátodo se mueve hacia la pieza de trabajo.
- Concentración del electrolito: es la cantidad de gramos por litro que contiene la solución.
- Conductividad del electrolito: es la conductividad eléctrica de la solución.
- Temperatura del electrolito: temperatura que alcanza el electrolito durante el maquinado.
- Tasa de flujo del electrolito: velocidad a la cual entra el electrolito a la cámara de maquinado.

Todo proceso tiene indicadores de calidad que permiten decidir, con base a estos, si los valores asignados a los parámetros de entrada fueron los indicados. La selección adecuada de los parámetros juega un papel muy importante para obtener un producto final con determinada calidad, reduciendo los costos de manufactura e incrementando la productividad. Las métricas de rendimiento más comunes para el proceso ECDM son:

- Tasa de Remoción de Material: razón a la que se desprende el material de la pieza de trabajo, se expresa en peso/tiempo o volumen/tiempo (mg/min o  $\text{mm}^3/\text{min}$ ).
- Tasa de Desgaste de la Herramienta: es el deterioro que va presentando la herramienta de trabajo durante su vida útil. El cambio en la forma del cátodo causa defectos en la pieza de trabajo final, se expresa como pérdida de longitud lateral, o volumen/tiempo o peso/tiempo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\text{mm}^3/\text{min}$  o g/min).

- **Rugosidad de la Superficie:** mide el acabado de la superficie respecto a su rugosidad, se expresa en  $\mu\text{m}$ .
- **Diámetro de Sobrecorte:** es un exceso de corte producido por el electrolito al erosionar alrededor de las paredes laterales de la herramienta de trabajo. También se expresa como radio de sobrecorte (ROC, por sus siglas en inglés Radial Overcut). Se puede estimar como radio o diámetro y se expresa en  $\mu\text{m}$  o  $\text{mm}$ .
- **Conicidad:** las perforaciones en dependencia del ajuste de los parámetros pueden ir estrechándose hacia el orificio de salida. Se expresa en  $\text{mm}/\text{mm}$  o ángulo.
- **Zona Afectada por el Calor:** área de la pieza de trabajo donde debido a las propiedades térmicas cambia la microestructura interna del material de forma diferente al resto del área de la pieza, se expresa en  $\text{m}^2$  o diámetro. En el proceso EDM es producida por las temperaturas de las descargas (8000 a 12 000  $^{\circ}\text{C}$ ), además también puede producirse una capa de refundición en la superficie.

La tasa de remoción de material (MRR) y la Tasa de Desgaste de la Herramienta (TWR) se pueden obtener como una función de la masa eliminada durante el tiempo de maquinado, es decir, puede expresarse como pérdida de peso por unidad de tiempo. Ésta relación es empleada y expresada matemáticamente en varias investigaciones (Sarkar et al., 2009), (Paul et al., 2013) y (Dafade et al., 2015):

$$MRR = \frac{P_{wi} - P_{wf}}{t_{maq}} \quad (4.1)$$

$$TWR = \frac{P_{Ti} - P_{Tf}}{t_{maq}} \quad (4.2)$$

En las expresiones 4.1 y 4.2:

$P_{wi}$ : Peso inicial de la pieza de trabajo.

$P_{wf}$ : Peso final de la pieza de trabajo (después de maquinado).

$P_{Ti}$ : Peso inicial de la herramienta de trabajo.

$P_{Tf}$ : Peso final de la herramienta de trabajo.

$t_{maq}$ : Tiempo de maquinado.

No obstante, otros autores como Zeng et al. (2012), Shabgard et al. (2013), Goud and Sharma (2016) y otros, prefieren expresar la MRR y TWR como volumen removido por minutos ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ). Esto con el fin de establecer comparaciones entre diferentes

materiales. Para ello en las ecuaciones 4.1 y 4.2, se incluye la densidad ( $\rho$ ) del material en el denominador:

$$MRR = \frac{P_{wi} - P_{wf}}{\rho * t_{maq}} \quad (4.3)$$

$$TWR = \frac{P_{Ti} - P_{Tf}}{\rho * t_{maq}} \quad (4.4)$$

La rugosidad de la superficie se mide mediante instrumentos electrónicos denominados rugosímetros, los cuales permiten medir la profundidad de la rugosidad media. El diámetro de sobrecorte (DOC) se puede calcular mediante la ecuación 4.5 (Singh et al., 2018), es la diferencia entre el diámetro del orificio de entrada de la herramienta de trabajo ( $D_{in}$ ) y el diámetro de la herramienta de trabajo antes de maquinar ( $D_{tool}$ ), o también puede calcularse como la diferencia entre los radios para el caso del ROC, para esto se divide entre 2 la expresión 4.5 (Sarkar et al., 2009). La obtención de los diámetros se realiza a partir de procesamiento de imágenes (Elhami et al., 2017).

$$DOC = D_{in} - D_{tool} \quad (4.5)$$

Como respuesta de los parámetros que se establezcan durante el maquinado, la perforación sufrirá cierta conicidad, en dependencia de la aplicación de la perforación será deseable mayor, menor conicidad. La perforación se va estrechando hacia el orificio de salida del electrodo como resultado de la remoción del electrolito en las paredes laterales de la herramienta de trabajo. En la figura 4.3 se muestra una representación gráfica.

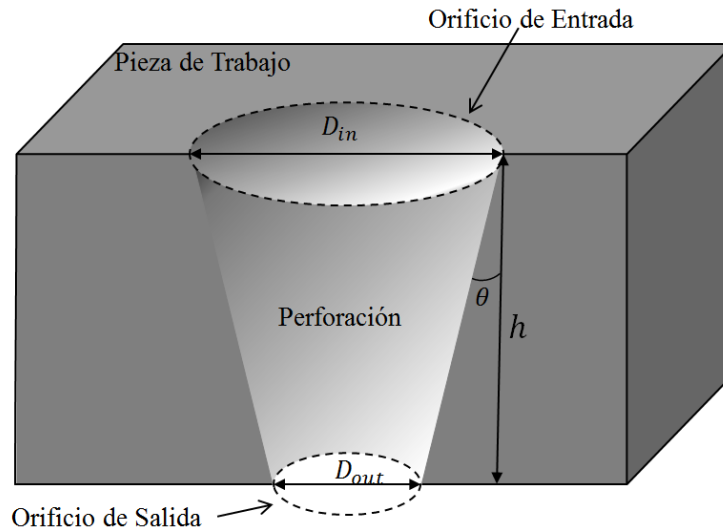


Figura 4.3: Representación de una perforación en ECDM (elaboración propia).

Dicho estrechamiento se conoce como conicidad ( $Cn$ ), el cual puede expresarse matemáticamente como la diferencia entre el diámetro del orificio de entrada del electrodo y el diámetro del orificio de salida del electrodo ( $D_{out}$ ) por unidad de altura de la pieza ( $h$ ) o espesor, como se muestra en la ecuación 4.6 (Hocheng et al., 2012). Sin embargo otros autores expresan esta métrica como grados de conicidad, a través de la ecuación 4.7 (Zhang et al., 2015), (Dong et al., 2017).

$$Cn = \frac{D_{in} - D_{out}}{h} \quad [mm/mm] \quad (4.6)$$

$$\theta = \frac{\tan^{-1} (D_{in} + D_{out})}{2h} \quad [^\circ] \quad (4.7)$$

#### 4.1.3.2. Relación de parámetros de entrada respecto a los parámetros de salida del proceso ECDM

En este epígrafe se expone cómo incide la variación de algunos parámetros de entrada sobre algunos parámetros de salida. Estas relaciones fueron obtenidas a partir de la revisión de la literatura, a partir de experimentaciones realizadas por diferentes autores en el proceso ECDM.

### Voltaje de la fuente

En investigaciones realizadas por Ranganayakulu et al. (2011) y Krötz et al. (2013), los autores han demostrado que a mayor voltaje se obtiene mayor MRR. El aumento del voltaje conduce a la generación de más burbujas resultando en una mayor capa de gas, por consiguiente mayor cantidad de energía de las descargas y por tanto mayor razón de remoción de material. Sin embargo, no se puede aumentar la MRR tanto como se desee, pues tendrá cierto límite debido a la acumulación de desechos entre los electrodos. En (Jawalkar, 2013) se demuestra que en el maquinado de vidrio cuando se aplica hasta 110 V, la MRR comienza a disminuir pues se dificulta eliminar los residuos atrapados con suficiente rapidez por el flujo del electrolito. Este efecto en el caso de materiales conductores conduciría a la ocurrencia de cortocircuitos retrasando aún más el proceso. Otro resultado indeseado del aumento de la energía es que produce micro grietas en la zona de maquinado debido a la generación excesiva de calor. Por ejemplo Harugade et al. (2013) obtuvieron que al maquinar vidrio de sodio-cal por encima de 70 V produjo la ruptura de la muestra, igual efecto reportaron Bhattacharyya et al. (1999) con 110 V aplicado a muestras de cerámica. En general a medida que cambia el voltaje aplicado cambia la dinámica del proceso de electrólisis que puede afectar a la MRR.

Otro elemento referente al voltaje aplicado es si emplear una señal pulsada o constante (corriente directa, CD). En (Nguyen et al., 2012a) los autores compran el uso de los dos tipos de señal. Demostraron que con el uso de señal no pulsada se obtiene una superficie relativamente más lisa que con la señal pulsada, sin rastros de cráteres. Sin embargo, se observó que el orificio se expandió notablemente provocando un amplio sobrecorte y por consiguiente poca exactitud. Esto afirma que el uso de pulsos de voltaje es un factor vital para localizar la zona de remoción y evitar que la forma maquinada se distorsione. Además, es una muestra de que la corriente pulsada permite las descargas eléctricas.

### Corriente:

Hocheng (2011), experimentó con muestras de compuestos de matriz metálica de aluminio 6061 reforzado con 10 y 20 % en volumen de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10ALO y 20ALO, respectivamente); con el fin de determinar el efecto de algunos parámetros como la corriente sobre la MRR. El autor obtuvo en una corrida con una duración del pulso de 32

$\mu\text{s}$ , 0.5 wt% de concentración de electrolito y 80 V, que la MRR aumentó alrededor de 20 y 15  $\text{mm}^3/\text{min}$  para el 10ALO y 20ALO, respectivamente. Por lo que los resultados mostraron que la MRR aumentó al incrementar la corriente. En la investigación se considera que una condición de alta corriente facilitaría la acción del proceso ECM. El efecto principal de la disolución electroquímica es aumentar el espacio de maquinado y una vez que se amplía las partículas cerámicas pueden descargarse más fácilmente, por lo que se mantiene una condición de maquinado estable para la descarga eléctrica. Además, el autor indicó que normalmente sucede que un aumento adicional del espacio donde tienen lugar las descargas conduce a una disminución de la MRR y un aumento del sobrecorte.

#### Ciclo de trabajo

Varios autores como Nguyen et al. (2013) y P. K. Gupta et al. (2016) han mostrado que con mayor  $t_{\text{on}}$  se obtiene mayor remoción de material. Esto se debe a que de esta forma habrá un predominio del proceso EDM sobre el ECM, produciendo mayor energía en las descargas y por tanto mayor remoción. Sin embargo, esto trae como consecuencia una disminución en la calidad del acabado superficial y aumento de la zona afectada por el calor. También observaron que cuando el ciclo de trabajo es demasiado pequeño, la velocidad de remoción es despreciable debido a que el tiempo de activación es demasiado corto para que el capacitor de doble capa se cargue significativamente.

#### Frecuencia

En el caso de la frecuencia ocurre un fenómeno similar al del ciclo de trabajo, ya que a mayor frecuencia menor  $t_{\text{on}}$ , pero con mayor cantidad de pulsos y por consecuencia mayor cantidad de posibles descargas. Como se mencionó anteriormente, un aspecto muy importante es que el  $t_{\text{on}}$  no debe ser muy pequeño, pues no daría tiempo a que el capacitor de doble capa se cargue. Otro elemento tanto en la frecuencia como en el ciclo de trabajo es que a menor  $t_{\text{on}}$ , la energía de las descargas disminuye brindando menor sobrecorte (Nguyen et al., 2012b) y (Nguyen et al., 2013).

#### Tasa de avance de la herramienta

En (Nguyen et al., 2012a) mostraron que con velocidades de avance bajas (10  $\mu\text{m/s}$ ), se puede obtener superficies más lisas. Los autores atribuyen este hecho a la remoción

del material inducida por la reacción electroquímica. A baja velocidad de avance, luego de que se detiene la descarga, los iones del electrolito actúan como un portador de corriente para permitir la reacción electroquímica. Esto permite la disolución de la capa de refundición (*recast*), formando una superficie más lisa. Los investigadores apuntan que cuando el electrodo se mueve a una velocidad de alimentación más alta (50  $\mu\text{m/s}$ ), existe menos tiempo para la reacción electroquímica.

#### Tipo de electrolito

Se han realizado varios estudios acerca de los electrolitos a emplear, Harugade et al. (2013) establecieron una comparación entre ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e hidróxido de potasio (KOH). El ácido sulfúrico es un ácido fuerte por lo que la reacción química apenas se lleva a cabo. Por otra parte KOH una base fuerte, la movilidad iónica de este electrolito es mucho mayor que la que presenta la solución de ácido sulfúrico, esto resulta en mayores tasas de generación de burbujas que permite mayor velocidad de descargas. Por estas razones es mejor el empleo de hidróxidos en lugar de ácidos.

Souza (2014) realizó una comparación entre Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ ) y Sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), apuntando que éste último generó en la superficie del orificio una capa de óxido (capa de pasividad) compuesta con elementos químicos del material de la pieza de trabajo, mientras que el  $\text{NaCl}$  no produjo este efecto. Dicha capa provoca que las descargas provoquen cráteres menores, protegiendo así la superficie, aunque con una disminución de la tasa de remoción de material. En micromaquinados es deseable la capa de pasividad para obtener valores mínimos de sobrecorte. Por otra parte, Jawalkar et al. (2014) experimentaron en el maquinado de vidrio sódico-cálcico con hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ), obteniendo que el hidróxido de sodio fue más eficiente que el nitrato de sodio, pues provocó menor desgaste del electrodo y mayor remoción de material.

#### Concentración y conductividad del electrolito

La concentración del electrolito incide en la tasa de remoción de material. Una concentración alta produce mayor movilidad de los iones y por tanto más reacciones electroquímicas entre los electrodos y una mayor cantidad de burbujas de gas, lo cual genera mayor número de chispas y por tanto mayor MRR. La explicación de esto radica



en que el aumento de la concentración del electrolito provoca el incremento de la conductividad de este y por tanto un aumento en la densidad de corriente debido a la movilidad iónica. Chak et al. (2007) reportaron que un aumento de la concentración de una solución mixta de KOH y NaOH del 5,5 al 15 wt% condujo a una mejora de la conductividad eléctrica de 275 a 375 mS/cm. Por su parte, Panda et al. (2012) obtuvieron resultados similares, el aumento de la concentración del electrolito mejoró el acabado superficial, ya que aumentó la viscosidad del electrolito, lo cual permitió la obtención de superficies más lisas.

Zhang et al. (2015) experimentaron con conductividades entre 0.1 y 10 mS/cm en piezas de súper aleaciones a base de cobalto y níquel (DZ40M y DZ125L, respectivamente) con electrodo de latón. Para 0.1 mS/cm obtuvieron en la superficie lateral cerca del borde de entrada estaba ligeramente disuelta y con un acabado, mientras que en el resto de la perforación encontraron grandes cráteres de descarga, lo cual indicó una leve reacción electroquímica y casi despreciable en algunos lugares. A partir de 5 mS/cm comenzaron a observar un aumento de capas lisas a lo largo del agujero, efecto que se acentuó para conductividades entre 1 y 3 mS/cm. Además, a un valor de 3 mS/cm obtuvieron que la capa de refundición apareció solo en la superficie adyacente al borde. Cuando la conductividad excedió de 3 mS/cm, los resultados no mostraron mejoras visibles. Esta investigación comprobó que la variación de la conductividad incide en que exista un predominio de EDM o ECM en el mecanismo de remoción de material.

Tanto los autores anteriores como Singh et al. (2018) han destacado que el principal efecto negativo de emplear conductividades altas es que afecta la calidad de la perforación, ya que aumenta el sobrecorte y la conicidad, pues esto hace que exista mayor disolución electroquímica en las zonas laterales del electrodo.

#### Temperatura del electrolito

La temperatura del electrolito influye también en su conductividad, Chak et al. (2007) obtuvieron que con un aumento de 35°C a 80°C la conductividad aumentó de 345 a 650 mS/cm. El aumento de la conductividad acelera la electrólisis, aumentando la formación de burbujas de gas de hidrógeno en el cátodo, incidiendo en la uniformidad y espesor de la capa de gas. Estos fenómenos producen mayor razón de remoción de material, sin embargo si la temperatura es demasiado alta provocaría la vaporización del electrolito.

### Flujo del electrolito

Es indeseable evitar la acumulación de restos de metal y gases producidos por la electrólisis dentro del orificio maquinado, ya que el crecimiento sin control de estos desechos produce corto circuitos entre los electrodos. Para evitarlo, el electrolito es bombeado a través del orificio interelectródico con el fin de que los residuos de la electrólisis sean removidos hacia afuera. El flujo del electrolito es también esencial en el minimizando de los efectos de calentamiento del electrolito, resultado del paso de la corriente eléctrica y del gas de hidrógeno, que respectivamente aumentan y disminuyen la conductividad efectiva. Además, un flujo alto puede producir áreas con maquinado inadecuado debido a la cavitación (formación de burbujas de vapor o gas) y un flujo demasiado lento puede producir problemas con el desplazamiento inadecuado de material disuelto y gaseoso. Esto requiere límites para el flujo del electrolito, precisar su rango conlleva a extensas pruebas (McGeough, 2005).

### **4.2. Lógica Difusa**

La Inteligencia Artificial (IA) es la ciencia e ingeniería que se encarga de dotar a las máquinas cierta inteligencia, la cual se puede expresar como algoritmos que diferencian patrones o discriminan ciertas informaciones. Esto permite que a través de programas informáticos, las máquinas tomen decisiones inteligentes que tomaría un operario. La diferencia radica en el tiempo de tomar la decisión, ya que el programa informático la toma y realiza la acción en fracciones de segundos, mientras que el operario haría la operación en minutos u horas. Mediante las herramientas de la IA, en la ingeniería se resuelven problemas difíciles que normalmente requieren la inteligencia humana, reduciendo los tiempos de operación (Adnan et al., 2015).

Entre las técnicas de la inteligencia artificial se destaca, la lógica difusa, también conocida como lógica borrosa, la cual se basa en métodos heurísticos, los cuales consisten en traducir a variables lingüísticas la experiencia previa, consejos, intuiciones y estrategias de uso frecuente (Gigerenzer et al., 2011), (Barzani et al., 2015). Las reglas heurísticas son una implicación lógica de la forma (Shaw, 2013):

**si** <condición> **entonces** <consecuencia>

Dónde la condición es conocida también como “antecedente” y la consecuencia es conocida como “consecuente”. Estas reglas lingüísticas son conocidas como reglas difusas debido a que presentan cierto nivel de incertidumbre. La lógica difusa fue formulada por Lotfi A. Zadeh en 1965, la dio a conocer en (Zadeh, 1965), donde expone las ideas para modelar y controlar mediante un sistema experto casos complejos como los sistemas no lineales. E. Trillas (2011) considera que Zadeh expone en este artículo las dos principales contribuciones para el desarrollo de esta lógica: la regla composicional de la inferencia difusa y los métodos de inferencia difusa.

Para Zadeh, la lógica difusa es una lógica precisa de la imprecisión y el razonamiento aproximado. Expresa además que puede verse como un intento de formalización y mecanización de capacidades humanas: la capacidad de conversar, razonar y tomar decisiones racionales en un ambiente de imprecisión, incertidumbre, ambigüedad, información incompleta y contradictoria, parcialidad de la verdad, parcialidad de la posibilidad, es decir, en un entorno de información imperfecta. Una de las principales ventajas de la lógica difusa radica en que brinda enfoques diferentes a los de la lógica booleana (lógica clásica). En la lógica booleana, los enunciados toman sólo dos valores: 0 o 1, falso o verdadero, sí o no; siendo excluyentes y con un cambio abrupto entre ambas opciones, por lo que las variables son bivalentes. Por otra parte, la lógica difusa se basa en el concepto de la verdad parcial asignando a un enunciado un valor entre  $[0;1]$ , el cual expresará su nivel de membresía o pertenencia a cierta clasificación. Una variable tiene la característica de multivalencia, pues puede tomar valores en el intervalo  $[0;1]$  (Zadeh, 1975), (Zadeh, 1979), (Zadeh, 2001) y (Zadeh, 2008). Para una mejor comprensión en la figura 4.4 se establece una comparación de los enfoques de ambas lógicas.

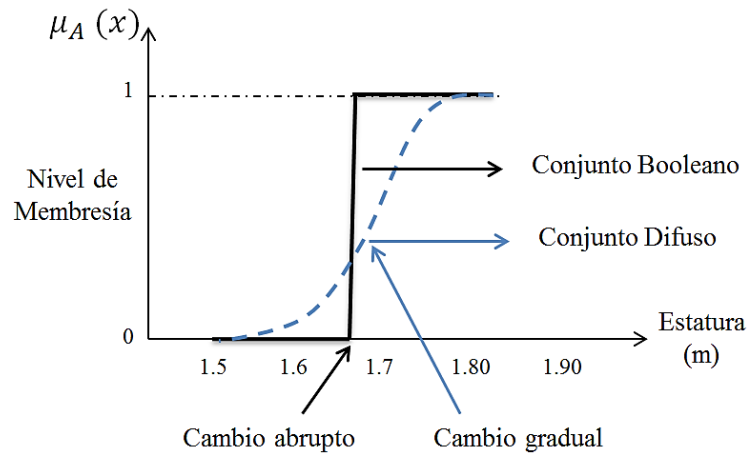


Figura 4.4: Comparación entre lógica booleana y lógica difusa (elaboración propia).

La pertenencia se interpreta como posibilidad, la lógica difusa maneja el término de posibilidad, el cual difiere del término probabilidad. Por ejemplo, una distribución de probabilidad se refiere a la probabilidad de que se produzca un suceso basado en observaciones; mientras que una distribución de posibilidades (función de pertenencia) es subjetiva. La palabra “probable” es sinónimo de “presumible”, “asumible”, “indudable”. La palabra “posible” es sinónimo de “factible”, “practicable”, “viable”. Además indica que la posibilidad y probabilidad se encuentran sólo en un punto: cuando ambos son cero (Jantzen, 2013).

La técnica de lógica difusa traduce en algoritmos declaraciones lingüísticas cualitativas sobre determinado procedimiento, el cual es un algoritmo no lineal que representa el conocimiento cualitativo de un experto humano sobre el comportamiento del sistema. En (Shaw, 2013), se define un sistema difuso como una aproximación universal que pueden realizar aplicaciones no lineales, lo cual permite un conocimiento cualitativo que se debe combinar con datos cuantitativos de forma complementaria. A continuación, se describen los conceptos y fundamentos de la lógica difusa.

#### 4.2.1. Conjuntos Difusos

Los conjuntos difusos representan los rangos numéricos de las variables lingüísticas. Están contenidos en el universo de discurso o conjunto universal (U), el cual contiene todos los posibles elementos concernientes a determinada clasificación. Un conjunto

difuso ( $A$ ) se define como abstracciones matemáticas de eventos representados en el universo de discurso, induce una distribución de la posibilidad o pertenencia de eventos en el universo de discurso. Los elementos pueden ser miembros de varios conjuntos difusos en el mismo universo. En el caso de los conjuntos continuos e infinitos se representan matemáticamente por la ecuación 4.8, mientras que los conjuntos discretos y finitos por la ecuación 4.9 (Ross, 2010):

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (4.8)$$

$$A = \sum_U \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (4.9)$$

En ambas notaciones, la barra horizontal no indica cociente, sólo es un delimitador. El numerador en cada término ( $\mu_A(x)$ ) es el valor de membresía o pertenencia en el conjunto  $A$ , asociado con el elemento del universo indicado en el denominador. En la ecuación 4.8, el signo no expresa integral algebraica sino un operador continuo de agregación teórico funcional para variables continuas; mientras que en la ecuación 4.9 el símbolo de sumatoria algebraica, denota la recopilación o agregación de cada elemento. En la figura 4.5 se muestra una representación gráfica de los conceptos abordados hasta el momento y otros que se explican en los epígrafes siguientes.

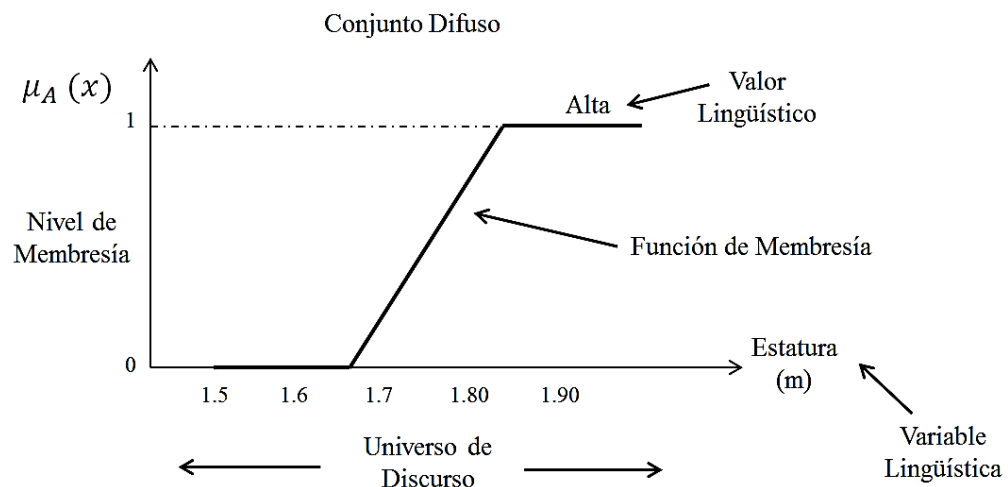


Figura 4.5: Ejemplo de conjunto difuso para la estatura de una persona (elaboración propia).

#### 4.2.2. Operaciones entre conjuntos difusos en un mismo universo de discurso

Las operaciones que se establecen entre conjuntos clásicos como: unión (*or*), intersección (*and*) y complemento (*not*), son también las operaciones básicas que se aplican en los conjuntos difusos. La unión entre dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  ( $A \cup B$ ) contiene a todos los elementos de los dos conjuntos, por lo que se determina como el valor máximo de membresía entre ambos (tabla 4.1). La intersección ( $A \cap B$ ) contiene los elementos en común entre los conjuntos, por lo que se calcula como el valor mínimo de membresía (tabla 4.2). El complemento de un conjunto difuso ( $\bar{A}$ ) está determinado por todos los elementos del universo de discurso que no pertenecen a dicho conjunto (tabla 4.3). En las tablas siguientes se presenta la expresión matemática y la representación gráfica de las operaciones comentadas (Ross, 2010).

Tabla 4.1: Operación difusa unión.

Expresión Matemática	Representación Gráfica
$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	

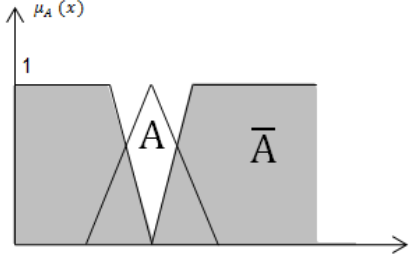
\* $\mu_A(x)$ : Nivel de membresía del conjunto  $A$  en el punto  $x$ .

\* $\mu_B(x)$ : Nivel de membresía del conjunto  $B$  en el punto  $x$ .

Tabla 4.2: Operación difusa intersección.

Expresión Matemática	Representación Gráfica
$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	

Tabla 4.3: Operación difusa complemento.

Expresión Matemática	Representación Gráfica
$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$	

### 4.2.3. Operaciones entre conjuntos difusos en diferentes universos de discurso

#### 4.2.3.1. Producto cartesiano

El producto cartesiano entre conjuntos difusos que pertenecen a diferentes universos de discurso está determinado por la intersección difusa. Por lo que para determinar el producto cartesiano difuso se emplea la operación “mínimo”, se denota con la siguiente expresión (Trillas et al., 2015):

$$\mu_{A \times B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4.10)$$

Dónde:  $x \in A$  y  $y \in B$ .

#### 4.2.3.2. Relación difusa

Las relaciones difusas entre dos conjuntos difusos de diferentes universos de discurso se determinan mediante el producto cartesiano difuso, por lo que mapean cada elemento a una sola función de pertenencia en el espacio producto cartesiano (ecuación 4.11):

$$\mu_R(x, y) = \mu_{A \times B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)); \quad x \in A, y \in B \quad (4.11)$$

Para conjuntos difusos finitos, la relación es posible expresarla mediante una matriz cuyo orden estará determinado por la cantidad de elementos de los conjuntos. Por

ejemplo, para los conjuntos difusos  $x = \{x_1, x_2\}$ ;  $x \in A$  y  $y = \{y_1, y_2\}$ ;  $y \in B$ , la relación entre ambos conjuntos se determina como (Ross, 2010):

$$R = A \times B = \begin{bmatrix} \min(x_1, y_1) & \min(x_1, y_2) \\ \min(x_2, y_1) & \min(x_2, y_2) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

#### 4.2.3.3. Composición

La composición es una operación que permite combinar relaciones difusas en diferentes espacios producto. La ecuación 4.13 representa la expresión matemática de la composición, cuyo operador es “ $\circ$ ”. Existen diferentes formas para determinar la composición, entre las que se encuentran: composición de máximo y mínimo (max-min, ecuación 4.14), donde se calcula el máximo de los mínimos entre cada elemento; otra vía es la composición de máximo y producto (max-producto, ecuación 4.15), donde se calcula el máximo de los productos entre cada elemento (Sivanandam et al., 2007).

$$Y(y) = X(x) \circ R(x, y); \quad x \in U, \quad y \in V \quad (4.13)$$

$$\mu_{X \circ R}(y) = \mu_Y(y) = \max \left[ \min[\mu_x(x), \mu_R(x, y)] \right] \quad (4.14)$$

$$\mu_{X \circ R}(y) = \mu_Y(y) = \max[\mu_x(x) \cdot \mu_R(x, y)] \quad (4.15)$$

#### 4.2.4. Principio de extensión

El principio de extensión es una herramienta matemática que brinda el mecanismo a través del cual es posible extender nociones y operaciones matemáticas clásicas al dominio difuso. Este principio conduce a la operación de establecer un mapeo punto a punto de una función matemática clásica a un mapeo entre conjuntos difusos. Si se supone que una función  $f$  mapea elementos  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  de un universo de discurso  $X$  a otro universo de discurso  $Y$ , tal que  $y = f(x)$ , por tanto (Ponce, 2011):

$$y_1 = f(x_1)$$

$$y_2 = f(x_2)$$



$$y_3 = f(x_3)$$

$$y_n = f(x_n)$$

Si se tiene un conjunto difuso  $A$  definido en  $X$ :

$$A = \left[ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_A(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right] \quad (4.16)$$

Entonces cada imagen de  $x_i$  se convierte al dominio difuso a través del conjunto  $A$ , con un nivel de membresía:

$$\mu_f(A) = \left[ \frac{\mu_A(x_1)}{y_1}, \frac{\mu_A(x_2)}{y_2}, \dots, \frac{\mu_A(x_n)}{y_i} \right] \quad (4.17)$$

#### 4.2.5. Variables lingüísticas

Una variable lingüística adopta valores con palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno; estas palabras se pueden representar mediante conjuntos difusos y gráficamente mediante una función de membresía. Por ejemplo, cierto valor de determinado elemento se puede particionar en términos como: muy bajo, bajo, medio, alto o muy alto, etc. Una variable lingüística se puede representar con la expresión 4.19 (Ponce, 2011):

$$T(\text{Estatura}) = [\text{Bajo}, \text{Medio}, \text{Alto}] \quad (4.19)$$

La acción de dividir el universo de discurso de una variable lingüística en varios conjuntos difusos se conoce como partición difusa (Trillas et al., 2015). En la figura 4.6 se muestra un ejemplo de partición difusa para la variable lingüística de la expresión 4.19:

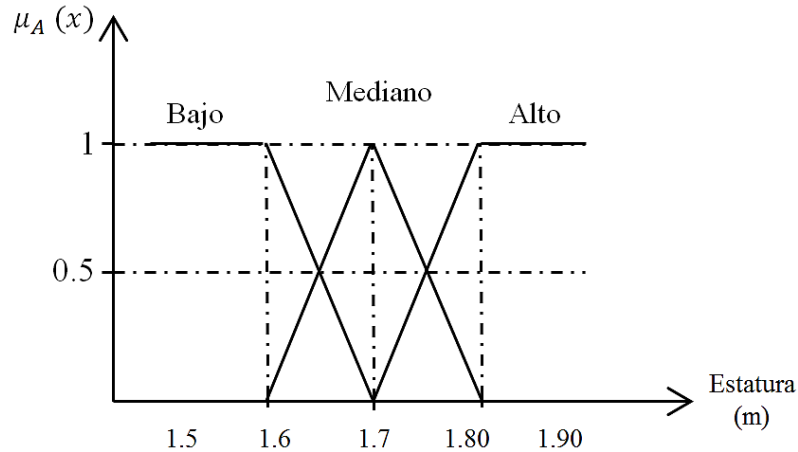


Figura 4.6: Ejemplo de particiones difusas para la variable lingüística “estatura” (elaboración propia).

#### 4.2.6. Funciones de membresía

En las ecuaciones 4.8 y 4.9, el término  $\mu_A(x)$  se denomina función de membresía o pertenencia, la cual es una función que representa gráficamente a cada variable lingüística e indica el valor de pertenencia de un elemento del universo de discurso al conjunto  $A$ . Una función de membresía toma valores en el intervalo  $[0,1]$ , donde  $\mu_A(x) = 1$  representa el mayor valor de pertenencia y  $\mu_A(x) = 0$  representa no pertenencia (Trillas et al., 2015).

En la figura 4.7, se muestran las características de las funciones de membresía. El soporte de la función es la región donde los elementos del universo de discurso tienen valor de pertenencia diferente de cero ( $\mu_A(x) \neq 0$ ). El núcleo es la parte de la función donde los elementos presentan pertenencia máxima ( $\mu_A(x) = 1$ ). Las fronteras son las zonas donde la membresía varía entre cero y uno ( $0 < \mu_A(x) < 1$ ). Los puntos de cruce son los valores donde la pertenencia es de 0.5 ( $\mu_A(x) = 0.5$ ), los cuales indicarán el ancho de banda de la función de membresía, determinado por el valor absoluto de la diferencia entre ambos puntos ( $|x_2 - x_1|$ ). Otro elemento en las funciones de membresía es la altura, la cual es el máximo valor de membresía contenida en la función ( $\max(\mu_A(x))$ ) (Sivanandam et al., 2007) y (Ross, 2010).

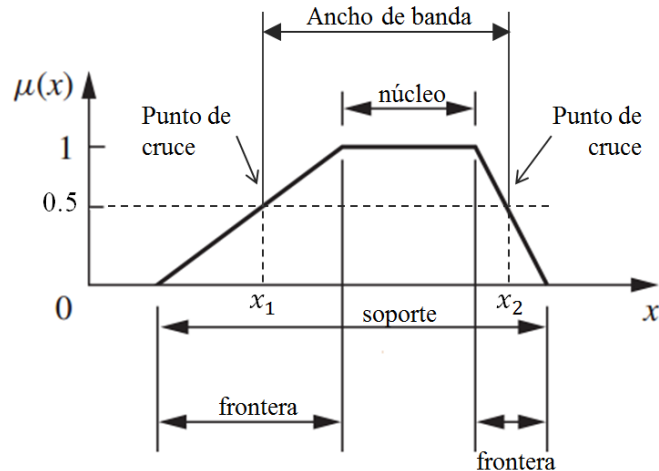


Figura 4.7: Características de las funciones de membresía (Adaptada de (Ross, 2010)).

Las funciones de membresía han sido clasificadas respecto a diferentes características. Algunas de las clasificaciones se comentan a continuación:

- Normal o subnormal, el primer caso ocurre cuando la función alcanza al menos en un punto del universo de discurso el valor máximo de 1, las funciones subnormales nunca alcanzan un valor de pertenencia de 1 por lo que no tienen núcleo.
- De acuerdo a la convexidad, una función de membresía será convexa si los valores de membresía comprendidos entre dos puntos son mayores o iguales que el mínimo de membresía de los dos puntos.

También pueden ser simétricas o no respecto al eje “x”. Otro tipo de clasificación es abierta o cerrada. Hay dos tipos funciones de membresía abiertas, en la figura 4.5 se observa una función abierta por la derecha, que se caracterizan en que su nivel de membresía aumenta y no vuelve a descender. La otra es abierta por la izquierda, su nivel de membresía disminuye pero no vuelve a elevarse. En el caso de las cerradas, su nivel de membresía si vuelve a descender a cero, como la que se observa en la figura 4.6.

Hay dos formas de representar una función de membresía: continua y discreta. Entre las funciones discretas está la función Singleton (Tabla 4.4). Entre las formas más comunes de funciones continuas están la Trapezoidal (Tabla 4.5), Triangular (Tabla 4.6), Gaussiana (Tabla 4.7), Sigmoidal o “S” (Tabla 4.8), Hombro o Saturación (Tabla 4.9), entre otras.

Tabla 4.4: Función de membresía Singleton (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases} \quad (4.20)$	

Tabla 4.5: Función de membresía Trapezoidal (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \left(\frac{d-x}{d-c}\right); & c \leq x \leq d \\ 0; & x > d \end{cases} \quad (4.21)$	

Tabla 4.6: Función de membresía Triangular (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right); & b \leq x \leq c \\ 0; & x > c \end{cases} \quad (4.22)$	

Tabla 4.7: Función de membresía Gaussiana (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

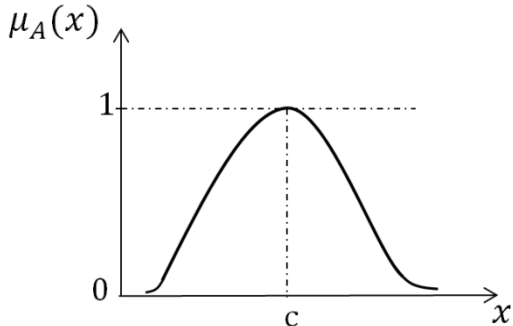
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; c, \sigma) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma}} \quad (4.23)$ <p>c: centro  <math>\sigma</math>: ancho</p>	

Tabla 4.8: Función de membresía Sigmoidal (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

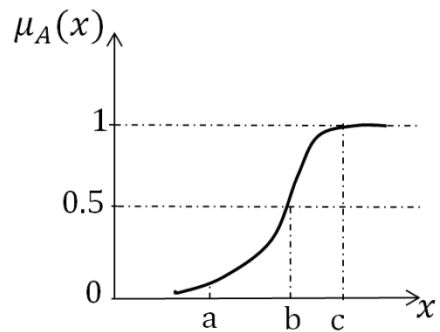
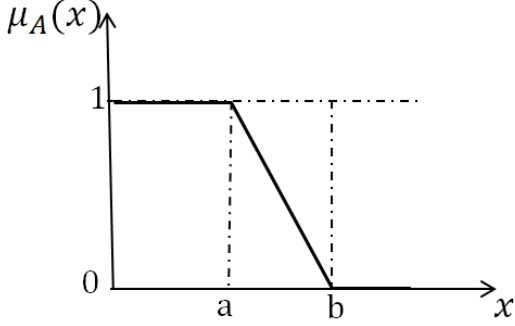
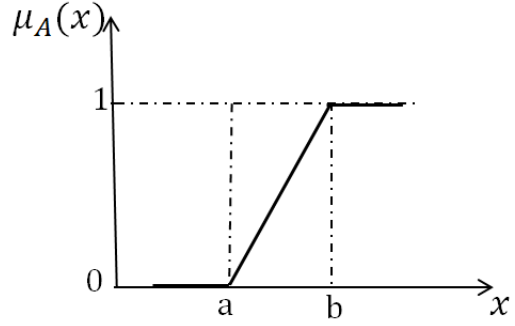
Ecuación	Gráfico
$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; & x < a \\ 2 \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^2 & ; & a \leq x \leq b \\ 1 - 2 \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^2 & ; & b \leq x \leq c \\ 1 & ; & x > c \end{cases} \quad (4.24)$	

Tabla 4.9: Funciones de membresía Hombro o Saturación (Sivanandam et al., 2007) y (Ponce, 2011).

Ecuación	Gráfico (Abierta hacia la izquierda)
$\mu_A(x; a, b) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq a \\ \left(\frac{b-x}{b-a}\right) & ; & a < x < b \\ 1 & ; & x \geq b \end{cases}$ <p>(4.25)</p>	
Ecuación	Gráfico (Abierta hacia la derecha)
$\mu_A(x; a, b) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right) & ; & a < x < b \\ 1 & ; & x \geq b \end{cases}$ <p>(4.26)</p>	

El empleo de cada forma es decisión del diseñador del sistema difuso, sin embargo existen recomendaciones, por ejemplo si la salida no es tan sensible a cambios en la entrada se aconseja utilizar funciones trapezoidales ya que presentan una porción plana; para casos donde los cambios de la respuesta son más repentinos se aconseja funciones triangulares. Las funciones de membresía contenidas en un universo de discurso se solaparán y la cantidad de solapamiento afecta la exactitud del sistema. Se ha establecido experimentalmente que el solapamiento debe estar entre el 25% y 75% (Jantzen, 2013) y (Shaw, 2013).

#### 4.2.7. Razonamiento difuso

El razonamiento difuso se basa en realizar inferencias a partir de proposiciones lingüísticas que representan hechos o relaciones que presentan incertidumbres, es decir, son imprecisas. Por ejemplo: “Juan es alto”, es una proposición donde se asigna el valor de “alto” a la variable lingüística “estatura”. En una proposición se pueden asignar valores a diferentes variables lingüísticas, uniéndolas mediante las operaciones difusas abordadas en el epígrafe 4.2.2, esta acción se conoce como agregación de reglas difusas (Sivanandam et al., 2007).

##### 4.2.7.1. Implicación difusa

La implicación relaciona dos proposiciones denominadas como: antecedente ( $p$ ) y consecuente ( $q$ ), la notación matemática para la implicación es:

$$p \rightarrow q \quad (4.27)$$

La expresión 4.27 se puede leer como:  $p$  implica a  $q$ , esto se puede representar mediante reglas heurísticas de la forma: “si  $p$  entonces  $q$ ”, en este principio se basan las reglas difusas. La implicación difusa asigna funciones de pertenencia al antecedente y al consecuente, las reglas difusas quedan de la forma (Ross, 2010):

Si  $X$  es  $A$  entonces  $Y$  es  $B$ .

La forma de determinar la relación entre causa y efecto de las reglas difusas es mediante la relación entre el conjunto difuso del antecedente y el conjunto difuso del consecuente (Trillas et al., 2015):

$$\text{Si } X \text{ es } A \text{ entonces } Y \text{ es } B. \leftrightarrow R = A \times B$$

Esta relación se puede determinar de diferentes formas, uno de los métodos más empleados fue propuesto por Ebrahim H. Mamdani en (Mamdani, 1976), en el cual se calcula la implicación mediante la operación “mínimo” (ecuación 4.28). Otro método fue propuesto por Larsen, en el cual la implicación se calcula mediante el producto (ecuación 4.29). Estos son los métodos más empleados en aplicaciones de lógica difusa (Ross, 2010).

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (4.28)$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (4.29)$$

#### 4.2.7.2. Métodos de razonamiento difuso

Los métodos de razonamiento difuso son la forma en que se formulan las reglas difusas. Existen dos métodos principales, uno de estos se denomina: *Modus Ponens*, el cual se caracteriza por llegar al consecuente de la regla partiendo desde los antecedentes, por lo que se conoce como inferencia hacia adelante. Como se mencionó anteriormente la regla difusa se puede interpretar mediante la operación de relación. La inferencia se calcula mediante la operación de composición, la cual expresa que a partir de una relación difusa conocida de un sistema, la respuesta de dicho sistema puede ser calculada a partir de un estímulo conocido. Lo anterior se puede representar de la siguiente forma (Ponce, 2011):

Hecho: x es A'	A'
<u>Regla: Si x es A entonces y es B</u>	<u>R = A x B</u>
Consecuencia: y es B'	B' = A' o R

El otro método de inferencia difusa se denomina *Modus Tollens*, el cual parte de la consecuencia para determinar los antecedentes, por lo que se conoce como razonamiento hacia atrás o inverso. Este se expresa de la forma (Ross, 2010):



<u>Regla: Si x es A entonces y es B</u>	<u><math>R = A \times B</math></u>
Hecho: y no es B'	B'
Consecuencia: x no es A'	$A' = B' \circ R$

#### 4.2.8. Agregación de reglas difusas

Un sistema basado en reglas difusas puede involucrar más de una regla. El proceso de obtener la conclusión general a partir de los consecuentes de cada regla se conoce como agregación de reglas difusas. Hay dos métodos para determinar la agregación de reglas, mediante la intersección difusa (“y”, min) o mediante la unión difusa (“o”, max). Por ejemplo, a continuación se muestra un sistema compuesto por dos reglas (Shaw, 2013):

Hecho: X es A'	A'
Regla 1: Si x es A1 entonces y es B1	$B1' = A' \circ R1 = A' \circ (A1 \times B1)$
<u>Regla 2: Si x es A2 entonces y es B2</u>	<u><math>B2' = A' \circ R2 = A' \circ (A2 \times B2)</math></u>
Consecuencia: y es B'	$B' = B1' \cup B2'$

Luego el cálculo del consecuente B' es:

$$\mu_{B'}(y) = \max[\mu_{B1'}(y), \mu_{B2'}(y)] \quad (4.30)$$

#### 4.2.9. Etapas de los sistemas difusos

De manera general, los sistemas difusos se componen de cuatro etapas como se muestra en la figura 4.8. La base de conocimientos contiene la información del proceso real y los objetivos del sistema difuso. Estos dos aspectos se transforman en una base de reglas lingüísticas desarrolladas a partir de las definiciones del proceso y la combinación de las funciones de membresía. La etapa que se denomina fusificación (o defusificación), en ésta se mapean los valores de las variables en el dominio de los números reales al dominio difuso. Uno de los métodos es la fusificación tipo Singleton, en el cual se representa el valor real de la variable con una función Singleton, esta función permite que se simplifiquen las operaciones. La fusificación no es más que la

evaluación de las funciones de pertenencia de los antecedentes de cada regla en el valor de entrada al sistema difuso (Sivanandam et al., 2007).

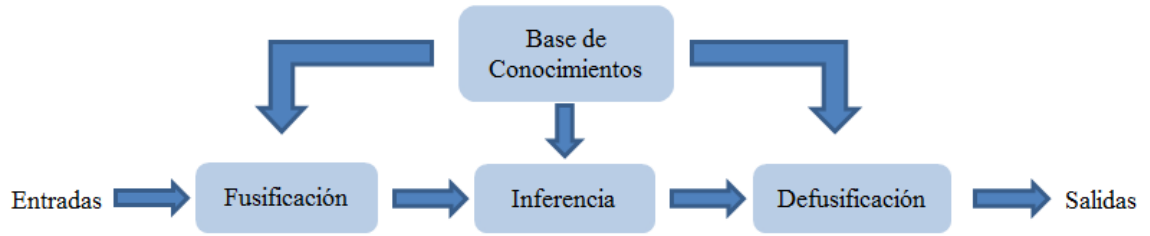


Figura 4.8: Etapas de un sistema difuso (adaptada de (Ponce, 2011)).

La inferencia es la lógica utilizada para calcular las salidas del sistema en términos lingüísticos. Jantzen (2013) define la inferencia como una consecuencia lógica a un planteamiento, por tanto, es lo que se infiere o se deduce de las reglas si-entonces. Los dos métodos principales son el método de inferencia difusa de Mamdani y el método de Sugeno. El primero fue introducido por Mamdani et al. (1975), se basa en calcular el consecuente de la regla heurística como un conjunto difuso para cada variable de salida y este conjunto difuso se defusificará posteriormente.

El método de Sugeno fue propuesto por Takagi y Sugeno en Takagi et al. (1985), también se conoce como modelo Sugeno-Takagi. Se basa en obtener el consecuente como una función polinomial o cualquier otra función que describa adecuadamente la salida del sistema dentro de la región difusa especificada por el antecedente de la regla. Éste valor difuso se convierte a valor en el dominio de los números reales mediante la defusificación. Los sistemas difusos de Mamdani usan conjuntos difusos como consecuencia de la regla, mientras que los sistemas difusos de Sugeno emplean funciones lineales de las variables de entrada como consecuencia de las reglas.

La defusificación se puede establecer por diferentes métodos, algunos de los cuales se describen a continuación (Sivanandam et al., 2007), (Shaw, 2013):

- Centro de área o gravedad: calcula el centro del área que representa el término difuso de salida, se obtiene mediante la siguiente expresión 4.31:

$$\text{Salida} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_B(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^m \mu_B(x_i)} \quad (4.31)$$

- Bisectriz: encuentra la abscisa  $x$  de la línea vertical que divide el área bajo la función de membresía en dos áreas de igual tamaño.

- Método de centro máximo: Se selecciona el centro de los valores reales a los cuales corresponden membresía máxima. Este método y los tres siguientes se emplean principalmente en caso de secciones constantes como las que tienen las trapezoidales.
- Método de máximo izquierda o máximo más pequeño: el valor de salida será el valor más a la izquierda (menor) dentro de los valores a los que corresponden el máximo de membresía.
- Método de máxima derecha o máximo más grande: el valor de salida será el valor más a la derecha (mayor) dentro de los valores a los que corresponden el máximo de membresía.
- Método de media de máximos (MoM, por sus siglas en inglés *Mean of Maxima*): se promedian los valores reales a los cuales corresponden membresía máxima.

# Capítulo 5

## 5. Metodología

A partir del problema y la hipótesis planteados en el capítulo 2, así como de la revisión bibliográfica, se plantea la metodología a desarrollar para la obtención de un modelo difuso del proceso ECDM.

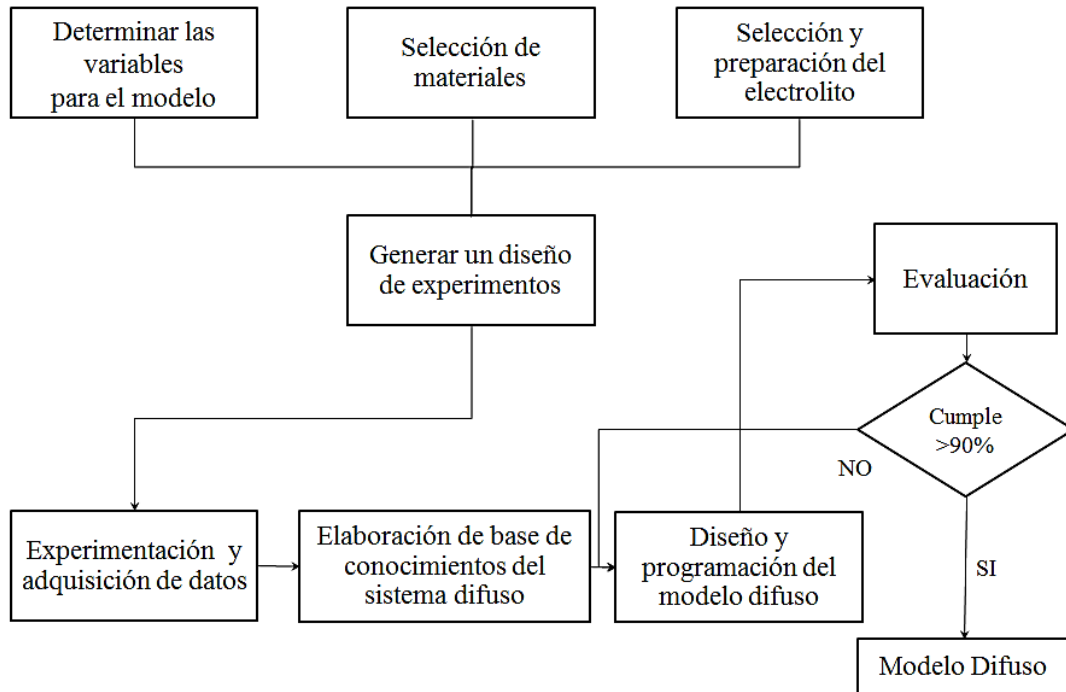


Figura 5.1: Metodología (elaboración propia).

### 1. Determinar las variables para el modelo:

A partir de la revisión bibliográfica se identificaron las variables que intervienen en el proceso ECDM. Posteriormente se determinaron cuáles son posibles de medir y variar en el sistema de maquinado en condiciones de ECDM que se cuenta en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA.

### 2. Selección de materiales (pieza de trabajo y herramienta de trabajo):

Considerando la importancia y uso industrial, se seleccionaron los materiales posibles para pieza y herramienta de trabajo a partir de la disponibilidad en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA.

### 3. Selección del electrolito:

A partir de la revisión bibliográfica se identificaron los electrolitos más empleados y que mejor rendimiento brindan al proceso ECDM, en correspondencia con los materiales seleccionados y la disponibilidad en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA.

### 4. Generar un diseño de experimentos:

Se generó un diseño de experimentos que sirvió como marco de referencia para establecer la base de conocimientos del sistema difuso.

### 5. Experimentación y adquisición de datos:

Se realizó la experimentación acorde al diseño de experimentos generado y se adquirieron los datos de los parámetros de entrada y salida mediante dispositivos de medición disponibles en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA.

### 6. Elaboración de base de conocimientos del sistema difuso:

A partir de los datos experimentales se obtuvo conocimiento acerca de cómo se comporta el proceso de maquinado para establecer los conjuntos difusos y funciones de membresía que representen lo más cercano posible a la realidad, el comportamiento de los parámetros de entrada y salida; así como también las reglas difusas que regirán el funcionamiento del modelo difuso.

### 7. Diseño y programación del modelo difuso:

Se estableció el método de fusificación, motor de inferencia difusa y de defusificación. Posteriormente se programó el sistema difuso mediante la herramienta MATLAB®.

### 8. Evaluación:

Evaluación del modelo difuso mediante el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la predicción del modelo respecto a los obtenidos en las experimentaciones reales, donde la exactitud de la predicción fue superior a 90%. Para la validación se realizaron 14 corridas experimentales con combinaciones de los parámetros de entrada que no hayan sido incluidas en el diseño de experimentos y se obtuvo una exactitud de alrededor del 90 %.

# Capítulo 6

## 6. Procedimiento Experimental

En el presente capítulo se describirá la experimentación realizada para obtener datos del comportamiento del proceso ECDM. Se presentará una descripción de la preparación metalográfica de las piezas de trabajo, así como las características de la máquina donde fue desarrollada la etapa experimental. Posteriormente, se describirá la técnica empleada para la adquisición de los niveles de voltaje, corriente y frecuencia. Al final se explicará cómo se determinaron las variables de salida y cómo se analizaron los resultados obtenidos del diseño de experimentos.

### 6.1. Preparación metalográfica

El material de las piezas de trabajo fue acero de alta resistencia (HSS, por sus siglas en inglés *High Strength Steel*). La composición química de este material fue determinada experimentalmente mediante combustión y detección infrarroja (ASTM E1019-2011) para los componentes: Carbono y Azufre, el resto de los elementos fueron determinados por Espectrometría de Emisión por Plasma. A continuación se muestra la composición química:

Tabla 6.1: Composición Química del material de trabajo HSS (% e. p.).

<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Si</b>	<b>Ti</b>	<b>Mo</b>	<b>P</b>
Balance	1.12	0.21	0.17	0.15	0.037	0.021	0.013
<b>Cu</b>	<b>V</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>				
0.009	0.009	0.006	0.005				

Se emplearon muestras de este material en forma de prisma con dimensiones de 20 mm de largo, 20 mm de ancho y 7 mm de alto. Antes de realizar la experimentación se procedió a la preparación metalográfica de las muestras de acuerdo a la norma ASTM E3, con el fin de obtener un acabado espejo de la superficie de entrada del electrodo, como se muestra en la figura 6.1. Las piezas fueron desbastadas con lijas de Carburo de Silicio (SiC) a diferentes granulometrías (120, 320, 600 y 1200 granos por pulgada

lineal) en una pulidora. Posteriormente, se obtuvo el acabado espejo realizando el pulido en un paño suave húmedo con pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  como medio abrasivo. Finalmente las muestras fueron lavadas con alcohol etílico y secadas.

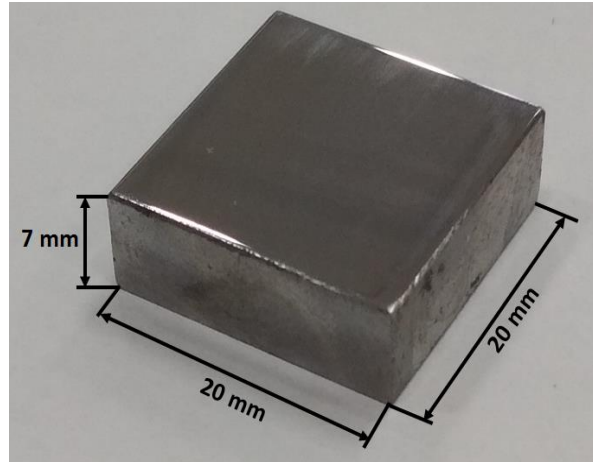
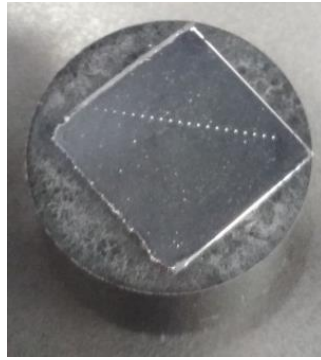


Figura 6.1: Muestra de las piezas de trabajo con acabado espejo (elaboración propia).

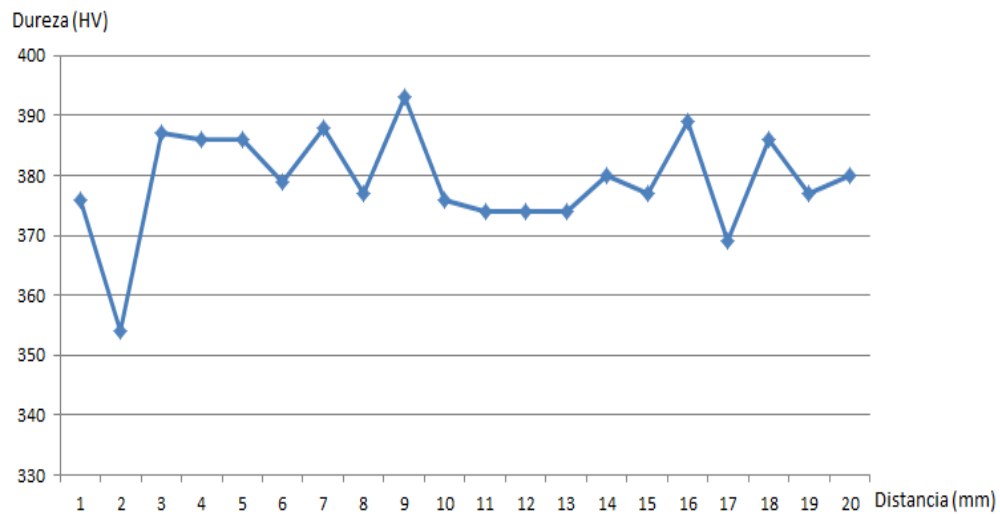
#### **6.1.1. Determinación de la microdureza del material de trabajo.**

Se realizó un análisis de microdureza sobre el metal base para conocer el perfil de dureza del material de trabajo. Inicialmente, para mejorar la manipulación, se procedió al montaje o encapsulado de una muestra en una prensa de montaje en caliente marca Struers modelo CitoPress-20. En este proceso se recubrieron las muestras con un polímero denominado baquelita en dicha prensa de montaje, calentando la resina a 180° y manteniendo la temperatura durante 3 minutos aplicando una presión de 250 bar, posteriormente el tiempo de enfriamiento fue de 2 minutos.

El análisis de microdureza fue realizado en un microdurómetro marca Wilson Hardness-Tukon 2500. Para esto fue empleada una carga de 500 gf y fueron realizadas 20 indentaciones espaciadas a 1 mm en sección transversal de la pieza, la carga fue aplicada durante 10 segundos en cada indentación, como se observa en la figura 6.2 (a). La prueba de microdureza realizada fue tipo vickers según la norma ASTM E92-17, los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 6.2 (b). Promediando estos resultados se obtiene una microdureza de 379 HV.



(a)



(b)

Figura 6.2: (a) Pieza procesada en el análisis de microdureza (elaboración propia). (b) Resultados del análisis de microdureza (elaboración propia).

## 6.2. Técnica experimental

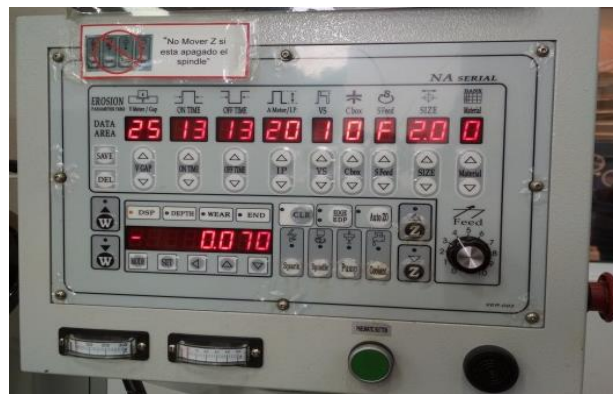
La etapa experimental se desarrolló en una máquina EDM comercial marca River modelo 3 (figura 6.3 (a)), la cual fue adaptada para el empleo de electrolito en lugar de agua desionizada, con el fin de establecer el proceso ECDM. Al ser una máquina comercial, sólo se cuenta con el manual de usuario el cual no presenta una profunda descripción de su funcionamiento. En la figura 6.3 (b) se observa el panel de control, en la parte superior del panel se establecen los valores de los parámetros para efectuar el maquinado. La máquina permite el ajuste del tiempo activo y no activo de la señal ( $t_{on}$ - $t_{off}$ ), la suma de ambos brinda el período de la señal, el inverso del período da como



resultado la frecuencia de la señal de voltaje aplicada. La máquina River 3 permite establecer estos parámetros desde 5 a 99  $\mu$ s, permitiendo por tanto valores de frecuencia entre 5 y 100 kHz aproximadamente. También puede ser ajustada la corriente pico de *gap* ( $I_p$ ), el cual es un valor que limita la potencia y por consiguiente la energía durante el maquinado, los valores que se pueden ajustar están en el rango de 1 a 25 A.



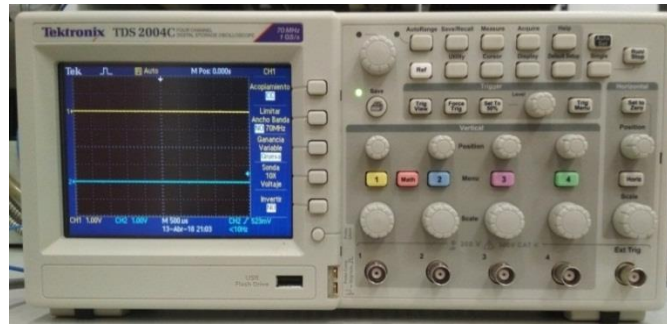
(a)



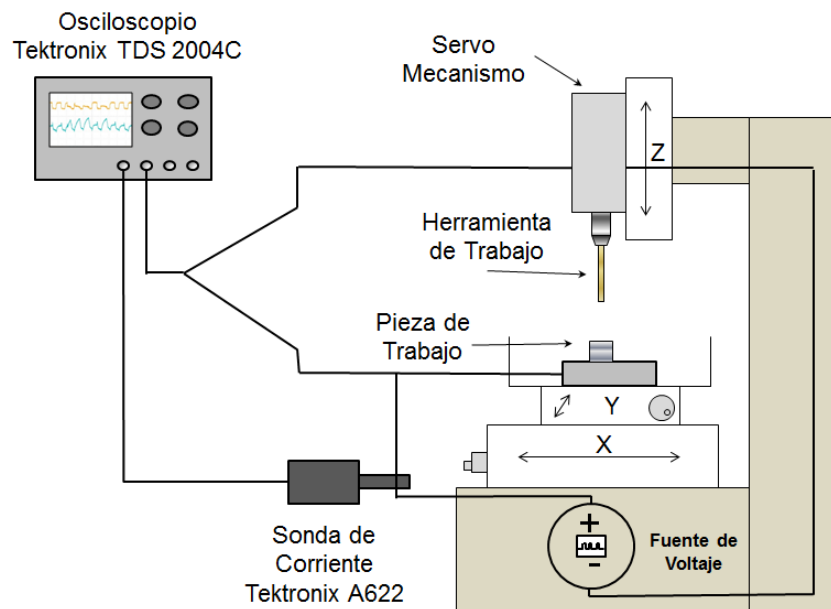
(b)

Figura 6.3: (a) Máquina EDM River 3 (elaboración propia). (b) Panel de control maquina EDM River 3 (elaboración propia).

Otros parámetros que se pueden establecer en la configuración de la maquina es el voltaje que la fuente aplica entre los electrodos (Vs), la velocidad de rotación (SFeed) y la velocidad de avance de la herramienta (Feed); los cuales presentan una codificación en el panel de control. La codificación para el ajuste del voltaje de la fuente (Vs) se basa en la selección de tres niveles: 1, 2 y 3. Por su parte la corriente es posible ajustarla entre 1 y 25 A, mientras que para la frecuencia se puede ajustar valores entre 5 y 100 kHz a partir del establecimiento de los tiempos activo y no activo de señal. El comportamiento real de los niveles de voltaje de gap, corriente y frecuencia fueron medidos mediante un osciloscopio Tektronix TDS 2004C (figura 6.4(a)), la sonda fue conectada al cátodo (negativo) y ánodo (positivo), como se muestra en la figura 6.4 (b).



(a)



(b)

Figura 6.4: (a) Osciloscopio Tektronix TDS 2004C (elaboración propia). (b) Esquema eléctrico de conexión (elaboración propia).

A partir de las mediciones realizadas para cada nivel de  $V_s$  e  $I_p$ , el comportamiento de  $V_g$  presenta un rango de operación. Se obtuvo que para el nivel 1 de  $V_s$  corresponde un  $V_g$  de alrededor de 50 V, al nivel 2 le corresponden alrededor de 60 V, mientras que para el nivel 3 un voltaje de gap alrededor de 70 V. Se observó que durante el maquinado dichos valores fluctuaron en aproximadamente  $\pm 10$  V alrededor del valor que se comentó para cada nivel. También se pudo observar que durante el maquinado el valor de la corriente fluctuó en rangos de  $\pm 5$  A alrededor del valor fijado, para esto se empleó una sonda de corriente Tektronix A622 conectada al mismo osciloscopio (figura 6.4), y se muestra en la figura 6.5.



Figura 6.5: Sonda de corriente Tektronix A622 (elaboración propia).

Como parte de las investigaciones que se realizan en el laboratorio de electromaquinado en COMIMSA, el MSc. Gerardo Galo Hernández realizó una estimación de los valores reales de los niveles de selección de la velocidad de rotación (SFeed) y la velocidad de avance de la herramienta (Feed), la cual se comenta a continuación. La rotación del electrodo fue medida con un tacómetro digital marca DT-2234C, se realizaron mediciones en un mismo nivel y se obtuvo un promedio de las mediciones para cada nivel. La máquina River 3 presenta 15 niveles codificados en el sistema de numeración hexadecimal, correspondiendo al nivel 1 una velocidad de 50 RPM y al último nivel (15 o F) una velocidad cercana a 190 RPM (entre 186 y 188 RPM). Se pudo corroborar que la variación entre los niveles 9 y 15 fue de sólo 10 RPM aproximadamente, correspondiendo al nivel 9 una velocidad de 180 RPM. Debido a lo anterior, se decidió realizar la etapa experimental con el nivel 9, para el cual se obtuvo una medición de 180 RPM. En la tabla 6.2 se presentan los valores de cada nivel.

Para la velocidad de avance de la herramienta (Feed) la máquina cuenta con 10 niveles, los cuales fueron cuantificados midiendo el tiempo que demora en avanzar 10 centímetros (la máquina cuenta con un indicador de medición que permite observar el

avance en el eje “z”), fueron tomadas 5 mediciones de tiempo y luego se promediaron. La velocidad tuvo una variabilidad entre 3,758.27  $\mu\text{m/s}$  en el nivel 1 y 28,328.61  $\mu\text{m/s}$  en el nivel 10. En la tabla 6.2 se presentan los valores de cada nivel. Sin embargo, la mínima velocidad que permite la máquina es mayor a las velocidades reportadas en investigaciones de ECDM con materiales metálicos como Nguyen et al. (2012a), quienes emplean 10 y 50  $\mu\text{m/s}$ .

Tabla 6.2: Valores de la velocidad de rotación (SFeed) y la velocidad de avance de la herramienta (Feed).

Velocidad de Rotación (SFeed)		Velocidad de Avance de la Herramienta (Feed)	
Código	Valor (RPM)	Código	Valor ( $\mu\text{m/s}$ )
1	50	1	3,758.27
2	63	2	8,713.84
3	78	3	12,138.87
4	97	4	14,771.05
5	115	5	17,271.16
6	132	6	19,334.88
7	152	7	21,285.65
8	170	8	23,009.66
9	180	9	25,380.71
A	184	10	28,328.61
B	185		
C	186		
D	186		
E	186		
F	187		

Para la medición del peso de las piezas de trabajo se empleó una balanza de alta precisión marca OHAUS modelo Scout Pro SP602, el peso máximo capaz de medir es de 600 g, con una desviación de 0.01 g. Mientras que para obtener las dimensiones reales de cada pieza se trabajó con un vernier Mitutoyo Absolute Digimatic. La conductividad del electrolito fue medida con un medidor de resistividad marca HANNA Instruments modelo HI 87314. Estos instrumentos se pueden observar en la figura 6.6.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.6: Instrumentos de medición utilizados en las experimentaciones (elaboración propia). (a) Balanza de alta precisión marca OHAUS modelo Scout Pro SP602 (elaboración propia). (b) Medidor de resistividad marca HANNA Instruments modelo HI 87314. (c) Vernier Mitutoyo Absolute Digimatic (elaboración propia).

### 6.3. Etapa experimental

Para conocer la relación de los factores: voltaje de gap ( $V_g$ ), corriente pico a través del gap ( $I_p$ ) y frecuencia ( $f$ ) de la señal de la fuente de voltaje ( $V_s$ ); sobre los parámetros de salida: tasa de remoción de material (MRR) y diámetro del sobrecorte (DOC); se procedió a desarrollar un diseño de experimentos (DoE). Como se mencionó anteriormente, la máquina sólo puede ajustar 3 niveles para el voltaje de la fuente y se desea evaluar la repetitividad de la máquina a partir de la inserción de puntos centrales. Por tanto, se elaboró un diseño de experimentos factorial completo de 3 factores con 2 niveles ( $2^3$ ), con dos réplicas y 4 puntos centrales. Los valores de los niveles de cada

factor se pueden observar en la tabla 6.3, mientras que el DoE generado, con aleatorización de corridas, en el software estadístico Minitab se aprecia en la tabla 6.4.

Tabla 6.3: Niveles de los factores para el diseño de experimentos.

Factores	Niveles		
	Bajo	Central	Alto
Voltaje de gap (V)	50	60	70
Corriente pico (A)	10	15	20
Frecuencia (kHz), [ $t_{on}$ - $t_{off}$ ]	10 [50-50]	25 [20-20]	40 [13-13]

$t_{on}$ : Pulso activo.

$t_{off}$ : Pulso no activo.

Tabla 6.4: Diseño de experimento generado.

Orden Estándar de Corrida	Orden de Corrida	Valores Codificados			Valores Decodificados		
		$V_g$	$I_p$	$f$	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	F (kHz)
6	1	+	-	+	70	10	40
7	2	-	+	+	50	20	40
8	3	+	+	+	70	20	40
4	4	+	+	-	70	20	10
3	5	-	+	-	50	20	10
15	6	-	+	+	50	20	40
2	7	+	-	-	70	10	10
20	8	0	0	0	60	15	25
19	9	0	0	0	60	15	25
13	10	-	-	+	50	10	40
9	11	-	-	-	50	10	10
12	12	+	+	-	70	20	10
17	13	0	0	0	60	15	25
5	14	-	-	+	50	10	40
18	15	0	0	0	60	15	25
11	16	-	+	-	50	20	10
10	17	+	-	-	70	10	10
14	18	+	-	+	70	10	40
16	19	+	+	+	70	20	40
1	20	-	-	-	50	10	10

Las principales ventajas del método factorial son su confiabilidad en la creación de un proceso experimental estructurado adecuadamente y su facilidad para combinarse con diversos métodos estadísticos, computacionales y de optimización, para así aumentar su efectividad y precisión (Davim, 2016). La inserción de puntos centrales permite analizar

la reproducibilidad del proceso, mientras que a través de las réplicas se analizará la repetitividad. (Montgomery, 2008).

Como se mencionó anteriormente, la corriente pico se puede fijar entre 1 y 25 A, para la experimentación se seleccionó como nivel bajo 10 A, debido a que en corridas preliminares se obtuvo que por debajo de 10 A la energía que se genera es insuficiente para una adecuada remoción de material tanto para las descargas eléctricas como para la remoción electroquímica. Esto provoca tiempos de maquinado altos (mayores de 20 minutos) y en ocasiones la herramienta de trabajo no avanzó a partir de cierto momento por lo que no hubo una perforación completa. Por tales motivos se pudo constatar que el empleo de valores de corriente alrededor de 5 A no son adecuados para el proceso de barrenado (aun con el máximo valor de  $V_g$ ), por lo cual se utilizó para las experimentaciones corrientes a partir de 10 A.

Mientras que el valor máximo elegido fue de 20 A debido a que en corridas preliminares se observó un predominio de descargas eléctricas en el máximo de corriente que permite la máquina (25 A) y se deseó obtener en esta primera etapa de experimentación un maquinado equilibrado entre las dos vías de remoción de material. Los valores de frecuencia elegidos fueron seleccionados con el fin de establecer comparaciones respecto a experimentaciones previas desarrolladas en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA en el proceso EDM. Cabe destacar que el caso del nivel máximo de 40 kHz realmente lo que se alcanzan son 38 kHz, pues no es posible especificar el valor puntual de 40 kHz exactamente. En la experimentación se empleó un ciclo de trabajo de 50 %.

Los parámetros que se mantuvieron constantes durante la experimentación y sus valores se resumen en la tabla 6.5. En la bibliografía consultada acerca del maquinado mediante ECDM con pieza de trabajo metálicas, Huang et al. (2011) experimentó con velocidades entre 6000 y 42000 RPM, Souza (2014) reportó experimentaciones con velocidades de rotación del electrodo entre 100 y 2000 RPM, por su parte Zhang et al. (2015) empleó 100 RPM. En el presente trabajo, para el ajuste de este parámetro, debido a que la máquina River no presenta gran variación entre los niveles 10 y 15, se seleccionó el nivel 9 correspondiente a 180 RPM, el cual se encuentra entre los valores que han reportado algunos autores.

La velocidad de avance de la herramienta se ajustó a partir de experimentaciones preliminares, pues en la bibliografía consultada hasta el momento no se han reportado velocidades como las disponibles en la maquina River 3. Con el nivel 4 se observó una adecuada relación en cuanto al tiempo de maquinado y la ocurrencia de cortocircuitos. Además se observó que al especificar niveles con valores mínimos, el tiempo de maquinado sobrepasó los 20 minutos, generándose una cantidad baja de descargas lo cual llevo a una remoción de material originada por el efecto electrolítico produciendo un alto sobrecorte. Mientras que a niveles mayores de 4 se observó la ocurrencia de cortocircuitos con mayor frecuencia, por consiguiente generó la retracción del cátodo resultando en maquinados incompletos debido a la necesidad de detener la máquina ante un mal funcionamiento.

Tabla 6.5: Parámetros constantes y sus valores.

Parámetro	Valor
<b>Pieza de Trabajo</b>	
Material	Acero de Alta Resistencia (HSS)
Dimensiones (largo x ancho x altura)	20 x 20 x 7 mm
<b>Herramienta de Trabajo</b>	
Material	Latón
Velocidad de Rotación	180 RPM
Avance de la Herramienta	14,771 $\mu\text{m/s}$
Forma	Doble Agujero
Diámetro	1.93 mm
Material	Latón
Gap inicial	0.150 mm ( $\pm 0.01$ mm)
<b>Electrolito</b>	
Nombre	Cloruro de Sodio (NaCl)
Concentración	2.51 g/L
Conductividad	4.35 mS/cm
Presión	300 PSI (2.0684 MPa)

El material de la herramienta de trabajo (cátodo o electrodo) fue de latón, el cual es una aleación de cobre (Cu) y zinc (Zn). La composición química de dicho material se obtuvo mediante Espectrometría de Emisión por Plasma. En la siguiente tabla se muestran los componentes que forman esta aleación, el signo “<” indica que el valor obtenido es menor al límite de cuantificación de la curva de calibración.



Tabla 6.6: Composición Química Latón (% e. p.).

<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Pb</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Sn</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>
62.28	37.63	0,043	0.019	0.014	0.009	<0.005	<0.005
<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Sb</b>				
<0.005	<0.005	<0.005	<0.005				

El electrodo empleado forma parte de los electrodos industriales de la máquina EDM River 3, los cuales son diseñados con menor medida que el diámetro de la perforación deseada debido al sobrecorte provocado por el proceso. El diámetro real del electrodo fue de 1.93 mm, el cual se emplea para perforaciones en EDM de 2 mm. En el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA se cuenta con dos tipos de electrodos cuyas geometrías internas se aprecian en la figura 6.7. Para la experimentación se seleccionó el de tipo H o doble agujero, debido a que éstos permiten alcanzar menor tiempo de maquinado ya que reducen la posibilidad de cortocircuitos al desbastar todo el material dentro de la perforación. Con el electrodo de tubo existe mayor posibilidad de generar cortocircuitos debido a la porción de material que queda en el interior.

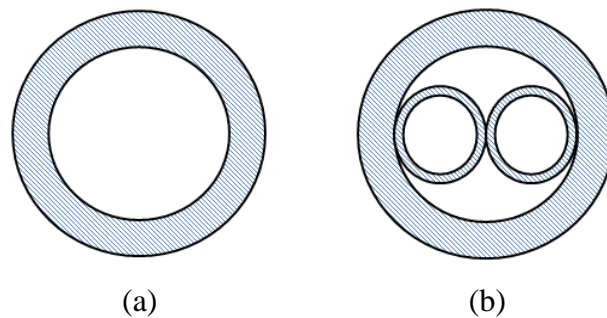


Figura 6.7: Vista frontal de formas de herramienta de trabajo (elaboración propia). (a) Electrodo de tubo o simple. (b) Electrodo de doble agujero o tipo H.

El electrolito seleccionado fue Cloruro de Sodio (NaCl) debido a que es un compuesto común, no nocivo para la salud humana y mantiene el sistema de manufactura lo más simple posible. Además, de acuerdo con Souza (2014) el cloruro de sodio frente a otros electrolitos produce menor capa de pasividad, lo que provoca un mayor efecto de las descargas durante el maquinado produciendo una mayor MRR. Además en investigaciones realizadas en el laboratorio de electromaquinado de COMIMSA como (Granda-Gutiérrez et al., 2015), donde se realizó una comparación entre cuatro electrolitos: Cloruro de Sodio (NaCl), Bromuro de Sodio (NaBr), Bromuro

de Potasio (KBr) y Nitrato de Sodio (NaNO<sub>3</sub>), en el proceso de maquinado por electrolito (ECM); obtuvieron una mayor tasa de remoción de material con el NaCl. Tomando como base el trabajo de Granda-Gutiérrez et al. (2015), la concentración del electrolito para la experimentación fue de 2.51 g/L; se prepararon 20 litros de cloruro de sodio a dicha concentración produciendo una conductividad de 4.35 mS/cm.

### 6.3.1. Obtención de los parámetros de salida

#### 6.3.1.1. Tasa de Remoción de Material (MRR)

La tasa de remoción de material (MRR) se obtuvo como una función del volumen eliminado durante el tiempo de maquinado, es decir, fue estimada como pérdida de volumen por unidad de tiempo. Esta relación es expresada matemáticamente en la ecuación 4.3:

$$MRR = \frac{P_{wi} - P_{wf}}{\rho * t_{maq}} \quad (4.3)$$

Las muestras fueron pesadas antes y después del proceso de electromaquinado, utilizando la balanza de alta precisión marca OHAUS modelo Scout Pro SP602. La densidad del material se obtuvo mediante cálculos según la expresión 6.1, donde  $P_w$  es el peso de la pieza de trabajo y  $V_w$  es el volumen de la pieza de trabajo, el cual se obtuvo mediante la expresión 6.2 donde  $a$  es el ancho de la muestra,  $l$  es el largo de la muestra y  $h$  es la altura o espesor de la muestra:

$$\rho = P_w / V_w \quad [g/mm^3] \quad (6.1)$$

$$V_w = a * l * h \quad [mm^3] \quad (6.2)$$

Para la densidad del material fue determinada la densidad de 36 muestras y los resultados fueron promediados obteniendo un valor aproximado de 0.00781 g/mm<sup>3</sup>. El tiempo de maquinado fue medido con un cronómetro digital. Los valores obtenidos para la MRR se pueden observar en la tabla 6.7.

### 6.3.1.2. Diámetro del Sobrecorte (DOC)

Para la obtención del diámetro del sobrecorte, las muestras fueron procesadas en un Microscopio Electrónico por Barrido (MEB) marca Bruker en el laboratorio de microscopía de COMIMSA. Se obtuvieron imágenes de alta calidad para cada pieza con detección de electrones secundarios a una altura de trabajo de 30 mm, magnificación de 20x y un haz de electrones de 20 kV. Como se comentó en el capítulo 4, un efecto que provoca el electrolito radica en que no se obtienen bordes agudos en el orificio de entrada. Para una mejor comprensión de este fenómeno, en la figura 6.8 se muestran tres piezas maquinadas en los niveles máximo, central y mínimo del diseño de experimentos.

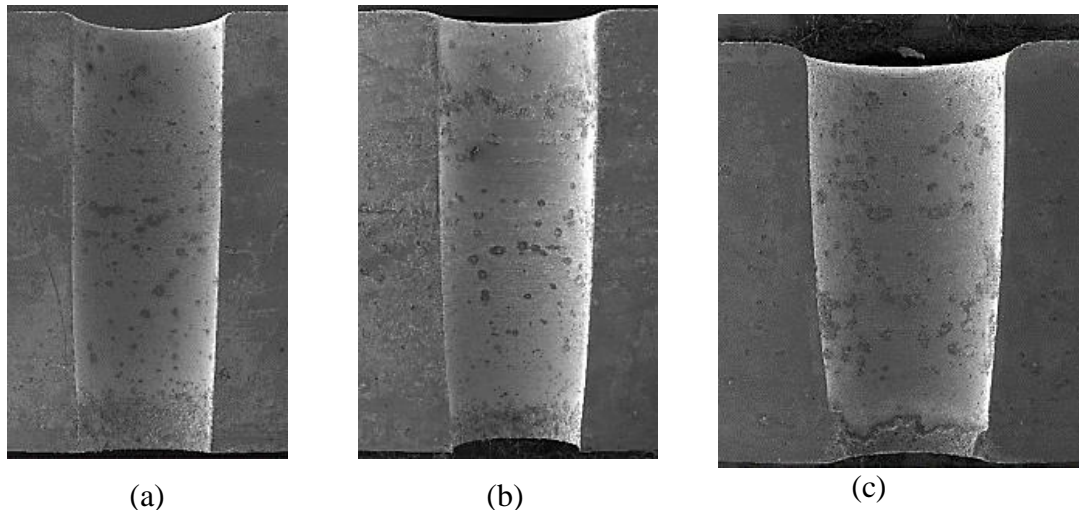


Figura 6.8: Vista lateral del orificio de entrada de una pieza maquinada (elaboración propia). (a) Niveles máximos,  $t_{\text{maq}}=1:05$  min. (b) Niveles medios,  $t_{\text{maq}}=1:52$  min. (c) Niveles bajos,  $t_{\text{maq}}=11:03$  min.

Estas piezas no formaron parte de las corridas del diseño de experimento y fueron diseccionadas antes de maquinar en una cortadora marca Struers con un disco de diamante, posteriormente se procedió a obtener un acabado espejo en las caras laterales con el mismo procedimiento que se explicó anteriormente. Como se puede apreciar los orificios de entrada presentan bordes curvos, mientras que los orificios de salida tienen bordes agudos, corroborando lo obtenido por Zhang et al. (2015). Los orificios de salida se caracterizaron por un predominio del proceso EDM, con descargas continuas y altos

picos de corriente. Además, quedan expuestos al electrolito durante menor tiempo que los orificios de entrada del electrodo.

Las imágenes obtenidas en el MEB fueron procesadas en instalaciones del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) Unidad Saltillo, en el software de procesamiento de imágenes: Image-Pro Plus 4.1. Dicho software, permitió calibrar las imágenes en función de la escala impresa en las fotomicrografías obtenidas en el MEB. De tal forma fue posible procesar mediciones sobre las imágenes y efectuar las mediciones del diámetro superior de la curvatura del orificio de entrada, el cual fue tomado como el diámetro de entrada. En la figura 6.9 se muestra un ejemplo de las mediciones realizadas para los diámetros del orificio de entrada mediante el software Image-Pro Plus 4.1 en la muestra correspondiente a la corrida número 1 del diseño de experimentos (tabla 6.7).

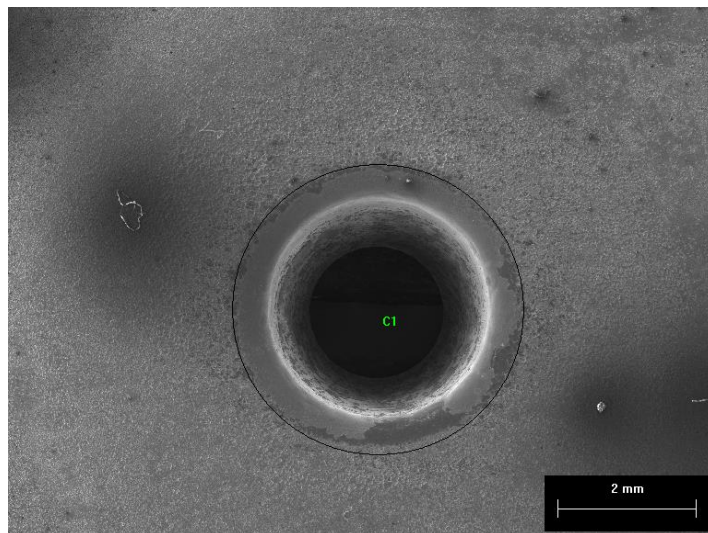


Figura 6.9: Imagen procesada en Image-Pro Plus 4.1 con la medición del diámetro del orificio de entrada (elaboración propia).

Luego, se calculó el diámetro de sobrecorte mediante la expresión 4.5. Los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 6.7.

$$DOC = D_{in} - D_{tool} \quad (4.5)$$

Tabla 6.7: Diseño de experimento (adicionalmente se incluye el tiempo de maquinado:

$t_{maq}$ ).

Diseño de experimento						$t_{maq}$ (min)
Orden de Corrida	Factores			Respuestas		
	Valores Decodificados			MRR (mm <sup>3</sup> /min)	DOC (mm)	
$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)				
1	70	10	40	10.4381	2.2833	03:04.4
2	50	20	40	10.1680	2.3100	03:23.7
3	70	20	40	28.4994	1.3500	01:01.6
4	70	20	10	28.3038	1.3233	00:57.0
5	50	20	10	9.7289	2.3900	03:49.3
6	50	20	40	9.8883	2.2300	03:22.1
7	70	10	10	13.7187	1.9033	02:19.6
8	60	15	25	17.0721	1.6967	01:48.1
9	60	15	25	17.6203	1.8833	01:48.5
10	50	10	40	5.2211	3.4567	08:34.9
11	50	10	10	4.3740	3.6700	11:25.1
12	70	20	10	29.1404	1.3366	00:58.1
13	60	15	25	16.9155	1.8033	01:48.8
14	50	10	40	5.2241	3.3767	08:20.1
15	60	15	25	18.6677	1.7767	01:47.4
16	50	20	10	9.7334	2.3334	03:41.2
17	70	10	10	14.0191	1.8934	02:17.3
18	70	10	40	12.9771	2.2033	02:28.2
19	70	20	40	26.0022	1.3767	01:04.8
20	50	10	10	4.2508	4.0167	12:21.3

#### 6.4. Análisis y discusión de resultados del diseño de experimentos

Los resultados del diseño de experimentos fueron analizados a través del software estadístico Minitab. El supuesto de normalidad de los residuales obtenidos a través del modelo de la regresión múltiple fueron evaluados mediante una prueba de bondad y ajuste de Anderson Darling con un valor de probabilidad menor de 0.05, como resultado es posible afirmar con un nivel de confianza del 95% que no es posible ajustar una distribución normal a los residuales de la tasa de remoción de material ( $P=0.022$ ), mientras que si es posible ajustar una distribución normal a los residuales del diámetro de sobrecorte ( $P=0.057$ ). Debido a que los residuales de la tasa de remoción no cumplen con uno de los supuestos estadísticos, no es pertinente realizar conclusiones acertadas a partir del análisis de varianza, así como tampoco será apropiado el uso del modelo de regresión lineal múltiple para la representación del comportamiento de ambas salidas.

Además, se realizó una prueba de correlación de Pearson cuyos resultados se presentan en la tabla 6.8. Se obtuvo un valor de probabilidad menor a 0.5 y un coeficiente de correlación de Pearson negativo, lo cual muestra la existencia de una correlación negativa entre ambas respuestas. Debido a la existencia de correlación entre MRR y DOC, para su análisis estadístico se debe emplear técnicas avanzadas como un análisis de varianza multivariado (MANOVA).

Tabla 6.8: Análisis de Correlación entre MRR y DOC.

Coeficiente de correlación de Pearson	-0.881
Valor de probabilidad	0.000

Esta correlación negativa se explica debido a que los valores más altos para el diámetro de sobrecorte fueron obtenidos en las corridas de mayor tiempo de maquinado, por consiguiente, un tiempo de maquinado alto provocó una velocidad de remoción baja (inversamente proporcionales, ver ecuación 4.3). Las configuraciones que brindaron los valores más altos de MRR fueron las correspondientes a 70 V, 20 A y 10 kHz con 29.1404 y 28.3038 mm<sup>3</sup>/min en cada réplica. Se obtuvieron resultados similares con la configuración de 70 V, 20 A y 40 kHz, donde los valores de MRR fueron de 28.4994 y 26.0022 mm<sup>3</sup>/min en cada réplica.

Estas mismas corridas fueron las correspondientes a los menores valores de DOC, como muestra de la correlación negativa entre las variables de salida. El menor valor de diámetro de sobrecorte fue de 1.3233 mm con la configuración de 70 V, 20 A y 10 kHz, se tiene la apreciación que este valor de DOC es alto para barrenados del orden de 2 mm (diámetro obtenido con la herramienta de trabajo en EDM), ya que el diámetro de la perforación fue de 3.2534 mm. Para obtener valores más bajos de DOC se debe estudiar reducir la conductividad del electrolito, sin embargo, esto afectaría también los resultados obtenidos de MRR. Además, también afectaría la conicidad de la perforación, por lo cual este es un aspecto a profundizar en futuras investigaciones.

La repetitividad del proceso se analizó a través de los resultados obtenidos en cada réplica del DoE. En la tabla 6.9 se muestran los resultados de MRR organizados por réplica. Para la MRR el proceso brindó resultados similares en cada réplica, sin embargo en las combinaciones correspondientes a 70 V, 10 A, 40 kHz y 70 V, 20 A, 40 kHz se observaron las mayores variaciones de aproximadamente de 2.5 mm<sup>3</sup>/min, las cuales se deben a la variabilidad inherente del proceso de maquinado. Sin embargo, se tiene la apreciación de que esta cantidad no es suficiente como para considerar que el proceso no mostró estabilidad en cuanto a la repetitividad de la MRR.

Tabla 6.9: Comparación entre MRR en ambas réplicas.

<b><i>V<sub>g</sub></i></b> <b>(V)</b>	<b><i>I<sub>p</sub></i></b> <b>(A)</b>	<b><i>f</i></b> <b>(kHz)</b>	<b>MRR (mm<sup>3</sup>/min)</b>		<b>Diferencia</b> <b>(mm<sup>3</sup>/min)</b>
			<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>	
50	10	10	4.2508	4.3740	0.1232
70	10	10	13.7187	14.0191	0.3004
50	20	10	9.7289	9.7334	0.0045
70	20	10	28.3038	29.1404	0.8366
50	10	40	5.2241	5.2211	0.0030
70	10	40	10.4381	12.9771	2.5390
50	20	40	10.1680	9.8883	0.2797
70	20	40	28.4994	26.0022	2.4972

Para el caso del DOC, como se observa en la tabla 6.10, el proceso brindó resultados similares en cada réplica. Sin embargo, en la combinación correspondiente a 50 V, 10 A y 10kHz se registró la mayor diferencia, de aproximadamente 0.35 mm. Esta diferencia para perforaciones del orden de 2 mm es considerable. Sin embargo, las 7 restantes

corridas presentaron diferencias menores, por lo que de manera general se puede considerar que el proceso mostró estabilidad en cuanto a la repetitividad del DOC.

Tabla 6.10: Comparación entre DOC en ambas réplicas.

$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	DOC (mm)		Diferencia
			Réplica 1	Réplica 2	
50	10	10	4.0167	3.6700	0.3467
70	10	10	1.9033	1.8934	0.0099
50	20	10	2.3900	2.3334	0.0566
70	20	10	1.3233	1.3366	0.0133
50	10	40	3.3767	3.4567	0.0800
70	10	40	2.2833	2.2033	0.0800
50	20	40	2.3100	2.2300	0.0800
70	20	40	1.3500	1.3767	0.0267

En cuanto a la reproducibilidad del proceso, se analizaron los resultados para las corridas de los puntos centrales. Como se puede apreciar en la tabla 6.11, en la MRR el proceso brindó resultados similares para 3 corridas, con un comportamiento de alrededor de  $17 \text{ mm}^3/\text{min}$ , sin embargo se obtuvo una corrida con un comportamiento desplazado en aproximadamente  $1.7 \text{ mm}^3/\text{min}$ . Se tiene la apreciación de que esta cantidad no es suficiente como para considerar que el proceso es inestable en cuanto a la reproducibilidad de la MRR.

Tabla 6.11: Corridas de los puntos centrales.

$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	MRR( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	DOC (mm)
60	15	25	16.9155	1.8033
60	15	25	18.6677	1.7767
60	15	25	17.6203	1.8833
60	15	25	17.0721	1.6967

En el diámetro de sobrecorte se obtuvieron diferencias de 0.03, 0.08, 0.11 y la mayor de 0.19 mm (entre 1.8833 y 1.6966 mm), esta última diferencia, de prácticamente 0.2 mm, en perforaciones de 2 mm es considerable. Sin embargo, se tiene la apreciación de que por solo una diferencia considerable, no es suficiente como para observar inestabilidad en la reproducibilidad del DOC.



De manera general el proceso mostró estabilidad en la repetitividad y reproducibilidad, no obstante se observaron diferencias en algunas corridas para ambas respuestas, lo cual representa la variabilidad inherente del proceso ECDM. Esta variabilidad introduce incertidumbre, lo cual influye en la exactitud para generar un modelo del proceso y en la capacidad de predicción por parte del modelo. En este sentido, como se ha comentado anteriormente, en la lógica difusa se definen los conjuntos difusos a través de rangos de valores, siendo capaz de captar las variabilidades observadas anteriormente. Además, cuando los datos no cumplen con los supuestos estadísticos es necesario realizar transformaciones a los datos de salida para que cumplan con los supuestos, o emplear técnicas estadísticas no paramétricas. De igual manera, las salidas del proceso presentaron una correlación, por lo cual para su modelación estadística sería necesario emplear técnicas avanzadas multivariadas. Ante esto elementos, otras opciones para la modelación es utilizar técnicas de soft computing como lógica difusa. La lógica difusa permite modelar las incertidumbres presentes en los parámetros del proceso ECDM.

## **6.5. Modelación con Lógica Difusa**

Para el desarrollo del modelo empleando lógica difusa se procede a elaborar las etapas del sistema difuso presentadas en el epígrafe 4.2.9. Como primer paso, se debe conformar la base de conocimientos a partir de los resultados obtenidos en la experimentación y luego establecer los métodos para la fusificación, inferencia y defusificación. El modelo se programó en el software MATLAB®.

El universo de discurso de los parámetros de entrada fue representado con tres conjuntos difusos descritos por los términos lingüísticos: bajo, medio y alto, mientras que para los parámetros de salida se definieron cinco conjuntos difusos descritos por los términos lingüísticos: bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto. Estos conjuntos difusos fueron representados gráficamente a través de funciones de membresía que representaran cómo se comportaron los parámetros lo más cercano posible a la realidad. En este sentido, mayormente se emplearon funciones de membresía triangulares ya que brindan simplicidad en los cálculos (Ross, 2010), además con el empleo de otros tipos

de funciones se obtuvieron valores de exactitud menores a los mostrados en próximos epígrafes.

Como se mencionó anteriormente, el voltaje de gap ( $Vg$ ) fluctuó en aproximadamente  $\pm 10$  V alrededor de su valor. Partiendo de estos rangos se estableció el universo de discurso en:  $U(Vg) = [35; 85]$ . Los conjuntos difusos que denotan las variables lingüísticas se graficaron con funciones de membresía con un 50% de traslape entre ellas, con el fin de lograr simplicidad en el sistema difuso. El conjunto difuso “Bajo” se representó con una función de saturación abierta hacia la izquierda, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.25 las variables tomaron los valores:  $a=50$  y  $b=60$ , quedando la expresión 6.3:

$$\mu_A(x; 50,60) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq 50 \\ \left(\frac{60-x}{10}\right); & & 50 < x < 60 \\ 1; & & x \geq 60 \end{cases} \quad (6.3)$$

El conjunto difuso “Medio” se representó con una función triangular, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores:  $a=50$ ,  $b=60$  y  $c=70$ , quedando la expresión 6.4:

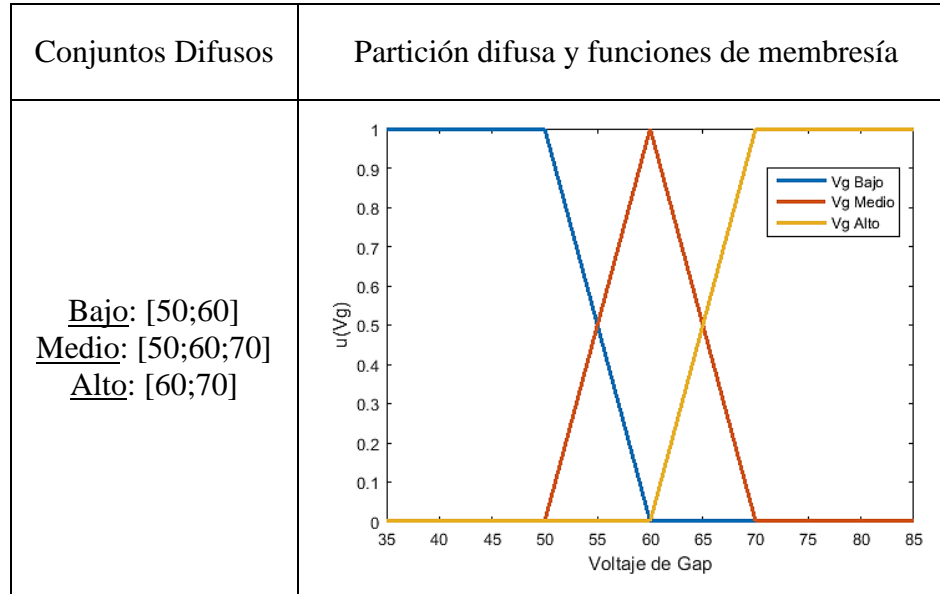
$$\mu_A(x; 50,60,70) = \begin{cases} 0; & & x < 50 \\ \left(\frac{x-50}{10}\right); & & 50 \leq x \leq 60 \\ \left(\frac{70-x}{10}\right); & & 60 \leq x \leq 70 \\ 0; & & x > 70 \end{cases} \quad (6.4)$$

El conjunto difuso “Alto” se representó con una función de saturación abierta hacia la derecha, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.26 las variables tomaron los valores:  $a=60$  y  $b=70$ , quedando la expresión 6.5:

$$\mu_A(x; 60,70) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq 60 \\ \left(\frac{x-60}{10}\right); & & 60 < x < 70 \\ 1; & & x \geq 70 \end{cases} \quad (6.5)$$

En la tabla 6.12 se muestra la representación gráfica de las funciones de membresía para los conjuntos difusos antes descritos.

Tabla 6.12: Variables lingüísticas, conjuntos difusos y funciones de membresía de la variable de entrada: voltaje de gap ( $V_g$ ).



Como se mencionó en la sección 6.2, la máquina River 3 permite el ajuste de la corriente pico ( $I_p$ ) desde 1 a 25 A, pero valores por debajo de 5 A generan muy poca energía para la remoción de material, por lo cual se estableció como universo de discurso para esta variable:  $U(I_p) = [5; 25]$ . Durante las corridas experimentales  $I_p$  presentó fluctuaciones del orden de  $\pm 5$  A alrededor del nivel fijado en el diseño de experimentos, los cuales fueron: 10, 15 y 20 A. Tomando como base las fluctuaciones observadas, se segmentó su universo de discurso en los conjuntos difusos y funciones de membresía que se comentan a continuación. El conjunto difuso “Bajo” se representó con una función de saturación abierta hacia la izquierda, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.25 las variables tomaron los valores:  $a=10$  y  $b=15$ , quedando la expresión 6.6:

$$\mu_A(x; 10,15) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq 10 \\ \left(\frac{15-x}{5}\right) & ; & 10 < x < 15 \\ 1 & ; & x \geq 15 \end{cases} \quad (6.6)$$

El conjunto difuso “Medio” se representó con una función triangular, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores: a=10, b=15 y c=20, quedando la expresión 6.7:

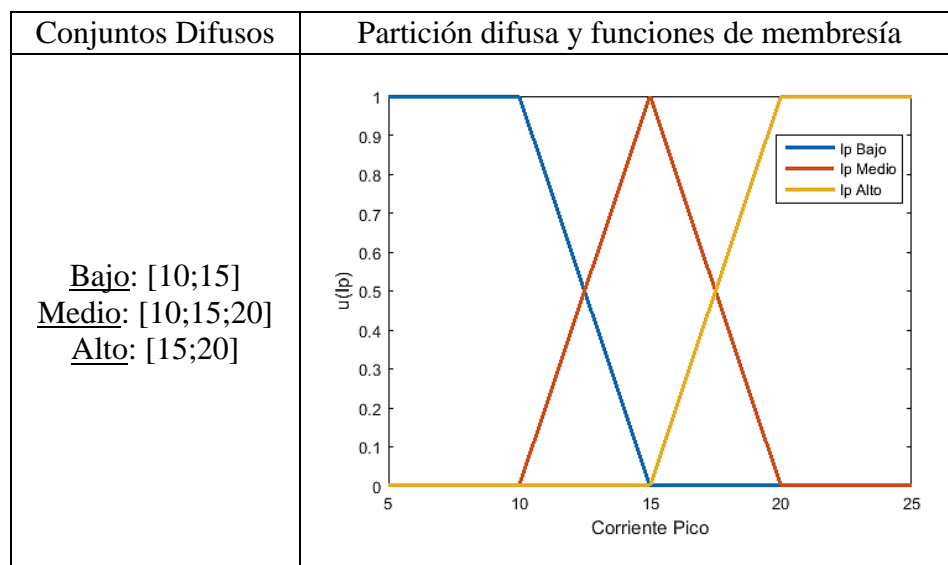
$$\mu_A(x; 10, 15, 20) = \begin{cases} 0; & x < 10 \\ \left(\frac{x-10}{5}\right); & 10 \leq x \leq 15 \\ \left(\frac{20-x}{5}\right); & 15 \leq x \leq 20 \\ 0; & x > 20 \end{cases} \quad (6.7)$$

El conjunto difuso “Alto” se representó con una función de saturación abierta hacia la derecha, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.26 las variables tomaron los valores: a=15 y b=20, quedando la expresión 6.8:

$$\mu_A(x; 15, 20) = \begin{cases} 0 & ; & x \leq 15 \\ \left(\frac{x-15}{5}\right); & 15 < x < 20 \\ 1; & x \geq 20 \end{cases} \quad (6.8)$$

En la tabla 6.13 se observa la representación gráfica de las funciones de membresía para los conjuntos difusos antes descritos.

Tabla 6.13: Términos lingüísticos, conjuntos difusos y funciones de membresía de la variable de entrada: corriente pico ( $I_p$ ).



En el caso de la frecuencia de la señal ( $f$ ), la máquina River 3 permite el ajuste de la frecuencia desde 5 a 100 kHz, por lo cual se estableció como universo de discurso para esta variable:  $U(f) = [0; 50]$ . Durante la experimentación se pudo observar que no presentó una gran fluctuación durante el maquinado, mostró una variabilidad de aproximadamente  $\pm 2$  kHz alrededor del valor fijado. Por lo anterior se representó esta variable de entrada mediante funciones de membresía trapezoidales. En el conjunto difuso “Bajo”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.21 las variables tomaron los valores:  $a=0$ ,  $b=8$ ,  $c=12$  y  $d=20$ , quedando la expresión 6.9:

$$\mu_A(x; 0, 8, 12, 20) = \begin{cases} 0; & x < 0 \\ \left(\frac{x}{8}\right); & 0 \leq x \leq 8 \\ 1; & 8 \leq x \leq 12 \\ \left(\frac{20-x}{8}\right); & 12 \leq x \leq 20 \\ 0; & x > 20 \end{cases} \quad (6.9)$$

En el conjunto difuso “Medio”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.21 las variables tomaron los valores:  $a=12$ ,  $b=23$ ,  $c=27$  y  $d=36$ , quedando la expresión 6.10:

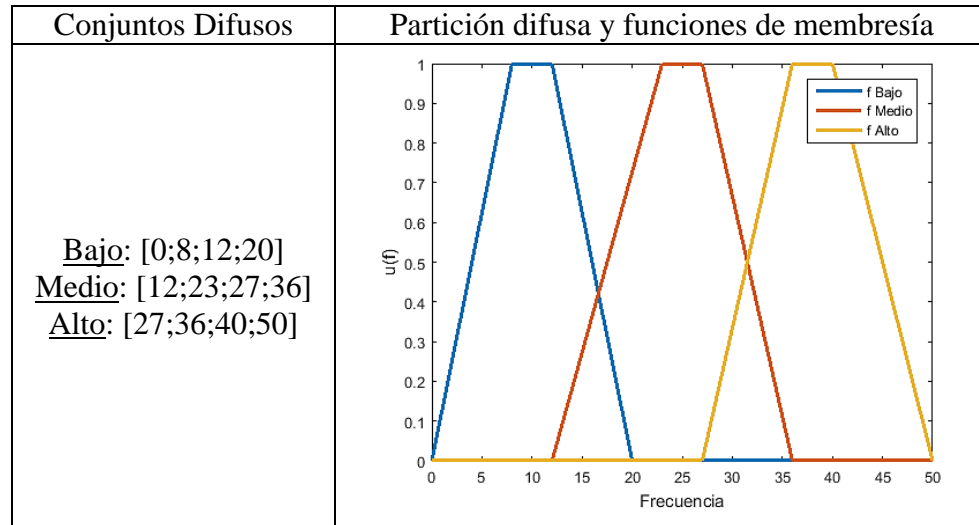
$$\mu_A(x; 12, 23, 27, 36) = \begin{cases} 0; & x < 12 \\ \left(\frac{x-12}{9}\right); & 12 \leq x \leq 23 \\ 1; & 23 \leq x \leq 27 \\ \left(\frac{36-x}{9}\right); & 27 \leq x \leq 36 \\ 0; & x > 36 \end{cases} \quad (6.10)$$

En el conjunto difuso “Alto”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.21 las variables tomaron los valores:  $a=27$ ,  $b=36$ ,  $c=40$  y  $d=50$ , quedando la expresión 6.11:

$$\mu_A(x; 27, 36, 40, 50) = \begin{cases} 0; & x < 27 \\ \left(\frac{x-27}{9}\right); & 27 \leq x \leq 36 \\ 1; & 36 \leq x \leq 40 \\ \left(\frac{50-x}{10}\right); & 40 \leq x \leq 50 \\ 0; & x > 50 \end{cases} \quad (6.11)$$

En la siguiente tabla se especifican las variables lingüísticas, conjuntos difusos y funciones de membresía para la frecuencia de la señal ( $f$ ).

Tabla 6.14: Términos lingüísticos, conjuntos difusos y funciones de membresía de la variable de entrada: frecuencia de la señal ( $f$ ).



Para las variables de salida, en ambas se emplearon funciones de membresía triangulares por simplicidad en los cálculos. El universo de discurso para la tasa de remoción de material (MRR) se estableció en:  $U(MRR) = [0; 35]$ . Se establecieron 5 conjuntos difusos: Bajo, medio-bajo, Medio, medio-alto y alto, los cuales se representaron con funciones de membresía triangulares. En el conjunto difuso “Bajo”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores:  $a=0$ ,  $b=5.5$  y  $c=10.5$ , quedando la expresión 6.12:

$$\mu_A(x; 0, 5.5, 10.5) = \begin{cases} 0; & x < 0 \\ \left(\frac{x}{5}\right); & 0 \leq x \leq 5.5 \\ \left(\frac{10.5-x}{5}\right); & 5.5 \leq x \leq 10.5 \\ 0; & x > 10.5 \end{cases} \quad (6.12)$$

En el conjunto difuso “medio-bajo”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores:  $a=5.5$ ,  $b=10.5$  y  $c=16.3$ , quedando la expresión 6.14:

$$\mu_A(x; 5.5, 10.5, 16.3) = \begin{cases} 0; & x < 5.5 \\ \left(\frac{x-5.5}{5}\right); & 5.5 \leq x \leq 10.5 \\ \left(\frac{16.3-x}{5.8}\right); & 10.5 \leq x \leq 16.3 \\ 0; & x > 16.3 \end{cases} \quad (6.14)$$

En el conjunto difuso “Medio”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores: a=10.5, b=16.3 y c=21.1, quedando la expresión 6.15:

$$\mu_A(x; 10.5, 16.3, 21.1) = \begin{cases} 0; & x < 10.5 \\ \left(\frac{x-10.5}{5.8}\right); & 10.5 \leq x \leq 16.3 \\ \left(\frac{21.1-x}{4.8}\right); & 16.3 \leq x \leq 21.1 \\ 0; & x > 21.1 \end{cases} \quad (6.15)$$

En el conjunto difuso “medio-alto”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores: a=16.3, b=21.1 y c=28.5 quedando la expresión 6.16:

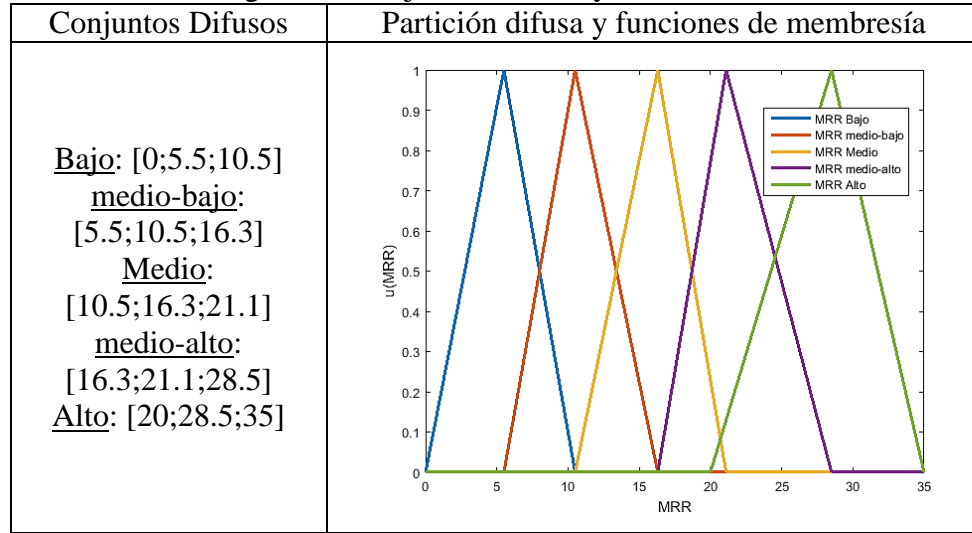
$$\mu_A(x; 16.3, 21.1, 28.5) = \begin{cases} 0; & x < 16.3 \\ \left(\frac{x-16.3}{4.8}\right); & 16.3 \leq x \leq 21.1 \\ \left(\frac{28.5-x}{7.4}\right); & 21.1 \leq x \leq 28.5 \\ 0; & x > 28.5 \end{cases} \quad (6.16)$$

En el conjunto difuso “Alto”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores: a=21.1, b=28.5 y c=35 quedando la expresión 6.17:

$$\mu_A(x; 21.1, 28.5, 35) = \begin{cases} 0; & x < 21.1 \\ \left(\frac{x-21.1}{7.4}\right); & 21.1 \leq x \leq 28.5 \\ \left(\frac{35-x}{6.5}\right); & 28.5 \leq x \leq 35 \\ 0; & x > 35 \end{cases} \quad (6.17)$$

En la tabla 6.15 se especifican las variables lingüísticas, conjuntos difusos y funciones de membresía para la tasa de remoción de material.

Tabla 6.15: Variable lingüística, conjuntos difusos y funciones de membresía de MRR.



El universo de discurso para el diámetro del sobrecorte (DOC) se estableció en:  $U(\text{DOC}) = [0; 4.5]$ . Se establecieron 5 conjuntos difusos: Bajo, medio-bajo, Medio, medio-alto y alto, los cuales se representaron con funciones de membresía triangulares. En el conjunto difuso “Bajo”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores:  $a=0$ ,  $b=1.3$  y  $c=1.8$ , quedando la expresión 6.18:

$$\mu_A(x; 0, 1.3, 1.8) = \begin{cases} 0; & x < 0 \\ \left(\frac{x}{0.5}\right); & 0 \leq x \leq 1.3 \\ \left(\frac{1.8-x}{0.5}\right); & 1.3 \leq x \leq 1.8 \\ 0; & x > 1.8 \end{cases} \quad (6.18)$$

En el conjunto difuso “medio-bajo”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores:  $a=1.3$ ,  $b=1.8$  y  $c=2.3$ , quedando la expresión 6.19:

$$\mu_A(x; 1.3, 1.8, 2.3) = \begin{cases} 0; & x < 1.3 \\ \left(\frac{x-1.3}{0.5}\right); & 1.3 \leq x \leq 1.8 \\ \left(\frac{2.3-x}{0.5}\right); & 1.8 \leq x \leq 2.3 \\ 0; & x > 2.3 \end{cases} \quad (6.19)$$

En el conjunto difuso “Medio”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores:  $a=1.8$ ,  $b=2.3$  y  $c=2.6$ , quedando la expresión 6.20:



$$\mu_A(x; 1.8, 2.3, 2.6) = \begin{cases} 0; & x < 1.8 \\ \left(\frac{x-1.8}{0.5}\right); & 1.8 \leq x \leq 2.3 \\ \left(\frac{2.6-x}{0.3}\right); & 2.3 \leq x \leq 2.6 \\ 0; & x > 2.6 \end{cases} \quad (6.20)$$

En el conjunto difuso “medio-alto”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores: a=2.3, b=2.6 y c=3.6 quedando la expresión 6.21:

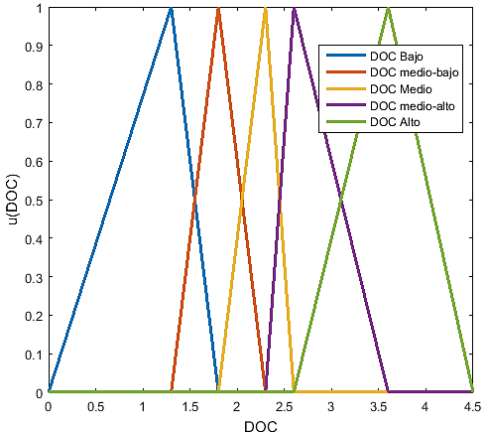
$$\mu_A(x; 2.3, 2.6, 3.6) = \begin{cases} 0; & x < 2.3 \\ \left(\frac{x-2.3}{0.5}\right); & 2.3 \leq x \leq 2.6 \\ \left(\frac{3.6-x}{1}\right); & 2.6 \leq x \leq 3.6 \\ 0; & x > 3.6 \end{cases} \quad (6.21)$$

En el conjunto difuso “Alto”, para el cálculo de membresía en la ecuación 4.22 las variables tomaron los valores: a=2.6, b=3.6 y c=4.5 quedando la expresión 6.22:

$$\mu_A(x; 2.6, 3.6, 4.5) = \begin{cases} 0; & x < 2.6 \\ \left(\frac{x-2.6}{1}\right); & 2.6 \leq x \leq 3.6 \\ \left(\frac{3.6-x}{0.9}\right); & 3.6 \leq x \leq 4.5 \\ 0; & x > 4.5 \end{cases} \quad (6.22)$$

En la tabla 6.16 se especifican, las variables lingüísticas, conjuntos difusos y funciones de membresía para DOC.

Tabla 6.16: Términos lingüísticos, conjuntos difusos y funciones de membresía de DOC.

Conjuntos Difusos	Partición difusa y funciones de membresía
<p><u>Bajo</u>: [0;1.3;1.8]  <u>medio-bajo</u>: [1.3;1.8;2.3]  <u>Medio</u>: [1.8;2.3;2.6]  <u>medio-alto</u>: [2.3;2.6;3.6]  <u>Alto</u>: [2.6;3.6;4.5]</p>	

Para las reglas difusas se empleó el método de razonamiento Modus Ponens, debido a que permite obtener el consecuente a partir de los antecedentes expresando conocimiento previo del sistema (Ross, 2010). Las reglas difusas constan de tres antecedentes que son el voltaje de gap ( $V_g$ ), corriente pico ( $I_p$ ) y frecuencia ( $f$ ); y dos consecuentes que corresponden a las variables de salida la Tasa de Remoción de Material (MRR) y el Diámetro del Sobrecorte (DOC). Se empleó el operador difuso “Y” (AND) como conector para los antecedentes y los consecuentes, debido a que se deben dar las condiciones de los antecedentes al mismo tiempo, para que produzcan los conjuntos difusos de los consecuentes. Se elaboraron 27 reglas difusas para representar las combinaciones de cada conjunto difuso de las variables de entrada. Se estableció la implicación de tipo Mamdani y la agregación de los consecuentes mediante la operación de unión (max). En el Anexo 1 se presentan las reglas difusas.

Una vez definida la base de conocimientos se procedió con los métodos de fusificación, inferencia y defusificación. Para la selección se consideró fundamentalmente los aspectos relativos a la eficiencia computacional y a la facilidad de adaptación. Se empleó la fusificación tipo Singleton y la inferencia difusa por el método de Mamdani pues como se comentó en capítulos anteriores, ésta permite expresar el conocimiento previo disponible sobre el sistema, expresando así el conocimiento adquirido. En la etapa de defusificación se estableció una comparación entre 3 de los métodos más utilizados en la literatura: el método del centro de área, el método de bisectriz y el método media de máximos. En el siguiente epígrafe se presentan los resultados obtenidos con estos métodos, y se selecciona el método a emplearse en el modelo propuesto en esta investigación en base al error porcentual absoluto medio.

## **6.6. Análisis y Discusión de resultados del modelo difuso**

Como se mostró en el capítulo 3 correspondiente al estado del arte, para obtener una cuantificación de la exactitud lograda por un modelo difuso respecto a los datos experimentales varios autores como: Rao et al. (2009), Kohli et al. (2012), Unune et al. (2016) y Bhuyan et al. (2017) han empleado el error porcentual absoluto medio

(MAPE), el cual permite expresar la exactitud como un porcentaje del error. En la ecuación 6.3 se plantea la expresión matemática para determinar dicho parámetro, donde  $V_m$  es el valor medido en la experimentación,  $V_p$  es el valor predecido por el modelo y  $n$  es el número de corridas:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_m - V_p}{V_m} \right| * 100 \quad [\%] \quad (6.3)$$

De acuerdo a la literatura, al utilizar técnicas de soft computing se considera que las predicciones realizadas a partir de un modelo son adecuadas si presentan una exactitud de aproximadamente 90% o más, lo cual corresponde con un MAPE menor del 10%. Considerando esta métrica, se realizó la comparación entre los métodos de defusificación centro de área, bisectriz y media de máximos. Los resultados obtenidos con el método de centro de área se muestran en la tabla 6.17 y 6.18 para la MRR y DOC respectivamente. Como se puede observar para la MRR se obtuvo una exactitud de 90.65%, la cual corresponde a un MAPE de 9.35%. Para el DOC la exactitud obtenida fue de 92.20% que corresponde a un MAPE de 7.80%.

Tabla 6.17: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para la Tasa de Remoción de Materia (MRR) con el método de centro de área.

Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)	$V_p$	% de error
1	70	10	40	10.4381	5.33	25.39
2	50	20	40	10.1680	15.9667	16.39
3	70	20	40	28.4994	10.7667	10.67
4	70	20	10	28.3038	28.2	0.37
5	50	20	10	9.7289	5.3333	2.09
6	50	20	40	9.8883	10.7667	3.15
7	70	10	10	13.7187	10.7667	5.89
8	60	15	25	17.0721	28.2	1.05
9	60	15	25	17.6203	5.33	21.86
10	50	10	40	5.2211	15.9667	13.89
11	50	10	10	4.3740	10.7667	10.62
12	70	20	10	29.1404	28.2	3.23
13	60	15	25	16.9155	5.3333	2.15
14	50	10	40	5.2241	10.7667	17.03
15	60	15	25	18.6677	10.7667	8.88
16	50	20	10	9.7334	28.2	8.45

17	70	10	10	14.0191	15.9667	5.61
18	70	10	40	12.9771	15.9667	14.47
19	70	20	40	26.0022	15.9667	9.38
20	50	10	10	4.2508	15.9667	6.48
					<b>MAPE</b>	<b>9.35 %</b>
					<b>Exactitud</b>	<b>90.65 %</b>

Tabla 6.18: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para el Diámetro de Sobrecorte (DOC) con el método de centro de área.

Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	DOC (mm)	$V_p$	% de error
1	70	10	40	2.2833	3.5667	11.20
2	50	20	40	2.31	1.8	5.43
3	70	20	40	1.35	2.2333	6.56
4	70	20	10	1.3233	1.0333	21.92
5	50	20	10	2.3900	3.5667	5.63
6	50	20	40	2.2300	2.2333	2.19
7	70	10	10	1.9033	2.2333	3.32
8	60	15	25	1.6966	1.0333	23.46
9	60	15	25	1.8833	3.5667	2.82
10	50	10	40	3.4566	1.8	4.93
11	50	10	10	3.6700	2.2333	4.29
12	70	20	10	1.3366	1.0333	22.69
13	60	15	25	1.8033	3.5667	3.18
14	50	10	40	3.3766	2.2333	1.36
15	60	15	25	1.7766	2.2333	0.15
16	50	20	10	2.3334	1.0333	24.94
17	70	10	10	1.8934	1.8	0.19
18	70	10	40	2.2033	1.8	1.31
19	70	20	40	1.3766	1.8	4.43
20	50	10	10	4.0166	1.8	6.09
					<b>MAPE</b>	<b>7.80%</b>
					<b>Exactitud</b>	<b>92.20%</b>

Los resultados obtenidos con el método de bisectriz se muestran en la tabla 6.19 y 6.20 para la MRR y DOC respectivamente. Como se puede observar para la MRR se obtuvo una exactitud de 90.55% la cual corresponde a un MAPE de 9.45%. Para el DOC la exactitud obtenida fue de 92.89% que corresponde a un MAPE de 7.11%.

Tabla 6.19: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para la Tasa de Remoción de Materia (MRR) con el método de bisección.

Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	MRR ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	$V_p$	% de error
1	70	10	40	10.4381	5.4	27.04
2	50	20	40	10.1680	16	16.63
3	70	20	40	28.4994	10.7	9.98
4	70	20	10	28.3038	28.3	0.01
5	50	20	10	9.7289	5.4	3.37
6	50	20	40	9.8883	10.7	2.51
7	70	10	10	13.7187	10.7	5.23
8	60	15	25	17.0721	28.3	0.699
9	60	15	25	17.6203	5.4	23.46
10	50	10	40	5.2211	16	14.13
11	50	10	10	4.3740	10.7	9.93
12	70	20	10	29.1404	28.3	2.88
13	60	15	25	16.9155	5.4	3.43
14	50	10	40	5.2241	10.7	17.55
15	60	15	25	18.6677	10.7	8.21
16	50	20	10	9.7334	28.3	8.84
17	70	10	10	14.0191	16	5.41
18	70	10	40	12.9771	16	14.29
19	70	20	40	26.0022	16	9.20
20	50	10	10	4.2508	16	6.28
<b>MAPE</b>						<b>9.45%</b>
<b>Exactitud</b>						<b>90.55%</b>

Tabla 6.20: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para el Diámetro de Sobrecorte (DOC) con el método de bisección.

Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	DOC (mm)	$V_p$	% de error
1	70	10	40	2.2833	3.6	10.37
2	50	20	40	2.31	1.8	5.43
3	70	20	40	1.35	2.2	7.95
4	70	20	10	1.3233	1.1	16.88
5	50	20	10	2.3900	3.6	6.61
6	50	20	40	2.2300	2.2	3.65
7	70	10	10	1.9033	2.2	4.76
8	60	15	25	1.6966	1.1	18.52

9	60	15	25	1.8833	3.6	1.91
10	50	10	40	3.4566	1.8	4.93
11	50	10	10	3.6700	2.2	5.72
12	70	20	10	1.3366	1.1	17.70
13	60	15	25	1.8033	3.6	4.15
14	50	10	40	3.3766	2.2	0.15
15	60	15	25	1.7766	2.2	1.35
16	50	20	10	2.3334	1.1	20.09
17	70	10	10	1.8934	1.8	0.19
18	70	10	40	2.2033	1.8	1.31
19	70	20	40	1.3766	1.8	4.43
20	50	10	10	4.0166	1.8	6.09
					<b>MAPE</b>	<b>7.11%</b>
					<b>Exactitud</b>	<b>92.89%</b>

Para el caso del método de media de máximos, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.21 y 6.22 para la MRR y DOC respectivamente. Como se puede observar para la MRR se obtuvo una exactitud de 90.67% la cual corresponde a un MAPE de 9.33%, y en la tabla 6.18 se muestra la exactitud obtenida para el DOC, la cual fue de 96.35% que corresponde a un MAPE de 3.65 %.

Tabla 6.21: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para la Tasa de Remoción de Materia (MRR) con el método de media de máximos.

Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	MRR ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	$V_p$	% de error
1	70	10	40	10.4381	10.5	0.59
2	50	20	40	10.1680	10.5	3.27
3	70	20	40	28.4994	28.5	0.00196
4	70	20	10	28.3038	28.5	0.69
5	50	20	10	9.7289	10.5	7.93
6	50	20	40	9.8883	10.5	6.19
7	70	10	10	13.7187	16.3	18.82
8	60	15	25	17.0721	16.3	4.52
9	60	15	25	17.6203	16.3	7.49
10	50	10	40	5.2211	5.5	5.34
11	50	10	10	4.3740	5.5	25.74
12	70	20	10	29.1404	28.5	2.20
13	60	15	25	16.9155	16.3	3.64
14	50	10	40	5.2241	5.5	5.28

15	60	15	25	18.6677	16.3	12.68
16	50	20	10	9.7334	10.5	7.88
17	70	10	10	14.0191	16.3	16.27
18	70	10	40	12.9771	10.5	19.09
19	70	20	40	26.0022	28.5	9.61
20	50	10	10	4.2508	5.5	29.39
					<b>MAPE</b>	<b>9.33%</b>
					<b>Exactitud</b>	<b>90.67%</b>

Tabla 6.22: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y exactitud para el Diámetro de Sobrecorte (DOC) con el método de media de máximos.

Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	DOC (mm)	$V_p$	% de error
1	70	10	40	2.2833	2.3	0.73
2	50	20	40	2.31	2.3	0.43
3	70	20	40	1.35	1.3	3.70
4	70	20	10	1.3233	1.3	1.76
5	50	20	10	2.3900	2.3	3.77
6	50	20	40	2.2300	2.3	3.14
7	70	10	10	1.9033	1.8	5.43
8	60	15	25	1.6966	1.8	6.09
9	60	15	25	1.8833	1.8	4.43
10	50	10	40	3.4566	3.6	4.15
11	50	10	10	3.6700	3.6	1.91
12	70	20	10	1.3366	1.3	2.74
13	60	15	25	1.8033	1.8	0.19
14	50	10	40	3.3766	3.6	6.61
15	60	15	25	1.7766	1.8	1.31
16	50	20	10	2.3334	2.3	1.43
17	70	10	10	1.8934	1.8	4.93
18	70	10	40	2.2033	2.3	4.39
19	70	20	40	1.3766	1.3	5.57
20	50	10	10	4.0166	3.6	10.37
					<b>MAPE</b>	<b>3.65%</b>
					<b>Exactitud</b>	<b>96.35%</b>

En la tabla 6.23 se presenta un resumen de los valores de MAPE y exactitud de cada método. Para la tasa de remoción de material se obtuvo valores de exactitud similares, donde el mayor valor, por una mínima diferencia (0.02%), correspondió al método de

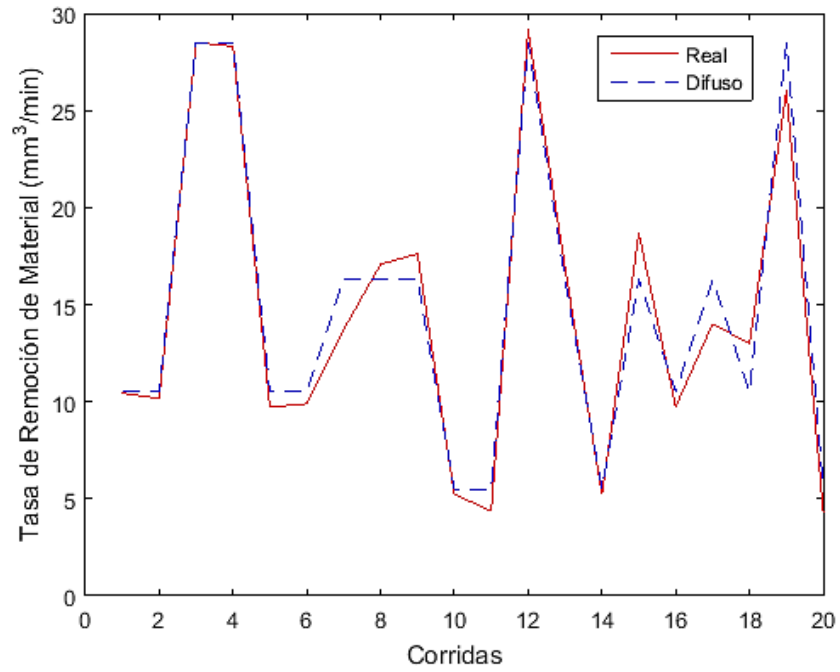
media de máximos. En el caso del diámetro de sobrecorte, la exactitud obtenida con el método de media de máximos fue mayor a los otros dos métodos. Con estos resultados el método que brindó los resultados deseables para ambas salidas del sistema difuso fue el método media de máximos, por lo cual se estableció este método para la etapa de defusificación del modelo difuso.

Tabla 6.23: Comparación de resultados de MAPE y exactitud para los métodos de defusificación.

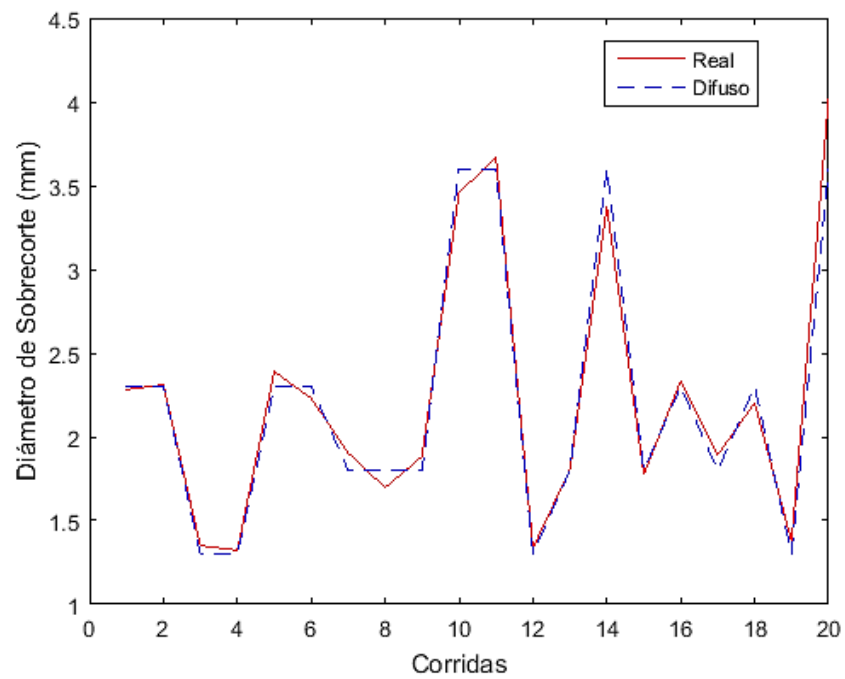
<b>Método</b>	<b>MAPE (%)</b>	<b>Exactitud (%)</b>
Centro de Área		
MRR	9.35	90.65
DOC	7.80	92.20
Bisectriz		
MRR	9.45	90.55
DOC	7.11	92.89
Media de Máximos		
MRR	9.33	90.67
DOC	3.65	96.35

Para establecer una comparación entre los resultados del diseño de experimentos y los obtenidos con el modelo difuso a través del método de defusificación de media de máximos, en la figura 6.10 se muestran las gráficas comparativas para las dos salidas del modelo. En la figura 6.10(a) correspondiente a la tasa de remoción de material, se observan las diferencias más notables entre las gráficas en las corridas 7, 11, 17, 18 y 20, las cuales son las correspondientes a los valores más altos de MAPE (tabla 6.21). En el caso del DOC se observa la diferencia más notable entre ambas gráficas en la corrida 20, la cual es la correspondiente al valor más alto de porcentaje de error absoluto (tabla 6.22).





(a)



(b)

Figura 6.10: Comparación entre los resultados experimentales y los valores obtenidos con el modelo difuso (elaboración propia). (a) Tasa de Remoción de Material. (b) Diámetro del Sobrecorte.

Como se comentó en el epígrafe 6.4, las salidas del modelo presentan una correlación negativa. Por lo cual, para analizar la relación de las variables de entrada del sistema respecto a las de salida se realizaron conclusiones a partir de las superficies obtenidas con el modelo difuso para cada salida, ya que la lógica difusa permite la posibilidad de trabajar tanto con datos correlacionados como no correlacionados.

En la figura 4.11 se muestran las superficies para MRR obtenidas con el modelo difuso, en consecuencia con la variación de los parámetros de entrada. En la figura 4.11 (a) se muestra la influencia de  $V_g$  e  $I_p$  sobre la MRR, como se puede observar con el incremento del voltaje de gap y de la corriente pico se obtuvo un incremento en la tasa de remoción de material. El aumento del voltaje incidió en un incremento de la tasa de remoción de material, corroborando lo obtenido por Ranganayakulu et al. (2011), Krötz et al. (2013) y Paul et al. (2016), el aumento del voltaje condujo a la generación de mayor cantidad de burbujas de gas de hidrógeno resultando en un mayor espesor de la capa de gas, por consecuente provocó también el aumento en la diferencia de potencial. Lo anterior condujo a una mayor cantidad de energía de las descargas y por tanto mayor tasa de remoción de material.

El aumento de la corriente también provocó un incremento en la tasa de remoción de material, efecto obtenido por Hocheng (2011). El aumento de la corriente propició mayor energía de las descargas eléctricas y por tanto el material se removió a mayor velocidad. En las figuras 6.11 (b) y (c), se puede apreciar el efecto de los valores de frecuencia junto a  $V_g$  e  $I_p$  sobre la MRR. En ambas figuras se observa que los valores de frecuencia no tuvieron un impacto considerable respecto a la variable MRR. En el caso del comportamiento con  $V_g$  (figura 6.11 (b)) se observa una inflexión en la intercesión del nivel bajo de frecuencia y el nivel alto de  $V_g$ , esto corresponde a las corridas con el nivel bajo de  $I_p$ . Mientras que en la interacción de  $f$  con  $I_p$  (figura 6.11 (c)), la frecuencia no mostró un efecto significativo sobre la MRR. Estos resultados conducen a la apreciación de que se debe profundizar en el estudio de los valores de frecuencia en experimentaciones posteriores.

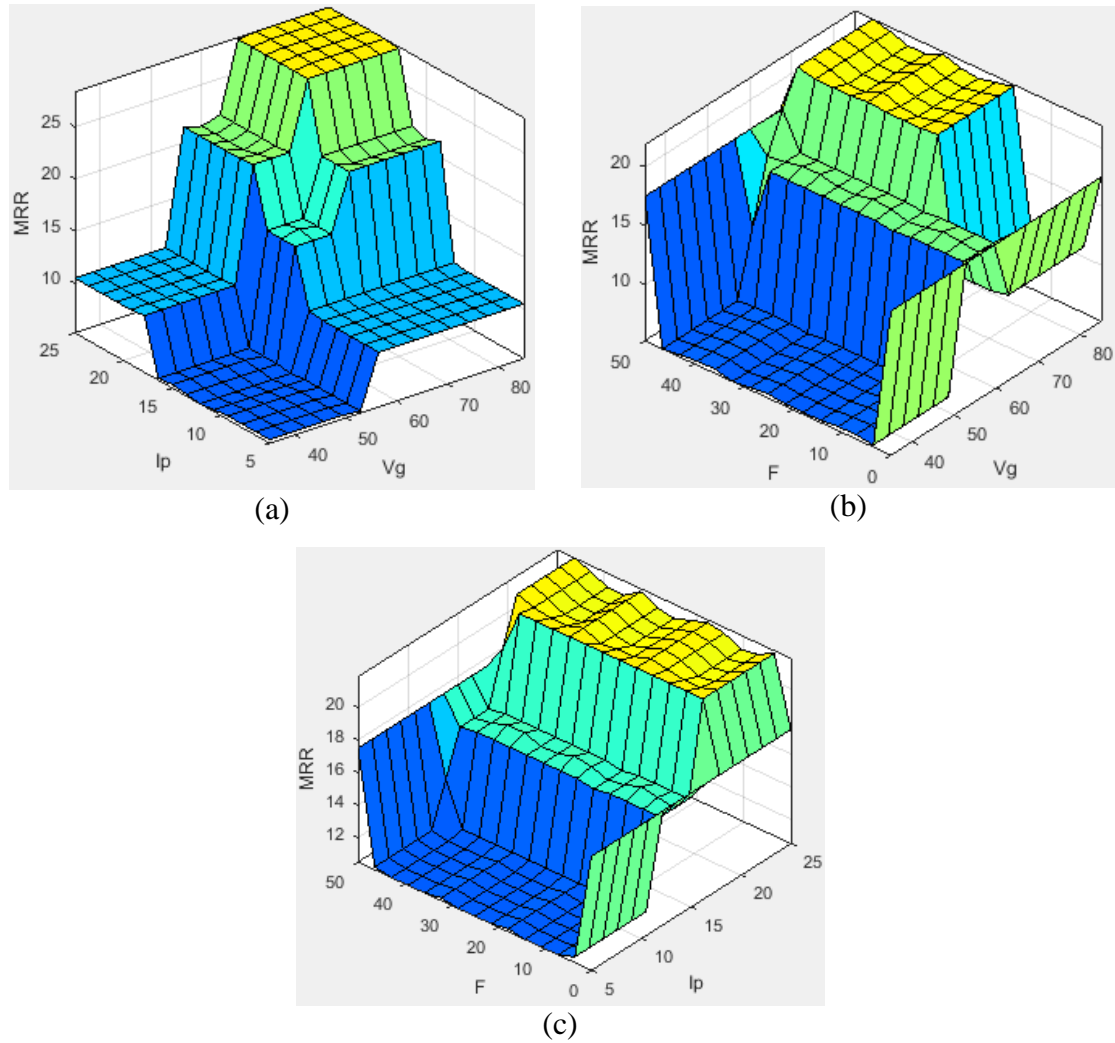


Figura 6.11: Superficies difusas para la Tasa de Remoción de Material en relación con el cambio de los parámetros de entrada (elaboración propia). (a) Respecto a  $V_g$  e  $I_p$ . (b) Respecto a  $V_g$  y  $f$ . (c) Respecto a  $I_p$  y  $f$ .

En la figura 6.12 se muestran las superficies para DOC obtenidas con el modelo difuso, en consecuencia con la variación de los parámetros de entrada. En la figura 6.12 (a) se muestra la influencia de  $V_g$  e  $I_p$  sobre el diámetro de sobrecorte, en la cual se observa que con el incremento tanto del voltaje de gap como de la corriente pico se obtuvo un decremento en el diámetro de sobrecorte, aspecto que muestra la correlación negativa entre la MRR y el DOC. Respecto a los resultados obtenidos con los valores mínimos de  $V_g$  e  $I_p$ , la energía para desprender el material disminuyó lo cual aumentó el tiempo de maquinado, esto condujo a que la remoción electrolítica que ocurre en las paredes laterales de la herramienta de trabajo actuó durante mayor tiempo y por

consecuencia se obtuvo un mayor sobrecorte. La frecuencia mostró un compartimiento similar al observado para la MRR.

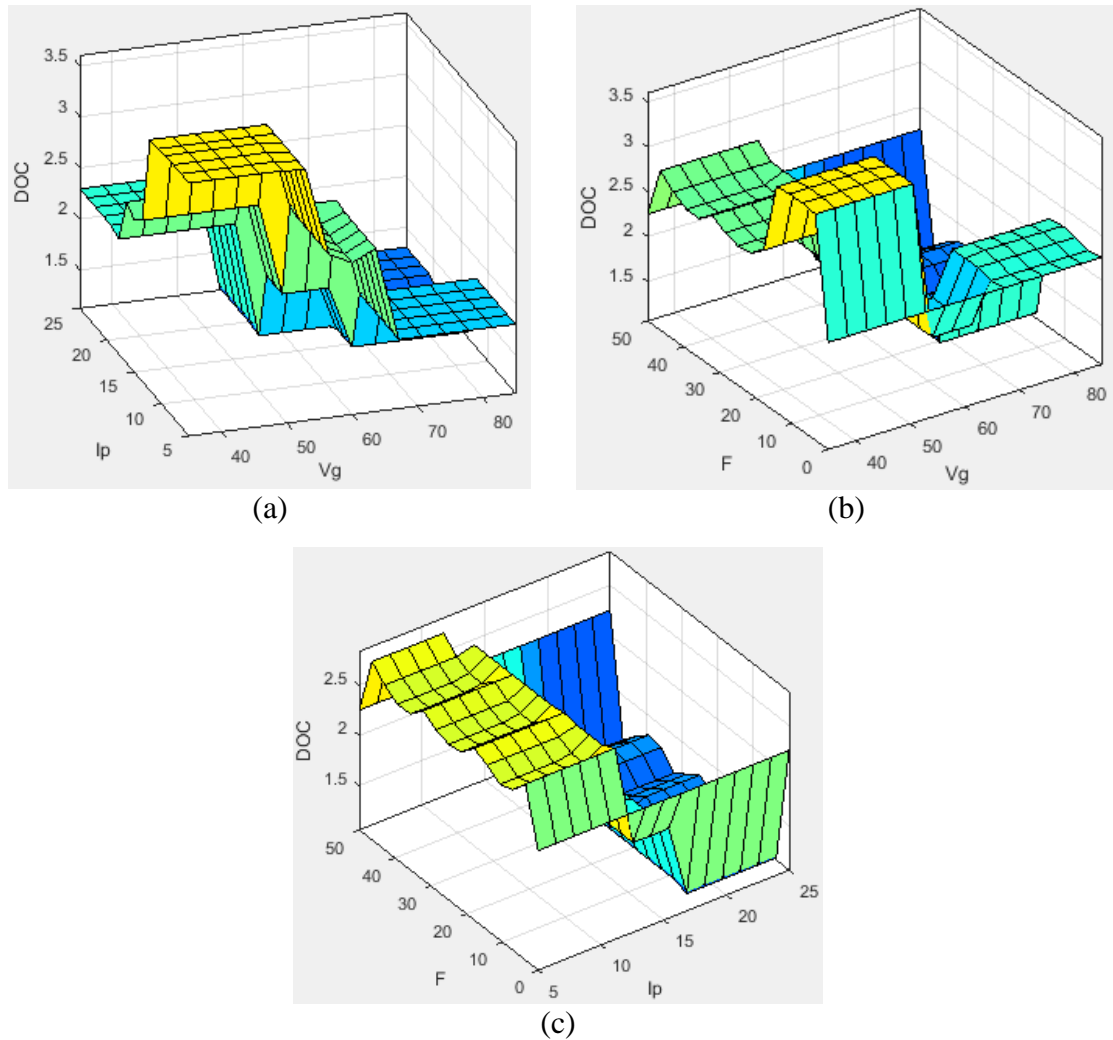


Figura 6.12: Superficies difusas para el Diámetro de Sobrecorte en relación con el cambio de los parámetros de entrada (elaboración propia). (a) Respecto a  $V_g$  e  $I_p$ . (b) Respecto a  $V_g$  y  $f$ . (c) Respecto a  $I_p$  y  $f$ .

### 6.7. Validación del modelo difuso

Para la validación del modelo se desarrollaron 14 corridas experimentales con combinaciones y valores de las variables de entrada que no se tuvieron en cuenta en el diseño de experimentos, con la finalidad de evaluar la predicción del modelo considerando diferentes condiciones de trabajo en el proceso ECDM. Para esto se

utilizaron las mismas condiciones en las que se desarrolló la experimentación anterior. Se emplearon piezas de trabajo del mismo material y dimensiones, además, los parámetros constantes se mantuvieron en las mismas configuraciones. Los parámetros de salida se calcularon de la misma forma explicada en los epígrafes 6.3.1.1 y 6.3.1.2. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.24: Corridas experimentales para la validación del modelo.

<b>Corrida</b>	<b>V<sub>g</sub> (V)</b>	<b>I<sub>p</sub> (A)</b>	<b>f (kHz)</b>	<b>MRR(mm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>DOC (mm)</b>
1	50	15	25	7.0915	3.0300
2	70	25	40	30.4399	1.2966
3	60	20	10	19.2061	1.5900
4	50	25	15	11.4841	2.2908
5	70	13	10	9.3858	2.2500
6	50	17	17	7.2949	3.2900
7	50	22	30	10.4108	2.3100
8	60	10	25	9.6031	2.4966
9	70	15	5	11.7111	2.1500
10	50	15	40	7.4829	2.6832
11	50	20	25	10.1085	2.3632
12	60	25	10	22.0871	1.4300
13	70	15	25	21.9499	1.5100
14	70	10	25	11.0356	2.0966

Una vez obtenidos los parámetros de salida, se procedió a evaluar la exactitud de la predicción de estos valores a través del modelo difuso mediante el error porcentual absoluto medio (MAPE). Los resultados para la tasa de remoción de material se muestran en la tabla 6.20. El modelo fue capaz de predecir con un 89.26% de exactitud las corridas de validación, dicho valor a pesar de tener una diferencia mínima con el 90%, se considera un valor de exactitud adecuado teniendo en cuenta la complejidad del proceso.

Tabla 6.25: MAPE y exactitud de la MRR en las corridas de validación.

<b>Corrida</b>	<b>V<sub>g</sub> (V)</b>	<b>I<sub>p</sub> (A)</b>	<b>f (kHz)</b>	<b>MRR (mm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>V<sub>p</sub></b>	<b>% de error</b>
1	50	15	25	7.0915	5.5	22.44
2	70	25	40	30.4399	28.5	6.37
3	60	20	10	19.2061	21.1	9.86
4	50	25	15	11.4841	10.65	7.26

5	70	13	10	9.3858	10.65	13.47
6	50	17	17	7.2949	5.35	26.66
7	50	22	30	10.4108	10.65	2.30
8	60	10	25	9.6031	10.5	9.34
9	70	15	5	11.7111	10.65	9.06
10	50	15	40	7.4829	5.5	26.50
11	50	20	25	10.1085	10.5	3.87
12	60	25	10	22.0871	21.1	4.47
13	70	15	25	21.9499	21.1	3.87
14	70	10	25	11.0356	10.5	4.85
					<b>MAPE</b>	<b>10.74 %</b>
					<b>% de Exactitud</b>	<b>89.26 %</b>

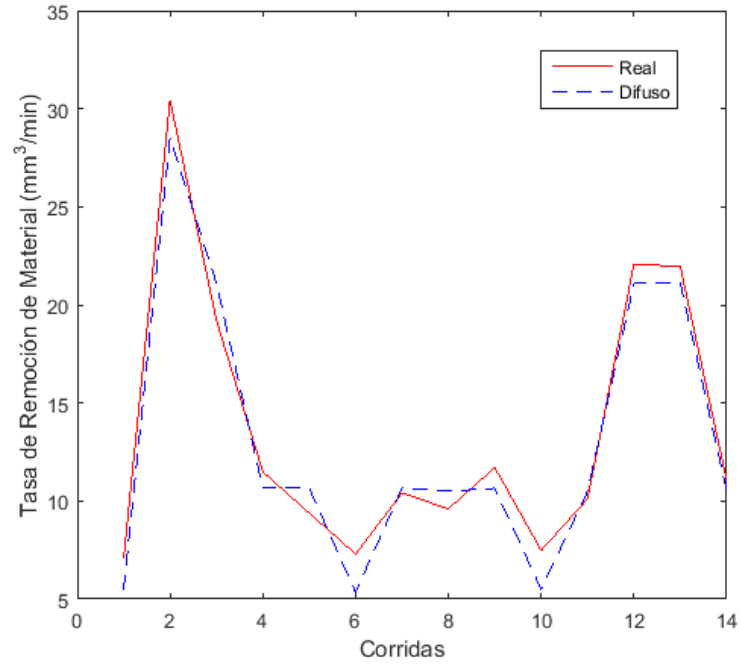
Los resultados para el diámetro de sobrecorte se muestran en la tabla 6.21. El modelo fue capaz de predecir con un 92.68% de exactitud las corridas de validación, lo cual corresponde a un MAPE de 7.32%. Con lo cual se obtuvieron resultados satisfactorios.

Tabla 6.26: MAPE y exactitud de la DOC en las corridas de validación.

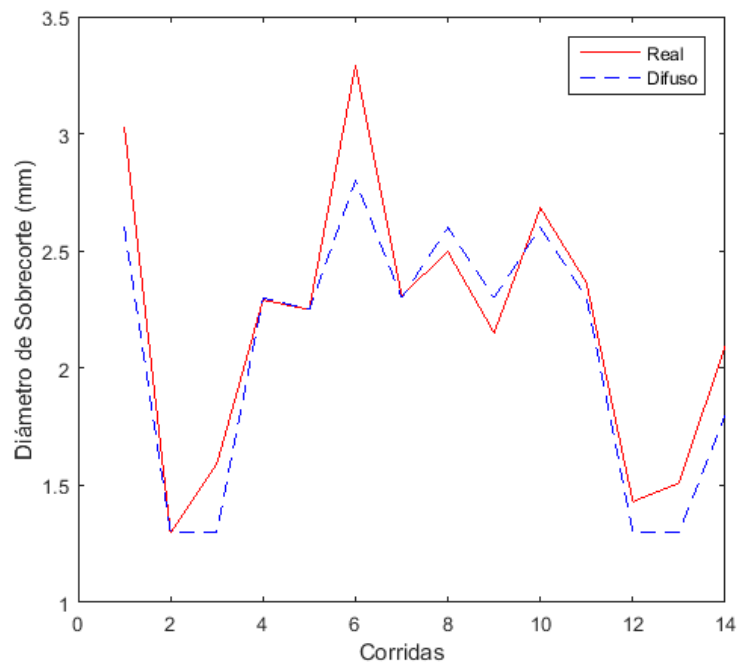
Corrida	$V_g$ (V)	$I_p$ (A)	$f$ (kHz)	DOC (mm)	$V_p$	% de error
1	50	15	25	3.03	2.6	14.19
2	70	25	40	1.2966	1.3	0.26
3	60	20	10	1.59	1.3	18.24
4	50	25	15	2.2908	2.3	0.40
5	70	13	10	2.2500	2.25	0.00
6	50	17	17	3.29	2.8	14.89
7	50	22	30	2.31	2.3	0.43
8	60	10	25	2.4966	2.6	4.14
9	70	15	5	2.15	2.3	6.98
10	50	15	40	2.6832	2.6	3.10
11	50	20	25	2.3632	2.3	2.67
12	60	25	10	1.43	1.3	9.09
13	70	15	25	1.51	1.3	13.91
14	70	10	25	2.0966	1.8	14.15
					<b>MAPE</b>	<b>7.32 %</b>
					<b>% de Exactitud</b>	<b>92.68 %</b>

Para las corridas de validación se comprobaron los otros dos métodos de defusificación. Con el método de centro de área se obtuvo una exactitud de 88.5% para la MRR y 86.66% para el DOC. En el caso del método de bisectriz se obtuvo una exactitud de 89.21% para la MRR y 88.31% para el DOC. Estos resultados confirmaron la selección del método de media de máximos para el modelo difuso, el valor de exactitud para la MRR es similar al alcanzado con el método de bisectriz, sin embargo con ninguno de estos dos métodos se logró más del 90% de exactitud para el diámetro de sobrecorte.

A continuación se muestra las gráficas comparativas entre los resultados de las corridas experimentales de validación y los obtenidos con el modelo difuso a través del método de defusificación de media de máximos. En la figura 6.13 (a) correspondiente a la MRR, se observan las diferencias más notables entre las gráficas en las corridas 1, 6 y 10, las cuales son las correspondientes a los valores más altos de MAPE (tabla 6.25). En el caso del DOC se observan las diferencias más notables entre las gráficas en las corridas 1, 3, 6, 13 y 14, las cuales son las correspondientes a los valores más altos de porcentajes de error absoluto (tabla 6.26).



(a)



(b)

Figura 6.13: Comparación entre los resultados experimentales de validación y los valores obtenidos con el modelo difuso (elaboración propia). (a) Tasa de Remoción de Material. (b) Diámetro del Sobrecorte.



## 7 Conclusiones

La presente investigación tiene el propósito del desarrollo de un modelo difuso, el cual permita realizar predicciones de determinadas métricas de calidad del proceso ECDM. Para la elaboración del modelo y dando respuesta al primer objetivo específico, se determinaron las variables de entrada y salida para el modelo difuso. A partir de la revisión bibliográfica, el trabajo experimental y análisis con el proceso ECDM, se comprobó la complejidad de este maquinado, compuesto por dos procesos: ECM y EDM, y en el cual intervienen fenómenos físicos, químicos, eléctricos, entre otros. Esto provoca que interactúen varios parámetros de entrada (figura 4.2). En este sentido, la investigación se centró en parámetros eléctricos y se seleccionaron como variables de entrada el voltaje de gap ( $V_g$ ), la corriente pico ( $I_p$ ) y la frecuencia ( $f$ ) de los pulsos de la señal de voltaje aplicada a los electrodos. Con el fin de analizar a través del modelo la relación entre estas variables de entrada y las métricas de calidad del proceso ECDM, se determinaron como variables de salida la tasa de remoción de material (MRR) y el diámetro de sobrecorte (DOC).

Dando cumplimiento al segundo objetivo específico, para el planteamiento del modelo se siguieron las etapas de desarrollo de un sistema difuso de la figura 4.7. Para la elaboración de la base de conocimientos se implementó un diseño de experimentos factorial completo  $2^3$ , con dos réplicas y cuatro puntos centrales. A partir de las experimentaciones realizadas se llegaron a los siguientes resultados:

- Los residuales de la tasa de remoción de material no cumplieron con el supuesto de normalidad, mientras que los residuales del diámetro de sobrecorte si cumplieron con el supuesto de normalidad.
- Se detectó una correlación negativa entre ambas variables de salida.
- Se consideró que el proceso mostró una estabilidad respecto a la reproducibilidad y repetitividad, sin embargo se obtuvo disparidad entre los resultados de las réplicas y los puntos centrales, las cuales mostraron la variabilidad inherente del proceso ECDM, demostrando la presencia de incertidumbre en este maquinado.

Posteriormente, se procedió con las siguientes etapas para el sistema difuso, la base de conocimientos se conformó con 27 reglas heurísticas que representaron las posibles configuraciones de los niveles establecidos para los parámetros en el diseño de experimentos. Las variables de entrada se definieron a partir de tres conjuntos difusos, los cuales constituyeron los tres niveles del DoE, el voltaje de gap y la corriente se representaron con funciones de membresía triangulares y la frecuencia con funciones trapezoidales de forma tal que representaran su comportamiento lo más cercano a la práctica. El empleo de otras funciones de membresía afectó la predicción del sistema difuso. Para las variables de salida se definieron cinco conjuntos difusos, un menor número de estos afectó la capacidad de predicción del modelo. Se representaron con funciones de membresía triangulares, otros tipos de funciones afectó la predicción del modelo, además las funciones triangulares brindaron simplicidad en los cálculos.

En la etapa de defusificación el método media de máximos (MoM) fue seleccionado para el modelo, ya que presentó resultados adecuados de predicción respecto a los otros métodos. A partir del modelo diseñado se analizó la relación de los variables de entrada con las de salida a través de las superficies difusas, de donde se concluyó que:

- La tasa de remoción de material (MRR) aumentó al incrementar el valor de  $V_g$  e  $I_p$ , esto debido al incremento de energía de las descargas eléctricas y por consiguiente, generando las condiciones adecuadas para el fenómeno de electrólisis.
- Como muestra de la correlación negativa, el valor de DOC disminuyó con el incremento de  $V_g$  e  $I_p$ , ya que esto produjo una disminución en el tiempo de maquinado y por tanto menor tiempo de exposición a la remoción electrolítica en las paredes laterales de la herramienta de trabajo.
- En el caso de la frecuencia se tiene la apreciación que su variación no influyó considerablemente en la tasa de remoción de material, por lo que se debe profundizar en el estudio de este parámetro.

La exactitud del modelo difuso respecto a los resultados experimentales se obtuvo a partir del error porcentual absoluto medio (MAPE), esta es una métrica empleada por varios autores para establecer la exactitud de modelos difusos. Con base en lo anterior, se plantea obtener un MAPE menor del 10% el cual equivale a una exactitud a partir del

90%. Con el modelo desarrollado se obtuvo un 90.67% para la MRR y 96.35% para el DOC de exactitud respecto a los resultados experimentales del DoE.

Para resolver el tercer objetivo específico, se realizó la validación del modelo por medio de 14 corridas experimentales con configuraciones de valores de  $V_g$ ,  $I_p$  y  $f$  que no se tuvieron en cuenta en el diseño de experimentos. En estas corridas de validación se confirmó que el incremento del voltaje de gap y de la corriente favoreció el aumento de la MRR y la disminución del DOC.

Se obtuvo una exactitud respecto a los resultados experimentales de 89.27% para la MRR y de 92.68% para el DOC. La exactitud de la MRR fue muy cercana al 90%, por lo que se consideró un valor de exactitud aceptable para un proceso complejo como lo es el maquinado ECDM, en el cual intervienen fenómenos de diferente naturaleza. A partir de los valores de exactitud obtenidos en esta investigación es posible concluir que la modelación del proceso ECDM a través de la técnica de lógica difusa es viable y permite lograr valores de exactitud aproximadamente a partir del 90%, lo cual contribuye al desarrollo de controles difusos para este proceso.

Como trabajo futuro se propone profundizar en el estudio del proceso ECDM a través de la realización de diseños de experimentos incluyendo mayor cantidad de variables de entrada, con especial atención al análisis de la concentración del electrolito. Posteriormente, tener en cuenta las nuevas variables en el modelo difuso, con el fin de obtener mayor exactitud respecto a los resultados experimentales con un consecuente aumento en la complejidad del modelo. También, se recomienda el desarrollo de una interfaz gráfica para la interacción de usuarios. Además, se propone desarrollar técnicas de control inteligente para el proceso a través del modelo obtenido.

## Bibliografia

- Adnan, M. M., Sarkheyli, A., Zain, A. M., & Haron, H. (2015). Fuzzy logic for modeling machining process: a review. *Artificial Intelligence Review*, 43(3), 345-379.
- Antil, P., Singh, S., & Manna, A. (2014). A study on input parameters affecting metal removal rate and surface roughness in electrochemical discharge machining process. *International Journal of Advance Research In Science And Engineering*, 3(12), 400-405.
- Barzani, M. M., Zalnezhad, E., Sarhan, A. A., Farahany, S., & Ramesh, S. (2015). Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al–Si–Cu–Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*, 61, 150-161.
- Bhattacharyya, B., Doloi, B., & Sorkhel, S. (1999). Experimental investigations into electrochemical discharge machining (ECDM) of non-conductive ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 95(1), 145-154.
- Bhuyan, R., Mohanty, S., & Routara, B. (2017). RSM and Fuzzy logic approaches for predicting the surface roughness during EDM of Al-SiCp MMC. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1947-1956.
- Bingham, B. C. (2014). *An investigation into the electrochemical removal of unwanted residual material protrusions from parts*.
- Coteață, M., Schulze, H.-P., & Slătineanu, L. (2011). Drilling of difficult-to-cut steel by electrochemical discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(12), 1466-1472.
- Chak, S. K. (2016). Electro Chemical Discharge Machining: process capabilities. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 4(8), 42-53.
- Chak, S. K., & Rao, P. V. (2007). Trepanning of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by electro-chemical discharge machining (ECDM) process using abrasive electrode with pulsed DC supply. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(14), 2061-2070.
- Dafade, S. V., & Waghmare, C. A. (2015). Optimization of Process Parameters in Electrochemical Discharge Machining (ECDM). *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2(16), 1339-1343.

- Davim, J. P. (2013). *Nontraditional machining processes*. J. P. Davim (Ed.). London: Springer-Verlag.
- Davim, J. P. (2016). *Design of experiments in production engineering*. J. P. Davim (Ed.). Switzerland: Springer International Publishing.
- Dewangan, S., & Biswas, C. K. (2013). *The use of fuzzy logic technique for optimization of EDM process*. Paper presented at the ALCON -2012, CSIT Durg (C.G.).
- Dong, S., Wang, Z., & Wang, Y. (2017). High-speed electrochemical discharge drilling (HSECDD) for micro-holes on C17200 beryllium copper alloy in deionized water. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1-4), 827-835.
- El-Hofy, H. (2005). *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*: McGraw Hill Professional.
- Elhami, S., & Razfar, M. (2017). Analytical and experimental study on the integration of ultrasonically vibrated tool into the micro electro-chemical discharge drilling. *Precision Engineering*, 47, 424-433.
- Gigerenzer, G., & Gaissmaier, W. (2011). Heuristic decision making. *Annual review of psychology*, 62, 451-482.
- González-Ibarra, G. (2014). *Estudio de maquinabilidad de 2 superaleaciones inconel 617 y 718*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Goud, M., & Sharma, A. K. (2016). Analysis of Material Removal and Radial Overcut during Micro-drilling of Soda Lime Glass using Electrochemical Discharge Machining (ECDM).
- Goud, M., Sharma, A. K., & Jawalkar, C. (2016). A review on material removal mechanism in electrochemical discharge machining (ECDM) and possibilities to enhance the material removal rate. *Precision Engineering*, 45, 1-17. doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.01.007
- Granda-Gutiérrez, E., Díaz-Guillén, J., Hung, N., Hernandez-García, H., López, S., Garza, A., Acevedo, J., Rossano-Díaz, I.,. (2015). Remoción de Material en Diversos Electrolitos Durante el Maquinado Electroquímico de Aceros de Alta Resistencia. *Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica*, 37, 25-30. Chihuahua, México.

- Gupta, K., Jain, N. K., & Laubscher, R. (2016). *Hybrid machining processes: perspectives on machining and finishing*. Springer.
- Gupta, P. K., Bhamu, J. P., Rajoria, C. S., Lautre, N. K., & Agarwal, V. (2016). *Effect of Duty Ratio at Different Pulse Frequency during Hole Drilling in Ceramics Using Electrochemical Discharge Machining*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Harugade, M., Kavade, M., & Hargude, N. (2013). Effect of electrolyte solution on material removal rate in electrochemical discharge machining. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 1-8.
- Hocheng, H. (2011). *Machining technology for composite materials: principles and practice*. Elsevier.
- Hocheng, H., & Tsai, H.-Y. (2012). *Advanced analysis of nontraditional machining*. Springer Science & Business Media.
- Huang, S., Liu, Y., Li, J., Hu, H., & Sun, L. (2014). Electrochemical discharge machining micro-hole in stainless steel with tool electrode high-speed rotating. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(5), 634-637.
- Huang, S., Zhu, D., Zeng, Y. B., Wang, W., & Liu, Y. (2011). *Micro-hole machined by electrochemical discharge machining (ECDM) with high speed rotating cathode*. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Jantzen, J. (2013). *Foundations of fuzzy control: a practical approach*: John Wiley & Sons.
- Jawalkar, C. (2013). *Investigation on performance enhancement of ECDM process while machining glass*. PhD Thesis, Indian Institute of Technology Roorkee, India.
- Jawalkar, C., Sharma, A. K., & Kumar, P. (2014). Investigations on performance of ECDM process using NaOH and NaNO<sub>3</sub> electrolytes while micro machining soda lime glass. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 28(1-3), 80-93.
- Kohli, A., Wadhwa, A., Virmani, T., & Jain, U. (2012). *Optimization of material removal rate in electrical discharge machining using fuzzy logic*. Paper presented at the Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology.

- Krötz, H., Roth, R., & Wegener, K. (2013). Experimental investigation and simulation of heat flux into metallic surfaces due to single discharges in micro-electrochemical arc machining (micro-ECAM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5-8), 1267-1275.
- Kurafuji, H., & Suda, K. (1968). Electrical discharge drilling of glass,. *Annals of the CIRP 16 (I)*, 415-419.
- Labib, A., Keasberry, V., Atkinson, J., & Frost, H. (2011). Towards next generation electrochemical machining controllers: A fuzzy logic control approach to ECM. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7486-7493.
- MacGillivray, B. H. (2017). Characterising bias in regulatory risk and decision analysis: An analysis of heuristics applied in health technology appraisal, chemicals regulation, and climate change governance. *Environment International*, 105, 20-33.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- McGeough, J. (2005). Electrochemical machining (ECM). *Edinburgh, UK: <http://electrochem.cwru.edu/encycl/artm03-machining.htm>*.
- Mediliyedara, T., De Silva, A., Harrison, D., & McGeough, J. (2004a). *A Fuzzy Logic Approach for the Pulse Classification of Electro Chemical Discharge Machining (ECDM)*. Paper presented at the Proceedings of the 34th International MATADOR Conference.
- Mediliyedara, T., De Silva, A., Harrison, D., & McGeough, J. (2004b). An intelligent pulse classification system for electro-chemical discharge machining (ECDM)—a preliminary study. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 499-503. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.002
- Mediliyedara, T., De Silva, A. K. M., Harrison, D., & McGeough, J. (2004c). *Design and development of an intelligent process controller in LabVIEW environment for electro chemical discharge machining (ECDM)*. Paper presented at the UKACC Control 2004 Mini Symposia.
- Mohd Adnan, M. R. H., Sarkheyli, A., Mohd Zain, A., & Haron, H. (2013). Fuzzy logic for modeling machining process: a review. *Artificial Intelligence Review*, 43(3), 345-379. doi: 10.1007/s10462-012-9381-8

- Montgomery, D. C. (2008). *Diseño y análisis de experimentos*: Limusa Wiley.
- Mount, A., Eley, K., & Clifton, D. (2000). Theoretical analysis of chronoamperometric transients in electrochemical machining and characterization of titanium 6/4 and inconel 718 alloys. *Journal of Applied Electrochemistry*, 30(4), 447-455.
- Nguyen, M. D., Rahman, M., & San Wong, Y. (2012a). Enhanced surface integrity and dimensional accuracy by simultaneous micro-ED/EC milling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(1), 191-194.
- Nguyen, M. D., Rahman, M., & San Wong, Y. (2012b). Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 54, 55-65.
- Nguyen, M. D., Rahman, M., & San Wong, Y. (2013). Modeling of radial gap formed by material dissolution in simultaneous micro-EDM and micro-ECM drilling using deionized water. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 66, 95-101.
- Panda, M. C., & Yadava, V. (2012). Intelligent modeling and multiobjective optimization of die sinking electrochemical spark machining process. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(1), 10-25.
- Paul, L., & Hiremath, S. S. (2013). Response Surface Modelling of Micro Holes in Electrochemical Discharge Machining Process. *Procedia Engineering*, 64, 1395-1404. doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.221
- Paul, L., & Hiremath, S. S. (2014a). Characterisation of Micro Channels in Electrochemical Discharge Machining Process. *Applied Mechanics and Materials*, 490-491, 238-242. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.238
- Paul, L., & Hiremath, S. S. (2014b). Evaluation of Process Parameters of ECDM Using Grey Relational Analysis. *Procedia Materials Science*, 5, 2273-2282. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.446
- Paul, L., & Korah, L. V. (2016). Effect of Power Source in ECDM Process with FEM Modeling. *Procedia Technology*, 25, 1175-1181. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.236



- Pawar, P., Ballav, R., & Kumar, A. (2015). Revolutionary Developments in ECDM Process: An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3188-3195. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.113
- Phipon, R., & Pradhan, B. (2012). Optimization of Electro-Chemical Discharge Machining process using Genetic Algorithm. *IOSR Journal of Engineering*, 2(9-8719), 106-115.
- Ponce, P. (2011). *Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería. México DF: Editorial Alfaomega. 348 p: ISBN 978-84-267-1706-1.*
- Rajan, J. J. J., Anand, M. D., & Gopu, P. (2014). *A retrospective study based on the soft computing approach in Electro Chemical discharge machining.* Paper presented at the Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), 2014 International Conference on.
- Rajurkar, K., Sundaram, M., & Malshe, A. (2013). Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*, 6, 13-26.
- Ranganayakulu, J., Hiremath, S. S., & Paul, L. (2011). Parametric analysis and a soft computing approach on material removal rate in electrochemical discharge machining. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 24(1-4), 23-39.
- Rao. (2011). Modeling and optimization of modern machining processes *Advanced modeling and optimization of manufacturing processes* (pp. 177-284): Springer.
- Rao, Sravan, C., Ranga, P., & Padmanabhan, G. (2009). *Fuzzy logic-based forward modeling of electro chemical machining process.* Paper presented at the Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications:* John Wiley & Sons, Ltd.
- Sanghani, C. R., & Acharya, G. D. (2014). A Review of Research on Improvement and Optimization of Performance Measures for Electrical Discharge Machining. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(1), 433-450.
- Sarkar, B., Doloi, B., & Bhattacharyya, B. (2006). Parametric analysis on electrochemical discharge machining of silicon nitride ceramics. *The International*

*Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(9-10), 873-881. doi: 10.1007/s00170-004-2448-1

- Sarkar, B., Doloi, B., & Bhattacharyya, B. (2009). Investigation into the influences of the power circuit on the micro-electrochemical discharge machining process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(2), 133-144.
- Sathisha, N., Somashekhar., S. H., Shivakumar, J., & Jagannatha, N. (2013). Optimization of ECDM process parameters using Taguchi Robust Design and Utility Concept. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 2(3), 165-173.
- Sengottuvel, P., Satishkumar, S., & Dinakaran, D. (2013). Optimization of multiple characteristics of EDM parameters based on desirability approach and fuzzy modeling. *Procedia Engineering*, 64, 1069-1078.
- Shabgard, Badamchizadeh, M., Ranjbary, G., & Amini, K. (2013). Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 32-39.
- Shabgard, Gholipoor, A., & Baseri, H. (2016). A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8), 2081-2097.
- Shanmukhi, K., Vundavilli, P. R., & Surekha, B. (2014). Modeling of ECDM micro-drilling process using GA- and PSO-trained radial basis function neural network. *Soft Computing*, 19(8), 2193-2202. doi: 10.1007/s00500-014-1400-z
- Shaw, I. S. (2013). *Fuzzy control of industrial systems: theory and applications* (Vol. 457): Springer.
- Singh, T., & Dvivedi, A. (2018). On pressurized feeding approach for effective control on working gap in ECDM. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(4), 462-473.
- Sivanandam, S., Sumathi, S., & Deepa, S. (2007). *Introduction to fuzzy logic using MATLAB* (Vol. 1): Springer.

- Skrabalak, G., Zybura-Skrabalak, M., & Ruszaj, A. (2004). Building of rules base for fuzzy-logic control of the ECDM process. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 530-535. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.058
- Souza, A. d. (2014). Analyzing machining time, geometric form and TWR as work result of the ECDM-process producing microholes in stainless steel. *Development Journal in Integrated Engineering*, 1.
- Spieser, A. F. J. (2015). *Development of an electrochemical micromachining ( $\mu$ ECM) machine*. Brunel University London.
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*(1), 116-132.
- Trillas, E. & Eciolaza, L. (2015). *Fuzzy logic: an introductory course for engineering students* (Vol. 320): Springer.
- Trillas, E. (2011). Lotfi A. Zadeh: On the man and his work. *Scientia Iranica*, 18(3), 574-579.
- Unune, D. R., Barzani, M. M., Mohite, S. S., & Mali, H. S. (2016). Fuzzy logic-based model for predicting material removal rate and average surface roughness of machined Nimonic 80A using abrasive-mixed electro-discharge diamond surface grinding. *Neural Computing and Applications*, 1-16.
- Xi, X.-C., Chen, M., & Zhao, W.-S. (2017). Improving electrical discharging machining efficiency by using a Kalman filter for estimating gap voltages. *Precision Engineering*, 47, 182-190.
- Yong, L., Yunfei, Z., Guang, Y., & Liangqiang, P. (2003). Localized electrochemical micromachining with gap control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 108(1), 144-148.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zadeh, L. A. (1975). Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese*, 30(3), 407-428.
- Zadeh, L. A. (1979). A theory of approximate reasoning, *Machine Intelligence 9*, J. Hayes, D. Michie, and LI Mikulich (eds.), 149-194.

- Zadeh, L. A. (2001). A new direction in AI: Toward a computational theory of perceptions. *AI magazine*, 22(1), 73.
- Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information sciences*, 178(13), 2751-2779.
- Zeng, Z., Wang, Y., Wang, Z., Shan, D., & He, X. (2012). A study of micro-EDM and micro-ECM combined milling for 3D metallic micro-structures. *Precision Engineering*, 36(3), 500-509.
- Zhang, Y., Xu, Z., Zhu, D., Qu, N., & Zhu, Y. (2016). Drilling of film cooling holes by a EDM/ECM in situ combined process using internal and side flushing of tubular electrode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 505-517.
- Zhang, Y., Xu, Z., Zhu, D., & Xing, J. (2015). Tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling using low-conductivity salt solution. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 92, 10-18. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2015.02.011

# Anexos

## Anexo 1: Reglas heurísticas del modelo difuso.

1. Si  $Vg$  es bajo y  $Ip$  es bajo y  $f$  es bajo entonces MRR es bajo y DOC es alto.
2. Si  $Vg$  es alto y  $Ip$  es bajo y  $f$  es bajo entonces MRR es medio alto y DOC es medio bajo.
3. Si  $Vg$  es bajo y  $Ip$  es alto y  $f$  es bajo entonces MRR es medio bajo y DOC es medio alto.
4. Si  $Vg$  es alto y  $Ip$  es alto y  $f$  es bajo entonces MRR es alto y DOC es bajo.
5. Si  $Vg$  es bajo y  $Ip$  es bajo y  $f$  es alto entonces MRR es bajo y DOC es alto.
6. Si  $Vg$  es alto y  $Ip$  es bajo y  $f$  es alto entonces MRR es medio bajo y DOC es medio alto.
7. Si  $Vg$  es bajo y  $Ip$  es alto y  $f$  es alto entonces MRR es medio bajo y DOC es medio alto.
8. Si  $Vg$  es alto y  $Ip$  es alto y  $f$  es alto entonces MRR es alto y DOC es bajo.
9. Si  $Vg$  es medio y  $Ip$  es medio y  $f$  es medio entonces MRR es medio alto y DOC es medio bajo.
10. Si  $Vg$  es BAJO y  $Ip$  es BAJO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es BAJO y DOC es ALTO.
11. Si  $Vg$  es BAJO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es BAJO entonces MRR es BAJO y DOC es ALTO.
12. Si  $Vg$  es BAJO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es BAJO y DOC es MA.
13. Si  $Vg$  es BAJO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es ALTO entonces MRR es BAJO y DOC es MA.
14. Si  $Vg$  es BAJO y  $Ip$  es ALTO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es MB y DOC es MEDIO.
15. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es BAJO y  $f$  es BAJO entonces MRR es MB y DOC es MA.
16. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es BAJO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es MB y DOC es MA.
17. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es BAJO y  $f$  es ALTO entonces MRR es MB y DOC es MA.
18. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es BAJO entonces MRR es MEDIO y DOC es MB.
19. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es ALTO entonces MRR es MEDIO y DOC es MB.
20. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es ALTO y  $f$  es BAJO entonces MRR es MA y DOC es BAJO.

21. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es ALTO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es MA y DOC es BAJO.
22. Si  $Vg$  es MEDIO y  $Ip$  es ALTO y  $f$  es ALTO entonces MRR es MA y DOC es BAJO.
23. Si  $Vg$  es ALTO y  $Ip$  es BAJO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es MB y DOC es MB.
24. Si  $Vg$  es ALTO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es BAJO entonces MRR es MB y DOC es MEDIO.
25. Si  $Vg$  es ALTO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es MA y DOC es BAJO.
26. Si  $Vg$  es ALTO y  $Ip$  es MEDIO y  $f$  es ALTO entonces MRR es MA y DOC es BAJO.
27. Si  $Vg$  es ALTO y  $Ip$  es ALTO y  $f$  es MEDIO entonces MRR es ALTO y DOC es BAJO.

## Anexo 2: Código de programación del modelo difuso en MATLAB®.

```
clc
clear
step=0.1;
%----- Variables de Entrada -----
%%% Vg %%%%%%%%%%
UD_Vg=35:step:85; %Universo de Discurso
%%%%%%%%%%%%%% Funciones de membresía %%%%%%%%%%%%%%%
Vg_bajo=trapmf(UD_Vg,[30 35 50 60]);
Vg_medio=trimf(UD_Vg,[50 60 70]);
Vg_alto=trapmf(UD_Vg,[60 70 90 110]);
%%%%%%%%%%%%%% Gráfica %%%%%%%%%%%%%%%
subplot(6,1,1),plot (UD_Vg,Vg_bajo,UD_Vg,Vg_medio,UD_Vg,Vg_alto,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10), legend('Vg Bajo','Vg Medio','Vg Alto')
xlabel('Voltaje de Gap'),ylabel('u(Vg)')
%%% Ip %%%%%%%%%%
UD_Ip=5:step:25; %Universo de Discurso
%%%%%%%%%%%%%% Funciones de membresía %%%%%%%%%%%%%%%
Ip_bajo=trapmf(UD_Ip,[-10 0 10 15]);
Ip_medio=trimf(UD_Ip,[10 15 20]);
Ip_alto=trapmf(UD_Ip,[15 20 25 30]);
%%%%%%%%%%%%%% Gráfica %%%%%%%%%%%%%%%
subplot(6,1,2),plot (UD_Ip,Ip_bajo,UD_Ip,Ip_medio,UD_Ip,Ip_alto,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10), legend('Ip Bajo','Ip Medio','Ip Alto')
xlabel('Corriente Pico'),ylabel('u(Ip)')
%%% F %%%%%%%%%%
UD_f=0:step:50; %Universo de Discurso
%%%%%%%%%%%%%% Funciones de membresía %%%%%%%%%%%%%%%
f_bajo=trapmf(UD_f,[0 8 12 20]);
f_medio=trapmf(UD_f,[12 23 27 36]);
f_alto=trapmf(UD_f,[27 36 40 50]);
%%%%%%%%%%%%%% Gráfica %%%%%%%%%%%%%%%
subplot(6,1,3),plot (UD_f,f_bajo,UD_f,f_medio,UD_f,f_alto,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10), legend('f Bajo','f Medio','f Alto')
xlabel('Frecuencia'),ylabel('u(f)')
%----- Variables de Salida -----
%%% MRR %%%%%%%%%%
UD_MRR=0:step:35; %Universo de Discurso
%%%%%%%%%%%%%% Funciones de membresía %%%%%%%%%%%%%%%
MRR_bajo=trimf(UD_MRR,[0 5.5 10.5]);
MRR_medio_bajo=trimf(UD_MRR,[5.5 10.5 16.3]);
MRR_medio=trimf(UD_MRR,[10.5 16.3 21.1]);
MRR_medio_alto=trimf(UD_MRR,[16.3 21.1 28.5]);
MRR_alto=trimf(UD_MRR,[21.1 28.5 35]);
%%%%%%%%%%%%%% Gráfica %%%%%%%%%%%%%%%
subplot(6,1,4),plot
(UD_MRR,MRR_bajo,UD_MRR,MRR_medio_bajo,UD_MRR,MRR_medio,UD_MRR,MRR_medio_alto,UD_MRR,MRR_alto,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10), legend('MRR Bajo','MRR medio-bajo','MRR Medio','MRR medio-alto','MRR Alto')
xlabel('MRR'),ylabel('u(MRR)')
%%% DOC %%%%%%%%%%
UD_DOC=0:step:4.5; %Universo de Discurso
%%%%%%%%%%%%%% Funciones de membresía %%%%%%%%%%%%%%%
DOC_bajo=trimf(UD_DOC,[0 1.3 1.8]);
DOC_medio_bajo=trimf(UD_DOC,[1.3 1.8 2.3]);
DOC_medio=trimf(UD_DOC,[1.8 2.3 2.6]);
```

```

DOC_medio_alto=trimf(UD_DOC,[2.3 2.6 3.6]);
DOC_alto=trimf(UD_DOC,[2.6 3.6 4.5]);
%%%%%%%%%%%% Gráfica %%%%%%%%%%%%%
subplot(6,1,5),plot
(UD_DOC,DOC_bajo,UD_DOC,DOC_medio_bajo,UD_DOC,DOC_medio,UD_DOC,DOC_medio_alto,
UD_DOC,DOC_alto,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10), legend('DOC Bajo','DOC medio-bajo','DOC Medio','DOC medio-alto','DOC Alto')
xlabel('DOC'),ylabel('u(DOC)')
%%%%%%%%%%%% Reglas, Fusificación e Inferencia %%%%%%%%%%%%%
%----- Valores de entrada -----
Vg_in=50;
n1=find(UD_Vg==Vg_in);
subplot(6,1,1), hold on
,plot(Vg_in,Vg_bajo(n1),'*',Vg_in,Vg_medio(n1),'*',Vg_in,Vg_alto(n1),'*', 'LineWidth',5), hold off
Ip_in=10;
n2=find(UD_Ip==Ip_in);
subplot(6,1,2), hold on
,plot(Ip_in,Ip_bajo(n2),'*',Ip_in,Ip_medio(n2),'*',Ip_in,Ip_alto(n2),'*', 'LineWidth',5), hold off
f_in=10;
n3=find(UD_f==f_in);
subplot(6,1,3), hold on ,plot(f_in,f_bajo(n3),'*',f_in,f_medio(n3),'*',f_in,f_alto(n3),'*', 'LineWidth',5), hold
off
%%%%%%%% ---- MRR ---- MRR ---- MRR ---- MRR ---- MRR ---- MRR -----
%%% ----- REGLAS HEURÍSTICAS-----
R1_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_bajo(n3),MRR_bajo)));
R2_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_bajo(n3),MRR_medio)));
R3_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_bajo(n3),MRR_medio_bajo)));
R4_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_bajo(n3),MRR_alto)));
R5_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_alto(n3),MRR_bajo)));
R6_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_alto(n3),MRR_medio_bajo)));
R7_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_alto(n3),MRR_medio_bajo)));
R8_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_alto(n3),MRR_alto)));
R9_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_medio(n3),MRR_medio)));
R10_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_medio(n3),MRR_bajo)));
R11_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_bajo(n3),MRR_bajo)));
R12_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_medio(n3),MRR_bajo)));
R13_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_alto(n3),MRR_bajo)));
R14_MRR=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_medio(n3),MRR_medio_bajo)));
R15_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_bajo(n3),MRR_medio_bajo)));
R16_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_medio(n3),MRR_medio_bajo)));
R17_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_alto(n3),MRR_medio_bajo)));
R18_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_bajo(n3),MRR_medio)));
R19_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_alto(n3),MRR_medio)));
R20_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_bajo(n3),MRR_medio_alto)));
R21_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_medio(n3),MRR_medio_alto)));
R22_MRR=min(Vg_medio(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_alto(n3),MRR_medio_alto)));
R23_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_medio(n3),MRR_medio_bajo)));
R24_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_bajo(n3),MRR_medio_bajo)));
R25_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_medio(n3),MRR_medio_alto)));
R26_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_alto(n3),MRR_medio_alto)));
R27_MRR=min(Vg_alto(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_medio(n3),MRR_alto)));
%%%%%%%% ---- Inferencia ---- %%%%%%%%%
R_MRR=max(R1_MRR,max(R2_MRR,max(R3_MRR,max(R4_MRR,max(R5_MRR,max(R6_MRR,ma
x(R7_MRR,max(R8_MRR,max(R9_MRR,max(R10_MRR,max(R11_MRR,max(R12_MRR,max(R13_M
RR,max(R14_MRR,max(R15_MRR,max(R16_MRR,max(R17_MRR,max(R18_MRR,max(R19_MRR,m

```



```

ax(R20_MRR,max(R21_MRR,max(R22_MRR,max(R23_MRR,max(R24_MRR,max(R25_MRR,max(R2
6_MRR,max(R27_MRR)))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))));
figure
plot(UD_MRR,R_MRR,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10), legend('Salida MRR')
%%%----- Defusificación -----%%%%%%%%
fo_MRR=defuzz(UD_MRR,R_MRR,'mom')
hold on, plot(fo_MRR*ones(1,3),[0 0.5 1],'r','LineWidth',1)
%%%----- DOC --- DOC --- DOC --- DOC --- DOC --- DOC -----
%%% ----- REGLAS HEURÍSTICAS-----
R1_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_bajo(n3),DOC_alto)));
R2_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_bajo(n3),DOC_medio_bajo)));
R3_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_bajo(n3),DOC_medio)));
R4_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_bajo(n3),DOC_bajo)));
R5_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_alto(n3),DOC_alto)));
R6_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_alto(n3),DOC_medio)));
R7_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_alto(n3),DOC_medio)));
R8_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_alto(n3),DOC_bajo)));
R9_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_medio(n3),DOC_medio_bajo)));
R10_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_medio(n3),DOC_alto)));
R11_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_bajo(n3),DOC_alto)));
R12_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_medio(n3),DOC_medio_alto)));
R13_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_alto(n3),DOC_medio_alto)));
R14_DOC=min(Vg_bajo(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_medio(n3),DOC_medio)));
R15_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_bajo(n3),DOC_medio_alto)));
R16_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_medio(n3),DOC_medio_alto)));
R17_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_alto(n3),DOC_medio_alto)));
R18_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_bajo(n3),DOC_medio_bajo)));
R19_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_alto(n3),DOC_medio_bajo)));
R20_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_bajo(n3),DOC_bajo)));
R21_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_medio(n3),DOC_bajo)));
R22_DOC=min(Vg_medio(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_alto(n3),DOC_bajo)));
R23_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_bajo(n2),min(f_medio(n3),DOC_medio_bajo)));
R24_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_bajo(n3),DOC_medio)));
R25_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_medio(n3),DOC_bajo)));
R26_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_medio(n2),min(f_alto(n3),DOC_bajo)));
R27_DOC=min(Vg_alto(n1),min(Ip_alto(n2),min(f_medio(n3),DOC_bajo)));
%%%%%%%%----- Inferencia -----%%%%%%%%
R_DOC=max(R1_DOC,max(R2_DOC,max(R3_DOC,max(R4_DOC,max(R5_DOC,max(R6_DOC,max(
R7_DOC,max(R8_DOC,max(R9_DOC,max(R10_DOC,max(R11_DOC,max(R12_DOC,max(R13_DOC,
max(R14_DOC,max(R15_DOC,max(R16_DOC,max(R17_DOC,max(R18_DOC,max(R19_DOC,max(R2
0_DOC,max(R21_DOC,max(R22_DOC,max(R23_DOC,max(R24_DOC,max(R25_DOC,max(R26_DOC
,max(R27_DOC)))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))))));
figure
plot(UD_DOC,R_DOC,'LineWidth',3)
set(gca,'FontSize',10), legend('Salida DOC')
%%%----- Defusificación -----%%%%%%%%
fo_DOC=defuzz(UD_DOC,R_DOC,'mom')
hold on, plot(fo_DOC*ones(1,3),[0 0.5 1],'r','LineWidth',1)

```

### **Anexo 3: Publicaciones.**

Durante el desarrollo de la tesis se lograron las siguientes publicaciones:

- J. Leyva-Bravo, P. Chiñas-Sánchez, and A. Hernández-Rodríguez. “A Survey of ECDM Modeling Literature Based on Different Techniques”. *6<sup>th</sup> Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering (SISE, 2017)*. Herndon, Virginia, USA. Octubre 19-21, 2017.
- J. Leyva-Bravo, P. Chiñas-Sánchez, A. Hernández-Rodríguez, P. Pérez-Villanueva, G. Galo-Hernández and R. Martínez-Alvarado. “Fuzzy modeling for diametral overcut in ECDM process”. *7<sup>th</sup> Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering (SISE, 2018)*. Binghamton, NY, USA. Octubre 11-12, 2018.
- R. Martínez-Alvarado, E. Granda-Gutierrez, A. Hernández-Rodríguez, G. Galo Hernández Alba, J. Leyva Bravo, P. Chiñas Sánchez and R. Praga Alejo. “Radial Basis Function Neural Network for modelling an Electrical Discharge Machining drilling process”. *XX IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC, 2018)*. Ixtapa, Guerrero, México. Noviembre 14-16, 2018
- J. Leyva-Bravo, P. Chiñas-Sánchez, A. Hernández-Rodríguez, G. Galo-Hernández and R. Martínez-Alvarado. “Efecto de parámetros eléctricos sobre la tasa de remoción de material en el maquinado ECDM de acero de alta resistencia”. *IV Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica (COMCAPLA, 2018)*. Mérida, Yucatán, México. Noviembre 20-23, 2018.