

Implementación experimental del diseño robusto de parámetros en el proceso de maquinado por electro-descarga con alambre a probetas de aluminio 6061

Geovani Esau García Sánchez¹, Lázaro Rico Pérez¹, Raúl Ñeco Caberta¹,
David Atayde Campos¹ Carlos Felipe Ramírez Espinoza¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

El siguiente documento describe la metodología usada para obtener los valores óptimos de operación del proceso de maquinado por electro-descarga con alambre (WEDM) a probetas de aluminio 6061, en la máquina Robofil 310 mediante el diseño robusto de parámetros (RPD); manipulando los factores controlables que más influyen en las características de calidad y en función de una señal ruido medible y cuantificable; en el estudio el comportamiento de las características de calidad son la tasa de remoción de material (MRR) y la rugosidad superficial (Ra); en el diseño experimental se implementó el arreglo ortogonal y se ejecutaron pruebas de corte para caracterizar las probetas de aluminio y evaluar mediante el uso del software Minitab los resultados y optimizando así el tiempo de maquinado y elevando la calidad del corte.

Palabras Clave: Electro-descarga, diseño experimental, tasa de remoción y rugosidad superficial.

Introducción

WDEM proceso metalúrgico, que erosiona el material de la pieza de trabajo por una serie de chispas efectuadas entre el área de la pieza y el alambre (electrodo) separados por una delgada película de fluido o medio dieléctrico líquido.

El alambre actúa como una sierra de cinta, pero en lugar de dientes las chispas realizan el corte creando un camino para cada

descarga, ionizando el fluido en la ranura, el área se eleva a temperaturas extremadamente altas, de modo que se remueve material por fundición, como se observa en la figura 1. Área de trabajo.

Las partículas que se generan por la remoción de material son segregadas en el medio dieléctrico y gracias a su flujo son filtradas y apartadas del sistema.

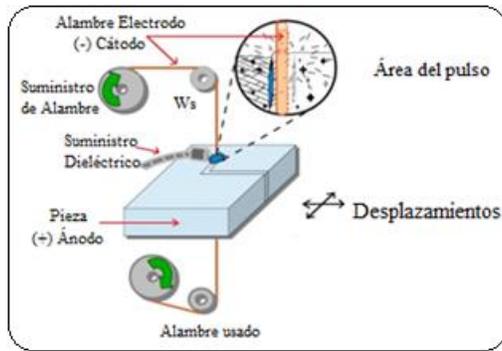


Figura 1. Área de trabajo

La investigación busca encontrar los factores que afecten de manera significativa las dos características de calidad, que serán la rugosidad superficial (R_a) y la tasa de remoción de material (MRR) en probetas de aluminio, para determinar niveles óptimos de operación y posibles interacciones entre factores, con un análisis de varianza y la

ayuda del software Minitab, la inferencia de la variable dureza del material como ruido requiere robustecer el proceso ante esta causa de variación, para una mayor comprensión en la figura 2 se presenta una caja de proceso típica con factores y características de calidad.

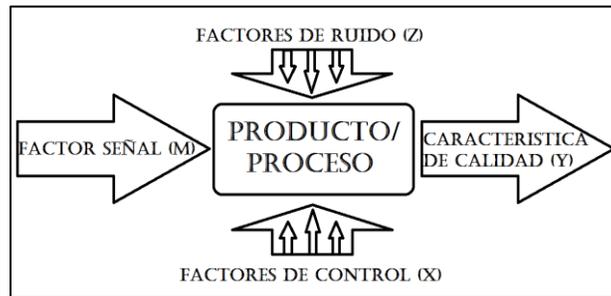


Figura 2. Caja de Proceso.

Metodología

La metodología propuesta está basada en las investigaciones empíricas en el área del diseño experimental del Dr. Taguchi, y su diseño robusto de parámetros. El concepto de diseño robusto se debe entender en un experimento a minimizar de forma indirecta,

los factores de ruido considerados explícita o implícitamente en el proceso.

Factores de WEDM

La máquina Robofil 310 trabaja por factores señal, esto es, asigna los valores ideales según las características del material a

maquinar, de tal forma que al programar una nueva señal para el aluminio 6061 está arrojado valores ideales, los cuales se componen de dos formas: los parámetros fijos que se mantendrán constantes a lo largo

del experimento y, los factores controlables que pueden ser modificados. La tabla 1 muestra los tres factores de control de mayor inferencia en las características de calidad.

Tabla 1. Niveles de los factores de control

Factores	Símb.	Nivel 1 (Bajo)	Nivel 2 (Alto)	Optimo	Unidad
Pulso ON-time	A	0.6	1.2	1.0	μs
Pulso Off-time	B	6.0	10.0	8.0	μs
Vel. alimentación del hilo	WS	6.0	12.0	9.0	m/min

Pulso ON-time (A)

Este parámetro es la duración de la chispa donde las tasas de erosión se ven afectadas principalmente por los parámetros del pulso. La chispa es un puente eléctrico que genera la corriente y se obtiene el trabajo de remoción. Cuanto más larga se mantenga la chispa, mayor es la eliminación de material. Por consiguiente, los cráteres resultantes serán más grandes y profundos, además el acabo de la superficie será más áspero, esto es con mayor grado de rugosidad.

Pulso Off-time (B)

En contra parte del pulso On-time este es la duración donde descansa el pulso y la re-ionización del troquel eléctrico se lleva a cabo, puede afectar a la velocidad de la operación de una manera general, entre más largo es el off-time mayor será el tiempo de mecanizado y remoción. Pero esto es una parte integral del proceso y debe existir. El

pulso Off-time también regula la estabilidad del proceso.

Velocidad de alimentación del hilo (WS)

Este parámetro entra en el estudio debido a la fuerte interacción que se tiene con los dos pulsos, el parámetro por sí solo, regula la velocidad de alimentación del hilo gracias a unos servos dispuestos en las boquillas.

Factor Ruido

Un factor importante es el ruido interno de la dureza del material, en algunas industrias el cumplimiento es riguroso y las especificaciones del material en particular la dureza requieren de una certificación que eleva el costo de producción; por ello la metodología para robustecer el proceso ante la variabilidad de la dureza del material determina cada parámetro y sus niveles de operación utilizados, y caracteriza el factor ruido, en este caso con ensayos de Dureza Rockwell “B” a probetas cilíndricas véase

figura 3. Los valores de la dureza y el rango de confianza se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Niveles del Factor Ruido

Factor Ruido (DUREZA)	Valor (HRB)	Intervalo de confianza (HRB)
Nivel 1	52.96	52.54, 53.37
Nivel 2	55.21	54.71, 55.71

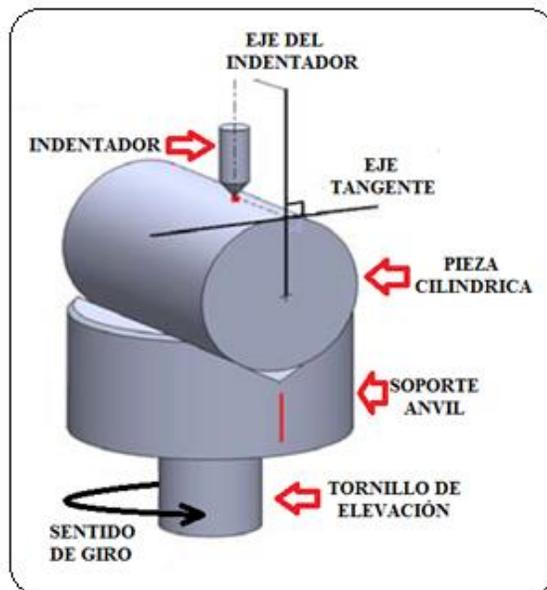


Figura 3. Prueba Rockwell para piezas cilíndricas.

Arreglo Ortogonal

En el RPD el Arreglo ortogonal en este estudio es a dos niveles de ruido con intervalos de confianza con tres factores de

control, quedando de la siguiente forma para su estudio, ver tabla 3.

Arreglo Ortogonal $L_4 = 2^3$

Tabla 3. Arreglo Ortogonal

BLOQUE	A	B	WS	Ruido	Ruido
1	1	1	1	TO BA EL	TO AL EL

2	1	2	2		
3	2	1	2		
4	2	2	1		

Variables de salida MRR y Ra

Después de realizar la experimentación se analizan los resultados; la tabla 4 muestra los datos arrojados por cada bloque, tomando la MRR y Ra como variables de salida o características de calidad que pretendemos optimizar. Se utilizó la herramienta estadística Minitab 16 con la finalidad estudiar su comportamiento estadístico.

Tabla 4. Resultados de la MRR y Ra

BLOQUE	NIVEL RUIDO	MRR ($\frac{in^2}{hr}$)	TIEMPO DE MAQUINADO (min)	RUGOSIDAD TOTAL
1	1	3.765	15.26	124.16
2	1	7.294	9.50	135.33
3	1	4.308	13.56	128.66
4	1	9.220	6.40	157.33
5	2	3.609	15.42	124.16
6	2	6.254	10.00	135.33
7	2	4.072	14.20	128.66
8	2	8.923	6.52	157.33

El comportamiento de las características de calidad o variables de salida MRR y Ra, se determina que la MRR se busca maximizar

y la Ra se busca minimizar. La tabla 5 identifica el tipo de característica y razón señal / ruido para cada variable de respuesta.

Tabla 5. Señal Ruido

Variable Respuesta	Tipo de Característica.	Razón señal/ruido (S/N)

Ra	Mientras más pequeña es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
MRR	Mientras más grande es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$

Seleccionar valores para robustecer

Con la ayuda del software Minitab 16 se muestra las interacciones fuertes entre las

tres variables del estudio, en las figuras 4 y 5 se observan los niveles de operación para cada bloque y si existe o no interacción.

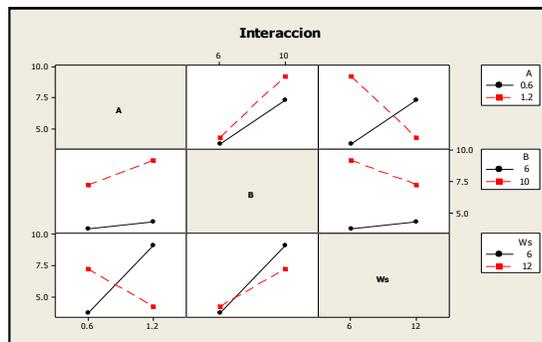


Figura 4. Interacciones para la MRR.

Al analizar las figuras y siguiendo la metodología de RPD para cada factor de calidad se detectaron que las interacciones fuertes que se tienen en los factores de control son: Duración de impulsión (pulso

on time) “A” y Velocidad de Alimentación del hilo “Ws”. Tiempo entre impulsos (pulso off time) “B” y Velocidad de Alimentación del hilo “Ws”.

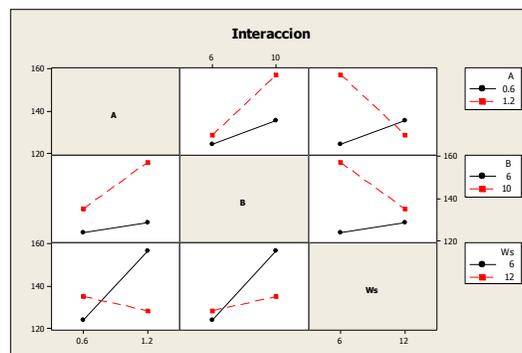


Figura 5. Interacciones para la Ra.

Para la selección de los niveles óptimos de operación se presenta la tabla 6.

Tabla 6. Niveles óptimos de operación.

Factores de control	Niveles seleccionados para MRR	Niveles seleccionados para Ra
Pulso ON-time (A)	2	1,2
Pulso Off-time (B)	2	1
Vel. alimentación del hilo (Ws)	1	1

Confirmación Experimental

La confirmación experimental es el paso final en el proceso de diseño de experimentos, en este estudio el propósito es validar los resultados elaborados durante la fase de análisis implementando RPD.

La validación de los resultados se obtendrá después de calcular la señal/ruido que generan los niveles de operación.

Cálculo de señal / ruido (S/N)

Se calcula la relación S/N para cada Factor señal, empezando por el factor señal original que arroja la WEDM, después el diseño de experimentos basado en RPD y, la relación S/N se mide en decibeles (db) para expresar variabilidad. Entre más alto sea el valor de la relación S/N, menor es la variabilidad. La tabla 7 representa la ganancia S/N contra la reducción de variabilidad.

Ganancia S/N (db)	Reducción Variabilidad
0.1	1.1%
0.2	2.3%
0.5	5.6%
1.0	10.9%
1.5	15.9%
2.0	20.6%
2.5	25.1%
3.0	29.3%
4.0	37.0%
5.0	43.9%
6.0	50.0%
9.0	64.6%
12.0	75.0%
15.0	82.3%
18.0	87.5%
21.0	91.2%
24.0	93.8%

Figura 7. Ganancia S/N contra la reducción de variabilidad

Prueba de confirmación.

En las pruebas de confirmación se recolectaron los datos de las características de calidad de la tasa de remoción de material (MRR) y la rugosidad superficial (Ra) realizando cortes controlados e implementando los niveles óptimos predichos por RPD y realizando la comprobación experimental se obtuvieron las S/N con la herramienta estadística de Minitab 16, y se describen a continuación, cabe mencionar que son dos diferentes pruebas de confirmación puesto que una cumple con el objetivo de maximizar la tasa

de remoción de materia (MRR) y el otro objetivo es minimizar al máximo la rugosidad superficial (Ra). Esto responde al hecho que cada característica de calidad tiene su prioridad según el objetivo.

Se observa en la tabla 10 que la señal/ruido entre el Diseño original y el Diseño Robusto (RPD), para maximizar la MRR difiere en magnitud, esto es debido en el RPD los experimentos resultaron óptimos, por lo tanto se obtiene una ganancia significativa.

Tabla 10. Resultados de confirmación para MRR.

	S/N
Diseño Original (WEDM)	11.3276
Diseño Robusto (RPD)	19.1501

En la tabla 11 se observa que el Diseño Robusto (RPD), para minimizar Ra si tiene una diferencia moderada, esto se verá reflejado en la ganancia sobre el Diseño original.

Tabla 11. Resultados de confirmación para Ra.

	S/N
Diseño Original (WEDM)	-43.9362
Diseño Robusto (RPD)	-41.8796

Conclusiones

La selección del diseño de experimentos (DOE) brindó los niveles óptimos de mecanizado en WEDM con la selección correcta y una excelente metodología como lo es RPD del Dr. Taguchi generando así calidad en el producto, y con repercusiones en el costo total, robusteciendo el proceso

ante la posible variación de la dureza en las probetas de aluminio 6061, se optimizaron y confirmaron los resultados.

Con la interpolación de los valores de S/N y la Figura 7. La reducción de variabilidad queda de acuerdo a lo mostrado dentro de la tabla 12:

Tabla 12. Ganancia para MRR.

	Ganancia (db)
DiseñoRobusto (RPD)	57%

Para el caso de que el proceso necesite un régimen de desbaste maximizando la tasa de remoción de materia, la ganancia esperada con el este diseño robusto es de **57%** tal y como se puede ver en la tabla 13. Esto se

traduce en más de la mitad del tiempo de maquinado reducido arrojando valores óptimos de operación y, minimizando el gasto de insumos.

Tabla 13. Ganancia para Ra.

	Ganancia (db)
DiseñoRobusto (RPD)	21%

En el caso que el proceso necesite de un régimen de Acabado fino, se minimiza la Rugosidad superficial aplicando Diseño robusto (RPD) se obtiene una ganancia sobre el Diseño original arrojado por la máquina de 21%; esto quiere decir que la característica de calidad Ra. Estos valores reflejan una disminución en el desgaste de herramientas, desviaciones con respecto a especificaciones y, se tiene un mayor control del proceso.

También por medio del RPD se pudo comprobar las interacciones fuertes que se tienen en los factores de control y son:

Duración de impulsión (pulso on time) “A”
y Velocidad de Alimentación del hilo “Ws”

Tiempo entre impulsos (pulso off time) “B”
y Velocidad de Alimentación del hilo “Ws”

Referencias

Taguchi, G. (1993). Taguchi on robust technology development: Bringing quality engineering upstream. New York: ASME Press.

Mahapatra, S., & Patnaik, A. (January 01, 2007). Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34, 9-10.

Kuehl, R. O. (2001). Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. México [etc.: Thomson Learning.

Liao, Y. S., Huang, J. T., & Su, H. C. (January 01, 1997). A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining. Journal of Materials Processing Tech, 71, 3, 48