

## MSISU EN LA SOLUCIÓN DE COMPROMISO DE PARÁMETROS PARA EL FRESADO A ALTA VELOCIDAD

MSc. Ing. Hiovanis Castillo Pantoja<sup>1</sup>MSc. Ángel Infante Haynes<sup>2</sup>Dr. C. Roberto Pérez Rodríguez<sup>3</sup>Dr. C. Ricardo Lorenzo Ávila Rondón<sup>4</sup>

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Hiovanis Castillo Pantoja, Ángel Infante Haynes, Roberto Pérez Rodríguez y Ricardo Lorenzo Ávila Rondón (2021): "Msisu en la solución de compromiso de parámetros para el fresado a alta velocidad", Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCO DS, n. 25 (p.p. 1-16, noviembre2021). En línea:

<https://www.eumed.net/es/revistas/rilcoDS/25-noviembre21/msisu-fresado>

### RESUMEN

En el proceso de maquinado de piezas de aleaciones de aluminio se destacan las de estructura delgadas en la industria del automovilismo, aeroespacial, la industria militar caracterizado por una buena homogeneidad y resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y de masa. En la manufactura de estas aparece principalmente el arranque de gran volumen de material, a partir de ello se hace necesario garantizar una buena calidad y altas producciones. Una de las vías de alcanzar este propósito se basa fundamentalmente en establecer el mejor compromiso de los parámetros de maquinado. El siguiente trabajo se realiza con el objetivo de seleccionar la mejor solución de compromiso de los parámetros en el proceso de fresado a alta velocidad, empleando Método Secuencial Interactivo para Sistemas Urbanos (MSISU). Como resultado se obtiene un modelo de la selección de la mejor alternativa con los parámetros óptimos para el proceso de fresado a alta velocidad en piezas de estructura delgadas con material de aleaciones de aluminio AL7075.

**Palabras claves:** Paredes delgadas, Fresado Alta velocidad, MSISU, Al7075.

### MSISU IN THE TRADE-OFF OF PARAMETERS FOR THE DRILLED TO HIGH VELOCITY

<sup>1</sup> Universidad de Holguín, Cuba [sotosilva@nauta.cu](mailto:sotosilva@nauta.cu) <https://orcid.org/0000-0003-0091-0904>

<sup>2</sup> Universidad de Holguín, Cuba [ainfantehaynes@gmail.com](mailto:ainfantehaynes@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-6462-5339>

<sup>3</sup> Universidad de Holguín, Cuba [roberto.perez@uho.edu.cu](mailto:roberto.perez@uho.edu.cu) <https://orcid.org/0000-0001-5741-5168>

<sup>4</sup> Universidad de Cahuila, México [rlar001@yahoo.com](mailto:rlar001@yahoo.com) <https://orcid.org/0000-0001-6730-5789>

## ABSTRACT

In the process of machined they stand out of aluminum pieces of alloys give them structure thin at motoring's industry, aerospace, the military industry characterized by a good homogeneity and resistance to corrosion, mechanical and mass properties. The start of great volume of material, as from it appears principally in the manufacture of the same to guarantee a good quality and loud productions becomes necessary. One of the roads to attain this purpose has a base fundamentally in establishing the best commitment of the parameters of machined. The following work comes true for the sake of selecting the best trade-off of the parameters in the process of once tall gear was drilled, using Sequential Interactive Method for Systems Urban (MSISU). As a result you get a model from the selection of the best alternative with the optimal parameters for the process of drilled to loud velocity in pieces of structure thin with material of alloys of aluminum AL7075.

**Keywords:** Thin walled, High Speed Milling, SIMUS, Al7075.

## INTRODUCCIÓN

La producción industrial requiere cada día más que los productos tengan mejores propiedades mecánicas, de peso, precios relativamente bajos y una buena maquinabilidad, entre ellos se encuentran las aleaciones de aluminio.

En los estudios e investigaciones realizadas se señala un ascenso en los requerimientos para la fabricación de piezas de estructuras delgadas de aluminio para la industria aérea, aeroespacial, automovilística y militar. (Dejan Lukic, 2020). Los temas de mayor relevancia son: La optimización del diseño, la reducción de la masa, las deformaciones, los procesos de planeación de fabricación para incrementar la productividad y costos eficientes. Para el desarrollo de la investigación las variables a estudiar son: la exactitud dimensional, de forma, superficie y calidad de maquinado.

Por lo anterior, al emplear parámetros óptimos en el maquinado a alta velocidad se logran altos niveles de productividad con la exactitud y calidad requerida. "Por otra parte, debido a la rigidez baja de paredes delgadas, es también recomendado para evitar la apariencia de vibraciones y las deformaciones, lo cual puede causar errores en el maquinado, baja calidad, y la apariencia de pequeña cantidad de desechos" (Lukic, 2020, pág. p.2). Los principales parámetros que inciden en el maquinado en piezas de estructura delgada se muestran en la Figura 1.

### **Figura. 1.**

*Principales parámetros que influyen en el maquinado de las piezas de estructura delgadas.*



Fuente: (Lukic, 2020, pág. p.2).

De acuerdo con (Yusup, 2012) la teoría de optimización como una disciplina científica tiene una aplicación enorme en solucionar problemas diversos de ingeniería, donde la aplicación de métodos apropiados en búsqueda de la mejor solución para el objeto seleccionado a mejorar en ciertas condiciones basadas en uno o más criterios de optimización. Los parámetros de las máquinas herramientas es su mayoría constituyen una de las variables que se optimiza dentro de los procesos de mecanizado. Los parámetros óptimos, son tomados a partir de la mejor solución de la función objetivo resultado de la investigación experimental, con la aplicación de vías simples o multicriterios, las técnicas de simulación, y su combinación.

El objeto de investigación de este trabajo es determinar la calidad de los parámetros de maquinado con el mejor compromiso según las distintas restricciones para el fresado de alta velocidad en aleaciones de aluminio AL7075. Basados en los estudios experimentales y los resultados obtenidos, se decide aplicar el método de toma de decisiones bajo múltiples criterios (MCDM), seleccionado la mejor alternativa que cumpla satisfactoriamente el compromiso según las restricciones planeadas en la operación de fresado a alta velocidad.

“Método Secuencial Interactivo para Sistemas Urbanos (MSISU). Ha sido probado en diversos tipos de proyectos. El método se basa en la programación lineal y el algoritmo SIMPLEX. (Munier, 2019, p.101).

## Materiales y Métodos

*Definición de las tareas de optimización. Caso de estudio.*

El caso de estudio de esta investigación es una estructura lineal de paredes delgadas de aleación de aluminio con un espesor de pared de  $a = 0,5-1,5$  mm y una altura de pared de 30 mm. Como resultado de estas investigaciones, se seleccionaron los siguientes parámetros de entrada: espesor de pared (a), número de revoluciones (n), velocidad de avance (f), profundidad de corte ( $\delta$ ) y estrategia de trayectoria de la herramienta (TPS); mientras se midieron y calcularon los parámetros de salida: tiempo de mecanizado (T) / tasa de remoción de material (MRR), desviación del espesor de la pared ( $\Delta a$ ), desviación de la superficie ( $\Delta b$ ), desviación del paralelismo ( $\Delta c$ ), desviación perpendicular ( $\Delta d$ ) y rugosidad superficial (Ra). (Lukic, 2020).

“La principal tarea se refiere a la determinación de los parámetros de mecanizado con mejor compromiso con la función objetivo que permita al fabricar las piezas de paredes delgadas lograr una alta productividad, la precisión de las medidas, la calidad del mecanizado, la precisión de la forma y la posición de la superficie. La estructura jerárquica del problema de optimización consta de los siguientes elementos:

- Función objetivo: Niveles óptimos de parámetros de mecanizado de las piezas de pared delgada de tipo lineal de aleación de aluminio desde el punto de vista de alta productividad, precisión y calidad de mecanizado;
- Criterios de compromiso: parámetros de salida del proceso de mecanizado (MRR,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$ ,  $\Delta d$ , y Ra);
- Variantes alternativas: combinaciones seleccionadas-niveles de parámetros de entrada del proceso (a, n, f,  $\delta$  y TPS) basado en el plan experimental diseñado.
- Suponiendo que las relaciones matemáticas de los parámetros de entrada y los rendimientos de los procesos son complejos y no lineales, se eligieron tres niveles de variación para cada parámetro Tabla 1. Al elegir los valores de los parámetros, las recomendaciones de la literatura técnica y las tecnológicas son las limitaciones de la máquina, las herramientas, características del material de la pieza de trabajo.” (Lukic, 2020, p. 7).

**Tabla 1.**

*Parámetros de corte para fresado a alta velocidad.*

Parámetros	Unidad	Niveles		
		1	2	3
Número de revoluciones(n)	rpm	6000	12000	24000
Avance (f)	mm/min	600	1200	2400
Profundidad de corte ( $\sigma$ )	mm	1	2	3
Estrategia recorrido de herramienta	-	climp	convencional	mixto
Espesor de pared	mm	0.5	1.0	1.5

**Fuente:** (Lukic, 2020)

El análisis experimental se realizó con la metodología Taguchi (Ghani, 2004), la cual se aplica a menudo en la optimización de los procesos de producción y en el centro CNC (Center of Numerical Control) de fresado a alta velocidad vertical, DIGMA HSC 850. La Tabla 2 recoge los parámetros de entrada y salida del análisis experimental.

**Tabla 2.**

*Relación de las alternativas obtenidas a partir del estudio experimental.*

No.	Input Parameters				Output Parameters—Optimization Criteria							
	a mm	n rpm	f mm/min	δ mm	TPS -	T hh:mm:ss	MRR mm <sup>3</sup> /min	Δa mm	Δb mm	Δc mm	Δd mm	Ra μm
1	0.5	6000	600	1	1	00:36:40	2262.252	0.0420	0.03875	0.0690	0.0840	0.2500
2	0.5	6000	1200	2	2	00:11:30	7213.043	0.0240	0.12725	0.2415	0.3830	1.3100
3	0.5	6000	2400	3	3	00:19:29	4257.558	0.0260	0.04925	0.0845	0.1220	0.8300
4	0.5	12,000	600	2	3	00:21:06	3931.280	0.0160	0.04850	0.1035	0.1160	0.8425
5	0.5	12,000	1200	3	1	00:42:10	1967.178	0.0160	0.03475	0.0645	0.0925	0.3375
6	0.5	12,000	2400	1	2	00:09:16	8951.117	0.0220	0.06475	0.1085	0.1015	0.8600
7	0.5	24,000	600	3	2	00:47:16	1754.924	0.0120	0.04175	0.1160	0.1335	0.4100
8	0.5	24,000	1200	1	3	00:17:17	4799.514	0.0260	0.03375	0.0875	0.1195	0.3950
9	0.5	24,000	2400	2	1	00:08:37	9626.320	0.0380	0.03975	0.0685	0.1000	0.2925
10	1.0	6000	600	2	2	00:22:33	3631.929	0.0600	0.05750	0.1355	0.1250	1.5325
11	1.0	6000	1200	3	3	00:29:03	2819.277	0.0380	0.02525	0.1355	0.1730	0.5800
12	1.0	6000	2400	1	1	00:11:23	7194.940	0.0100	0.02050	0.1135	0.1170	0.5100
13	1.0	12,000	600	3	1	01:03:54	1281.690	0.0080	0.01150	0.0890	0.0940	0.1375
14	1.0	12,000	1200	1	2	00:17:46	4609.670	0.0560	0.02375	0.0600	0.1090	0.6325
15	1.0	12,000	2400	2	3	00:05:28	14,980.790	0.0260	0.03650	0.0905	0.1510	1.0050
16	1.0	24,000	600	1	3	00:28:03	2919.786	0.0420	0.01650	0.1305	0.1195	0.1850
17	1.0	24,000	1200	2	1	00:12:00	6825.000	0.0280	0.01550	0.0790	0.1405	0.1925
18	1.0	24,000	2400	3	2	00:23:00	3560.870	0.0360	0.02475	0.0960	0.1060	0.3050
19	1.5	6000	600	3	3	00:58:06	1391.566	0.0240	0.26175	0.0925	0.2325	0.2575
20	1.5	6000	1200	1	1	00:17:49	4537.801	0.0140	0.27300	0.2115	0.3290	0.3825
21	1.5	6000	2400	2	2	00:06:13	13,004.660	0.0660	0.31675	0.3165	0.4715	1.9800
22	1.5	12,000	600	1	2	00:31:23	2576.236	0.0400	0.28875	0.2180	0.3335	1.1600
23	1.5	12,000	1200	2	3	00:11:17	7165.647	0.0160	0.29850	0.2790	0.4590	1.3275
24	1.5	12,000	2400	3	1	00:21:59	3677.842	0.0100	0.27100	0.1790	0.2725	0.4075
25	1.5	24,000	600	2	1	00:21:33	3751.740	0.0100	0.27100	0.3480	0.3215	0.1500
26	1.5	24,000	1200	3	2	00:35:27	2280.677	0.0120	0.27875	0.2615	0.4245	0.2725
27	1.5	24,000	2400	1	3	00:08:18	9740.964	0.0120	0.27475	0.2100	0.3400	0.5050

**Fuente:** (Lukic, 2020)

El método SIMUS fue desarrollado para que funcione con tantos objetivos como sean necesarios al nivel de centenares, y aceptando criterios cualitativos. No reporta en sus resultados una solución óptima, sino que como otros métodos; establece un compromiso que se basa en una matriz de Pareto eficiente, utilizando en su solución suma ponderada. (Munier, 2019, p. 118)

De acuerdo con (Haynes, Orlando, 2021) el método SIMUS, al ejecutar las tres 3 fases: Análisis, Síntesis y Evaluación, busca mejorar la gestión de la información, logrando mejor fiabilidad en sus soluciones con un menor grado de incertidumbre del centro decisor, esto hace que se eleve el nivel de fiabilidad de las selecciones. Otro criterio positivo, está la aplicación de hipótesis de equivalencias, con lo que se permite comprobaciones, usando modelos para un mismo caso, alcanzándose una consonancia de resultados, que probablemente corresponderán con la mejor solución.

“El método consiste en resolver sucesivos escenarios formulados como programas lineales. Para cada escenario el decisor debe seleccionar el criterio que será considerado como objetivo, mientras que los restantes constituirán el sistema de restricciones a los que están sujetos los proyectos, si existiera una solución factible óptima se registra en una matriz de resultados eficientes. Luego; a partir de esta matriz, se obtienen mediante procedimientos diferentes dos rankings u ordenamientos

Msisu en la solución de compromiso de parámetros para el fresado a alta velocidad que permiten al decisor comparar resultados. El primer ordenamiento se logra mediante una ponderación lineal de cada proyecto mediante un factor que equivale a establecer un peso y que mide la participación del correspondiente proyecto. Para obtener el segundo ordenamiento, el método utiliza relaciones de dominación y subordinación entre proyectos. Para cada escenario se debe seleccionar el criterio que será considerado como objetivo, mientras que los restantes constituirán el sistema de restricciones de cada programa lineal. En cada caso, si existe una solución factible óptima, ésta se registra en una matriz, cuyos elementos, por estar constituidos por resultados óptimos, la definen como Pareto eficiente. Se selecciona un criterio como objetivo y se resuelve el programa lineal; el resultado obtenido se guarda en una matriz y el objetivo se restaura al sistema de restricciones como criterio. Este procedimiento continúa hasta que todos los criterios que el decisor haya seleccionado como objetivos se hayan considerado, esta matriz tendrá tantas filas como objetivos y tantas columnas como proyectos evaluados. Al encontrar una solución viable, estamos en presencia de la óptima, es por eso que utiliza esta propiedad para construir una matriz de resultado eficientes (ERM), para luego encontrar un compromiso, o solución de compromiso para problemas de múltiples objetivos. El análisis de sensibilidad muestra los precios sombra, estos se obtienen como el dual del problema primal para cada objetivo. El análisis de sensibilidad sí utiliza estos precios sombra o utilidades marginales, para graficar cómo varía el objetivo cuando se aumentan o disminuyen los criterios en forma simultánea, dibujando una curva de utilidad. Esto nos indica la importancia relativa de acuerdo con el objetivo, siendo independiente de las elecciones, conjeturas y preferencias, no es necesario ponderar los criterios, la programación lineal se encarga de esto". (Infante, Orlando, 2021, p. 3).

A partir del análisis bibliográfico SIMUS lo encontramos aplicados en varias de áreas, las principales los relacionamos a continuación:

- ✓ Cuando hay dependencia de proyectos.
- ✓ Cuando existe alianza de proyectos (negocios conjuntos)
- ✓ Cuando hay proyectos exclusivos.
- ✓ Cuando es necesario tener resultado en números enteros.
- ✓ Cuando es necesario clasificar proyectos en una cartera.
- ✓ Cuando hay escases de fondos, para ejecutar proyectos.
- ✓ Cuando los proyectos están relacionados con la disponibilidad de fondos.

*Pasos para seguir para la aplicación del método SIMUS.*

Como explica (Infante, Orlando, 2021), el método se desarrolla por cuatro pasos, sobre la base de 14 ecuaciones que se describen a continuación respectivamente:

*Construcción de la matriz de decisión*

$$P = [P_j]; j = (1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$C = [C_j]; j = (1,2, \dots, n) \quad (2)$$

Donde:

P : Son los diferentes proyecto en nuestro casos las diferentes zonas en estudios.

C: Serán entoces los diferentes criterios, que seran convertido en objetivos.

Matriz de datos:

$$A = [a_{ij}] \quad (3)$$

Donde los elementos  $a_{ij}$  expresan los aportes negativos o positivos de cada proyecto (j) a cada criterio (i)

Al aplicar este método los criterios tienen una doble función, según su empleo, es decir que un La función a optimizar en cada escenario, será uno de los s criterio-objetivo y los valores de las variables  $x_{rj}$  indicarán la participación del j-ésimo proyecto cuando el r-ésimo criterio se escoge como función objetivo-criterio, de acuerdo a cómo se use, puede interpretarse como objetivo o como restricción.

$$X = [X_{rj}]; \quad r = 1,2, \dots, s \quad (4)$$

#### *Matriz de Resultados Eficientes*

La solución óptima de cada programa lineal, si existe, se transcribe a una matriz denominada de resultados óptimos o de resultados eficientes (RE), la cual se define como Pareto eficiente.

$$RE = [X_{rj}] \quad (5)$$

Al ser normalizada por la suma, el modelo se quedaría de la siguiente forma:

$$REN = [X_{rj}] = \left[ \frac{x_{rj}}{\sum_j x_{rj}} \right] \quad (6)$$

A continuación se ejecuta dos procedimientos de ordenación con los resultados de la matriz normalizada.

#### *Primer procedimiento de ordenación:*

Se analiza la matriz REN en columna, sumando los valores que componen cada una, lo cual da el valor suma proyecto (SCj).

$$SC_j = \sum_r V_{rj} \quad j = 1, \dots, m \quad (7)$$

Y como cada proyecto participa en un número determinado de objetivos, se debe considerar, el grado de participación de cada uno, mediante el factor de participación ( $FP_j$ )

$$FP_j = \frac{q}{s} \quad (8)$$

Donde q es igual al número de veces que  $V_{rj} > 0$ , la proporción de veces que el proyecto j participó en los S, programas lineales.

Luego el valor de la puntuación de cada proyecto ( $VP_j$ ) a través del producto:

$$VP_j = SC_j * FP_j \quad j = 1, \dots, n \quad (9)$$

Este valor se utiliza para realizar el primer ordenamiento.

*Segundo procedimiento de ordenación.*

A partir de la matriz REN, para cada r-ésimo criterio-objetivo se comparan los proyectos de forma pareada, calculando la diferencia ( $\delta_{jk}^r$ ) entre los valores de los  $V_{rj}$  estos se hacen solamente para los casos en lo que estas diferencias sean positivas y se registran en una matriz  $D^r = [\delta_{jk}^r]$

$$\delta_{jk}^r = V_{rj} - V_{rk} ; \text{ si } V_{rj} \geq V_{rk} \quad j = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, m \quad (10)$$

Cada elemento  $\delta_{jk}^r$  de esta matriz puede interpretarse como la medida en que el proyecto j domina al proyecto k, en el r-ésimo criterio considerado, de esta manera se generan tantas matrices como criterios- objetivos se hayan propuesto, la suma de estas matrices dará como resultado una matriz de dominancia  $DO = [\delta_{jk}^r]$

$$d_{jk} = \sum_r \delta_{jk}^r \quad r = 1, \dots, s \quad (11)$$

Las filas de esta matriz corresponden a los proyectos dominantes en tanto las columnas identifican a los proyectos dominados, de igual forma la suma de las filas nos entrega el valor de dominancia del j-ésimo proyecto ( $\theta_j^+$ ), en tanto el valor de cada columna da el valor dominado ( $\theta_j^-$ ) del proyecto j.

$$\theta_j^+ = \sum_k d_{jk} \quad j = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$\theta_j^- = \sum_j d_{jk} \quad k = 1, \dots, m \quad (13)$$

Para lograr una ordenación se realiza la diferencia entre ambos valores o dominancia neta.

$$\theta_j = \theta_j^+ - \theta_j^- \quad (14)$$



Por lo que aquella alternativa que posea mayor valor de dominancia, será entonces la alternativa seleccionada.

## Resultados y Discusión

### *Aplicación de SIMUS. Mecanizado de las piezas de pared delgada*

#### *Primera Etapa. Definición de los criterios.*

Para determinar el mejor compromiso entre los parámetros de mecanizado de las piezas de pared delgada, es necesario definir correctamente los criterios a emplear y luego determinar la mejor alternativa que cumpla con las restricciones. Como se elimina una gran cantidad de material en el proceso de producción de estas piezas, es necesario lograr una alta productividad y, al mismo tiempo, la mejor calidad y precisión en el proceso de mecanizado. Para ello, los criterios elegidos son:

- EP - Espesor de la pared.(mm)
- RPM - Número de revoluciones (rpm)
- S - Avance (mm/min)
- PC - Profundidad de corte (mm).
- TH - Trayectoria de la herramienta.
- TM - Tiempo de maquinado (hh:mm:ss).
- RMM - Volumen de material a remover (mm<sup>3</sup>/min).
- a - Desviación de espesor de la pared (mm).
- b - Desviación horizontal (mm).
- c - Desviación paralelismo (mm)
- d - Desviación perpendicular (mm)
- Ra – Rugosidad superficial (µm).

#### **Figura 2.**

*Ventana inicial de la aplicación SIMUS, con nombre del proyecto.*



Segunda Etapa Determinación de las alternativas.

Tabla 3.

Matriz Máxima Normalizada.

Matriz Euclidean Normalizada (LHS) y RHS							
Criterios/Targets	Projects						
	Art 1	Art 2	Art 3	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7
EP	0.33	0.35	0.38	0.41	0.33	0.44	0.38
RPM	0.13	0.26	0.26	0.26	0.51	0.51	0.51
S	0.53	0.13	0.26	0.53	0.13	0.26	0.53
PC	0.35	0.18	0.35	0.53	0.35	0.53	0.18
TH	0.56	0.19	0.37	0.37	0.56	0.19	0.19
TM	0.12	0.54	0.19	0.38	0.36	0.61	0.14
RMM	0.10	0.19	0.52	0.27	0.27	0.17	0.71
a	0.81	0.49	0.20	0.12	0.12	0.15	0.15
b	0.42	0.38	0.39	0.36	0.36	0.37	0.36
c	0.45	0.31	0.40	0.26	0.50	0.37	0.30
d	0.47	0.33	0.46	0.27	0.32	0.42	0.34
Ra	0.26	0.15	0.17	0.53	0.20	0.36	0.66

Fuente: Elaboración propia.

Primer paso: Construcción de la matriz de decisión (Tabla 4), el subíndice **EscX** representa las alternativas a revisar, se puede apreciar que son tres objetivos para maximizar, y 9 a minimizar.

Figura 3.

Segunda ventana de SIMUS, se establecen los valores de precisión, convergencia y tolerancia.

**Tabla 4.**

*Matriz de decisión.*

Criterios/Objetivos	Esc1	Esc2	Esc3	Esc4	Esc5	Esc6	Esc7	Acción
Espesor de la pared	1.1	1.2	1.3	1.4	1.1	1.3	1.5	Min
Número de revoluciones	6000.0	12000.0	12000.0	12000.0	24000.0	24000.0	24000.0	Max
Avance	2400.0	600.0	1200.0	2400.0	600.0	1200.0	2400.0	Max
Profundidad de Corte	2.0	1.0	2.0	3.0	2.0	3.0	1.0	Min
Trayectoria de la herramienta	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	1.0	Min
Tiempo de maquinado	0.0043	0.0218	0.0078	0.0153	0.0150	0.0246	0.0058	Min
Volumen de material a remover	13004.6600	2576.2360	7165.6470	3677.8420	3751.7400	2280.6770	9740.9640	Max
Desciación de espesor de pared	0.0660	0.0400	0.0160	0.0100	0.0100	0.0120	0.0120	Min
Desviación horizontal	0.3168	0.2888	0.2985	0.2710	0.2710	0.2788	0.2748	Min
Desviación paralelismo	0.3165	0.2180	0.2790	0.1790	0.3480	0.2615	0.2100	Min
Desviación vertical	0.4715	0.3335	0.4590	0.2725	0.3215	0.4245	0.3400	Min
Rugosidad superficial	1.9800	1.1600	1.3275	0.4075	0.1500	0.2725	0.5050	Min

**Tercera Etapa Determinación de las estrategias y variantes.**

**Tabla 5.**

*Matriz normalizada (Cardinal values in the decision matrix) LHS y (Thresholds, Limits or Right Hand Side) RHS.*

Criterios/Objetivos	Matriz Euclidean Normalizada (LHS) y RHS								RHS values
	Projects	MCDMSIMUS							
	Art 1	Art 2	Art 3	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7	Operator	
EP	0.33	0.35	0.38	0.41	0.33	0.44	0.38	≥	0.33
RPM	0.13	0.26	0.26	0.26	0.51	0.51	0.51	≤	0.51
S	0.53	0.13	0.26	0.53	0.13	0.26	0.53	≤	0.53
PC	0.35	0.18	0.35	0.53	0.35	0.53	0.18	≥	0.18
TH	0.56	0.19	0.37	0.37	0.56	0.19	0.19	≥	0.19
TM	0.12	0.54	0.19	0.38	0.36	0.61	0.14	≥	0.12
RMM	0.10	0.19	0.52	0.27	0.27	0.17	0.71	≤	0.71
a	0.81	0.49	0.20	0.12	0.12	0.15	0.15	≥	0.12
b	0.42	0.38	0.39	0.36	0.36	0.37	0.36	≥	0.36
c	0.45	0.31	0.40	0.26	0.50	0.37	0.30	≥	0.26
d	0.47	0.33	0.46	0.27	0.32	0.42	0.34	≥	0.27
Ra	0.26	0.15	0.17	0.53	0.20	0.36	0.66	≥	0.15

La Tabla 6 presenta los modelos de optimización lineal con la función objetivo y las condiciones de restricción basados en método SIMUS para la primera y segunda interacción. Inicialmente para el primer criterio es utilizado como la función objetivo. Las condiciones de restricción son presentadas por las demás filas de la matriz normalizada.

**Tabla 6.**

*Modelos lineales.*

<b>Modelo lineal para el primer criterio</b>	<b>Modelo lineal para el segundo criterio</b>
Función objetivo:	Función objetivo:
$0.33X_1 + 0.35X_2 + 0.38X_3 + 0.41X_4 + 0.33X_5 + 0.44X_6 + 0.38X_7 \rightarrow \min$	$0.13X_1 + 0.26X_2 + 0.26X_3 + 0.51X_4 + 0.26X_5 + 0.51X_6 + 0.51X_7 \rightarrow \max$
Condiciones de restricción	Condiciones de restricción
$0.13X_1 + 0.26X_2 + 0.26X_3 + 0.51X_4 + 0.26X_5 + 0.51X_6 + 0.51X_7 \leq 0.51$	$0.33X_1 + 0.35X_2 + 0.38X_3 + 0.41X_4 + 0.33X_5 + 0.44X_6 + 0.38X_7 \geq 0.33$

$0.51X_7 \leq 0.33$	$0.38X_7 \geq 0.33$
$0.53X_1+0.13X_2+0.26X_3+0.53X_4+0.13X_5+0.26X_6+0.53X_7 \leq 0.53$	$0.53X_1+0.13X_2+0.26X_3+0.53X_4+0.13X_5+0.26X_6+0.53X_7 \leq 0.53$
$0.35X_1+ 0.18X_2+0.35X_3 + 0.53X_4+ 0.35X_5+ 0.53X_6+ 0.18X_7 \geq 0.18$	$0.35X_1+ 0.18X_2+0.35X_3 + 0.53X_4+ 0.35X_5+ 0.53X_6+ 0.18X_7 \geq 0.18$
$0.56X_1+ 0.19X_2+ 0.37X_3 + 0.37X_4+ 0.56X_5+ 0.19X_6+ 0.19X_7 \geq 0.19$	$0.56X_1+ 0.19X_2+ 0.37X_3 + 0.37X_4+ 0.56X_5+ 0.19X_6+ 0.19X_7 \geq 0.19$
$0.12X_1+ 0.54X_2+ 0.19X_3 + 0.38X_4+ 0.36X_5+ 0.61X_6+ 0.14X_7 \geq 0.12$	$0.12X_1+ 0.54X_2+ 0.19X_3 + 0.38X_4+ 0.36X_5+ 0.61X_6+ 0.14X_7 \geq 0.12$
$0.10X_1+ 0.19X_2+ 0.52X_3 + 0.27X_4+ 0.27X_5+ 0.17X_6+ 0.71X_7 \leq 0.71$	$0.10X_1+ 0.19X_2+ 0.52X_3 + 0.27X_4+ 0.27X_5+ 0.17X_6+ 0.71X_7 \leq 0.71$
$0.81X_1+ 0.49X_2+ 0.20X_3 + 0.12X_4+ 0.12X_5+ 0.15X_6+ 0.15X_7 \geq 0.12$	$0.81X_1+ 0.49X_2+ 0.20X_3 + 0.12X_4+ 0.12X_5+ 0.15X_6+ 0.15X_7 \geq 0.12$
$0.42X_1+ 0.38X_2+ 0.39X_3 + 0.36X_4+ 0.36X_5+ 0.37X_6+ 0.36X_7 \geq 0.36$	$0.42X_1+ 0.38X_2+ 0.39X_3 + 0.36X_4+ 0.36X_5+ 0.37X_6+ 0.36X_7 \geq 0.36$
$0.45X_1+ 0.31X_2+ 0.40X_3 + 0.26X_4+ 0.50X_5+ 0.37X_6+ 0.30X_7 \geq 0.26$	$0.45X_1+ 0.31X_2+ 0.40X_3 + 0.26X_4+ 0.50X_5+ 0.37X_6+ 0.30X_7 \geq 0.26$
$0.47X_1+ 0.33X_2+ 0.36X_3 + 0.27X_4+ 0.32X_5+ 0.42X_6+ 0.34X_7 \geq 0.27$	$0.47X_1+ 0.33X_2+ 0.36X_3 + 0.27X_4+ 0.32X_5+ 0.42X_6+ 0.34X_7 \geq 0.27$
$0.26X_1+ 0.15X_2+ 0.17X_3 + 0.53X_4+ 0.20X_5+ 0.36X_6+ 0.66X_7 \geq 0.15$	$0.26X_1+ 0.15X_2+ 0.17X_3 + 0.53X_4+ 0.20X_5+ 0.36X_6+ 0.66X_7 \geq 0.15$

Los resultados de optimización por el primer criterio son guardados en la primera fila de los valores de la matriz de resultados eficientes (ERM); los resultados para la relación de maximizar y minimizar beneficios del segundo criterio son guardados en la segunda fila la matriz (ERM), Tabla 7. El procedimiento es aplicado consistentemente a todos los criterios. Para esta investigación se utilizó el programa SIMUS versión 1.3-1, con el método de optimización lineal.

**Tabla 7.**  
*Matriz ERM.*

		Efficient Results Matrix (ERM)						
		Art 1	Art 2	Art 3	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7
EP		0.82	0.04					
RPM						1.98	1.01	
S		4.00						
PC		0.03	0.89					0.01
TH			0.90				0.03	0.01
TM		0.46						0.46
RMM				2.00		0.00		
a					0.00	1.00		
b		0.03			0.20		0.53	
c			0.00		1.00			
d			0.00		1.00	0.00		
Ra			0.87	0.06				

**Tabla 8.**

*Matriz ERM Normalizada.*

		Efficient Results Matrix (ERM) Normalized						
		Art 1	Art 2	Art 3	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7
EP		0.95	0.05					
RPM						0.66	0.34	
S		1.00						
PC		0.03	0.95					0.01
TH			0.96				0.03	0.01
TM		0.50						0.50
RMM				1.00				
a						1.00		
b		0.03			0.26		0.71	
c					1.00			
d					1.00			
Ra			0.93	0.07				
Sum of Column (SC)		2.52	2.89	1.07	2.26	1.66	1.07	0.52
Participation Factor (PF)		5	4	2	3	2	3	3
Norm. Participation Factor (NPF)		0.42	0.33	0.17	0.25	0.17	0.25	0.25
<b>Final Result (SC x NPF)</b>		<b>1.05</b>	<b>0.96</b>	<b>0.18</b>	<b>0.57</b>	<b>0.28</b>	<b>0.27</b>	<b>0.13</b>

ERM Ranking

Art 1 - Art 2 - Art 4 - Art 5 - Art 6 - Art 3 - Art 7

La alternativa 1 es la mejor según con 5 criterios: EP, S, PC, TM y b. Le sigue la número 2, con 4 criterios: EP, PC, TH, Ra. La tercera alternativa mejor es la 4 con 3 criterios: b (Desviación horizontal), c (Desviación horizontal), d Desviación perpendicular.

**Tabla 9.**

*Matriz de dominio de proyectos (PDM).*

		Project Dominance Matrix (PDM)								
		Dominated projects								
Dominant proj.		Art 1	Art 2	Art 3	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7	Row sum of dominant projects	Net dominance
Art 1			2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	14.4	5.6
Art 2		2.8		2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	17.2	8.3
Art 3		1.1	1.0		1.1	1.1	1.1	1.1	6.3	-4.5
Art 4		2.2	2.3	2.3		2.3	2.0	2.3	13.3	3.8
Art 5		1.7	1.7	1.7	1.7		1.3	1.7	9.6	-0.4
Art 6		1.0	1.0	1.1	0.8	0.7		1.1	5.8	-4.5
Art 7		0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		2.6	-8.4
Column sum of dominated projects		8.8	8.9	10.9	9.4	10.0	10.3	10.9		
<b>PDM Ranking</b>		<b>Art 2 - Art 1 - Art 4 - Art 5 - Art 6 - Art 3 - Art 7</b>								

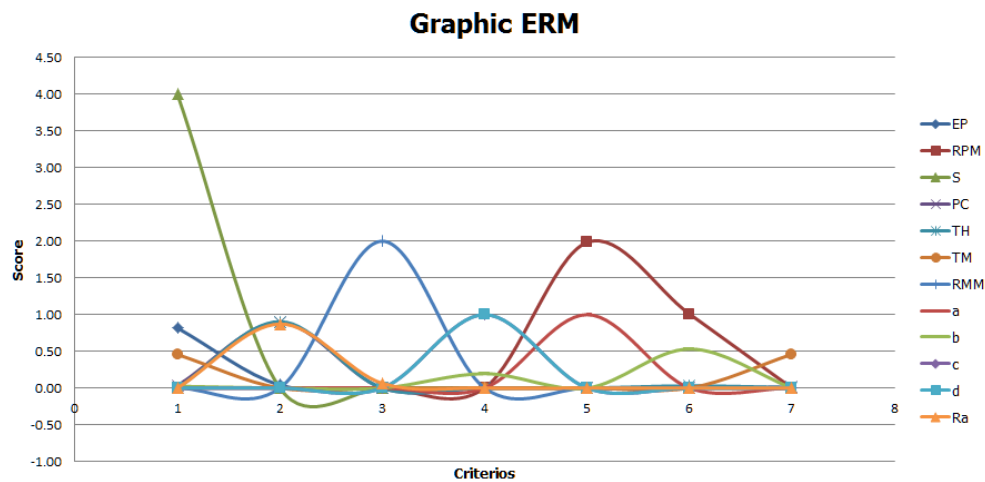
La Tabla 8 presenta los resultados del ranking ERM. Se aprecia que la alternativa 2 es la mejor por 6 criterios, le sigue la alternativa 1 satisface 6 criterios. Este resultado también no se demuestra a través del factor de participación (PF) en la Tabla 8, ya que da a la alternativa 1 como la mejor. El máximo valor de la suma de las columnas (SC) tiene la alternativa 2 donde se enfoca en los criterios que afectan la estabilidad y la ocurrencia de vibraciones en fresado de piezas de estructuras delgadas. El valor del factor máximo normalizado NPF le corresponde a la alternativa 1, con la participación de 5 factores. El total de criterios es 12 y se encuentra dentro del cálculo de NPF. El ranking ERM se muestra de la siguiente forma: Alternativa 1 – Alternativa 2 – Alternativa 4.

La Tabla 9 se aprecia el ranking PDM. De los criterios de ranking, la red de dominancia se muestra en la columna final. La alternativa 2 tiene el mayor dominio con un valor de 8.3. La segunda alternativa con mejor subordinación es la 1 con un valor de 5.6 y la tercera es la alternativa 4 con un valor de 3.8. Los resultado que muestran que la alternativa 2 tiene el valor superior de la red de dominio y es la mejor en la solución propuesta. La última fila de la tabla presenta el ranking PDM.

Se aprecia que en ambos rankings ERM y PDM el orden cambia a pesar de que si están las mismas alternativas, no es normal para el método SIMUS, en realidad significa un problema de la aproximación de los métodos y considerando que es a partir de ERP se emplean dos métodos completamente distintos, con las reglas aritméticas distintas de adición, mezclada con multiplicación y división en uno, y simples restas en el otro, y que suministran escores totalmente distintos. Desde el punto de vista de ranking de PDM es más seguro que el de ERM, para el caso se ve que en ERM los dos valores están cercanos en un 91 %, en tanto que en PDM en un 67 %. Es decir, PDM normalmente da más discriminación. Precisamente, esta discriminación es uno de los métodos de SIMUS para resolver los casos de iguales scores en dos alternativas. (Munier, 2021). En consecuencia, en el caso de estudio se adoptó el ranking de PDM.

**Figura 4.**

*Score de los criterios por alternativas.*



### **Análisis de la alternativa de mejor compromiso con los parámetros para el de fresado a alta velocidad en piezas de aluminio de estructura delgada.**

A partir de los parámetros para la fabricación de las piezas de estructura delgada con material correspondiente a la aleación de aluminio AL7075 aparecen en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Parámetros de caso de estudio para la fabricación de las piezas de estructura delgada con material correspondiente a la aleación de aluminio AL7075.*

	Art 1	Art 2	Art 4	Art 5	Art 6	Art 7
<b>EP</b>	<b>1.10</b>	<b>1.20</b>	<b>1.40</b>	<b>1.10</b>	<b>1.50</b>	<b>1.30</b>
<b>RPM</b>	<b>6000.00</b>	<b>12000.00</b>	<b>12000.00</b>	<b>24000.00</b>	<b>24000.00</b>	<b>24000.00</b>
<b>S</b>	<b>2400.00</b>	<b>600.00</b>	<b>2400.00</b>	<b>600.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>2400.00</b>
<b>PC</b>	<b>2.00</b>	<b>1.00</b>	<b>3.00</b>	<b>2.00</b>	<b>3.00</b>	<b>1.00</b>
<b>TH</b>	<b>3.00</b>	<b>1.00</b>	<b>2.00</b>	<b>3.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
<b>TM</b>	<b>7.00</b>	<b>31.00</b>	<b>22.00</b>	<b>21.00</b>	<b>35.00</b>	<b>8.00</b>
<b>RMM</b>	<b>1300.47</b>	<b>2576.24</b>	<b>3677.84</b>	<b>3751.74</b>	<b>2280.68</b>	<b>9740.96</b>
<b>a</b>	<b>0.66</b>	<b>0.40</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>
<b>b</b>	<b>0.32</b>	<b>0.29</b>	<b>0.27</b>	<b>0.27</b>	<b>0.28</b>	<b>0.27</b>
<b>c</b>	<b>0.32</b>	<b>0.22</b>	<b>0.18</b>	<b>0.35</b>	<b>0.26</b>	<b>0.21</b>
<b>d</b>	<b>0.47</b>	<b>0.33</b>	<b>0.27</b>	<b>0.32</b>	<b>0.42</b>	<b>0.34</b>
<b>Ra</b>	<b>0.20</b>	<b>0.12</b>	<b>0.41</b>	<b>0.15</b>	<b>0.27</b>	<b>0.51</b>

Al seleccionar el ranking PDM, y crear el mejor compromiso que establece el orden 2-1-4-5-6-3-7 de las alternativas, se busca una planeación de proceso para fabricar la pieza de AL7075 y llevarla desde el espesor de 1.5 mm hasta un valor mínimo de 1.1 mm, y así garantizar la calidad, estabilidad y propiedades mecánicas a la pieza final. Hay que tener en cuenta que existen otros factores o criterios dentro de la planeación de procesos que pueden influir en este resultado, pero en la investigación realizada no se ha tenido en cuenta y que pudieran constituir otros tipos de criterios que mejore la relación de compromiso para este tipo de problemas que ocurren en los procesos de fabricación con arranque de virutas.

## **CONCLUSIONES**

En el siguiente trabajo ha propuesto un modelo integrado para la selección de alternativa con los parámetros de fresado a alta velocidad en paredes delgadas de aleaciones de aluminio basado en el método SIMUS, Entropía. Introduciendo método de optimización lineal como nueva vía para la toma de decisiones en los procesos de planeación de fabricación de piezas por arranque de virutas.

Los doce criterios cuantitativos, buscan al fabricar las piezas de paredes delgadas con material de aleaciones de aluminio, una elevada productividad, costos eficientes, la exactitud dimensional de forma y superficie, calidad de maquinado y mejores propiedades mecánicas.

En el estudio ha permitido elaborar una metodología utilizando el método de optimización lineal y procedimiento SIMUS para obtener la mejor alternativa para el proceso de fresado a alta velocidad en pieza de aluminio.

La alternativa 1 es la mejor por ERM con 5 criterios y la alternativa 2 es la mejor por PDM, ellos contienen las funciones objetivo, para la investigación se incluyeron los siguientes criterios: respectivos a cada uno.

La metodología y la definición de otros tipos criterios pueden ser utilizados en el estudio de otros fenómenos importantes en los procesos de maquinado a alta velocidad con arranque de virutas, como el mismo fresado, torneado y taladrado; o en piezas de otras formas como: las simétricas circular o prismática y así como otros tipos de materiales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángel Eugenio Infante Haynes, O. B. (2021). *Optimización multicriterio- multiobjetivo, eslabón de unión: Método SIMUS*.
- Antonio Scippa, N. G. (2014). FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. *Procedia CIRP*, 6.
- Brans, j. V., & Mareschal, b. (1986). *How to select and how to rank projects: the Promethee method*.
- Dejan Lukic, R. C. (2020). Multi-Criteria Selection of the Optimal Parameters for High-Speed Machining of Aluminum Alloy Al7075 Thin-Walled Parts. *Metals*, 22.
- Infante Haynes, Á., & Orlando, B. (2021). *Artículos publicados*.
- Ingenio, M. -C.-C. (2019). *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making*.
- J.A. Ghani, I. C. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 84-92.
- Jozef Zajac, M. H. (2017). Experimental High Speed Milling of the Selected Thin-Walled Component. *TEM Journal*, 5.
- Lida Zhu, Y. D. (2016). Investigation on chatter stability of thin-walled parts in high-speed milling based on relative transfer functions. *Journal of Vibroengineering*, 14.
- Munier, N. (19 de Abril de 2021). Diferencia de los ranking en los métodos ERM y PDM en el estudio de la mejor compromiso de los parámetros para fresado a alta velocidad en piezas con material de aluminio y de estructura delgada. (H. C. Pantoja, Entrevistador)
- Nolberto Munier, E. F.-S. (2019). *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making. A Practical Guide for Complex Scenarios*. Valencia: Springer.
- Nolberto Munier, E. F.-S. (2019). *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making. A Practical Guide for Complex Scenarios* (Vol. 275). Valencia: Springer Nature Switzerland.
- Nolberto, M. (2011). Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples.
- R, N. (2020). *High Speed Machining*.
- Yusup, N. Z. (2012). Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011). 39.
- Zouhour Chourabi, F. K. (2018). Multi-Criteria decision making in workforce choice using AHP, WSM y WPM. *The Journal of the textile Instituted*, 11.