



## **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TORNEADO MULTIPASADA UTILIZANDO FRONTERA DE PARETO CON TRES OBJETIVOS**

**Ramón Quiza<sup>1</sup>, Marcelino Rivas<sup>2</sup>, Yarens J. Cruz<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS). Universidad de Matanzas.  
Autopista a Varadero km 3½, Matanzas, Cuba. Web: <http://cefas.umcc.cu>, Teléf.: +(53)45256812  
<sup>1</sup>e-mail: [ramon.quiza@umcc.cu](mailto:ramon.quiza@umcc.cu), <sup>2</sup>e-mail: [marcelino.rivas@umcc.cu](mailto:marcelino.rivas@umcc.cu), <sup>3</sup>e-mail: [yarens.cruz@umcc.cu](mailto:yarens.cruz@umcc.cu)

### **RESUMEN**

En el presente estudio se llevó a cabo la optimización de un proceso de torneado multi-pasada, considerando, simultáneamente, tres objetivos: el tiempo total de maquinado, el factor total de consumo herramental y la rugosidad de la superficie elaborada. Para la solución del problema, se utilizó el enfoque *a posteriori*, donde se obtiene, primeramente, la frontera de Pareto, formada por las soluciones no dominadas. Se tomaron, como variables de decisión, la profundidad de corte de la pasada de acabado, la cantidad de pasadas totales, y el avance y la velocidad tanto para las pasadas de desbaste como de la de acabado. Se tuvieron en cuenta, como restricciones, la potencia de corte admisible por el motor y la fuerza de corte, por la máquina. Para la optimización se empleó la heurística NSGA-II. A partir de la frontera de Pareto obtenida, se ejemplifican posibles tomas de decisiones, dependiendo de las condiciones concretas de trabajo.

**PALABRAS CLAVES:** Torneado multipasada, optimización multiobjetivo, frontera de Pareto.

### **MULTIPASS TURNING PROCESS OPTIMIZATION BY USING A THREE OBJECTIVES PARETO FRONT**

#### **ABSTRACT**

This work presents the optimization of a multipass turning process, considering, simultaneously, three objectives: the total machining time, the total tool waste factor, and the obtained Surface roughness. For solving the problem, it was used an *a posteriori* approach, where the Pareto front, which is composed by the non-dominated solutions, is firstly obtained. As decision variables, were chosen the depth of cut in the finishing pass, the number of total passes, and the feed and cutting speed for both passes types. As constraints, they were considered the cutting power allowed by the motor and the cutting force allowed by the machine-tool. For optimizing, the NSGA-II heuristic was used. From the obtained Pareto front, different possible decision making options are exemplified, depending on the specific working conditions.

**KEY WORDS:** Multipass turning, multi-objective optimization, Pareto front.

#### **1. INTRODUCCIÓN**

La optimización juega un papel clave en la industria moderna, influir positivamente en las productividad, las ganancias y el aprovechamiento de los recursos disponibles [1]. Los procesos de maquinado no son una excepción de lo anterior, desempeñando, la optimización, un importante papel en la selección de los regímenes de corte [2, 3].

Dentro de la optimización de procesos de corte, se han empleado tanto análisis mono-objetivos [4, 5] como multi-objetivos [6-8]. Aunque estos últimos tienen la indudable ventaja de considerar varios objetivos, si se emplean con un enfoque *a priori*, donde los diversos objetivos son combinados, ya sea por agregación lineal o por otro método, esta ventaja se pierde, al transformarse el problema, de hecho, en uno mono-objetivo [9]. Por el contrario, el enfoque *a posteriori*, donde se emplea el concepto de optimalidad de Pareto, conduce a un grupo de soluciones no dominadas, que son óptimas en el sentido más amplio de que no existe ninguna otra solución, dentro del espacio de búsqueda considerado, que mejore uno de los objetivos sin empeorar, a la vez, alguno de los otros [10].



No obstante, la obtención efectiva de estas soluciones no dominadas, en lo que se conoce como el conjunto y la frontera de Pareto, requiere el uso de las llamadas heurísticas sin uso gradiente [11]. Estas heurísticas, usualmente inspiradas en procesos o sistemas naturales, no sólo evitan los requerimientos de continuidad, derivabilidad y unimodalidad, exigidos por las técnicas analíticas y numéricas, sino que, además, permiten obtener dicha frontera en una sola ejecución, lo que redundará en la eficiencia computacional del proceso de optimización [12].

Dentro de las heurísticas más populares en la optimización multi-objetivo, se destacan los algoritmos genéticos, que simulan el proceso evolutivo de las especies naturales, codificando las variables de problema de forma similar a como se codifica, en el genotipo, las características fenotípicas de los seres vivos [13].

En el presente trabajo, se propone la optimización multi-objetivo de un proceso de torneado multi-pasada, empleando algoritmos genéticos, donde se consideren tres objetivos simultáneamente: el tiempo de maquinado total, el factor total de gasto herramienta y la rugosidad superficial obtenida.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

### Definición de las variables de decisión

El proceso de torneado considerado es un cilindrado en una pieza de acero AISI 1045, donde se tornea un escalón de diámetro  $D = 80$  mm y longitud  $L = 150$  mm, partiendo de un semiproducto de diámetro,  $D_0 = 100$  mm. El mismo, se llevará a cabo mediante  $N$  pasadas, de las cuales, la última será de acabado mientras que, las restantes, serán de desbaste. Además de la cantidad de pasadas, se definen como variables de decisión la profundidad de corte en la pasada de acabado,  $a''$ , el avance,  $f'$ , y velocidad de corte,  $v'$ , para todas las pasadas de desbaste, y el avance,  $f''$ , y la velocidad de corte,  $v''$ , para la pasada de acabado.

Teniendo en cuenta lo anterior, los parámetros de corte, para cada una de las pasadas se formalizan de la siguiente manera:

$$a_i = \begin{cases} a' = \frac{D_0 - D - 2a''}{2(N-1)}, & i = 1 \dots N-1; \\ a'', & i = N \end{cases} \quad (1)$$

$$f_i = \begin{cases} f', & i = 1 \dots N-1; \\ f'', & i = N \end{cases} \quad (2)$$

$$v_i = \begin{cases} v', & i = 1 \dots N-1; \\ v'', & i = N \end{cases} \quad (3)$$

El diámetro maquinado en cada pasada estará, entonces, dado por la siguiente expresión:

$$d_i = \begin{cases} D_0, & i = 1 \\ d_{i-1} - 2a_{i-1}, & i = 2 \dots N \end{cases} \quad (4)$$

a partir del cual, se determina la frecuencia de rotación del husillo:

$$n_i = \frac{1000v_i}{\pi d_i} \quad (5)$$

y el tiempo de maquinado:

$$\tau_i = \frac{L + \Delta L}{n_i f_i} \quad (6)$$



donde  $\Delta L$  es la longitud adicional recorrida por la herramienta para la entrada y la salida (en presente estudio se tomó  $\Delta L = 2$  mm).

Por su parte, la vida útil de la herramienta, para el régimen de cada pasada, está dado por la expresión empírica:

$$T_i = \frac{5,48 \cdot 10^9}{v_i^{3,46} f_i^{0,696} v_i^{0,460}} ; \quad (7)$$

con la cual se calcula la fracción de consumo herramental:

$$\xi_i = \frac{\tau_i}{T_i} \cdot 100\% . \quad (8)$$

### Definición de los objetivos de optimización

El primer objetivo de optimización es el tiempo de maquinado total, que se puede calcular mediante la expresión:

$$\tau = \sum_{i=1}^N \tau_i + (N-1)\tau_0 + \tau_A . \quad (9)$$

donde  $\tau_0$  es el tiempo de retorno de la herramienta, entre pasadas, y  $\tau_A$ , el tiempo de posicionamiento y retorno de la herramienta (en el presente estudio, se tomó  $\tau_0 = 5$  s y  $\tau_A = 15$  s).

El segundo objetivo considerado fue la fracción total de gasto herramental, dada por la ecuación:

$$\xi = \sum_{i=1}^N \xi_i . \quad (10)$$

Por último, el tercer objetivo considerado fue la rugosidad superficial, la cual se calculó por la expresión teórica:

$$R_z = \frac{125 f_N^2}{r_E} . \quad (11)$$

donde  $r_E$  es el radio de la punta de la herramienta.

### Definición de las restricciones

La primera restricción considerada está en función de los parámetros de corte, los cuales están definidos, para la herramienta utilizada (ISO TNMG 22 04 16, P20,  $r_E = 0,5$  mm) sobre los intervalos:

$$2 \leq N \leq 20 ; \quad (12)$$

$$0,5 \text{ mm} \leq a'' \leq 2,0 \text{ mm} ; \quad (13)$$

$$0,15 \text{ mm/rev} \leq f' \leq 0,55 \text{ mm/rev} ; \quad (14)$$

$$0,15 \text{ mm/rev} \leq f'' \leq 0,25 \text{ mm/rev} ; \quad (15)$$

$$250 \text{ m/min} \leq v', v'' \leq 400 \text{ m/min} . \quad (16)$$

También se verificará que la fuerza de corte en las pasadas de acabado,  $F$ , no supere la admisible por el sistema,  $[F] = 5\,000$  N:

$$F = \frac{6.560 f'^{0.917} a''^{1.10}}{v'^{0.286}} \leq [F]; \quad (17)$$

ni la potencia, la admisible por el motor y la transmisión,  $[P] = 7,5 \text{ kW}$ :

$$P = \frac{Fv'}{6 \cdot 10^4} \leq [P]; \quad (18)$$

### 3. EJECUCIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La optimización se llevó a cabo con el algoritmo genético con ordenamiento no dominado II (*non dominated sorting genetic algorithm II*) (NSGA-II) [14], implementado en el *Global Optimization Toolbox* de MATLAB R2018a. Se establecieron como parámetros del método, un tamaño de población de 2 500 soluciones y una cantidad de 500 generaciones. La población inicial se creó basada en una distribución uniforme, la selección se llevó a cabo por torneo, el cruzamiento se hizo por punto intermedio y la mutación fue adaptativa para satisfacer las restricciones.

Se realizaron 30 réplicas para analizar la convergencia del método, a partir de las cuales se determinaron los coeficientes de variación de los límites mínimo y máximo de todas las variables de decisión y los objetivos. Como se puede observar (Fig. 1), en todos los casos este valor está por debajo del 35% y sólo en tres casos supera el 15%, por lo que puede afirmarse que se ha logrado una buena convergencia con el método.

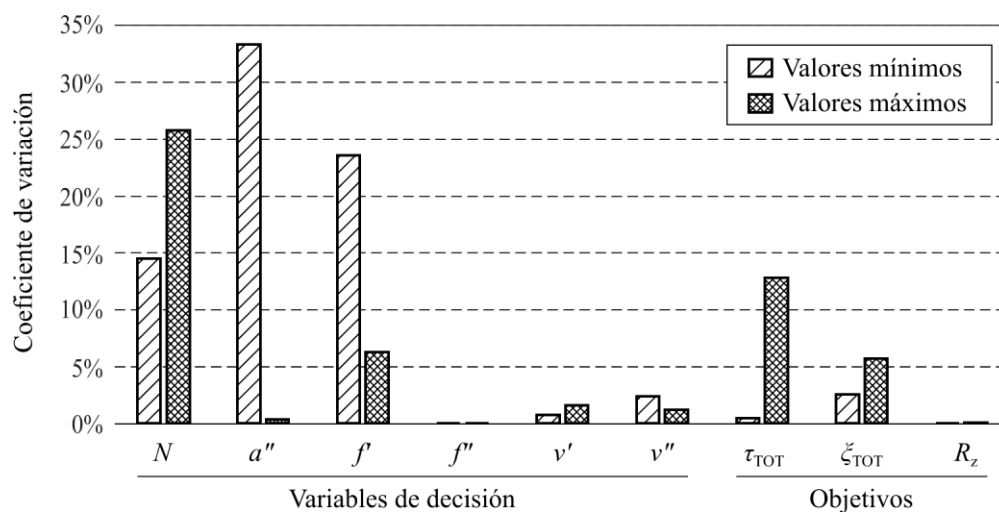


Figura 1: Coeficiente de variación de los límites de los conjuntos (variables de decisión) y fronteras (objetivos) de Pareto obtenidas en las réplicas de la optimización

Del análisis de la frontera de Pareto (Fig. 2), se puede observar que las soluciones obtenidas forman una superficie sobre los tres ejes correspondientes a los objetivos considerados. Dentro de las soluciones posibles, cuatro variantes tienen especial interés, como regímenes de corte a utilizar en casos prácticos (Tabla 1).

En primer lugar, se tiene la variante más productiva (No. 1), que es la que posee el menor tiempo de maquinado. Esta variante corresponde a la mayor profundidad de corte en la pasada de acabado y al uso de los mayores avances y velocidades de corte. Como a este régimen de corte corresponde, además, los mayores valores de desgaste herramental y de rugosidad superficial, sólo debería ser utilizado bajo condiciones donde la productividad sea un requisito insoslayable, como para producciones dirigidas a paliar una crisis o a cumplir compromisos productivos.

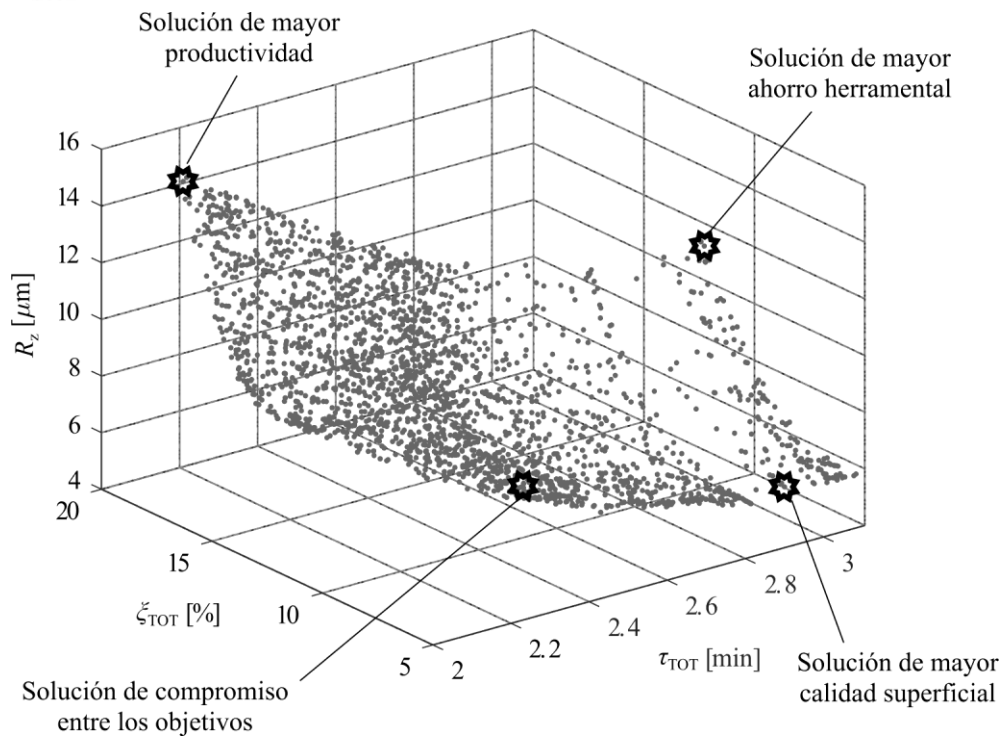


Figura 2: Frontera de Pareto obtenida

La segunda variante corresponde al menos gasto herramental. La misma se logra con bajos avances y velocidades de corte tanto para el acabado como para el desbaste. Este régimen sería conveniente para talleres donde la productividad no es importante, por tener bajos niveles de carga laboral y donde la calidad superficial sea admisible en el valor obtenido.

La tercera variante permite obtener la mejor calidad superficial, pero a costa de sacrificar el tiempo de elaboración. Para ello, se usan niveles mínimos de avance en la pasada de acabado, mientras el resto de los parámetros toman valores admisibles para las restricciones. Al igual que en el caso anterior, este régimen es adecuado para producciones donde la calidad sea mucho más importante que la productividad.

Finalmente, la cuarta variante es un compromiso entre los tres objetivos. Se escogió por ser el punto más cercano al origen de coordenadas en el cubo de valores normalizados en el intervalo de cero a uno, de los tres objetivos. Como se puede observar, el mismo tiene valores razonablemente bajos de los tres objetivos. Eso implica que, probablemente, sea el régimen más conveniente para la operación de un taller en condiciones normales.

Tabla 1: Variantes de regímenes óptimos

No.	Variables de decisión						Objetivos		
	$N$	$a''$ [mm]	$f'$ [mm/rev]	$f''$ [mm/rev]	$v'$ [m/min]	$v''$ [m/min]	$\tau_{TOT}$ [min]	$\xi_{TOT}$ [%]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	5	2,0	0,42	0,25	391	393	2,08	17,6	15,6
2	3	0,6	0,21	0,25	250	266	2,70	5,1	15,5
3	3	1,2	0,20	0,15	262	319	2,97	6,8	5,6
4	4	1,9	0,40	0,16	264	375	2,42	8,3	6,8

El método propuesto, desde luego, no excluye los análisis de costos, que pueden ser complementarios de todo lo anteriormente expuesto.



#### 4. CONCLUSIONES

En enfoque utilizado mostró ser efectivo en la optimización del proceso de torneado multi-pasada. El uso de los tres objetivos, simultáneamente, permitió considerar tres de los aspectos más importantes de la economía del maquinado: la productividad, el gasto herramental y la calidad. El uso de la toma de decisiones a posteriori, posibilitó la selección del régimen de corte con mayor flexibilidad y objetividad, y teniendo en cuenta diferentes condiciones de trabajo en el entorno industrial.

Como posibles extensiones futuras del presente trabajo, se consideran la aplicación de la metodología propuesta a otros procesos de maquinado, tales como el fresado o el taladrado. También sería conveniente probar otras heurísticas sin uso de gradiente para la optimización y comparar los resultados con los obtenidos con el NSGA-II.

#### RECONOCIMIENTOS

Los autores desean reconocer el soporte a la presente investigación del proyecto *Heurísticas inteligentes para optimización multiobjetivo con aplicación a los procesos industriales*, asociado al Programa de Ciencias Básicas, con el código P223LH001-068.

#### REFERENCIAS

- [1] DATTA, S.; DAVIM, J. P. (eds.) *Optimization in industry: Present practices and future scopes*, Cham (Switzerland): Springer Nature, 2019, ISBN 978-3-030-01640-1.
- [2] QUIZA, R.; BERUVIDES, G.; DAVIM, J. P. "Modeling and optimization of mechanical systems and processes," in *Modern mechanical engineering*, J. P. Davim, Ed., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 169-198.
- [3] RAO, R. V.; KALYANKAR, V. D. "Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 73, núm. 5-8, pp. 1159-1188.
- [4] BATISH, A.; BHATTACHARYA, A.; KAUR, M.; CHEEMA, M. S. "Hard turning: Parametric optimization using genetic algorithm for rough/finish machining and study of surface morphology". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, vol. 28, núm. 5, pp. 1629-1640.
- [5] VELCHEV, S.; KOLEV, I.; IVANOV, K.; GECHESKI, S. "Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning". *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 80, pp. 139-149.
- [6] LA FÉ, I.; QUIZA, R.; RIVAS, M.; RAMTAHALSING, V. "Hybrid modelling and optimization of the oblique cutting of AISI 1045 steel". *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 8, núm. 4.
- [7] UMER, U.; QUDEIRI, J. A.; HUSSEIN, H. A. M.; KHAN, A. A.; AL-AHMARI, A. R. "Multi-objective optimization of oblique turning operations using finite element model and genetic algorithm". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 71, núm. 1-4, pp. 593-603.
- [8] SELVARAJ, D. P.; CHANDRAMOHAN, P.; MOHANRAJ, M. "Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method". *Measurement*, 2014, vol. 49, pp. 205-215.
- [9] LA FÉ, I.; BERUVIDES, G.; QUIZA, R.; HABER, R. E.; RIVAS, M. "Automatic selection of optimal parameters based on simple soft computing methods: A case study on micro-milling processes". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 5, núm. 2, p. 800.
- [10] YANG, X. S.; KOZIEL, S.; LEIFSSON, L. "Computational optimization, modelling and simulation: Past, present and future". *Procedia Computer Science*, 2014, vol. 29, pp. 754-758.
- [11] TALBI, E.-G.; NAKIB, A. (eds.) *Bioinspired heuristics for optimization*, Cham (Switzerland): Springer Nature, 2019, ISBN 978-3-319-95103-4.
- [12] MIRJALILI, S. *Evolutionary algorithms and neural networks: Theory and applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019, ISBN 978-3-319-93024-4.
- [13] KRAMER, O. *Genetic algorithm essentials*. Cham (Switzerland): Springer International, 2017, ISBN 978-3-319-52155-8.



# CONVENCIÓN 2019

del 21 al 24 de mayo

## INTERNACIONAL CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA

UNIVERSIDAD DE CAMAGÜEY IGNACIO AGRAMONTE LOYNAZ

- [14] DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, núm. 2, pp. 182-197.

### **SOBRE LOS AUTORES**

Ramón Quiza es ingeniero mecánico y doctor en ciencias técnicas en la especialidad de construcción de maquinaria. Es, actualmente, director del Centro de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS) de la Universidad de Matanzas. Trabaja en temas de investigación relacionados con los procesos de manufactura y la inteligencia artificial aplicada. Es miembro titular de la Academia de Ciencias de Cuba y miembro del Consejo Técnico Asesor del MES. Pertenece a la Unión de Informáticos de Cuba y la Sociedad Cubana de Matemática y Computación.

Marcelino Rivas es ingeniero mecánico y doctor en ciencias técnicas en la especialidad de construcción de maquinaria. Es miembro del Centro de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS) de la Universidad de Matanzas. Trabaja en temas de investigación relacionados con los procesos de manufactura. Es miembro del tribunal nacional de grado científico de construcción de maquinaria y coordinador de la carrera de Ingeniería Mecánica, en la Universidad de Matanzas.

Yarens J. Cruz es ingeniero automático y máster en ingeniería asistida por computadora. Es miembro del Centro de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS) de la Universidad de Matanzas. Trabaja en temas de investigación relacionados con Industria 4.0 y sistemas ciberfísicos.