

Optimización multiobjetivo de operaciones de cilindrado multi-pasada para producciones sostenibles utilizando algoritmos genéticos

Iván La Fé, Ramón Quiza, Marcelino Rivas

Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas.

Autopista a Varadero km 3½, Matanzas 44740, Cuba.

Web: <http://cef.as.umcc.cu>, Email: ivan.lafe@umcc.cu

RESUMEN

La selección de parámetros óptimos de corte es un aspecto esencial en la planificación de cualquier proceso de maquinado. En este trabajo se presenta una optimización multiobjetivo dirigida a producciones sostenibles, con el objetivo de optimizar los parámetros de corte en operaciones de cilindrado multi-pasada. Se empleó el método de algoritmos genéticos para aproximar la frontera de Pareto, con la obtención del conjunto de soluciones no dominadas y teniendo en cuenta los costos de producción y el impacto ambiental como principales funciones objetivos. A partir del enfoque *a posteriori* propuesto se puede seleccionar la solución más conveniente en correspondencia con las condiciones específicas de trabajo. Se llevó a cabo un caso de estudio con el fin de ilustrar el método empleado y analizar los resultados obtenidos para varias condiciones de elaboración. En esta investigación se resaltan las ventajas del enfoque multi-criterio sobre el mono-objetivo.

PALABRAS CLAVE: Cilindrado multipasada, optimización multiobjetivo, método de entropía cruzada.

Multiobjective optimization of multi-pass cylindrical turning operations for sustainable productions by using a genetic algorithms

ABSTRACT

Selection of optimal cutting parameters is a very important task in any process planning of metal parts. This paper presents a multi-objective optimization technique focused on sustainable productions to optimize the cutting parameters in multi-pass cylindrical turning operations. A genetic algorithm method is used to approximate the Pareto's front, by obtaining a set of non-dominated solutions, taking into account the productions costs and the environmental impact as the main figures of merits. From the *a posteriori* approach proposed the decision-maker chooses the most appropriate solution under the specific working conditions. A study case is carried out to illustrate the proposed method and its outcomes are analyzed for several manufacturing conditions. This investigation remarks the advantages of the multi-objective criterion over the single objective one.

KEY WORDS: Multi-pass cylindrical turning, multi-objective optimization, cross-entropy method.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de los parámetros de corte óptimos, como: el número de pasadas, la profundidad de corte en cada pasada, el avance y la velocidad, son una tarea primordial para cualquier proceso de maquinado. En la práctica real del taller estos parámetros de corte son seleccionados a partir de bases de datos o manuales especializados, sin embargo los rangos que se ofrecen en esas fuentes son

solo valores iniciales y no los valores óptimos [1].

La optimización de los parámetros de corte es una tarea difícil [2], donde se requieren conocimientos sobre: ecuaciones empíricas que relacionen la vida útil de la herramienta, la fuerza de corte, la potencia, la rugosidad superficial, que permitan desarrollar restricciones realísticas; especificaciones de la máquina herramienta; criterios de optimización

empleados, así como la fundamentación matemática de los mismos [3].

En cualquier procedimiento de optimización, la identificación de las funciones de salida (conocidas como funciones objetivos), es un aspecto crucial. En el caso específico del proceso de torneado el criterio más usado es el de los costos específicos [4-9].

Otros criterios empleados son: los tiempos de maquinado [8-10], el consumo de energía [11], el *material removal rate* [12, 13] y el desgaste de la herramienta [13], en estas investigaciones (más contemporáneas) se encuentran combinados varios de los criterios antes mencionados, debido a que esto permite una mejor caracterización y comprensión del proceso en estudio, no siendo así cuando se tratan como problemas enfocados en un solo objetivo, los cuales limitan la decisión que se puede tomar sobre determinada operación [14]. El enfoque *a posteriori* para la toma de decisiones es un recurso ventajoso en las tareas de optimización, debido a que las soluciones se muestran como un conjunto de valores no dominados, permitiendo la selección de cualquiera de esas soluciones a partir de los intereses y condiciones específicas de la producción. Estas soluciones se consideran óptimas ya que en el espacio de búsqueda no existe una solución mejor que ellas cuando son considerados todos los objetivos simultáneamente [15] y son conocidas también como soluciones óptimas de Pareto, las cuales se representan gráficamente en la frontera de Pareto.

En aplicaciones reales la obtención del conjunto de Pareto puede resultar computacionalmente más costosa. Por esta razón se han desarrollado numerosas estrategias de búsqueda, las cuales no garantizan la obtención de soluciones óptimas pero si tratan de hallar buenas aproximaciones (*near optimal solutions*). Dentro de esas estrategias se destaca por su aplicación a los procesos de manufactura los algoritmos genéticos, [1, 6, 7, 9, 10, 12, 16-25] capaces de encontrar soluciones óptimas a un costo computacional razonable.

Quizá y colaboradores [23] aplicaron los algoritmos genéticos (AG) a la optimización multiobjetivo del proceso de torneado de una sola pasada. En este trabajo se propone la aplicación del método basado en AG a la

optimización multiobjetivo del cilindrado de varias pasadas con un enfoque sostenible, teniendo en cuenta como funciones objetivos, los costos de operación y el impacto ambiental (evaluado en el consumo de energía y el gasto de herramienta).

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

2.1 Variables de decisión

En el problema de estudio, los parámetros de corte para cada pasada son considerados como variables de decisión. Debido a que para las pasadas de acabado, se emplean los mismos regímenes de corte, se tienen en cuenta seis variables de entrada: profundidad de corte para la pasada de acabado (a_F), número de pasadas (N), avance para el desbaste y el acabado (f_R y f_F) y la velocidad de corte para el desbaste y el acabado (v_R y v_F). Los parámetros de corte para cada pasada pueden ser asignados de la siguiente forma:

$$a_i = \begin{cases} \frac{d_0 - d - 2a_F}{2(N-1)} : i = 1, \dots, N-1 \\ a_F : i = N \end{cases} ; \quad (1)$$

$$f_i = \begin{cases} f_R : i = 1, \dots, N-1 \\ f_F : i = N \end{cases} ; \quad (2)$$

$$v_i = \begin{cases} v_R : i = 1, \dots, N-1 \\ v_F : i = N \end{cases} ; \quad (3)$$

2.2 Funciones objetivos

El objetivo de la optimización es minimizar dos criterios conflictivos simultáneamente. El primer objetivo es el costo total de la operación (ec. 4), donde z_L es el costo específico por mano de obra, z_O es el costo por recargo, z_T costo por herramienta, z_E costo de energía consumida, τ es el tiempo de producción, ξ es la vida útil total de la herramienta, E es el consumo de energía.

$$z_{TOT} = (z_L + z_O)\tau + z_T\xi + z_E E ; \quad (4)$$

$$\tau = \tau_S + \tau_C + \tau_T + \tau_{B0} ; \quad (5)$$

donde, τ_S es el tiempo de instalación, τ_C es el tiempo total de corte, τ_T es el tiempo de cambio de herramienta, τ_B es el tiempo de retroceso de la herramienta.

La ecuación 5 puede ser rescrita de la siguiente forma:

$$\tau = \tau_s + \sum_{i=1}^N \tau_{Ci} + \tau_{T0} \sum_{i=1}^N \frac{\tau_{Ci}}{T_i} + (N-1)\tau_{B0}; \quad (5b)$$

donde, τ_{Ci} es el tiempo de corte para la i th pasada:

$$\tau_{Ci} = \frac{\pi d_{i-1} L}{1000 v_i f_i}; \quad (6)$$

La vida útil de la herramienta para cada pasada (T_i), puede ser calculada usando la ley de Taylor extendida:

$$T_i = C_T v_i^{\alpha_T} f_i^{\beta_T} a_i^{\gamma_T}; \quad (7)$$

El segundo objetivo es el impacto ambiental (EI), que tiene en cuenta el consumo de energía y el gasto herramental; ambos parámetros fueron normalizados para poder establecer una relación entre ellos:

$$EI = \frac{(E_i - E_{\min})}{(E_{\max} - E_{\min})} + \frac{(\xi_i - \xi_{\min})}{(\xi_{\max} - \xi_{\min})}; \quad (8)$$

2.2 Restricciones

Para el proceso de corte es necesario que se cumplan determinadas restricciones. Primero que todo, los parámetros de corte se deben seleccionar en el rango permitido para la herramienta seleccionada:

$$0.1mm \leq a_F \leq 0.4mm; \quad (9a)$$

$$0.15mm/rev \leq f_i \leq 0.55mm/rev; \quad (9b)$$

$$250m/min \leq v_i \leq 400m/min; \quad (9c)$$

Además, la fuerza de corte para cada pasada (F_i) no debe sobrepasar un valor máximo (F^{MAX}), el cual está dado por la resistencia y rigidez de la máquina herramienta y la herramienta de corte:

$$F_i = C_F v_i^{\alpha_F} f_i^{\beta_F} a_i^{\gamma_F} \leq F^{MAX}; \forall i \in [1, \dots, N]; \quad (10)$$

También, la potencia de corte (P_i) para cada pasada no debe ser mayor que la potencia del motor de la máquina herramienta (P_{MOT}), considerando las pérdidas por fricción en la transmisión:

$$\frac{v_i F_i}{6 \cdot 10^4} \leq \eta P_{MOT}; \forall i \in [1, \dots, N]; \quad (11)$$

Estas dos últimas restricciones deben ser especialmente analizadas en las pasadas de desbaste.

Finalmente, en la pasada de acabado la rugosidad superficial obtenida (R_i) debe ser menor o igual que un valor específico (R^{MAX}), el cual es dado según especificaciones tecnológicas:

$$R_i = \frac{125 f_i^2}{r_E} \leq R^{MAX}; i = N; \quad (12)$$

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

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Caso de estudio

Con el objetivo de ilustrar el método de optimización propuesto, se llevará a cabo el siguiente estudio de caso. Se debe elaborar una sección de un árbol de AISI 1045, con longitud 180 mm, desde un diámetro inicial de 150 mm hasta un diámetro de 100 mm. De acuerdo con los requisitos tecnológicos, la superficie obtenida debe tener una rugosidad no mayor de $2.0 \mu m$ (Ra).

El proceso de torneado se ejecutará en un torno CNC, el cual tiene un motor de 10 kW y una eficiencia en la transmisión del 75%. La fuerza máxima permisible por la máquina herramienta es de 5000 N. El radio de la punta tanto para la herramienta de desbaste como para la de acabado es de 2 mm.

Para la combinación pieza-herramienta empleada, se obtuvieron los siguientes modelos empíricos, para la vida útil de la herramienta y la fuerza de corte:

$$T_i = \frac{5,48 \cdot 10^9}{v_i^{3,46} f_i^{0,696} a_i^{0,460}}; \quad (13a)$$

$$F_i = \frac{6,56 \cdot 10^3 f_i^{0,917} a_i^{1,10}}{v_i^{0,286}}; \quad (13b)$$

Estos modelos solo son válidos en los intervalos antes mencionados, los cuales son suministrados por el fabricante de las herramientas usadas.

El tiempo de instalación, el tiempo de cambio y el tiempo de retroceso para una herramienta, se han asumido como: 1,5; 1,0 y 0,1 min, respectivamente.

La implementación del algoritmo genético se realizó con la utilización del software MatLab R2013a, el método utilizado es el NSGA-II (*non-dominated sorting genetic algorithm*) [26], siendo este uno de los algoritmos evolutivos más utilizados en la optimización multiobjetivo.

El algoritmo fue implementado con un tamaño de población de 1000 muestras, y un número máximo de iteraciones igual a 200. La población inicial fue creada siguiendo una

distribución aleatoria y uniforme. El cruzamiento fue hecho mediante la técnica punto simple. Para la mutación se aplicó una probabilidad de 0.01.

Después de ejecutar el algoritmo de optimización, los puntos no dominados o soluciones óptimas son representados gráficamente en la frontera de Pareto (ver Fig. 1), con el objetivo de facilitar el proceso de toma de decisión.

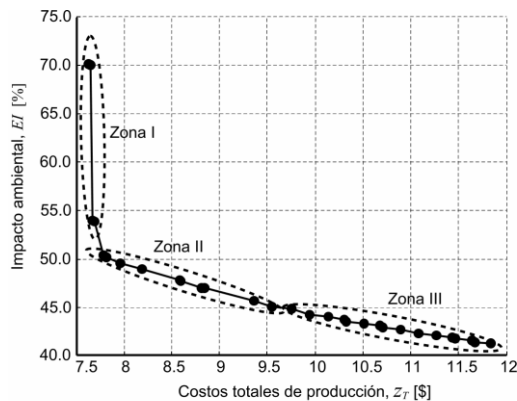


Figura 1. Frontera de Pareto

Como se puede apreciar en la figura, la frontera puede ser dividida en tres zonas aproximadamente:

- Zona I: En esta zona los costos alcanzan sus valores más bajos, y consecuentemente el impacto ambiental posee los mayores porcentajes. Estas soluciones son las más convenientes cuando en el taller se presentan dificultades con los indicadores económicos.
- Zona II: Aquí se puede notar un equilibrio aceptable entre los costos y el impacto ambiental. Esta zona es la recomendada cuando se quieren estabilizar los indicadores de sostenibilidad analizados.
- Zona III: En esta zona se sacrifican los costos de la operación en función de disminuir el consumo de corriente y de herramienta. Esta solución es la aconsejada cuando existan problemas con el suministro de energía o de herramental.

4. CONCLUSIONES

La optimización multiobjetivo con enfoque a *posteriori* demostró ser una opción viable en la selección de los parámetros más convenientes en el proceso de cilindrado multipasada, cumpliendo con las restricciones que modelan más realísticamente la operación. Esta técnica ofrece gran cantidad de información que hace más flexible la toma de decisiones.

El agrupamiento de las soluciones no dominadas en la frontera de Pareto, ejemplifica con más facilidad las diferentes combinaciones que pueden ser seleccionadas para lograr que el proceso de fabricación cumpla con los índices de sostenibilidad seleccionados.

El empleo de los algoritmos genéticos como técnica de optimización corroboró nuevamente su aplicabilidad a los procesos de manufactura, con un costo computacional aceptable.

REFERENCIAS

1. Dereli, T., I.H. Filiz, and A. Baykasoglu, *Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms*. International Journal of Production Research, 2001. **39**(15): p. 3303-3328.
2. Sreekumar, M., et al., *International Conference on Design and Manufacturing (IconDM2013) Optimization of Machining Parameters for end Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi based Grey Relational Analysis*. Procedia Engineering, 2013. **64**: p. 1276-1282.
3. Quiza, R., G. Beruvides, and J.P. Davim, *Modeling and optimization of mechanical systems and processes*, in *Modern mechanical engineering*, J.P. Davim, Editor. 2014, Springer Berlin Heidelberg. p. 169-198.
4. Taylor, F.W., *On the art of cutting metals*. Transactions of the ASME, 1907. **28**: p. 310-350.
5. Saravanan, R., P. Asokan, and K. Vijayakumar, *Machining parameters optimisation for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm (GA) and simulated annealing*

- (SA). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003. **21**(1): p. 1-9.
6. Cus, F. and J. Balic, *Optimization of cutting process by GA approach*. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2003. **19**(1-2): p. 113-121.
 7. Amiolemhen, E. and A.O.A. Ibhádode, *Application of genetic algorithms-determination of the optimal machining parameters in the conversion of a cylindrical bar stock into a continuous finished profile*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004. **44**(12-13): p. 1403-1412.
 8. Quiza, R., J.E. Albelo, and J.P. Davim, *Multi-objective optimisation of multipass turning by using a genetic algorithm*. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2009. **35**(1-2): p. 134-144.
 9. Ganesan, H. and G. Mohankumar, *Optimization of machining techniques in CNC turning centre using genetic algorithm*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013. **38**(6): p. 1529-1538.
 10. D'Addona, D.M. and R. Teti, *Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes*. *Procedia CIRP*, 2013. **7**: p. 323-328.
 11. Guo, Y., et al., *Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning*. *Procedia CIRP*, 2012. **1**: p. 512-517.
 12. Umer, U., et al., *Multi-objective optimization of oblique turning operations using finite element model and genetic algorithm*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. **71**(1-4): p. 593-603.
 13. Yang, S.H. and U. Natarajan, *Multi-objective optimization of cutting parameters in turning process using differential evolution and non-dominated sorting genetic algorithm-II approaches*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010. **49**(5-8): p. 773-784.
 14. Li, H. and Q. Zhang, *Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009. **13**(2): p. 284-302.
 15. Abbass, H.A., R. Sarker, and C. Newton. *PDE: A Pareto-frontier differential evolution approach for multi objective optimization problems*. in *Congress on Evolutionary Computation*. 2001. Piscataway, NJ (U.S.A.).
 16. Abido, M.A., *A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch*. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2003. **25**(2): p. 97-105.
 17. Al Jadaan, O., L. Rajamani, and C.R. Rao, *Non-dominated ranked genetic algorithm for solving constrained multi-objective optimization problems*. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2008. **5**(5): p. 60-67.
 18. Ali-Tavoli, M., et al., *Multi-objective optimization of abrasive flow machining processes using polynomial neural networks and genetic algorithms*. *Machining Science and Technology*, 2006. **10**(4): p. 491-510.
 19. Batish, A., et al., *Hard turning: Parametric optimization using genetic algorithm for rough/finish machining and study of surface morphology*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014. **28**(5): p. 1629-1640.
 20. Chien, W.-T. and C.-S. Tsai, *The investigation on the prediction of tool wear and the determination of optimum cutting conditions in machining 17-4PH stainless steel*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. **140**(1): p. 340-345.
 21. Dereli, T. and I.H. Filiz, *Optimisation of process planning functions by genetic algorithms*. *Computers and Industrial Engineering*, 1999. **36**(2): p. 281-308.
 22. Durairaj, M. and S. Gowri, *Parametric optimization for improved tool life and surface finish in micro turning using genetic algorithm*. *Procedia Engineering*, 2013. **64**: p. 878-887.
 23. Quiza, R., M. Rivas, and E. Alfonso, *Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2006. **19**(2): p. 127-133.
 24. Wang, Z.G., Y.S. Wong, and M. Rahman, *Optimisation of multi-pass milling using genetic algorithm and genetic simulated annealing*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004. **24**(9-10): p. 727-732.
 25. Wang, Z.G., et al., *Multi-objective optimization of high-speed milling with parallel genetic simulated annealing*. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006. **31**(3-4): p. 209-218.

26. Deb, K., et al., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002. **6**(2): p. 182-197.

SOBRE LOS AUTORES

Iván La Fé: Graduado de Ingeniero Mecánico (título de oro) en 2014. Recibió el título de Máster en Ingeniería Asistida por Computadora en el 2017 en la Universidad de Matanzas. En la actualidad se desempeña como profesor instructor en la Universidad de Matanzas y pertenece al Grupo de Investigación en Fabricación Avanzada y Sostenible. Principales líneas de investigación: modelación y optimización de procesos de manufactura y diseño mecánico.

Ramón Quiza: Recibió el título de Ingeniero Mecánico (título de oro) en 1999 y el título de Doctor en Ciencias Técnicas en el 2005 en la Universidad de Matanzas donde en la actualidad se desempeña como coordinador del Grupo de Investigación en Fabricación Avanzada y Sostenible. Sus principales líneas de investigación son: modelación y optimización de procesos de maquinado y aplicaciones de inteligencia artificial. Es profesor titular.

Marcelino Rivas: Recibió el título de Ingeniero Mecánico en 1983 y el título de Doctor en Ciencias Técnicas en 1990 en la Universidad de Matanzas donde en la actualidad se desempeña como miembro del Grupo de Investigación en Fabricación Avanzada y Sostenible. Sus principales líneas de investigación son: modelación y optimización de procesos de manufactura y aplicaciones de inteligencia artificial y métodos numéricos. Es profesor titular.