

Análisis de modelos para el fresado de alta velocidad

Analysis of models for high speed milling

Julio Ernesto de la Rosa Melian¹, Carlos Alberto Trinchet Varela², Roberto Pérez Rodríguez³, Dagnier Antonio Curra-Sosa⁴

^{1,2,3,4}Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín, Cuba, ¹delarosa94@uho.edu.cu,
²carlos.trinchet@uho.edu.cu, ³roberto.perez@uho.edu.cu, ⁴curra@uho.edu.cu

RESUMEN

El mecanizado de alta velocidad ha permitido aumentar la calidad de los productos y la eficiencia de las operaciones de corte, a través del empleo de máquinas herramienta CNC de alta tecnología y de la optimización de estos procesos. Según el criterio de expertos en esta temática, la complejidad de estas operaciones tributa a que no exista un modelo que contemple íntegramente todo el proceso de mecanización; por tanto, resulta imprescindible la elaboración de modelos predictivos que contribuyan al perfeccionamiento de estas operaciones. En el presente trabajo, se estudian varios modelos para el Fresado de Alta Velocidad desde la óptica del Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería, con el objetivo de identificar las variables determinantes en este proceso.

Palabras clave: Fresado de alta velocidad; Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería; modelos para el fresado.

ABSTRACT

The high speed machining has allowed increasing the quality of the products and the efficiency of cutting operations, through the use of CNC machine tools and the optimization of these processes. According to the criteria of experts, the complexity of these operations makes it difficult to obtain a model that fully contemplates the entire mechanization process; therefore, the development of predictive models that contribute to the improvement of these operations is essential. In the present work, several models for High Speed Milling are studied, from the perspective of the Analysis and Synthesis of Engineering Systems, with the aim of identifying the determining variables in this process.

Keywords: High speed milling; Analysis and Synthesis of Engineering Systems; models for milling.

1. INTRODUCCIÓN

El corte de metales con arranque de virutas juega un papel importante en la industria metalmecánica. Las máquinas-herramienta destinadas para este fin pueden trabajar en rangos convencionales de velocidad de corte o altas velocidades. Por lo general, el rango de alta velocidad se caracteriza por presentar de cinco a diez veces los valores que se observan en el Mecanizado Convencional (MC), dependiendo del material de trabajo. Frente a los procesos de MC, el Mecanizado de Alta Velocidad (MAV) muestra ventajas como un elevado volumen de corte, evacuación de calor con la viruta, menores esfuerzos cortantes y mejor calidad superficial. El uso del MAV se ha ampliado a todos los sectores de fabricación que utilizan procesos de mecanizado y exigen elevados parámetros de calidad (Ortiz, 2018).

Una de las operaciones que más se utiliza en las industrias que requieren gran precisión es el Fresado de Alta Velocidad (FAV). Su elevada eficiencia y exactitud en el acabado de los productos permite la reducción o eliminación de procesos de semiacabado y pulido. Estas características posibilitan disminuir costos y tiempos en las líneas de producción, además de proporcionar mejor acabado superficial y la posibilidad de eliminar el uso de refrigerantes en el corte (Suparmaniam y Yusoff, 2018).

El FAV juega un papel importante en la industria de alta precisión de sectores como el aeroespacial, aviación, automovilístico y en general, en la producción de moldes y matrices. Este proceso se aplica por primera vez en la industria aeroespacial, principalmente para mecanizar aleaciones de aluminio, pero se ha extendido con el paso del tiempo y hoy resulta una operación de manufactura indispensable en diversos sectores. El FAV se caracteriza por el mecanizado de materiales con alta dureza y de superficies con pequeño espesor manteniendo altos estándares de calidad. Esto ha sido posible por el desarrollo tecnológico de las máquinas-herramienta, las herramientas de corte y los sistemas CAD/CAM que intervienen en este proceso (Dawes y Aspinwall, 1997).

Actualmente, para el desarrollo de modelos en el campo de la ingeniería se emplean herramientas de la Inteligencia Artificial (IA), el Método de los Elementos Finitos (MEF), el Diseño de Experimentos (DE), entre otros; que en dependencia del número de datos y la complejidad del modelo queda determinada la factibilidad de la herramienta seleccionada.

La modelación en el FAV y en las operaciones de mecanizado en general, es imprescindible en la optimización, predicción e identificación de relaciones de parámetros que puedan mejorar la eficiencia del proceso de corte. En este sentido, la comunidad científica busca resultados dirigidos a la reducción de tiempos de producción y ahorros económicos, al resaltar la importancia de los modelos predictivos en la industria 4.0, donde el programa de control numérico permite incluirlos mejorando su desempeño (Ortiz, 2018).

Los métodos para la obtención de modelos que describan el proceso de mecanizado pueden clasificarse en analíticos, experimentales y de simulación numérica. Es válido destacar, que la combinación de estos métodos es necesaria para elaborar un modelo que pueda ser empleado con éxito (Ehmann, Kapoor, DeVor, y Lazoglu, 1997).

El principal objetivo de este trabajo, es analizar modelos que estudien el FAV para identificar las variables determinantes en este proceso. Mediante el análisis externo del método de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería, se puede considerar que cada uno de estos modelos funciona como una caja negra, la cual recibe datos y genera otros datos como salida. De esta forma, se identifican las variables que intervienen en el FAV y las herramientas utilizadas por los autores en la concepción de sus modelos.

2. METODOLOGÍA

Según el método de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería, el análisis externo comienza por identificar los indicadores de eficiencia cuyo desempeño interesa ser valorado. Posteriormente, son determinadas las variables de entrada que constituyen la información necesaria para calcular los indicadores de eficiencia; las mismas están formadas por las variables de decisión (que pueden ser modificadas), las variables de coordinación (escogidas dentro de rangos lógicos del proceso) y los datos de entrada (parámetros propios del proceso cuyos valores son conocidos). Todas las variables de entrada son independientes y en el análisis se debe verificar que cada una de ellas cumpla con este criterio (Arzola, 2000).

En la Figura 1 se observa el análisis externo de un sistema con la respectiva clasificación de la información, contenida en las variables del proceso, según la metodología mencionada anteriormente.

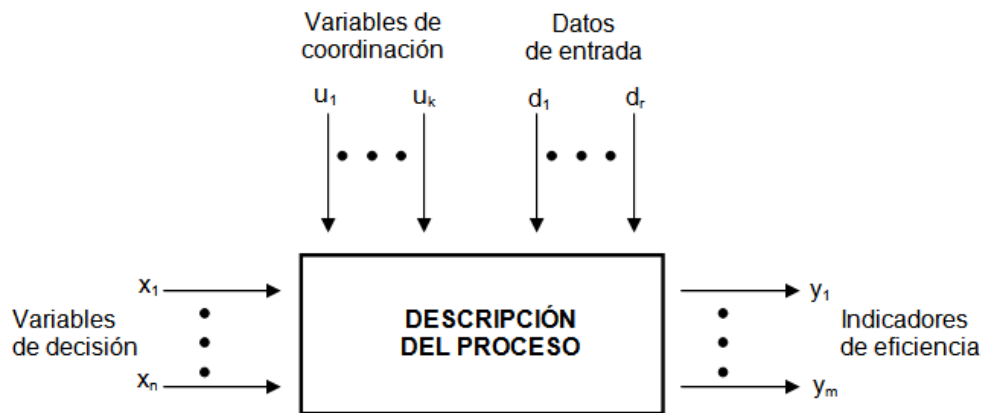


Figura 1. Análisis externo de un sistema. Fuente: Arzola (2000).

Modelos para el proceso de fresado

El modelo propuesto por Liu et al. (2019) para la trayectoria del fresado en superficies curvas, garantiza la estabilidad en la operación, bajos esfuerzos de corte y la continuidad del mecanizado de una aleación de titanio. En un estudio experimental, se compara el método propuesto con una de las estrategias de trayectoria de fresado que más se emplean en la industria. Con el método empleado se reducen las vibraciones en la herramienta de corte, se obtiene estabilidad en las fuerzas de corte, menores valores de rugosidad superficial y una elevada calidad del acabado superficial.

Liao et al. (2019) desarrollan un modelo para la predicción de la fuerza de corte en el microfresado mediante un proceso gaussiano. En su concepción, se tuvieron en cuenta los resultados de un modelo analítico para la predicción de esfuerzos cortantes en el fresado y datos obtenidos de forma experimental con varios niveles de velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte axial. Las predicciones con el nuevo modelo se ajustan mejor a los esfuerzos cortantes que se presentan en microfresado con un error medio alrededor del 6,7%.

Buj, Ortiz, Costa, Vivancos y Luis (2019) realizan un estudio de la influencia de parámetros de corte y estrategias de mecanizado, sobre la rugosidad superficial en el fresado de superficies semicilíndricas de acero templado. Mediante un estudio experimental evalúan la rugosidad superficial en términos del valor medio (R_a) y de la máxima profundidad (R_t) para diferentes ángulos de medición. Analizan las estrategias de fresado en concordancia y en contraposición entre trayectorias ascendentes y descendentes. Diferentes niveles de profundidad de corte axial, profundidad de corte radial, avance por diente y velocidad de

corte, fueron considerados en los experimentos y se obtuvieron modelos predictivos de los parámetros de rugosidad superficial mediante Redes Neuronales Artificiales. Los resultados demuestran que en aras de obtener menores valores de rugosidad superficial, el fresado en concordancia se debe utilizar en trayectorias descendentes mientras que para trayectorias ascendentes es recomendable el fresado en contraposición.

Generalmente, en el fresado existen cuantiosas variantes para determinar la trayectoria de la herramienta y muchas veces su elección depende de propuestas generadas por un programa CAM. En el modelo de Karuppanan y Saravanan (2019), se utilizan algoritmos genéticos y enjambres de partículas para optimizar la trayectoria de la herramienta de corte, con el objetivo de disminuir el tiempo de desplazamiento en vacío y la distancia recorrida por la herramienta. Al comparar las trayectorias obtenidas en dos softwares CAM, con las optimizadas por medio de IA, se observa que con el uso de estas herramientas de la IA se reduce en más de un 40 % la distancia recorrida, teniendo la optimización con enjambres de partículas como la de mejores prestaciones.

Las vibraciones excesivas entre el material de trabajo y la herramienta de corte, atentan contra la productividad y la exactitud dimensional en las operaciones de mecanizado. El método empleado por Suparmaniam y Yusoff (2018), se basa en detectar las señales sonoras emitidas en el FAV para contrarrestar las vibraciones con el cambio de velocidad del husillo. Este modelo es validado con un estudio experimental, donde al variar la profundidad de corte y el avance, se registra el espectro de frecuencia para distintas velocidades de husillo. Los datos demuestran que al corregir la velocidad del husillo en pleno proceso, se obtienen beneficios como: eliminación de vibraciones excesivas, aumento de la estabilidad del corte, mejor calidad superficial y mayor eficiencia en el acabado de la pieza.

El modelo de Kim y Lee (2018) para el microfresado de superficies curvas de Inconel 718, compara el método convencional de mecanizado con el fresado asistido por láser (LAM). Por el MEF se determina en un estudio térmico, la temperatura de precalentamiento que proporcionará el láser y la profundidad de corte efectiva para el mecanizado. Posteriormente, con el estudio experimental se analizan diferentes trayectorias de mecanizado, velocidad de corte y avance de mecanización; para ver el comportamiento de la energía específica de corte, la rugosidad superficial y la fuerza de corte para ambas variantes de mecanizado. Los resultados demuestran que con LAM se obtienen menores esfuerzos de corte, energía específica de corte y rugosidad superficial.

Sun y To (2018) obtienen un modelo analítico para el efecto de los parámetros de corte y el desgaste de la herramienta, en la uniformidad superficial del microfresado en seco de aluminio. El modelo es validado con un estudio experimental, donde con distintos valores de velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte axial y desgaste de la herramienta, fue posible construir el mapa topográfico de uniformidad superficial. Se demuestra que el uso de diferentes parámetros de corte y el desgaste de la herramienta, generan cambios de uniformidad en las superficies microfresadas. Además, el estudio también confirma que el valor de rugosidad superficial no es adecuado para determinar la uniformidad, debido a que algunas superficies con menor Ra eran más irregulares que otras con mayor valor.

Davoudinejad, Parenti y Annoni (2017) mediante la simulación numérica en 3D, obtienen un modelo predictivo para la formación de virutas, rebabas y de la fuerza de corte en el microfresado de aluminio. En el estudio, se consideraron dos niveles de avance por diente y velocidad. Al comparar los resultados de la simulación con los obtenidos experimentalmente, se obtienen buenas predicciones del mecanismo de formación de la viruta y de las rebabas, pero no así para las fuerzas de corte. Según los autores, las diferencias se deben a parámetros escogidos para la simplificación de la simulación numérica, relacionados con las propiedades elásticas del material y la ausencia de vibraciones, por lo cual recomiendan profundizar en estos aspectos.

Ma, Su, Jia, Song y Hu(2017) proponen un método para la optimización de parámetros de la trayectoria del mecanizado, en el FAVde superficies curvas de aluminio. Se compara la trayectoria propuesta, antes y después de ser optimizada, en un estudio experimental que confirma las ventajas de la optimización en la eficiencia de la operación. Aunque los valores de rugosidad superficial se mantienen estables, la longitud y el tiempo de mecanizado se logran disminuir en un 13,8% y 15,83% respectivamente con la optimización de la trayectoria.

El modelo de Castanhera y Diniz (2017) propone una estrategia de corte en el FAV para una superficie convexa de acero templado AISI D6. Experimentalmente, analiza la influencia de la trayectoria e inclinación de la herramienta en el acabado superficial, la fuerza de corte, las vibraciones y la vida útil de la herramienta. La optimización de este proceso de mecanizado, permite obtener una calidad superficialprescindiendo de operaciones como la electroerosión y otros procesos de pulido.

En una experimentación realizada por Martín et al. (2016), se pudo identificar la influencia de los cambios microestructurales, producidos por el fresado en seco de aceros inoxidables en la resistencia a la corrosión. Al variar la velocidad de corte y el avance por diente, fue posible analizar otros parámetros como las fuerzas de corte, el flujo de calor y la distribución de temperaturas. Los registros demuestran que con el aumento del avance por diente aumentan las fuerzas de corte; sin embargo, la temperatura aumenta con la velocidad de corte y decrece con el aumento del avance por diente. Por otro lado, el tiempo de evacuación del calor en el material de trabajo disminuye con el aumento de la velocidad de corte.

Wernsing y Büskens (2015) a través de la combinación de modelos analíticos, simulación numérica y estudios experimentales; proponen un método para determinar el flujo de calor en superficies fresadas en seco. Estos procesos, al prescindir del uso de refrigerantes, tributan a beneficios ecológicos y económicos, pero también presentan un alto riesgo de aumentar la carga térmica en el material de trabajo que puede afectar su exactitud dimensional. Experimentalmente, se comprueba como varía la distribución de temperaturas y el flujo de calor para diferentes estados de velocidad de avance, profundidad de corte radial, profundidad de corte axial y velocidad de corte; además de validar el método propuesto.

Santhanakrishnan, Sivasakthivel y Sudhakaran (2015) analizan el efecto de parámetros de corte y geométricos de la herramienta sobre el incremento de temperatura en el FAV de aluminio. Un modelo analítico para el aumento de temperatura en el corte, es validado con un estudio experimental que suministra los datos para la optimización del proceso mediante algoritmos genéticos. El estudio demuestra que la temperatura aumenta al incrementar velocidad de corte, avance y profundidad de corte axial; también se obtiene que, el ángulo de ataque es la variable de mayor incidencia en la reducción de las máximas temperaturas. Además, con el incremento del radio de la punta de la herramienta, el comportamiento de la temperatura aumenta en un principio y se reduce gradualmente.

San Juan et al. (2015) realizan un estudio experimental del corte ortogonal en el FAV de acero inoxidable. En el mismo se analiza la variación las fuerzas de corte y la distribución de temperaturas, en distintos regímenes de velocidad de corte y avance por diente para el fresado en concordancia y en contraposición. Los resultados demuestran que en el fresado en concordancia, se obtienen menores temperaturas en la zona de corte y que el mayor registro de este parámetro, se encuentra en la zona que será mecanizada por el otro diente de la fresa. Las fuerzas de corte son menores en el fresado en contraposición, pero las temperaturas máximas se encuentran en la zona mecanizada lo que puede ocasionar defectos en el acabado de la pieza.

Wang, Zhao, Li y Zhang (2014) investigan el efecto de la velocidad de corte y el avance por diente sobre la microdureza y microestructura en el FAV del acero para herramientas H13. Un estudio térmico realizado por simulación numérica, permite identificar la zona afectada térmicamente bajo distintos parámetros de corte; lo cual se comprueba en un estudio experimental, al realizar mediciones de microdureza y

observaciones de los cambios microestructurales en el material de trabajo. Los resultados demuestran que los cambios de microdureza, se deben a variaciones en la microestructura generadas por los efectos termomecánicos del proceso de mecanizado; se concluye que, al aumentar la velocidad de corte y el avance por diente, aumenta la zona afectada térmicamente pero disminuye la dureza en la superficie mecanizada.

Los implantes biodegradables juegan un importante papel en el campo de la ortopedia, donde las tensiones residuales constituyen un factor influyente de su degradación en el cuerpo humano. Salahshoor y Guo (2014), mediante simulación numérica, obtienen un modelo predictivo de las tensiones residuales en el fresado en seco del biomaterial Mg-Ca0.8. Con el objetivo de identificar la influencia de la velocidad de corte y la profundidad de corte radial en este parámetro, se realizaron varias simulaciones obteniendo las tensiones residuales en la superficie mecanizada y subsuperficies debajo de esta. Experimentalmente se reprodujo el estudio para validar el modelo, en el cual se aprecia que existen desviaciones en la predicción de tensiones residuales en la superficie y un buen ajuste en las de las subsuperficies.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los modelos estudiados, se apreciaron las siguientes regularidades respecto a los elementos componentes del Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería. Las variables de coordinación generalmente se corresponden al régimen de enfriamiento, ángulo de ataque, ángulo de incidencia y ángulo de inclinación de la herramienta. Los datos de entrada están en función del material de trabajo, geometría y material de la herramienta de corte y de la máquina-herramienta seleccionada para el mecanizado. Las variables de decisión que más se emplearon fueron velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte axial y trayectoria de mecanizado. La distribución de temperaturas, esfuerzos de corte y rugosidad superficial son los indicadores de eficiencia con mayor tendencia al análisis. La Tabla 1 muestra la relación de los modelos estudiados con las variables de decisión e indicadores de eficiencia que intervienen en estos procesos.

Tabla 1. Herramientas, variables de decisión e indicadores de eficiencia empleados en los modelos analizados.

Modelo	Herramienta	Variable de decisión	Indicadores de eficiencia
Liu et al. (2019)	Analítica MEF Experimental	Trayectoria de mecanizado	Fuerza de corte Vibraciones Rugosidad superficial
Liao et al. (2019)	Analítica Experimental	Velocidad de corte Avance por diente Profundidad de corte axial	Fuerza de corte
Buj et al. (2019)	DE IA	Trayectoria de mecanizado Profundidad de corte axial Profundidad de corte radial Avance por diente Ángulos de medición de rugosidad	Rugosidad superficial
Karuppanan y Saravanan (2019)	IA Experimental	Trayectoria del mecanizado	Consumo energético Tiempo de mecanizado Longitud de corte
Suparmaniam y Yusoff (2018)	Experimental	Velocidad de corte Avance de mecanización Profundidad de corte axial	Vibraciones
Sun y To (2018)	Analítica Experimental	Velocidad de corte Avance por diente Profundidad de corte axial Desgaste de la herramienta	Uniformidad superficial Rugosidad superficial

Tabla 1. Herramientas, variables de decisión e indicadores de eficiencia empleados en los modelos analizados. (Continuación)

Modelo	Herramientas	Variable de decisión	Indicadores de eficiencia
Kim y Lee (2018)	Analítica MEF Experimental	Velocidad de corte Avance de mecanización Trayectoria de mecanizado	Fuerza de corte Distribución de temperatura Consumo de energía Rugosidad superficial
Davoudinejad et al. (2017)	MEF Experimental	Velocidad de corte Avance por diente	Fuerza de corte Distribución de temperatura Formación de virutas Formación de rebabas
Ma et al. (2017)	Analítica Experimental	Trayectoria de mecanizado	Rugosidad superficial Tiempo de mecanizado
CastanherayDiniz (2017)	DE	Inclinación de la herramienta Trayectoria de mecanizado	Fuerza de corte Desgaste de la herramienta Vibraciones Rugosidad superficial
Martín et al.(2016)	Experimental	Velocidad de corte Avance por diente	Fuerza de corte Flujo de calor Distribución de temperatura Cambios microestructurales
WernsingyBüskens (2015)	Analítica MEF Experimental	Velocidad de corte Avance de mecanización Profundidad de corte radial Profundidad de corte axial	Flujo de calor Distribución de temperatura
Santhanakrishnan et al. (2015)	Experimental IA	Ángulo de ataque Radio de punta de la herramienta Velocidad de corte Avance de mecanización Profundidad de corte axial	Distribución de temperatura
San-Juan et al. (2015)	Experimental	Velocidad de corte Avance por diente Trayectoria de mecanizado	Fuerza de corte Distribución de temperatura
Wang et al. (2014)	MEF Experimental	Velocidad de corte Avance por diente	Distribución de temperatura Cambios de microdureza Cambios microestructurales
Salahshoory Guo (2014)	MEF Experimental Analítica	Velocidad de corte Profundidad de corte radial	Tensiones residuales

Del análisis realizado anteriormente, se puede afirmar que los métodos analíticos facilitan el estudio del FAV por la correlación de variables fundamentales del proceso, el MEF es empleado con buen desempeño en modelos que estudian la distribución de temperaturas, mecanismo de formación de virutas y flujo de calor. El DE es más adecuado cuando se utiliza en la elaboración de modelos con pocos niveles en sus variables, mientras que las herramientas de la IA facilitan la obtención de modelos con alta fiabilidad mediante el uso de grandes cantidades de datos experimentales. Por lo general los modelos propuestos se corroboran con estudios experimentales para confirmar su validez.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo los autores arriban a las siguientes conclusiones:

1. Fueron identificadas y clasificadas según el Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería las variables que intervienen en los modelos que estudian el FAV.
2. Se apreció la aplicación de las herramientas empleadas que responden a la IA, el MEF, el DE, métodos analíticos y experimentales para la concepción de los modelos.
3. El conocimiento adquirido en esta investigación tributará al desarrollo de un modelo conceptual para el estudio del desgaste de herramientas de corte en el FAV.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castanhera, I., & Diniz, A. (2017). Cutting forces, surface roughness and tool life in high-speed milling of hardened steel convex surface. *The Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Kim, E., & Lee, C. (2018). A Study on the Machining Characteristics of Curved Workpiece using Laser Assisted Milling with Different Tool Paths in Inconel 718. *Metals*.
- Liao, X., Zhang, Z., Chen, K., Li, K., Ma, J., & Lu, J. (2019). Modified Mechanistic Model Based on Gaussian Process Adjusting Technique for Cutting Force Prediction in Micro-End Milling. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Martín, Ó., San-Juan, M., De-Tiedra, P., & Santos, F. (2017). A new approach to machinability in orthogonal milling of AISI 316L austenitics atainless steel. *Dyna*, 92 (4), 456-460.
- Arzola Ruiz, J. (2000). *Sistemas de Ingeniería*. La Habana: Félix Varela.
- Buj-Corral, I., Ortiz-Marzo, J.-A., Costa-Herrero, L., Vivancos-Calvet, J., & Luis-P érez, C. (2019). Optimal Machining Strategy Selection in Ball-End Milling of Hardened Steels for Injection Molds. *Materials*.
- Davoudinejad, A., Parenti, P., & Annoni, M. (2017). 3D finite element prediction of chipflow, burr formation, and cutting forces in micro end-milling of aluminum 6061-T6. *Frontiers of Mechanical Engineering*.
- Dawes, R., & Aspinwall, D. (1997). A review of ultra high speed milling of hardened steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 1-17.
- Ehmann, K., Kapoor, S., DeVor, R., & Lazoglu, I. (1997). Machining Process Modeling: A Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 655-663.
- Jomaa, W., Mechri, O., Lévesque, J., Songmene, V., Bocher, P., & Gakwaya, A. (2017). Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075-T651 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 446-458.
- Karuppanan, R. C., & Saravanan, M. (2019). Optimized sequencing of CNC milling toolpath segments using metaheuristic algorithms. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 791-800.
- Liu, C., Li, Y., Jiang, X., & Shao, W. (2019). Five-axis flank milling tool path generation with curvature continuity and smooth cutting force for pocket. *Chinese Journal of Aeronautics*.
- Ma, J.-w., Su, W.-w., Jia, Z.-y., Song, D.-n., & Hu, G.-q. (2017). An optimization method of tool-path parameters for curved surface by construction of cutter location mesh units. *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*.
- Ortiz, J. (2018). *Contribución al estudio de la rugosidad superficial, obtenida mediante el proceso de fresado en alta velocidad, en la fase de acabado, de aceros templados, de moldes y matrices*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Mecánica, Barcelona.
- Salahshoor, M., & Guo, Y. (2014). *Finite Element Simulation and Experimental Validation of Residual Stresses in High Speed Dry Milling of Biodegradable Mg-Ca Alloys*. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014 (págs. 281 – 286). California, USA: Elsevier B. V.
- San-Juan, M., Martín, Ó., de Tiedra, M., Santos, F., López, R., & Cebrián, J. (2015). *Study of cutting forces and temperatures in milling of AISI 316L*. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015 (págs. 500-506). Barcelona, España: Elsevier Ltd.

- Santhanakrishnan, M., Sivasakthivel, P., & Sudhakaran, R. (2015). Modeling of geometrical and machining parameters on temperature rise while machining Al 6351 using response surface methodology and genetic algorithm. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*
- Sun, Z., & To, S. (2018). Effect of Machining Parameters and Tool Wear on Surface Uniformity in Micro-Milling. *Micromachines*.
- Suparmaniam, M., & Yusoff, A. (2018). Suppression of Chatter in High Speed Milling Machine Using Spindle Speed Variation Method with Microphone Feedback PID Controller. *Journal of Intelligent Manufacturing & Mechatronics*, 21-26.
- Wang, F., Zhao, J., Li, A., & Zhang, H. (2014). Effects of cutting conditions on microhardness and microstructure in high-speed milling of H13 tool steel. *Int J Adv Manuf Technol*, 137–146.
- Wernsing, H., & Buskens, C. (2015). *Parameter identification for finite element based models in dry machining applications*. 15th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO) (págs. 328-333). Karlsruhe, Germany: Elsevier B. V.