

Tendencias de la utilización de la inteligencia artificial en el fresado de alta velocidad

Trends in the use of Artificial Intelligence in High-Speed Milling

Hiovani Castillo-Pantoja¹, Roberto Pérez-Rodríguez¹, Ricardo Ávila-Rondón², Luis Wilfredo Hernández-González^{1,*}

¹Centro de Estudios CAD/CAM. Campus “Oscar Lucero Moya”, Avenida XX Aniversario s/n, Piedra Blanca. Universidad de Holguín, Cuba.

²Universidad Autónoma de Coahuila, México

*Autor de correspondencia: wilfredo@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 15 agosto 2021 Aceptado: 31 agosto 2021 Publicado: 4 de septiembre 2021

Resumen

En el presente trabajo se realiza una caracterización de la producción científica relacionada con la aplicación de la Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad, a través de un estudio bibliométrico. Se utilizaron como fuentes de información, los artículos de las revistas indexadas en las bases de datos *Web of Science*, *Scopus* y *Science Direct*. Se analizaron los indicadores bibliométricos de productividad, de colaboración, de impacto y el análisis de co-ocurrencia de palabras claves que permiten identificar las principales áreas de investigación. Para el proceso de tratamiento de la información, se usaron los programas informáticos Microsoft Excel y VOSviewer. Los resultados obtenidos evidencian la relación existente entre el fresado de alta velocidad y la inteligencia artificial, mostrando los nuevos retos en la investigación. Se agruparon las principales revistas, palabras claves y campos temáticos. Se presentan las tendencias y temas emergentes que no han sido suficientemente desarrollados y requieren más investigación.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Fresado de Alta Velocidad, estudio bibliométrico

Abstract

In the present work, a characterization of the scientific production related to the application of Artificial Intelligence in High-Speed Milling was carried out, through a bibliometric study. As sources of information, articles of the journals indexed in the Web of Science, Scopus and Science Direct databases were used. The bibliometric indicators of productivity, collaboration, impact and the analysis of the co-occurrence of keywords that allow the main research areas to be identified were analyzed. For the information treatment process, Microsoft Excel and VOSviewer computer programs were used. The results obtained show the relationship between High-Speed Milling and Artificial Intelligence, showing the new challenges in research. The main journals, keywords and subject fields were grouped. Emerging trends and issues that have not been sufficiently developed and require further investigation are presented.

Keywords: Artificial Intelligence, High Speed Milling, bibliometric study

1. Introducción

El mecanizado de alta velocidad constituye una tecnología de fabricación disruptiva, que aprovecha las altas velocidades del husillo y las altas velocidades de avance de la herramienta de corte, para lograr una alta tasa de remoción de metal, un tiempo de maquinado reducido, una mayor vida útil de la herramienta y una mayor productividad; es una tecnología que se utiliza ampliamente en el sector aeroespacial, la industria automotriz, la industria metal-mecánica, entre otras. En su conjunto, constituye una combinación de equipos, herramientas, software y tecnologías que mejora la eficiencia del proceso de mecanizado [1].

En el mecanizado de alta velocidad, la velocidad de corte influye notablemente en las fuerzas de corte, la rugosidad superficial, el desgaste de la herramienta, la generación de calor, la integridad de la superficie y la formación de la viruta. Los métodos comúnmente utilizados para el análisis del mecanizado de alta velocidad son los métodos experimentales, los analíticos y los numéricos [2].

La cuarta Revolución Industrial incorpora la visión digital al mundo físico, creando nuevos paradigmas donde confluyen varias áreas, tales como la Inteligencia Artificial, la computación cuántica, la nanotecnología, la biotecnología, la robótica, la impresión 3D, los vehículos autónomos y la Internet de las cosas. La Inteligencia Artificial ha propiciado la aparición de nuevas formas de comprensión analítica de los datos provenientes del sector metal-mecánico. Esto se conoce como mecanizado inteligente, refiriéndose a un nuevo paradigma de mecanizado en el que las máquinas-herramienta están completamente conectadas a través de un sistema ciberfísico [3,4].

Los sistemas de fabricación tradicionales siempre están bajo la presión del mercado para ofrecer productos de alta calidad a un costo menor, al tiempo que aumentan los ritmos de producción. En una fabricación ideal, cada producto debe satisfacer los estándares de calidad establecidos [5]. Este requisito crea la necesidad de utilizar tecnologías de ingeniería de vanguardia, lo que permite la integración de técnicas de optimización dentro de los sistemas de fabricación tradicionales. Esta integración es un parámetro clave que transfiere los sistemas de fabricación tradicionales a la fabricación inteligente [6,7].

Dentro de las operaciones tecnológicas de mecanizado, el Fresado de Alta Velocidad (HSM, *High-Speed Milling*) constituye una de más utilizadas en la industria aeronáutica, espacial y automotriz, sobre todo en la construcción de moldes y matrices. En el caso de las revisiones bibliográficas relacionadas con la Inteligencia Artificial en el HSM, se aprecia un número creciente en los últimos años. Autores como Li y Laghari [8] ofrecen una revisión exhaustiva de los procesos de mecanizado convencionales y los métodos de optimización utilizados en los compuestos de matriz metálica. El estudio hace énfasis en los métodos más utilizados: la metodología de superficie de respuesta, las redes neuronales artificiales, el método Taguchi y la lógica difusa. No se realiza un análisis macro y un estudio específico para el HSM y la Inteligencia Artificial.

Kar et al. [9] presentan una descripción de las características del HSM con potencialidades y aplicabilidad para materiales de alto rendimiento. Se destaca el desarrollo reciente con varios materiales endurecidos y aeroespaciales. Los autores no abordan la inclusión de la Inteligencia Artificial como herramienta de análisis de datos experimentales.

Zhu y Liu [10] exhiben una revisión crítica acerca del efecto de las vibraciones (*chatter*) en el mecanizado. Los autores revisan con profundidad los estudios sobre la predicción del *chatter* fuera de línea, la identificación en línea y las técnicas de supresión; realizan un análisis de la aplicación de algunas técnicas de Inteligencia Artificial, pero solo circunscritas al objeto de estudio.

En el presente trabajo, se muestra un análisis bibliométrico que correlaciona las investigaciones realizadas en el HSM y la Inteligencia Artificial. Para dar cumplimiento al objetivo planteado, se diseñó una estrategia de búsqueda que contiene como fuentes de información las bases de datos *Web of Science*, *Scopus* y *Science Direct*.

2. Materiales y Métodos

Para el análisis bibliométrico, se utilizó la metodología SLNA (*Systematic Literature Network Analysis*) [11], que se muestra en la Figura 1. Se utilizaron como fuentes de información, los artículos de las revistas indexadas en las bases de datos *Web of Science*, *Scopus* y *Science Direct*. Se analizaron los indicadores bibliométricos de productividad (por instituciones, por revistas y por documentos), de colaboración (entre autores), de impacto (autores, revistas, citas) y el análisis de co-ocurrencia de palabras claves que permiten identificar las principales áreas de investigación.

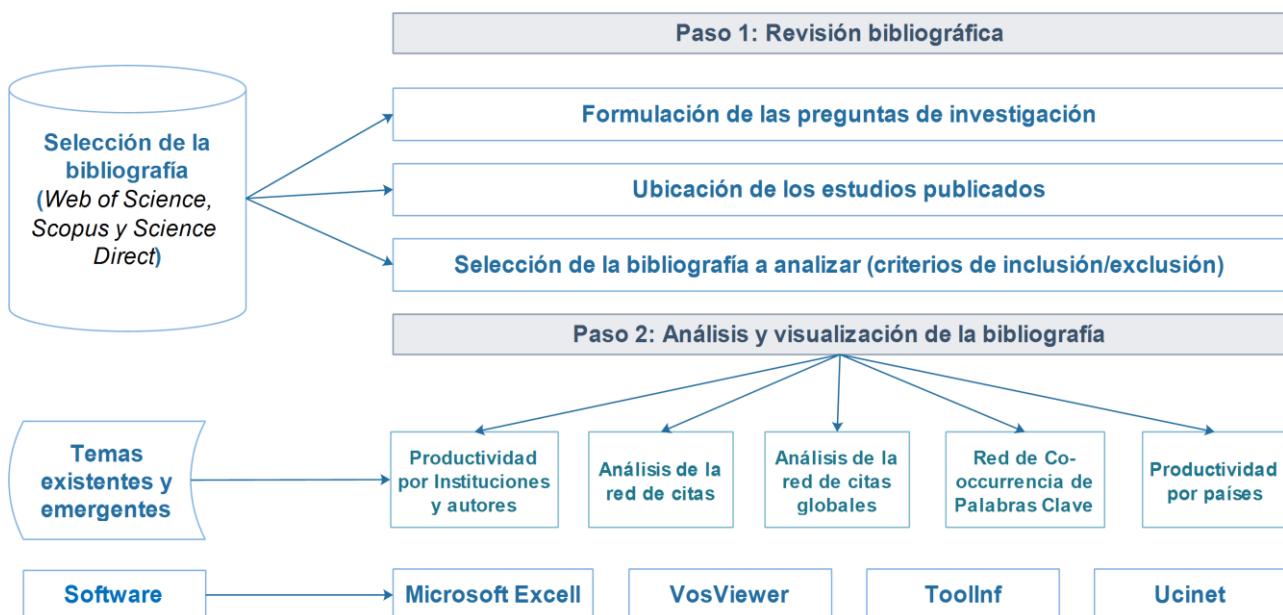


Fig.1 Metodología utilizada en la investigación (basado en [11])

Se analizaron los artículos publicados en español e inglés, regulando la selección con una jerarquía de dos niveles. En primer lugar, las investigaciones deben abordar la temática de “fresado de alta velocidad” (“*high speed milling*”, terminología en inglés) y posteriormente se selecciona como información significativa las que analicen la inteligencia artificial (“*artificial intelligence*”). Con los datos extraídos se confeccionó en Microsoft Excel una base de datos con: autores firmantes, título de las publicaciones, año de la publicación, revista de publicación, país de edición y número de citas recibidas.

Formulación de las preguntas de investigación

A partir de la revisión de la literatura disponible relacionada con la “Inteligencia artificial” y el “Fresado de Alta Velocidad”, se formularon la pregunta de búsqueda (RQ), la cual no ha sido completamente abordada en la literatura consultada.

- RQ1: ¿Cómo la Inteligencia Artificial ha contribuido al Fresado de Alta Velocidad?

A partir de la metodología de la Figura 1, se buscó la respuesta a la pregunta antes formulada, para cerrar los espacios vacíos de la literatura relacionada con este tópico.

Ubicación de los estudios publicados. Criterios de inclusión y exclusión

Una vez identificados los términos efectivos, sinónimos y abreviaturas de las palabras clave antes mencionadas, se evaluaron los autores que con mayor frecuencia son citados en la revisión bibliográfica sobre “*artificial intelligence*” (133 autores) y “*high speed milling*” (62 autores). La búsqueda se realizó en las bases de datos *Web of Science*, *Scopus* y *Science Direct*. Para evitar trabajos duplicados, se tuvo en cuenta que, en las expresiones de consulta, se reflejaran las palabras relacionadas con la temática de estudio en los idiomas inglés y español. Se tuvo en cuenta las abreviaturas de ambos términos: “AI”, “HSM”, “FAV” e “IA”. Las ecuaciones creadas para las búsquedas estructuradas se muestran a continuación.

{high speed milling} AND {artificial intelligence} AND {high speed *} AND {artificial intelligence}
 {hsm} AND {ai} AND {high – speed milling} AND {artificial intelligence}

{hsm} AND {ai} AND
 {hsm NOT (turning OR grinding OR drilling OR broaching)} AND {artificial intelligence} AND
 {high speed machining NOT (turning OR grinding OR drilling OR broaching)} AND {artificial intelligence}

{fav} AND {inteligencia artificial } AND {fresado de alta velocidad} AND {inteligencia artificial }

Las consultas identificadas incluyen en la búsqueda: títulos, resumen, palabras clave desde 1985 hasta 2020. Los documentos seleccionados se limitan a los campos de: ciencias de los materiales, máquinas herramienta, herramientas, planeación de procesos, parámetros de maquinado y economía.

3. Resultados y Discusión

Los artículos analizados fueron publicados entre el año 1985 y el segundo semestre del año 2020. En la última década se concentra poco más del 80% del total de las publicaciones y en los últimos cinco años cerca del 60%, siendo el año 2020 el de mayor productividad con un total de 50 artículos (Figura 2). Estos datos evidencian que en la actualidad resulta de gran interés el estudio de la Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad. Inicialmente, se encontraron 1 275 resultados y se registraron los siguientes tipos de documentos: artículos, editoriales, notas, revisiones, sección de libros y conferencias. La muestra final quedó dividida en 237 (85,87%) artículos originales, 15 (5,43%) comunicaciones en conferencias y 24 (8,69%) secciones de libros.

Para identificar a los autores más productivos se aplicó la ley de la raíz cuadrada de Price, la cual establece que la raíz cuadrada del total de los autores producen el 50% de lo que se publica, y el 50% restante es producido por los demás autores. Al aplicar la raíz cuadrada a 1 275 se obtuvo un núcleo de 36 autores. El estudio de asociación con 21 artículos arrojó un resultado de nueve clústeres de autores con los artículos del tema, visualizados en la Figura 3a.

Productividad por instituciones, autores y revistas

Las instituciones universitarias y de investigación que mayor número de artículos en revistas reportan en la temática son China, Canadá, España, Singapore y Alemania. La *Huazhong University of Science and Technology* es la institución con el mayor número de títulos, seguida de *University of British Columbia*, *University of Burgos*; *University of Windsor*; *Singapore Institute of*

Manufacturing Technology; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics; Nanyang Technological University; Shandong University y la University of Hannover, respectivamente.

Al cuantificar la cantidad de artículos en los que participa un autor, se puede medir su productividad y determinar cuáles son los investigadores más activos en un determinado campo de la ciencia. En la Tabla 1 se muestra la cantidad de publicaciones, la institución y el país de procedencia de los autores más productivos en el estudio de la Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad, dentro de una comunidad formada por 854 investigadores. El estudio demostró que el 1,5% de las publicaciones referidas al tema fueron producidos por un máximo de cuatro autores.

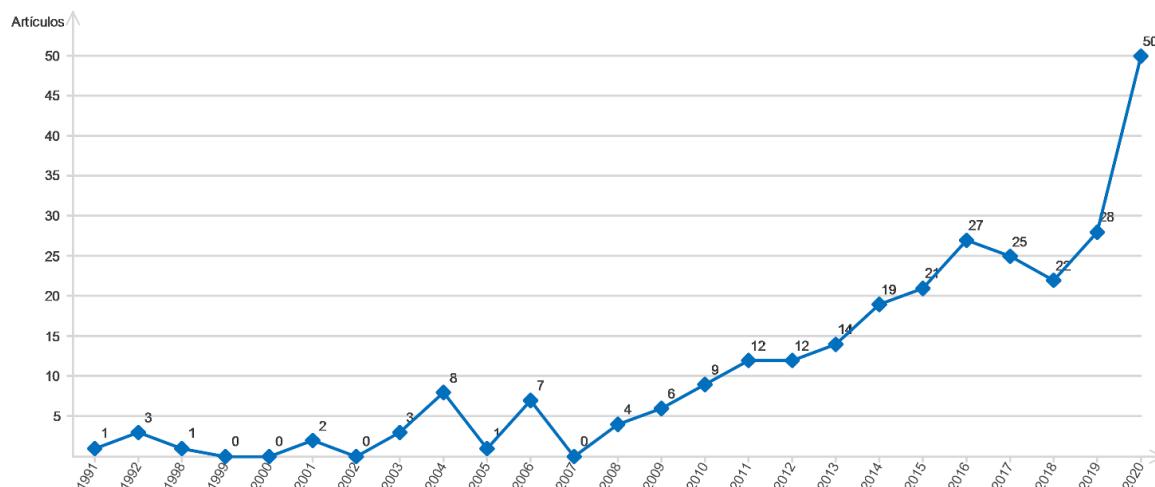


Fig.2 Tendencia de las publicaciones (artículos originales) de la aplicación de la Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad

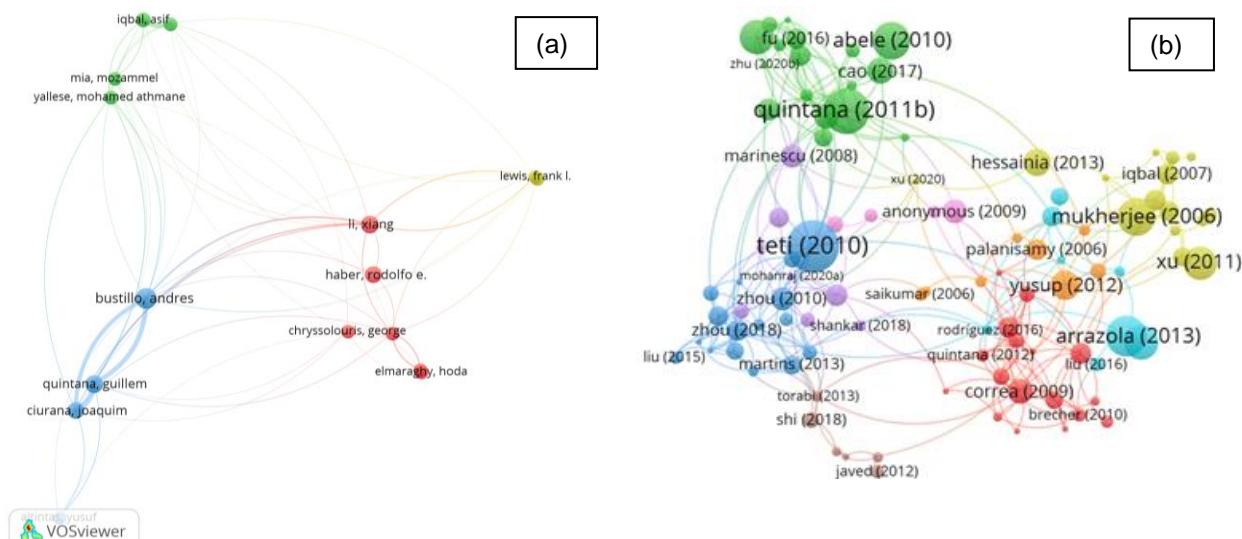


Fig.3 Red de autores agrupado por clústeres (a); Red de citas (b)

Tabla 1. Revistas más productivas sobre la Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad

No.	Revista	Cantidad de Artículos	SJR 2019	Q	H	País
1	<i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>	61	1	Q1	112	Reino Unido
2	<i>Journal of Intelligent manufacturing</i>	20	1,21	Q1	74	Holanda
3	<i>International Journal of Machine Tools and Manufacture</i>	9	3,98	Q1	146	Reino Unido
4	<i>Mechanical systems and signal processing</i>	7	2,19	Q1	151	Estados Unidos
5	<i>CIRP Annals</i>	6	2,54	Q1	143	Estados Unidos
6	<i>Expert Systems with Applications</i>	5	1,49	Q1	184	Reino Unido
7	<i>International Journal of Computer Integrated Manufacturing</i>	12	0,66	Q1	51	Reino Unido
8	<i>Measurement</i>	13	1,03	Q1	111	Estados Unidos
9	<i>IEEE Access</i>	10	0,78	Q1	86	Estados Unidos
10	<i>Applied Sciences</i>	8	0,42	Q1	35	Suiza

Análisis de las citas

La relación de las diez primeras revistas relacionadas con la temática objeto de estudio, se muestra en la Tabla 1, destacando la cantidad de artículos, el SJR, el índice Q, el índice H y el país. El número total de citas de todas las publicaciones fue de 1 956, con una media de 1,5. El índice h de los artículos recuperados fue de 5 (es decir, 853 artículos han sido citados al menos 6 veces). Existen artículos con más de 100 citas. El artículo más citado tiene 665 citas y dos de los diez artículos más citados fueron publicados en *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, perteneciente al Reino Unido. El análisis de red de citas es un método de análisis en los cuales los documentos son presentados en forma de nodos y las citas son representadas como las conexiones entre ellas. Permite rastrear la red de citas, para entender de una manera más clara el nivel de impacto de los estudios previos realizados (Figura 3b). Además, facilita la definición de los clústeres temáticos (Tabla 3).

Co-ocurrencia de Palabras Clave

El análisis de las palabras clave por autores es una herramienta para detectar las tendencias de las investigaciones. Para el análisis de la red, los nodos corresponden a las palabras clave de los autores y el peso de las conexiones nos indica las ocasiones en que estas palabras aparecen en los artículos. El análisis básico de *co-occurrence* de palabras clave de los autores representa la mejor descripción del contenido de los documentos.

Según el análisis *co-occurrence* de VOSviewer se extrajeron las palabras claves de los autores de los documentos seleccionados, después de revisar los resúmenes de las bases de datos, se realizó una limpieza de los datos, para utilizarlos en el VOSviewer en la obtención del mapa de red de las palabras claves. VOSviewer generó 13 nodos, agrupados en cuatro clústeres. De ellas, 77 conexiones

de la red y 422 son el total de las de mayor fuerza (*link strength*). Estas conexiones con mayor fuerza de manera positiva presentaron la cantidad de documentos, donde las palabras claves aparecen conjuntamente. La información detallada de las palabras y los clústeres se muestran en la Tabla 4. Los clústeres extraídos reflejan cuatro temáticas diferentes de investigación. Los tópicos de la investigación se han ordenado basados en la *co-occurrence* de las palabras clave.

Tabla 2. Documentos más citados sobre Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad

SCR	Citas	Autores	Título del artículo	Revista
1	665	R. Teti et al. [12]	<i>Advanced monitoring of machining operations</i>	<i>CIRP Annals</i>
2	143	L. Zhu et al. [13]	<i>Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling</i>	<i>Mechanical Systems and Signal Processing</i>
3	109	H. Cao et al. [14]	<i>The concept and progress of intelligent spindles: A review</i>	<i>International Journal of Machine Tools and Manufacture</i>
4	68	G. Quintana et al. [15]	<i>Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations</i>	<i>Journal of Intelligent Manufacturing</i>
5	66	Y. Zhou et al. [16]	<i>Review of tool condition monitoring methods in milling processes</i>	<i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
6	66	Y. Fu et al. [17]	<i>Timely online chatter detection in end milling process</i>	<i>Mechanical Systems and Signal Processing</i>
7	45	G. Quintana et al. [18]	<i>Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations</i>	<i>Materials and Manufacturing Processes</i>
8	31	G. Quintana et al. [19]	<i>Prediction, monitoring and control of surface roughness in high-torque milling machine operations</i>	<i>The International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>
9	5	M. Correa [20]	<i>Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process</i>	<i>Expert Systems with Applications</i>

Tabla 3. Temas de investigación basados en los clústeres de citas

Clúster	Nodo	Conecciones	Tópicos de análisis principales	Documentos más citados por Scopus	Rango de Fecha	Cantidad de citas
1	23	73	Modelos de Inteligencia Artificial para la optimización de los parámetros del maquinado	[21-23]	2009-2020	70 %
2	21	112	Monitoreo de las herramientas utilizando la Inteligencia Artificial	[16, 24-25]	2013-2020	63 %
3	19	77	Métodos de optimización evolutivos para la búsqueda de soluciones óptimas de los parámetros del maquinado	[26-27]	2005-2020	57 %
4	19	98	Utilización de las redes neuronales bayesianas en la optimización de parámetros de maquinado	[15,20]	2008-2020	57 %
5	16	88	Predicción del fenómeno de <i>chatter</i> empleando sistemas inteligentes en las máquinas herramientas	[10, 17, 28]	2012-2021	48 %
6	16	65	Proceso de identificación y predicción del desgaste de herramientas de corte en tiempo real	[29-30]	2009-2021	167 %
7	15	38	Modelos dinámicos del comportamiento de los husillos en el maquinado de alta velocidad	[31-32]	2008-2021	115 %

Tabla 4. Temáticas investigadas basado en clúster de palabras claves de autores

Clúster	Palabras claves/Autor	Total de conexiones de mayor fuerza	casos	Principales temáticas de investigación
1	Árboles de decisiones; Inteligencia Artificial (AI) en sistemas de fabricación; sistemas de apoyo a la toma de decisiones; supervisión del estado de la herramienta; rugosidad superficial; control de procesos; costos	33	12	asistencia de la fabricación y la delaminación en maquinados de alta velocidad
	Plásticos reforzados con fibra de carbono; delaminación; Red Neuronal Artificial (ANN)	44	11	

	Modelado de mecanizado; formación de virutas	45	12	
	Inconel 1690; fresado MQL; <i>flank wear</i>	30	12	
2	Eficiencia energética; fresado basado en <i>features</i> , STEP AP224; fabricación ecológica; metodología de superficie de respuesta	111	12	Detección de <i>chatter</i> Modelo de optimización de recursos energético
	Detección de vibraciones del fresado	108	12	
	Fresado; <i>chatter</i> ; tasa de remoción de material	74	12	
3	Mecanizado; monitoreo de sensores; procesamiento de señales avanzado	96	12	Estrategias monitoreo de procesos maquinado Técnicas de clúster para análisis de vibraciones
	IA; mecanizado de alta velocidad (HSM); técnicas de modelado	21	12	
	Monitoreo de sensores; procesamiento avanzado de señales	74	12	
4	Rendimiento del mecanizado; predicción; lógica difusa	65	12	IA predicción y optimización de procesos de maquinado.
	Fabricación aditiva; geometría de las curvas; medición sin contacto	61	12	
	Mecanizado; mejoramiento productivo	76	12	

De esta forma se responde a la pregunta de investigación realizada, identificándose las principales tendencias de la Inteligencia Artificial en el fresado de alta velocidad, las palabras claves y las conexiones con mayor fuerza.

4. Conclusiones

El análisis bibliométrico evidencia la relación existente entre el fresado de alta velocidad y la inteligencia artificial, mostrando los nuevos retos en la investigación. Se agruparon las principales revistas, palabras claves y campos temáticos. Los resultados manifiestan la relación entre el fresado de alta velocidad y la inteligencia artificial a través de diferentes sectores o funciones específicas. Se presentan las tendencias y temas emergentes que no han sido suficientemente desarrollados y requieren más investigación. La aplicación de la metodología de búsqueda muestra una imagen de los campos de la red de citas y de las palabras claves de los autores. La separación de los clústeres ayuda a identificar y analizar las áreas investigativas de mayor importancia.

Referencias

1. Awale, A.S., Inamdar, K.H., *Review on high speed machining of hard material*. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 2015. **2**: p. 517-524.
2. Pawade, R.S., Joshi, S.S., *Multi-objective optimization of surface roughness and cutting force in High Speed Turning of Inconel 718 using Taguchi Grey Relational Analysis*. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2011. **56**: p. 47-62. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3183-z>
3. Kim, DH., Kim, T.J.Y., Wang, X., *Smart machining process using machine learning: a review and perspective on machining industry*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018. **5**: p. 555-568. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-018-057-y>

4. Ribeiro-Carvalho S, Pereira R, Horovistiz A, Davim JP., *Intelligent machining methods for Ti6Al4V: A review*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2021. **235**(4): p. 1188-1210. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408920974795>
5. Deshayes L., *Smart machining systems: issues and research trends*. (Eds) Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development, 2006. Springer: Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-4617-0_25
6. Imad, M, Hosseini, A., Kishawy, H.A., *Optimization methodologies in Intelligent Machining Systems-A Review*. IFAC PapersOnLine, 2019. **52**(10): p. 282-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.043>
7. Dhobale, N., Mulik, S., Jegadeeshwaran, R., Patange, A., *Supervision of milling tool inserts using conventional and Artificial Intelligence approach: A Review*. Sound & Vibration, 2021. **55**(2): p. 87-116. DOI: <https://doi.org/10.32604/sv.2021.014224>
8. Li, J., Laghari, R.A., *A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **100**(9-12): p. 2929-2943. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2837-5>
9. Kar, B.C., Panda, A., Kumar, R., Sahoo, A.K., Mishra, R.R., *Research trends in high speed milling of metal alloys: A short review*. Materials Today: Proceedings, 2020. **26**(2): p. 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.559>
10. Zhu, L., Liu, C., *Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020. **143**: p. 106840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106840>
11. Khitous, F., Strozzi, F., Urbinati, A. Alberti, F., *A Systematic Literature Network Analysis of Existing Themes and Emerging Research Trends in Circular Economy*. Sustainability, 2020. **12**(4): p. 1633. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12041633>
12. Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., Dornfeld, D., *Advanced monitoring of machining operations*. CIRP Annals, 2010. **59**: p. 717-739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>
13. Zhu, L., Liu, C., *Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020. **143**: p. 106840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106840>
14. Cao, H., Zhang, X., Chen, X., *The concept and progress of intelligent spindles: A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017. **112**: p. 21-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005>
15. Quintana, G., Ciurana, J., Ribatallada, J., *Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations*. Materials and Manufacturing Processes, 2010. **25**: p. 386-398. DOI: <https://doi.org/10.1080/15394450902996601>
16. Zhou, Y., Xue, W., *Review of tool condition monitoring methods in milling processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **96**: p. 2509-2523. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1768-5>
17. Fu, Y., Zhang, Y., Zhou, H., Li, D., Liu, H., Qiao, H., *Timely online chatter detection in end milling process*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016. **75**: p. 668-688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.01.003>
18. Quintana, G., Rudolf, T., Ciurana, J., Brecher, C., *Surface roughness prediction through internal kernel information and external accelerometers using artificial neural networks*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011. **25**: p. 2877-2886. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0806-0>
19. Quintana, G., Bustillo, A., Ciurana, J., *Prediction, monitoring and control of surface roughness in high-torque milling machine operations*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2012. **25**: p. 1129-1138. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.684717>

20. Correa, M., Bielza, C., Pamies-Teixeira, J., *Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process*. Expert Systems with Applications, 2009. **36**: p. 7270-7279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.09.024>
21. Abbas, A.T., Pimenov, D.Y., Erdakov, I.N., Mikolajczyk, T., Soliman, M.S., El Rayes, M.M., *Optimization of cutting conditions using artificial neural networks and the Edgeworth-Pareto method for CNC face-milling operations on high-strength grade-H steel*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **105**: p. 2151-2165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04327-4>
22. Siddhpura, M., Paurobally, R., *A review of chatter vibration research in turning*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012. **61**: p. 27-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>
23. Singh, G., Gupta, M.K., Mia, M., Sharma, V.S., *Modeling and optimization of tool wear in MQL-assisted milling of Inconel 718 superalloy using evolutionary techniques*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **97**: p. 481-494. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1911-3>
24. Zhou, Y., Sun, W., *Tool Wear Condition Monitoring in Milling Process Based on Current Sensors*. IEEE Access, 2020. **8**: p. 95491-95502. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995586>
25. Zhu, K., Vogel-Heuser, B., *Sparse representation and its applications in micro-milling condition monitoring: noise separation and tool condition monitoring*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. **70**: p. 185-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5258-5>
26. Yusup, N., Zain, A.M., Hashim, S.Z.M., *Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011)*. Expert Systems with Applications, 2012. **39**: p. 9909-9927. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.109>
27. Mukherjee, I., Ray, P.K., *A review of optimization techniques in metal cutting processes*. Computers & Industrial Engineering, 2006. **50**: p. 15-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2005.10.001>
28. Lamraoui, M., Barakat, M., Thomas, M., Badaoui, M.E., *Chatter detection in milling machines by neural network classification and feature selection*. Journal of Vibration and Control, 2015. **21**: p. 1251-1266. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546313493919>
29. Zhou, J.H., Pang, C.K., Zhong, Z.W., Lewis, F.L., *Tool Wear Monitoring Using Acoustic Emissions by Dominant-Feature Identification*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011. **60**: p. 547-559. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2050974>
30. Mohanraj, T., Shankar, S., Rajasekar, R., Sakthivel, N.R., Pramanik, A., *Tool condition monitoring techniques in milling process-a review*. Journal of Materials Research and Technology, 2020, **9**: p. 1032-1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.031>
31. Abele, E., Altintas, Y., Brecher, C., *Machine tool spindle units*. CIRP Annals, 2010. **59**: p. 781-802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.002>
32. Khorasani, A.M., Gibson, I., Goldberg, M., Littlefair, G., *A comprehensive study on surface quality in 5-axis milling of SLM Ti-6Al-4V spherical components*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**: p. 3765-3784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1048-9>

Conflict de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Hiovani Castillo-Pantoja. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0091-0904>

Participó en el diseño de la investigación, visualización y análisis de la información y redacción del manuscrito.

Roberto Pérez Rodríguez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5741-5168>

Participó en el diseño de la investigación y redacción del manuscrito, procesamiento y visualización de la información.

Ricardo Ávila-Rondón. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6730-5739>

Participó en el diseño y conceptualización de la investigación.

Luis Wilfredo Hernández González. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2181-1959>

Participó en la revisión y edición del manuscrito.