

/01/

REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS SOBRE EL MODELADO DE MÁQUINAS HERRAMIENTA

REVIEW OF CURRENT STATE AND FUTURE PERSPECTIVES ON MACHINE TOOLS MODELING

Sergio Benavent-Nácher

Investigador predoctoral. Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño,
Universitat Jaume I de Castelló. España.

E-mail: sbn.universidad@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-542X>

Pedro Rosado Castellano

Profesor de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Departamento de Ingeniería de Sistemas
Industriales y Diseño, Universitat Jaume I de Castelló. España.

E-mail: rosado@uji.es ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9822-9484>

Lorenzo Solano García

Profesor de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Departamento de Ingeniería Mecánica y de
Materiales, Universitat Politècnica de València. Valencia. España.

E-mail: lsolano@mcm.upv.es ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0535-314X>

Recepción: 03/01/2018. **Aceptación:** 20/01/2018. **Publicación:** 14/09/2018

Citación sugerida:

Benavent Nácher, S., Rosado Castellano, P. y Solano García, L. (2018). Revisión del estado actual y perspectivas futuras sobre el modelado de máquinas herramienta. *3C Tecnología. Glosas de Innovación a la pyme*, 7(3), 10-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2018.v7n3e27.10-27/>

RESUMEN

El surgimiento y evolución de desarrollos tecnológicos como Cyber-Physical Production Systems (CPPS), Internet of Things (IoT) o Cloud Manufacturing (CMfg) ha impulsado en los últimos años la investigación sobre el modelado de sistemas de fabricación. Estos nuevos planteamientos están soportados por modelos virtuales y digitales, que utilizan diferentes técnicas y que responden a las necesidades de múltiples actividades presentes en los ciclos de vida del producto, del sistema de fabricación y de producción/suministro.

En este contexto, uno de los principales objetivos de la actual investigación apunta a la estandarización y unificación del modelado de recursos, aunque actualmente está muy limitado a ciertos dominios. Teniendo en cuenta esta línea de trabajo y los diversos requerimientos que demandan los nuevos paradigmas de fabricación, se realiza un estudio del estado del arte en el que se presentan los principales fundamentos que sustentan el modelado de sistemas de fabricación y, más concretamente, de máquinas herramienta.

El estudio pretende recoger los principales enfoques propuestos hasta la fecha sobre el tratamiento y representación formal de máquinas herramienta, con especial énfasis en las propuestas que los autores consideran como referencias o aquellas de carácter normativo. En base a dicho análisis, se presenta un esquema que muestra la evolución cronológica del modelado de máquinas herramienta y los trabajos orientados a su unificación. Finalmente se incluye además un esbozo de la orientación futura de esta línea de trabajo.

ABSTRACT

In recent years the emergence and evolution of technological developments such as Cyber-Physical Production Systems (CPPS), Internet of Things (IoT) or Cloud Manufacturing (CMfg) have driven the research on the modeling of manufacturing systems. These new approaches are supported by virtual and digital models, which use different techniques and respond to the needs of multiple activities present in the life cycles of the product, manufacturing system and production/supply system.

In this context, one of the main objectives of the current research is the standardization and unification of resource modeling, although currently it is very limited to certain domains. A study of the state of the art is presented taking into account this line of work and the new requirements demanded by the new manufacturing paradigms. The main foundations that support the modeling of manufacturing systems and, more specifically, machines-tools are presented.

The study aims to collect the main approaches proposed on the treatment and formal representation of machine tools, with special emphasis on both proposals that the authors consider as references and those from standarization domain. Based on this analysis, a schema is developed that incorporates the chronological evolution of the modeling of machine tools and the works oriented to their unifying. Finally, an outline of the future orientation of this line of work is also included.

PALABRAS CLAVE

Modelado de sistemas de fabricación, Modelado de máquinas herramienta, Técnicas de modelado, Máquina herramienta virtual.

KEY WORDS

Manufacturing system modelling, Machine tool modeling, Modeling techniques, Virtual machine tool.

1. INTRODUCCIÓN

Las perspectivas que nos trasladan iniciativas como “Smart Factory”, “Industrie 4.0”, “Factory of the Future”, etc., ponen de manifiesto la necesidad de diseñar procesos de fabricación más reactivos, ágiles y eficientes. La fabricación del futuro incluye como elementos fundamentales ciertos aspectos vinculados con los Sistemas Ciber-Físicos (CPS), y tecnologías como Cloud Manufacturing. Estas tecnologías y sistemas de gestión emergentes requieren de una representación formal de sistemas de fabricación y, especialmente, de máquinas herramienta (MH) como componente esencial de muchos de estos sistemas. Es precisa una representación con un alto nivel semántico para llevar a cabo la Ingeniería Basada en Modelos en dominios como la ingeniería fabricación.

El modelado de sistemas de fabricación se propuso inicialmente como una herramienta de soporte a la planificación de procesos, la simulación de operaciones, el cálculo de tiempos o el análisis de la distribución de máquinas (layout). Posteriormente, su uso se extendió a la investigación y el desarrollo de nuevos sistemas, la definición de especificaciones, la comunicación con clientes y proveedores o el seguimiento del mantenimiento del recurso a lo largo de su ciclo de vida, entre otras muchas utilidades. Recientemente, la necesidad de contar con modelos se vincula con el desarrollo de sistemas basados en conocimiento, que requieren hacer distinciones precisas, consistentes, sólidas y significativas entre conceptos relacionados con el dominio objeto de la aplicación, pero también con la mejora de la portabilidad, la interoperabilidad, la longevidad y la extensibilidad de sistemas (Kjellberg, 2009).

Esto dio lugar al desarrollo de diferentes tipos de modelos. En el contexto del modelado de MH, Nassehi y Newman (2012) identifican tres tipos de modelos. Los modelos matemáticos pretenden reducir la máquina a una ecuación o sistema de ecuaciones que representa un aspecto concreto de la MH, pero la semántica de las variables empleadas no queda representada, sino que requiere de una profunda abstracción del sistema representado. Los modelos con meta-modelo asociado simplifican la abstracción, almacenando tanto los datos como la relación entre ellos. Una tercera alternativa son los modelos basados en ontologías, que incluyen además la semántica del conocimiento representado.

El desarrollo de los modelos de MH ha estado limitado por las diversas definiciones de MH, dando lugar a una gran variedad de alternativas y propuestas de modelado. Frente a esta limitación, se plantea la necesidad de una definición universal de MH como uno de los factores críticos para la integración de sistemas CAx (Vichare, Nassehi, Kumar y Newman, 2007). El desarrollo de estos modelos unificados debe además soportar las nuevas características de la MH 4.0, un aspecto

a investigar en profundidad. Como comenta Xu (2017), el nuevo nivel tecnológico requiere necesariamente del modelado y virtualización de recursos, en especial de MH por su importante participación en los sistemas de fabricación.

Para contribuir a este desarrollo, en el presente trabajo se analizan las principales propuestas desarrolladas en los últimos años por diversos autores sobre el modelado de MH. En primer lugar se muestra una breve aproximación a la evolución de las MH. Posteriormente se comentan algunos de los principales estándares de referencia para el modelado de MH. Seguidamente, la investigación se centra en los nuevos requerimientos que la MH 4.0 establece y sus implicaciones de modelado, que es el centro de la revisión y estudio del estado del arte. Finalmente, se genera una tabla que muestra la evolución cronológica de los avances en el campo de estudio y permite trazar diversas líneas de investigación futuras alineadas con esta evolución.

2. ESTADO DEL ARTE

La revisión del estado del arte se realizó a través de un estudio de tipo documental, estableciendo un procedimiento de selección, acceso y registro de la muestra documental a través del diseño de una matriz bibliográfica de análisis del contenido, un instrumento a través del cual inventariar, filtrar y relacionar los textos de la muestra. Como resultado del estudio se abordó la redacción de esta sección, en la que se tratarán cuestiones relacionadas con la MH 3.0 y el modelado de la misma, haciendo mención especial al proceso de estandarización. A continuación se comentan las características específicas de la MH 4.0, y sus principales implicaciones de cara al modelado actual y las líneas futuras de trabajo.

2.1. MODELOS INICIALES DE MÁQUINA HERRAMIENTA

La historia de las MH ha estado muy vinculada al desarrollo de otras tecnologías en el sector industrial y a las grandes transformaciones impulsadas por las revoluciones industriales, una evolución que ha sido recogida por algunos autores como Liu y Xu (2017). En las últimas décadas del siglo XX, los avances en el campo computacional sirvieron para el desarrollo del control numérico por computador (CNC), el control numérico directo (DNC) o el control adaptativo (AC). Desarrollos que fueron acompañados por una progresiva introducción del computador como herramienta de soporte para la generación y verificación de los programas CN y con la necesidad de disponer de modelos computacionales de la MH, que fueron el sustento para el desarrollo de los sistemas de fabricación virtual (VMS- Virtual Manufacturing Systems).

Entre las propuestas iniciales de modelado destaca el trabajo de Wilczynski y Lipkis, quienes iniciaron en 1993 el modelado de las estructuras de MH CNC con el lenguaje de representación del conocimiento “LOOM” (Vichare, Nassehi y Newman, 2009b). En 1997 Ehmann, DeVor y DeMeter apuntaron que, para el desarrollo de VMS, era necesario simular y visualizar las trayectorias de la herramienta de corte para evitar colisiones y detectar errores de diseño.

A partir del año 2000 empezaron a surgir numerosas aplicaciones comerciales integradas en sistemas CAM orientadas a la representación de MH CNC y la simulación de trayectorias. Entre ellas destacan, por ejemplo, VNC (de Delmia), VERICUT (de CGtech), Machine Tool Builder and Synchronization Manager (de Unigraphics NX3) o ESPRIT (de DP Technology Corp.), desarrolladas para la representación virtual de MH y robots (Vichare et al., 2007).

A principios del siglo XXI se produce un giro en el uso y el campo de aplicación de estos modelos de MH, más vinculado a la planificación de procesos. Las propuestas desarrolladas en este periodo se centraron mayoritariamente en la representación de máquinas virtuales (Charlès, 2005), para dar soporte al desarrollo de planes de proceso específicos (Li et al., 2005, citado por Vichare et al., 2007).

Con el objeto de disponer de modelos más completos, gran parte de las propuestas incorporan el concepto de capacidad (capability) del recurso, como la de Zhang et al., (1999). Estos autores proponen un modelo de recursos de fabricación orientado a objetos que contempla diversas capacidades junto con una planificación de procesos basada en agentes. En dichas propuestas se muestra el recurso o sistema de fabricación como un conjunto de capacidades, propiedades y/o habilidades orientadas al proceso, que derivan fundamentalmente de los atributos de los elementos mecánicos, electromecánicos o electrónicos que lo componen. En esta línea, Yang y Xu (2008) crean un modelo basado en STEP-NC que incluye la cinemática de la máquina y sus posibilidades de mecanizado. Por su parte, Um, Su y Stroud (2016) proponen un modelo de datos para la descripción de las capacidades de la máquina y un algoritmo para la selección automática de máquinas en base a capacidades, espacios de trabajo y tolerancias que permite el desarrollo de controles numéricos inteligentes que cumplen con STEP.

Los modelos de información orientados a objetos cuentan con limitaciones como método de representación de MH, especialmente en los aspectos relativos al funcionamiento y control del recurso. El comportamiento y la representación de conocimiento son planteamientos cada vez más presentes en el modelado de los recursos, como lo demuestra el desarrollo de UML, un lenguaje que cuenta con la capacidad de describir comportamientos y relaciones funcionales. Esta representación permite dinamizar el sistema y obtener un modelo mucho más rico y completo, que es la tendencia actual.

En la misma línea se sitúan los modelos ontológicos, que están en el foco de atención de la gestión de la información y el conocimiento para fabricación. Con ellos se facilita una comunicación efectiva y eficiente, ya que pueden expresarse mediante lenguajes web, facilitan la reutilización y el uso compartido de la información, ofrecen posibilidades de integración y soportan el razonamiento.

Entre las aplicaciones genéricas basadas en ontologías se encuentran: la representación de base de los recursos (Fox, 1992) (Fadel, 1994), el modelado de la MH como parte de un sistema de fabricación (Kjellberg, 2009) o MASON (Lemaignan, 2006), una ontología de alto nivel que propone una semántica común para el dominio de la fabricación. En otros casos, las propuestas ontológicas tienen un enfoque más específico, como MIRC (Manufacturing and Inspection Resource Capabilities) que se centra en la planificación de procesos, con una visión integradora de los recursos de mecanizado e inspección, modelando las capabilities de MH, herramientas y utillajes en relación a las características geométricas de las piezas mecanizadas y/o inspeccionadas (Solano, Romero y Rosado, 2016).

Uno de los principales problemas en el desarrollo de modelos es la falta de homogeneidad, que da lugar a diversos sistemas y formatos incompatibles con el resto de propuestas. De hecho, una gran parte de la información relevante de las MH no está debidamente gestionada o almacenada desde el punto de vista de su reutilización (Kjellberg, 2009). El uso de estándares de referencia como solución a esta problemática es una cuestión que se desarrolla brevemente en el siguiente apartado.

2.2. ESTÁNDARES DE REFERENCIA

Como respuesta a la heterogeneidad en las aplicaciones de modelado, diversas iniciativas han optado por estándares con los que unificar aspectos relativos al modelado de MH y conseguir la capacidad de usar, reusar, comunicar y consolidar la información sobre MH para diferentes propósitos.

Entre las iniciativas normativas más relevantes del Comité Técnico ISO TC184 se encuentran las normas STEP - Standard for the Transfer and Exchange of Product Model Data (ISO, 1994), MANDATE -MANufacturing management DATa Exchange (ISO, 2004a) y PSL -Process Specification Language (ISO, 2004b).

La norma ISO 10303 (STEP) proporciona un estándar capaz de describir datos del producto a través de su ciclo de vida. Por ejemplo, mediante los protocolos AP214 y AP239. En relación a este último (AP239), indicar la guía desarrollada por el consorcio OASIS, que incluye directrices llamadas DEX (Data Exchange Specifications, Capabilities, and Templates) (OASIS, 2007) y el trabajo de von Euler-Chelpin (2007), centrado en la aplicación de AP239 en MH desde la perspectiva de planificación de procesos o de la planta, la investigación o la operación de máquina.

En el ámbito de STEP destaca el trabajo de dos subcomités (SC) del TC184 de ISO. El SC4, cuya actividad se centra en los datos industriales, ha desarrollado el protocolo AP238 (Application interpreted model for computerized numerical controllers) y el SC1, dedicado al control de máquinas, que trabaja en la norma ISO 14649 (Data model for computerized numerical controllers). Ambas iniciativas están profundamente relacionadas y conforman la norma conocida como STEP-NC, que ha dado lugar a diversos trabajos relacionados con la fabricación, como Suh et al. (2006) o Nassehi et al. (2006), y ha originado un nuevo modelo de datos de la MH para incluir en la programación STEP-NC. Otras propuestas complementarias a STEP-NC son STEP-NCMtDm (Yang y Xu, 2008) o UMRM (Unified Manufacturing Resource Model) (Vichare et al., 2009a), orientada hacia la reconfigurabilidad del recurso.

Otros estándares en desarrollo son la iniciativa ASME B5.59 (2005), dedicada a modelos de información y formatos para datos de la MH, y QIF (Quality Information Framework) que incluye el modelado de dispositivos de medición, herramientas y equipamiento auxiliar (DMSC, 2015).

2.3. LA MÁQUINA HERRAMIENTA 4.0

La evolución de los paradigmas y tecnologías industriales condiciona fuertemente la forma de entender los recursos y sistemas de fabricación, especialmente las MH. En los últimos años surge el concepto de MH 4.0 que incorpora tecnologías como CPS o IoT y da soporte a la fabricación en la Nube. Con este nuevo concepto, la MH es considerada como un proveedor de soluciones y servicios (Liu y Xu, 2017) y se tornan fundamentales las capacidades de conectividad, inteligencia, accesibilidad, adaptabilidad y autonomía, muy vinculadas a los principios de la Industria 4.0 y que están presentes en la MH 4.0.

Otra de las propuestas más recientes sobre el modelado de MH es el CGMTDM (Comprehensive and Generic Machine Tools Data Model), desarrollado por Zhang et al., (2017), que presenta una solución consistente, completa y flexible para la representación de la información de MH construido a partir de la orientación al objeto propia del lenguaje EXPRESS.

Por otra parte, el nuevo paradigma de la fabricación en la Nube (Cloud Manufacturing) ha transformado radicalmente el concepto de recurso, que tiene importantes implicaciones en su representación y en la integración en un nuevo marco de trabajo virtual. En esta línea, destacar la utilización de bloques funcionales para diseñar mecanismos de integración, cuyo objetivo es proporcionar una arquitectura flexible para soportar la fabricación en la Nube (Wang, X. V. y Lihui Wang, L., 2015).

La necesidad de una mayor integración vertical y horizontal de recursos es otro de los grandes retos. En este sentido, se ha desarrollado recientemente la Reference Architectural Model Industry 4.0 (RAMI 4.0) (Hankel y Rexroth, 2015, citado en Liu y Xu, 2017) que introduce el concepto de Industry 4.0 component y proporciona una guía para las tecnologías interdisciplinarias de la Industria 4.0. En esta misma línea se presenta el concepto de Cyber-Physical Machine Tool (CPMT) propuesto por Liu y Xu (2017) como una tendencia de desarrollo de la MH 4.0 dentro de los CPS donde la integración de computadores y redes de trabajo permiten monitorizar y controlar el proceso de mecanizado. El concepto de “gemelo virtual”, con su capacidad para recoger la información generada en tiempo real por la MH y analizarla para ayudar en la toma de decisiones durante la monitorización y control, permite la integración vertical de los CPS y aumenta la adaptabilidad de los mismos, al igual que otras propuestas como son las de Zhao, Xu y Xie (2008) y Lei et al., (2017). Por otra parte, la integración horizontal dota al CPPS de capacidades de cooperación autónoma, de manera que los “gemelos virtuales” se comunican y controlan entre sí, reduciendo de forma significativa el esfuerzo humano requerido. Como indican Liu y Xu (2017), la combinación de integración vertical e integración horizontal en el CPPS incrementa la calidad y la productividad al tiempo que reduce los costes de producción.

La tendencia en el diseño de sistemas de fabricación se orienta hacia la reconfigurabilidad, entendida como la utilización de sistemas modulares que se pueden añadir, quitar, modificar o intercambiar según las necesidades cambiantes, dando soporte a una gran variedad de operaciones de fabricación. Seo et al., (2005) presentaron un modelo estructural de MH basada en reglas, donde la reconfigurabilidad de la MH es el medio para soportar los requerimientos de fabricación de cada tipo de producto (Seo et al., 2005, citado en Vichare et al., 2007).

Finalmente, cabe indicar que si bien el modelado de errores en MH no es un concepto nuevo, este tipo de modelos adquieren una gran importancia cuando aumenta la variedad de clases de máquinas con configuraciones que evolucionan a lo largo de su ciclo de vida. Algunos autores sugieren que este tipo de modelado de errores está muy vinculado a la topología de la máquina y que, por tanto, no existe posibilidad de lograr un sistema de modelado genérico que abarque todas las MH existentes. Otros autores, en cambio, consideran que un modelo modular combinado con modelos de información sobre MH puede ser un paso significativo hacia un método genérico y robusto para el modelado de MH (Ronnie *et al.*, 2015).

La tendencia en el diseño de sistemas de fabricación se orienta hacia la reconfigurabilidad, entendida como la utilización de sistemas modulares que se pueden añadir, quitar, modificar o intercambiar según las necesidades cambiantes, dando soporte a una gran variedad de operaciones de fabricación.

3. RESULTADOS

A partir de la información recogida en la revisión del estado del arte se analiza la evolución del campo de modelado de la MH a lo largo de los últimos años. La Tabla 1 muestran los principales contenidos, identificado tres grandes bloques temáticos: el campo de aplicación, el tipo de modelo y la tecnología considerada.

En lo referido al campo de aplicación de los modelos, se han considerado tres alternativas: orientados a la selección de recursos y planificación de procesos (CAPP), orientados al control en tiempo real (CTR) mediante sistemas de bucle cerrado, y orientados al análisis de tolerancias y control de la calidad (CC). En cuanto al tipo de modelado, se han distinguido tres categorías: modelos matemáticos o analíticos (MA), modelos orientados a objetos (MOO) y modelos basados en ontologías (MBO). Finalmente, se han considerado tres tecnologías muy vinculadas a las nuevas propuestas de modelado: fabricación en la Nube (FN), sistemas ciber-físicos (CPS) y bloques funcionales (BF).

Cabe señalar además que, para acotar su alcance, las publicaciones consideradas en este análisis han sido seleccionadas por su relación directa con el modelado de MH. Las referencias se agrupan bianualmente por fecha de publicación y según las nueve categorías consideradas, de forma que sea posible realizar un análisis genérico y en paralelo de la evolución cronológica y temática del campo de estudio.

Tabla 1. Análisis de la evolución cronológica en el modelado de MH 4.0.

Años	Actividad			Tipo de modelo			Tecnología		
	CAPP	CTR	CC	MA	MOO	MBO	FN	CPS	BF
2003 / 04					1		1		
					(Suh, 2003)		(Suh, 2003)		
2005 / 06	2	1	1	3	2				1
	(Suh, 2006)	(Jönsson, 2005)	(Altintas, 2005)	(Seo, 2005)	(Suh, 2006)				(Nassehi, 2006)
	(Nassehi, 2006)			(Jönsson, 2005)	(Nassehi, 2006)				
2007 / 08	2	1	1		3				
	(Vichare, 2007)	(Zhao, 2008)	(Zhao, 2008)		(Vichare, 2007)				
	(Yang, 2008)				(Yang, 2008)				
					(Zhao, 2008)				
2009 / 10	2				3	1			
	(Nassehi, 2009)				(Kjellberg, 2009)	(Kjellberg, 2009)			
	(Vichare, 2009)				(Nassehi, 2009)				
					(Vichare, 2009)				
2011 / 12		1		1	1	1			1
		(Hoher, 2012)		(Hoher, 2012)	(Vichare, 2011)	(Nassehi, 2012)			(Nassehi, 2012)
2013/14/15	2			1	1		1		1
	(Soori, 2013)			(Soori, 2013)	(Safaieh, 2013)		(Wang, 2015)		(Wang, 2015)
	(Safaieh, 2013)								
2016 / 17	2	2	4	1	4	3	3	2	
	(Um, 2016)	(Lei, 2017)	(Fang, 2016)	(Jain, 2017)	(Um, 2016)	(Qin, 2017)	(Yuan, 2017)	(Xu, 2017)	
	(Yuan, 2017)	(Liu, 2017)	(Qin, 2016)		(Fang, 2016)	(Yuan, 2017)	(Liu, 2017)	(Liu, 2017)	
			(Lei, 2017)		(Lei, 2017)	(Solano, 2016)	(Xu, 2017)		
			(Jain, 2017)		(Zhang, 2017)				

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 1 se aprecia que la planificación de procesos es el campo de aplicación al que se enfocan mayoritariamente los modelos propuestos en los últimos años. Disponer de un modelo preciso con las características de la MH permite automatizar y mejorar la selección de recursos y, en general, la toma de decisiones relacionadas con la planificación de procesos. También destacan los trabajos relacionados con el control de calidad, la simulación de procesos y el tratamiento de tolerancias. Además, el control en tiempo real abre un escenario con propuestas aún por desarrollar.

En lo referente al tipo de modelo empleado, muchas propuestas se han alineado con los principios de STEP-NC: un enfoque orientado a objetos y una semántica más rica que los planteamientos puramente analíticos. Merece especial atención el incremento en los últimos años de los modelos basados en ontologías, que por su riqueza semántica y su capacidad para capturar conocimiento, facilitan nuevas prestaciones en el contexto de la Industria 4.0.

Entre las tecnologías presentes en las publicaciones más recientes, destaca la fabricación en la Nube, cuyo propósito es adaptar la MH a los nuevos requerimientos de la industria conectada. Algunos

modelos vinculan directamente esta nueva generación de MH con el desarrollo e implementación de CPS. Por otra parte, el uso de bloques funcionales en el diseño de los modelos se perfila como el soporte para los sistemas reconfigurables, un escenario en desarrollo y con gran potencial en la industria del futuro.

Por último, destacar las reiteradas alusiones a la necesidad de integración vertical y horizontal de los sistemas, así como al enfoque hacia el modelado de las capacidades.

4. CONCLUSIONES

Desde su origen, las MH han evolucionado junto con los grandes avances de la industria y las tecnologías asociadas a ésta. Desde hace unos años, la perspectiva de una nueva revolución industrial y planteamientos como la Industria 4.0 o RAMI 4.0 han potenciado nuevos avances tecnológicos como la fabricación en la Nube o los CPS. Estos desarrollos tecnológicos tienen a su vez un claro reflejo en la evolución de las MH, o más concretamente en el desarrollo de modelos virtuales de las mismas.

Conceptos como la MH 4.0 resultan ya familiares, pero son continuos los esfuerzos por encontrar una propuesta que estandarice y dé homogeneidad al modelado de este tipo de recursos, una cuestión compleja dada la gran variedad de tipos de máquina, así como la perspectiva de un futuro orientado al diseño de sistemas reconfigurables. Una problemática cuya solución podría estar soportada por diseños basados en bloques funcionales.

Desde hace unos años, la perspectiva de una nueva revolución industrial y planteamientos como la Industria 4.0 o RAMI 4.0 han potenciado nuevos avances tecnológicos como la fabricación en la Nube o los CPS.

Entre las muchas posibilidades que ofrecen las representaciones virtuales de las MH destaca la simulación de las capacidades de las MH y sus implicaciones en la gestión de la calidad, particularizadas en las operaciones de mecanizado. En otros casos, se proponen sistemas de control adaptativos a través de la adquisición de datos en tiempo real y sistemas de bucle cerrado.

Por otra parte, el camino hacia una MH cada vez más inteligente, autónoma, conectada y adaptativa, requiere disponer de modelos con una mayor riqueza semántica para representar y capturar el conocimiento necesario. Los modelos con soporte ontológico se presentan como una tecnología clave para alcanzar mayores niveles de interoperabilidad e integración de los sistemas de fabricación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M. y Witt, S.** (2005). Virtual Machine Tool. *CIRP Annals*, 54, pp. 115-138.
- ASME B5/TC56.** (2005). *ASME B5.59-2: Draft: Information Technology for Machine Tools, Part 2: Data Specification for Properties of Machine Tools for Milling and Turning*.
- Belli, F. y Radermacher, F.J. (Eds.)** (1992). The TOVE Project: A Common-sense Model of the Enterprise. En: *Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 604, pp. 25-34.
- Charlès, P.** (2005). *DELMIA Automation for Control Engineers in V5R15*.
- Dimensional Metrology Standards Consortium, Inc. (DMSC).** (2015). *Quality Information Framework (QIF) – An Integrated Model for Manufacturing Quality Information*. Part 5: QIF Resources Information Model and XML Schema File Version 2.1.
- Ehmann, K., DeVor, R. y DeMeter, E.** (1997). *A Framework for a Virtual Machine Tool (VMT)*.
- Fang, F.Z., Lib, Z., Arokiamc, A. y Gormand, T.** (2016). Closed Loop PMI Driven Dimensional Quality Lifecycle Management Approach for Smart Manufacturing System. *9th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2016 – Intelligent Manufacturing in the Knowledge Economy Era*.
- Fadel, F. G., M. S. Fox, y Gruninger, M.** (1994). A generic enterprise resource ontology. *3rd IEEE workshop on enabling technologies*. Infrastructure for collaborative enterprises, Morgantown.
- Fesperman, R. R., Moylan, S. P., Vogl, G. W. y Donmez, M. A.** (2015). *Reconfigurable data driven virtual machine tool: Geometric error modeling and evaluation*.
- Hankel, M. y Rexroth, B.** (2015). *The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*.
- Hoher, S. y Röck, S.** (2011). A contribution to the real-time simulation of coupled finite element models of machine tools – A numerical comparison. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, pp. 1627–1639.
- ISO (International Organization for Standardization).** (1994). *Industrial Automation System and Integration– Standard for the Transfer and Exchange of Product Model Data*. ISO 10303. New York, EE.UU.: American National Standards Institute.

- ISO (International Organization for Standardization).** (2004a). *Industrial Automation Systems and Integration – Industrial Manufacturing Management Data. Part 1, General Overview*. ISO 15531–1. New York, EE.UU.: American National Standards Institute.
- ISO (International Organization for Standardization).** (2004b). *Industrial Automation System and Integration – Process Specification Language. Part 1, Overview and Basic Principles*. ISO 18629–1. New York, EE.UU.: American National Standards Institute.
- Jain, S., Shao, G. y Shin, S.-J.** (2017). Manufacturing data analytics using a virtual factory representation. *International Journal of Production Research*, 55, pp. 5450-5464.
- Jönsson, A., Wall, J., y Broman, G.** (2005). A virtual machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, pp. 795–801.
- Kjellberg, T.** (2009). *The machine tool model—A core part of the digital factory*.
- Lemaignan, S., Siadat, A., Dantan, J-Y. y Semenenko, A.** (2006). *MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain*.
- Lei, P., Zheng, L., Xiao, W., Li, C. y Wang, D.** (2017). A closed-loop machining system for assembly interfaces of large-scale component based on extended STEP-NC. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91, pp. 2499-2525.
- Liu, C. y Xu, X.** (2017) Cyber-Physical Machine Tool – the Era of Machine Tool 4.0. *Procedia CIRP* 63, pp. 70-75.
- Moore, W. R.** (1970). *Foundations of mechanical accuracy*.
- Nassehi, A., Newman, S. T., y Allen, R. D.** (2006). The Application of Multi-Agent Systems for STEP-NC Computer Aided Process Planning of Prismatic Components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, pp. 559–574.
- Nassehi, A. y Newman, S.T.** (2012). Modeling of machine tools using smart interlocking software blocks. *CIRP Annals*, 61, pp. 435-438.
- OASIS PLCS TC.** (2007). *DEXLIB for PLCs*. Recuperado de: <http://www.plcsresources.org>
- Qin, Y. et al.** (2017). Explicitly representing the semantics of composite positional tolerance for patterns of holes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, pp. 2121–2137.

- Safaieh, M., Nassehi, A. y Newman, S. T.** (2013). A novel methodology for cross-technology interoperability in CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, pp. 79-87.
- Seo, Y. et al.** (2005). Virtual modeling of machine tools and Internet-based implementation. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. Orlando, FL, EE.UU.
- Solano, L., Romero, F. y Rosado, P.** (2016). An ontology for integrated machining and inspection process planning focusing on resource capabilities. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.
- Soori, M., Arezoo, B. y Habibi, M.** (2013). Dimensional and geometrical errors of three-axis CNC milling machines in a virtual machining system. *Computer-Aided Design*, 45, pp. 1306-1313.
- Suh, S.-H., Chung, D.-H., Lee, B.-E., Shin, S., Choi, I. y Kim, K.-M.** (2006). STEP-Compliant CNC System for Turning: Data Model, Architecture, and Implementation. *Computer Aided Design*, 38, pp. 677-688.
- Suh, S.H., Seo, Y., Lee, S.-M., Choi, T.-H., Jeong, G.-S. y Kim, D.-Y.** (2003). Modeling and implementation of Internet-based virtual. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, pp. 516-522.
- Tao, F., Hu, Y., Ding, Y., Sheng, B., Song, C. y Zhou, Z. D.** (2006). Modelling of manufacturing resource in manufacturing grid based on xml. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 1261-1266.
- Um, J., Suh, S.H. y Stroud, I.** (2016). *STEP-NC machine tool data model and its applications*.
- VERICUT.** (2007). *CNC Machine Simulation*.
- Vichare, P., Nassehi, A., Kumar, S. y Newman, S.T.** (2007). *Towards a STEP-NC compliant model for representation of machine tools*.
- Vichare, P., Nassehi, A., Kumar, S. y Newman, S. T.** (2009a). A unified manufacturing resource model for representing CNC machining systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25, pp. 999-1007.
- Vichare, P., Nassehi, A., y Newman, S. T.** (2009b). *A unified manufacturing resource model for representing CNC machine tools*.

- Vichare, P., Nassehi, A., y Newman, S. T.** (2011). Unified Representation of Fixtures: clamping, locating and supporting elements in CNC manufacture. *International Journal of Production Research*.
- Euler-Chelpin, A. von, Sivard, G., Hedlind, M., Kjellberg, T. y Lundholm, T.** (2007). A multi-viewpoint machine model for efficient production development. *Swedish Production Symposium*.
- Wang, X.V. y Wang, L.** (2015). *Function block-based integration mechanisms for adaptive and flexible cloud manufacturing*
- Xu, X.** (2017). *Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing*
- Yang, W., y X. Xu.** (2008). Modelling Machine Tool Data in Support of STEP-NC Based Manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21, pp. 745– 763.
- Yuan, M., Deng, K. y Chaovalitwongse, W. A.** (2017). *Manufacturing Resource Modeling for Cloud Manufacturing*
- Zhang, Y., Feng, S. C., Wang, X., Tian, W. y Wu, R.** (1999). Object oriented manufacturing resource modelling for adaptive process planning. *International Journal of Production Research*, 37, p. 18.
- Zhang, Y., Guo, G., Zhang, Y. y Li, Y.** (2017). A comprehensive and generic machine tools data model. *International Journal of Manufacturing Research (IJMR)*, 12(1).
- Zhao, F., Xu, X. y Xie, S.** (2008). STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, pp. 200–216.

