

Sistemas de Fabricación Holónicos.

Araújo Araújo José Alberto ¹, de Benito Martín Juan José ², del Olmo Martínez Ricardo ³

¹ Ingeniero Industrial, ETSII. de la UVA, Paseo del Cauce s/n 47011 Valladolid, arauzo@eis.uva.es

² Dr. Ingeniero Industrial, ETSII. de la UVA, Paseo del Cauce s/n 47011 Valladolid, debenito@eis.uva.es.

³ Dr. Ingeniero Industrial, EPS. de la UBU, Avenida Santander s/n 09006 Burgos, rdelolmo@ubu.es.

RESUMEN

Un sistema de fabricación holónico es un sistema de fabricación en el cual, los diferentes elementos que lo componen son modelados como holones, siendo estos unas entidades autónomas y cooperantes. Desde este punto de vista, pueden desarrollarse sistemas de programación y control de la producción más eficientes, robustos ante posibles perturbaciones y adaptables a cambios. En este trabajo justificaremos la utilización de los sistemas de fabricación holónicos, comentando sus características fundamentales y arquitecturas básicas.

1. Introducción.

Un sistema de fabricación puede definirse como un conjunto de elementos interrelacionados, que permite la obtención de bienes mediante la combinación adecuada de los recursos necesarios. La importancia y la cantidad de cada uno de estos recursos dependen del tipo de producto que se quiere fabricar, pero también de la tecnología y de los métodos aplicados.

Los métodos productivos, ligados al conocimiento organizativo y a los sistemas de información, juegan cada vez un papel más importante dentro de los sistemas productivos. Es por ello que la información, ha dejado de ser un recurso más para convertirse en el fundamental. De hecho, la forma en la que se procesa, determina la estructura del sistema productivo y en gran medida la competitividad de la empresa.

Desde este punto de vista, una forma adecuada de mejorar el funcionamiento del sistema productivo será actuar sobre los flujos de información. En este artículo se propone un sistema de información basado en entidades autónomas y distribuidas, llamadas holones, conectadas mediante las líneas de comunicación y los protocolos adecuados. Para ello, en primer lugar justificaremos la necesidad de nuevas estructuras del sistema de información, derivadas de las necesidades que exige el mercado. A continuación se repasarán algunas arquitecturas de los sistemas de información que se han propuesto a lo largo de las últimas décadas, comprobando hasta que punto se adaptan a los nuevos requisitos. Las arquitecturas puras propuestas no son las más adecuadas para hacer frente a las necesidades mencionadas, lo que da lugar a la búsqueda de soluciones mixtas, entre las que se encuentran los sistemas de fabricación holónicos.

2. Sistemas de información adecuados al mercado.

Las operaciones de fabricación no deben entenderse como un fin en si mismas sino que deben estar orientadas hacia la consecución de los objetivos globales de la empresa, condicionados a su vez por las características del mercado. Las condiciones del mercado pueden cambiar con el paso del tiempo y con éstas también lo hacen los requisitos del sistema de fabricación, de

forma que un sistema de fabricación bien planteado en este momento, puede resultar inadecuado en el futuro.

En esta sección se mostrará las tendencias actuales del mercado mundial y como éstas determinan las características deseables del sistema de fabricación, las cuales condicionaran la estructura de su sistema de información. Esta interdependencia ha sido puesta de manifiesto por algunos autores como Bussmann [1] que lo ilustra con la figura 1.



Figura 1: Interdependencia de las características del sistema de fabricación e información con el mercado [1].

2.1 Evolución del mercado.

Es difícil estimar como será el mercado del siglo XXI, pero la tendencia es, que el cliente a través de sus gustos sea quien va a determinar las características y composición del mercado. Esta tendencia, creciente hacia la personalización de la demanda, hace que las empresas deban fabricar, en cantidades variables, una amplia variedad de productos. El fabricante no sólo va a tener que suministrar al usuario aquello que precise en gama, calidad y precio, si no que además, debido a la enorme competencia existente, debe hacerlo en el instante de tiempo que éste lo requiera, exigencia que dará al entorno un dinamismo desconocido hasta el momento. Para adaptarse a este entorno, las compañías deben acortar el ciclo de vida del producto, reducir el tiempo de comercialización, incrementar la variedad de productos, satisfacer la demanda instantáneamente y todo esto manteniendo la calidad y los bajos costes.

2.2 Requisitos del sistema de operaciones.

El sistema de operaciones de la empresa debe ser capaz de adaptarse a las necesidades del nuevo mercado. Veamos algunas características deseables en los sistemas productivos para ser competitivos en el entorno descrito en el apartado anterior.

- Una característica deseable de todo sistema de fabricación es la simplicidad, puesto que permite reducir los costes de producción. Esta característica debe mantenerse aunque aumente la complejidad de la gama de productos. Desde el siglo pasado se ha reducido la complejidad de los sistemas de fabricación, aplicando la **estandarización** de los componentes de los productos y la **reducción de su número**. Pero además el sistema productivo debe poseer un **comportamiento** y una **estructura transparentes**, que garanticen un resultado predecible ante las instrucciones de control.
- Para que los costes de producción no aumenten drásticamente con los continuos cambios en el producto, es necesario la reutilización de los equipos de fabricación actuales en la producción de los bienes futuros. Esto se puede conseguir mediante la inclusión de componentes **flexibles** dentro del sistema productivo y reorganizando los procesos de fabricación. A esta característica del sistema de fabricación se la denominará **reconfigurabilidad**.

- La variación de la demanda hace que las compañías deban fabricar diferentes cantidades de productos en cada momento, lo que obliga a modificar la capacidad del sistema de fabricación. Esta flexibilidad en la capacidad, exige facilitar la posibilidad de añadir o sustraer recursos productivos (**escalabilidad**), así como la posibilidad de su reasignación (**reconfigurabilidad**).
- En un entorno dinámico como el descrito, la cantidad de imprevistos externos puede ser muy numerosa (anulación de pedidos, cambio de características del producto, aparición de pedidos urgentes, etc.). Además, los imprevistos internos típicos los como fallos de máquinas, absentismo, falta de materias primas, etc., se pueden sumar a estos imprevistos externos. Para conseguir solventar los problemas que pueden surgir de estas perturbaciones se requiere un **sistema robusto**. Esta robustez puede ser estructural o dinámica. La robustez estructural supone medidas como el acopio de inventarios y la planificación de holguras de capacidad, que claramente son alternativas costosas. Una forma más económica de conseguir robustez ante perturbaciones es dinámicamente, mediante el enrutamiento flexible y la posibilidad de reasignación de tareas.

2.3 Propiedades del sistema de información.

Para conseguir un sistema de fabricación con los requisitos citados anteriormente, es deseable que el sistema de información posea unas determinadas características en cuanto a su estructura y relación entre las partes que lo componen. Bussmann y McFarlane [1] proponen las siguientes.

- La **Arquitectura del sistema debe ser distribuida y basada en productos/recursos**. Es decir: el sistema de información debe descomponerse en entidades interrelacionadas que representen a productos y recursos. Esta arquitectura reduce la complejidad del sistema, facilitando además la introducción y eliminación de productos y/o recursos (escalabilidad) y la reconfiguración del sistema.
- Para facilitar la escalabilidad y la reconfigurabilidad es deseable que la **interacción entre las diferentes entidades sea abstracta, generalizada y flexible**. Un componente tiene una interacción abstracta con un segundo, cuando no necesita del conocimiento del funcionamiento interno del segundo componente. La interacción será generalizada cuando no es necesario un conocimiento preciso del comportamiento del segundo componente. La interacción entre componentes se denomina flexible, cuando cada componente decide dinámicamente con quien interactuar.
- El sistema debe poseer **comportamiento reactivo y pro-activo**. El comportamiento reactivo hace que el sistema actúe rápidamente ante perturbaciones. Además el sistema debe ser capaz de tomar decisiones, evaluando la situación y las consecuencias de la posible reacción (comportamiento pro-activo).
- Otra característica deseable de la arquitectura del sistema, para adaptarse a cambios o perturbaciones, es la **capacidad de auto-organización**. Para conseguir este requisito se debe, entre otras cosas, flexibilizar la jerarquía y asegurar el establecimiento dinámico de relaciones entre las diferentes partes.

Por lo tanto, la arquitectura del sistema de información debe ser distribuida en entidades basadas en recursos/productos. Estas entidades, capaces de un comportamiento pro-activo y

reactivo se relacionarán de forma abstracta, generalizada y flexible. Además el sistema debe ser capaz de auto-organizarse.

3. Arquitecturas de referencia.

Se denomina arquitectura de referencia a la estructura genérica del sistema de información que incluye, fundamentalmente, los tipos de componentes, las relaciones establecidas entre ellos y sus funciones.

Los sistemas de información para la fabricación, se han desarrollado, inicialmente, según un esquema jerárquico. Como se verá más adelante, esta arquitectura no se adapta a muchos de los requisitos expuestos anteriormente. En las dos últimas décadas se han propuesto varias arquitecturas de referencia para adaptar el sistema de información a los nuevos requisitos. A continuación se presentan algunas de ellas.

3.2 Control jerárquico.

El control de los sistemas de fabricación tradicionales se ha realizado de acuerdo a una estricta arquitectura jerárquica multi-nivel [2, 3], similar a la que se representa en la figura 2.

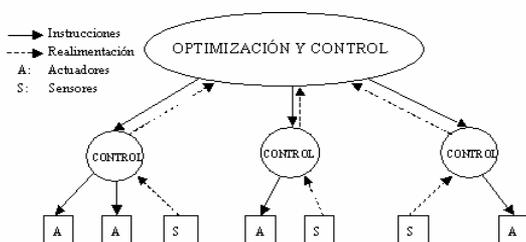


Figura 2. Elementos y relaciones en una arquitectura jerárquica de 3 niveles.

En este tipo de arquitectura existen dos flujos de información: las órdenes de ejecución, que fluyen desde los niveles superiores a los inferiores y los datos de control, que van desde los niveles inferiores a los superiores. Las órdenes de ejecución, procedentes del nivel superior y descompuestas en forma de tareas, serán enviadas a los niveles inferiores. Las tareas, ya desglosadas, llegarán al nivel más bajo que se encargará de realizar las acciones físicas a través de un conjunto de actuadores. El nivel inferior también es el encargado de recoger los datos procedentes de los sensores que servirán para realimentar el sistema. Todos los datos procedentes de los sensores, serán procesados y filtrados en cada nivel hasta llegar al nivel superior. Según este esquema de funcionamiento, cada elemento de la jerarquía realiza tres funciones: descomponer las órdenes en tareas, procesar los datos de control y adoptar las medidas correctoras cuando la ejecución de las tareas se desvía de la planificación. Para realizar estas funciones, cada nivel de la jerarquía debe tener un modelo casi completo del sistema de fabricación.

Este tipo de arquitectura tiene la ventaja de ser simple y transparente en su funcionamiento, pudiendo además funcionar en óptimos globales. Como contrapartida tiene algunas desventajas. La primera de ellas deriva del hecho de que los niveles altos de la jerarquía no están conectados directamente a los sensores, por lo que el sistema reacciona lentamente ante

perturbaciones. Para realizar sus funciones, cada elemento de la jerarquía debe poseer un modelo del sistema de fabricación. Si el sistema se modifica, se debe modificar cada uno de sus elementos. Esto nos lleva al segundo inconveniente, el sistema es difícilmente reconfigurable y escalable.

3.3 Control heterárquico.

Uno de los intentos de implantar el paradigma de control distribuido en los sistemas de fabricación, ha sido mediante el llamado control heterárquico [2], donde todos los elementos de la arquitectura se relacionan entre si pero sin ninguna jerarquía, según se esquematiza en la figura 3.

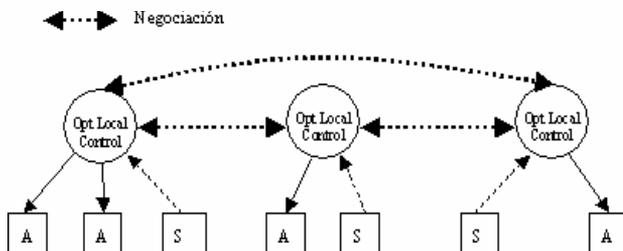


Figura 3. Elementos y relaciones en una arquitectura heterárquica.

En esta arquitectura cada elemento toma sus propias decisiones de actuación en función de sus objetivos individuales, de las señales de control que recibe directamente de sensores y de información que recibe de otros elementos del sistema. Es fácil deducir que las características de esta arquitectura serán las contrarias de la arquitectura jerárquica. Es decir: el sistema será poco transparente en su comportamiento y difícilmente podrá funcionar en óptimos globales, pero será más robusto, reconfigurable y escalable.

3.4 Arquitecturas mixtas.

Ninguna de las arquitecturas anteriores cumple con los requisitos establecidos en el epígrafe 2.3. Para solucionar los inconvenientes de estas aproximaciones se han propuesto arquitecturas mixtas, que intentan conseguir las ventajas de ambas y eliminar sus inconvenientes. Algunas de éstas son: la arquitectura jerárquica modificada [2], la arquitectura de subsumpción [4], la arquitectura PEM [5] o los sistemas de fabricación holónicos.

4. Sistemas de fabricación holónicos.

En octubre de 1989 se inició un amplio programa de investigación internacional sobre los sistemas de fabricación inteligentes, para lo que se creó el consorcio IMS (Intelligence Manufacturing System) [6]. El programa del IMS comprende actualmente seis proyectos importantes. El quinto de estos proyectos está orientado a desarrollar un nuevo paradigma para la planificación y control de la fabricación, que incorpore características de la arquitectura jerárquica y heterárquica, adaptándose a los requisitos expuestos en el punto 2.3. A este paradigma se le denomina sistemas de fabricación holónicos, y para su desarrollo se creó el consorcio HMS (Holonc Manufacturing System) [7].

4.1 Conceptos básicos de los sistemas de fabricación holónicos.

El elemento central de este paradigma es el holón, término acuñado por Koestler [8]. Este filósofo húngaro observó que los organismos vivos y las organizaciones sociales autosuficientes estaban formadas por diferentes unidades fácilmente identificables, que podían a su vez estar divididas en otras unidades y/o pertenecer a otras unidades mayores. Estas entidades que poseen a la vez las características del todo y de las partes, se denominaron holones.

El consorcio HMS ha traducido los conceptos que Koestler desarrolló para las organizaciones y organismos vivos en un conjunto de conceptos apropiados para los sistemas de fabricación. La meta de este trabajo es conseguir las ventajas que la organización holónica proporciona a los organismos y las sociedades, en los sistemas de fabricación. Como paso inicial, el consorcio del HMS desarrolló la siguiente lista de definiciones para ajustar los conceptos de Koestler al campo de la fabricación [7].

- **Holón:** bloque autónomo y cooperativo de un sistema de fabricación que transforma, transporta, almacena y/o valida información. Un holón puede ser también una parte física del proceso. Un holón puede, incluso ser parte de otro holón.
- **Autonomía:** capacidad de una entidad para crear y para controlar la ejecución de sus propios planes y/o estrategias.
- **Cooperación:** mecanismo por el que un conjunto de entidades desarrolla y ejecuta planes mutuamente aceptables.
- **Holarquía:** conjunto de holones que pueden cooperar para alcanzar una meta o un objetivo. La holarquía define las reglas básicas para la cooperación de los holones limitando su autonomía.
- **Sistema de fabricación holónico (HMS):** holarquía que integra el conjunto de actividades de fabricación desde el aprovisionamiento hasta la comercialización pasando por el diseño y la producción.
- **Cualidades holónicas:** cualidades de una entidad que hacen de ella un holón. El conjunto mínimo es autonomía y capacidad de cooperación.
- **Holonomía:** grado por el cual una entidad exhibe cualidades holónicas.

4.2 Arquitectura de referencia holónica.

Con los conceptos expuestos anteriormente Wyns [9] ha desarrollado la arquitectura de referencia PROSA para los sistemas de fabricación holónicos. Veamos las principales características de esta arquitectura comparándolas con las requeridas en el apartado 2.3. En la figura 4 se ha representado un esquema básico de la arquitectura PROSA que además ha sido utilizada por Bongaerst [10], para desarrollar un sistema de fabricación holónico que integra secuenciación de tareas y control.

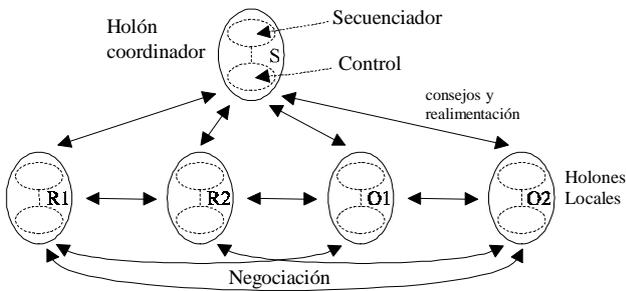


Figura 4. Esquema de la arquitectura de referencia PROSA [9].

4.2.1 Componentes.

Los componentes de un sistema holónico son lógicamente los holones. La cuestión es identificar estos holones. Durante la última década varios investigadores han hecho sus propuestas [11, 12, 13], coincidiendo todos ellos en incluir holones de producto, holones de recurso y holones coordinadores. Wyns denomina holones locales a los holones de producto y recurso. De esta forma, la arquitectura holónica es distribuida según un esquema producto/recurso, cumpliendo por lo tanto la primera de las especificaciones propuestas en el apartado 2.3.

4.2.2 Funciones de los componentes.

Cada holón, sea del tipo que sea, realiza dos funciones básicas, la secuenciación de operaciones y el control en tiempo de ejecución. Los holones coordinadores intentarán obtener una secuencia óptima de tareas, para posteriormente enviar las oportunas instrucciones a los diferentes holones locales. Esta forma de proceder implica un comportamiento pro-activo del sistema y es el más adecuado cuando no existen perturbaciones que modifiquen la planificación. Si ocurren imprevistos, el holón coordinador necesitará bastante tiempo para realizar una nueva secuenciación. Si se pretende que el sistema reaccione rápidamente ante el imprevisto, debe ser un holón local, mediante su secuenciador, el que busque una solución según criterios locales. Esta forma de proceder será reactiva.

Según este esquema el sistema incorpora comportamiento activo y pro-activo, que es otro de los requisitos expuestos en el punto 2.3. Además se puede observar que el sistema se estructura según un enfoque jerárquico cuando planifica el holón coordinador y según un enfoque heterárquico en cualquier otro caso, lo cual supone que el poder de decisión está ubicado en diferentes holones según sean las circunstancias.

4.2.3 Relación entre componentes.

Si como se describe anteriormente, el poder de decisión cambia de holón, las relaciones entre holones se modificarán a medida que el sistema trabaja. Si no existen imprevistos los holones locales actuarán según las instrucciones de los holones coordinadores. Si ocurren imprevistos serán los holones locales los que tomen la decisión cooperando entre ellos y desoyendo las instrucciones de los holones coordinadores. Se puede concluir por lo tanto, que la relación entre los componentes es flexible y que el sistema es capaz de auto-organizarse.

5. Conclusiones.

El paradigma de fabricación holónica se presenta como una alternativa a los sistemas de control de la fabricación actuales, para adaptarse a los actuales requisitos del mercado. Resultados experimentales obtenidos por Bongaerst [10] así lo confirman.

En base a esto, estamos aplicando este paradigma en el diseño del sistema de información para el gobierno de una célula de fabricación flexible (CFF). El holón coordinador está representado por el ordenador de control, encargado de la gestión de las comunicaciones y de la planificación de las ordenes de producción. Los productos y los componentes de la CFF están representados por holones locales que interactúan entre ellos y además exhiben un comportamiento reactivo.

Referencias

- [1] Bussmann, D. C., McFarlane, D.C., (1999) "Rationales for Holonic Manufacturing Control", *2nd Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, Belgium*, pp. 177-184.
- [2] Dilts, D. M., Boyd, N.P., Whorms, H. H., (1991) "The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, 10(1), pp 79-93.
- [3] Van Brussel, H., (1994) "Holonic Manufacturing System, The vision matching the problem", *First European Conf. on Holonic Manufacturing System*, Hanonover.
- [4] Brooks, R. A., (1986) "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2(1), pp 14-23.
- [5] Heikkilä T., Röning, J., (1992) "PMP-Modelling: A Framework for Designing Intelligent Robot Control", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 4, N° 5.
- [6] <http://www.ims.org/> (2002).
- [7] <http://hms.ifw.uni-hannover.de/> (2002).
- [8] Koestler, A., (1967) "The Ghost in the Machine", *Arkana*.
- [9] WYNS, J., (1999), "Architecture for holonic manufacturing systems - The key to support evolution and reconfiguration", *Ph.D. Dissertation*, K.U.Leuven, PMA Division.
- [10] Bongaerst, L., (1998) "Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems", *Ph.D. Dissertation*, K.U.Leuven, PMA Division.
- [11] Sugimura, N., Y. Tanimizu, T. Yoshioka, (1997) "A Study on Object-Oriented Modelling of Holonic Manufacturing System", *Proceedings of the 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Osaka, Japan, pp. 215-220.
- [12] McFarlane, D.C., (1995). "Holonic Manufacturing Systems in continuous processing: concepts and control requirements", *N.O.E. on Intelligent Control of Integrated Manufacturing Systems*, Lisboa, Portugal, Alfamicro.
- [13] Tharumarajah, A., A.J. WELLS, (1997) "A Behavior-Based Approach to Scheduling in Distributed Manufacturing Systems", *Integrated Computer-Aided Engineering*, V.4, N.4, pp. 235-249.