

Evolución y Retos de la Programación de la Producción Basada en Sistemas Multiagente*

Pedro Gómez Gasquet¹, Francisco-Cruz Lario Esteban¹

¹ Centro de Investigación de Gestión en Ingeniería de la Producción, Departamento de Organización de Empresas, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. {pgomez, fclario}@cigip.upv.es.

Resumen

En este trabajo se identifican algunos de los aspectos no cubiertos suficientemente por los amplios trabajos de investigación realizados hasta el momento en el campo de la Programación de la Producción, y se plantea como para algunos de ellos existen nuevas posibilidades de desarrollo soportadas en herramientas emergentes. En concreto se analiza la posibilidad de aplicar técnicas basadas en Sistemas Multiagente (MAS) procedentes de la Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) al Problema de la Programación de la Producción, para lo cual se identifica cuáles son las aportaciones de los MAS, y cuáles son los avances que futuros en dicho campo de los MAS.

Palabras clave: Programación Producción, Sistemas Multiagente.

1. Introducción

En este trabajo se tratará la Programación de la Producción o Scheduling, entendida de forma general como una disciplina cuyo objetivo es Asignar, Secuenciar y Temporizar diferentes órdenes de fabricación en un sistema productivo, y que se encuentra fuertemente ligada a técnicas que se desarrollan en el marco cuantitativo.

Durante más de cinco décadas se ha avanzado de forma significativa en esta disciplina, donde podemos encontrar miles de publicaciones científicas y profesionales, entre la que se debe destacar la “Teoría de la Secuenciación (Conway *et al* 1967)”. En los últimos años, se ha realizado un gran esfuerzo en abordar problemas prácticos y se han proporcionado una serie de nuevas técnicas que se enfocan dentro de lo que se puede denominar aplicaciones para el mundo real. Existen modelos basados en Restricciones con gran flexibilidad en las representaciones y escalabilidad en la gestión de las restricciones. Igualmente, existen herramientas de Programación Matemática capaces de afrontar problemas de escalas sin precedentes, y MetaHeurísticas que proporcionan capacidades robustas para la optimización de la Programación de la Producción. A pesar de disponer de este alentador panorama no se puede decir que el problema de la Programación de la Producción está superado.

* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un Proyecto de Investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, referencia PSE-370500-2006-1, “Potenciando la Competitividad del Tejido Empresarial Español a través de la logística como factor Estratégico en un entorno Global”.

2. Retos que Favorecen la Aplicación de Nuevas Técnicas

Existen algunos nichos muy maduros, los más cercanos a los entornos estáticos y con pocos recursos en juego, y otros muy lejos aún de ser dominados, como los relacionados con entornos dinámicos, con incertidumbre, o de gran complejidad. Sobre estos últimos problemas tan sólo disponemos, en la gran mayoría de los casos, de algunas técnicas y herramientas que permiten alcanzar resultados suficientemente satisfactorios, en el mejor de los casos, pero de los que estamos lejos de alcanzar la funcionalidad requerida.

Algunos de los retos más destacados en el área de la Programación de la Producción son, según Smith (2001) y Biundo (2003):

- La generación de Técnicas para proporcionar Programas en condiciones de alta complejidad en las restricciones y los objetivos. Se trata de disponer de herramientas que funcionen en condiciones realistas, y que tengan en cuenta la escala y complejidad de los problemas.
- Desarrollo de Técnicas para generar Programas en entornos cambiantes. Deben posibilitar herramientas que traten los entornos inciertos que sean capaces de gestionar los cambios para proporcionar altas prestaciones con la evolución del sistema.
- La integración/coordinación de la Planificación y la Programación. En algunos casos existe una línea delgada entre ambas actividades o al menos una fuerte dependencia, por lo que conviene dotar herramientas que implementen dicha integración.
- Desarrollo de herramientas de modelado intuitivas para el usuario. Se trata de implementar productos que permitan a un usuario no experto modelar un problema y analizar los resultados del modelo sin necesidad de conocer el lenguaje de modelado matemático.

Otros aspectos más tradicionales, pero con necesidad de un mayor avance científico son:

- Integración con otras herramientas del entorno cercano de colaboración. Existe software y herramientas tradicionales que trabajan junto con los sistemas inteligentes/avanzados de Programación de la Producción que deben ser integradas de forma rápida y sencilla.
- Ontologías y Librerías comunes. Se ha realizado un importante trabajo en el desarrollo de Ontologías por ARPA, lo que se ha traducido en un desarrollo de un lenguaje de descripción del dominio. No obstante, existen otras iniciativas que han desarrollado estos aspectos que pueden aportar valor añadido.

De los tres primeros puntos se podría extraer la necesidad de disponer de técnicas que permitan incorporar los conocimientos ya desarrollados, normalmente en forma de modelos y algoritmos, para crear nuevas herramientas dotadas de un alto grado de robustez, flexibilidad, y escalables. En este sentido, los Sistemas Multiagente (MAS), dentro de la denominada Inteligencia Artificial Distribuida, permiten alcanzar parte de estos objetivos y re-orientar el conocimiento adquirido en los últimos 50 años en el ámbito de la Programación de la Producción.

3. Aproximación de la IAD a la Programación de la Producción

El estudio de los comportamientos inteligentes colectivos consecuencia de la interacción de diversos elementos llamados agentes es el objetivo fundamental de la inteligencia artificial distribuida (IAD) (Avouris y Gasser 1992), Bond y Gasser 1988). La IAD ha experimentado una evolución apreciable en su corta vida, que podemos clasificar según Iglesias (1998) en tres etapas cronológicamente diferenciadas:

- La IAD “Clásica (Moulin y Chaib-draa 1996, Gasser y Huhns 1989), empieza a estudiar la conducta colectiva en contraposición de la inteligencia artificial que estudia la individual.
- La IAD “Autónoma” (Castelfranchi y Conte 1996), se centra en los agentes individuales dentro de un mundo social.
- La IAD “Comercial” (Hedberg 1996), Nwana 1996), se centra en la aplicación de las IAD clásica y autónoma al desarrollo de agentes, normalmente denominado agentes software, con características muy diferenciadas que están siendo explotados de forma comercial.

La aparición de los agentes software supuso la irrupción de un nuevo paradigma en el desarrollo del software que no solo influyó en las fases de conceptualización, diseño e implementación del mismo, sino también en la aplicabilidad de las soluciones propuestas.

La teoría de agentes y sistemas multiagente ha permitido dar un mayor realismo al tratamiento de ciertos problemas, incorporando a los modelos ciertas características que normalmente no se tienen en cuenta, o se hace de forma parcial, por la dificultad que incorporan al proceso de resolución del mismo. Cuando el problema que se desea solucionar incorpora características como: gran tamaño, alto grado de incertidumbre, dinamismo, o singularidad distribución de sus elementos, son excelentes candidatos a la aplicación de agentes para obtener grandes ventajas en el proceso de resolución. En este sentido, el problema de la Programación de la Producción es un problema complejo, ya que suelen incorporar gran parte de los factores mencionados anteriormente.

De entre todas las características indicadas en el párrafo anterior, quizás sean dos las que predominen sobre el resto: Singular distribución del problema y dinamismo. Los problemas distribuidos han sido la base de la IAD. Esta propiedad a permitido abordar tanto problemas distribuidos por su propia naturaleza como: redes de ordenadores, distribución eléctrica, redes de semáforos, etc., como también ha permitido subdividir problemas centralizados como: detección de errores (Jennings *et al* 1995), aplicaciones industriales (Parunak 1993), procesamiento de lenguaje natural (Sabah 1990), etc., en módulos y submódulos de forma que un individuo o un pequeño grupo de la sociedad afrontara ese submódulo, pero de una forma coordinada con el resto de individuos.

Por otro lado, la teoría de sistemas multiagente permite ofrecer soluciones dinámicas, a problemas dinámicos. Esto se debe a que la mayor parte de los soluciones están soportadas en herramientas software, y desde el punto de vista de la tecnología software los agentes se caracterizan como un entorno abierto que favorece el tratamiento variable en el tiempo de los problemas. Según Hewitt (1986) este concepto implica que la estructura del sistema es capaz de modificarse dinámicamente por si misma. Esto puede suponer que los elementos que la forman en un instante dado no son conocidos con anterioridad o pueden cambiar a lo largo del

tiempo. Normalmente en un sistema abierto los elementos suelen ser heterogéneos en su composición. De esta forma se puede decir que la ingeniería del software basada en agentes está relacionada con los sistemas complejos distribuidos en entorno abiertos. Esta tecnología no sólo puede ser utilizada para modelar una realidad existente sino también para modelar y diseñar una nueva propuesta que suponga el desarrollo de un nuevo sistema complejo.

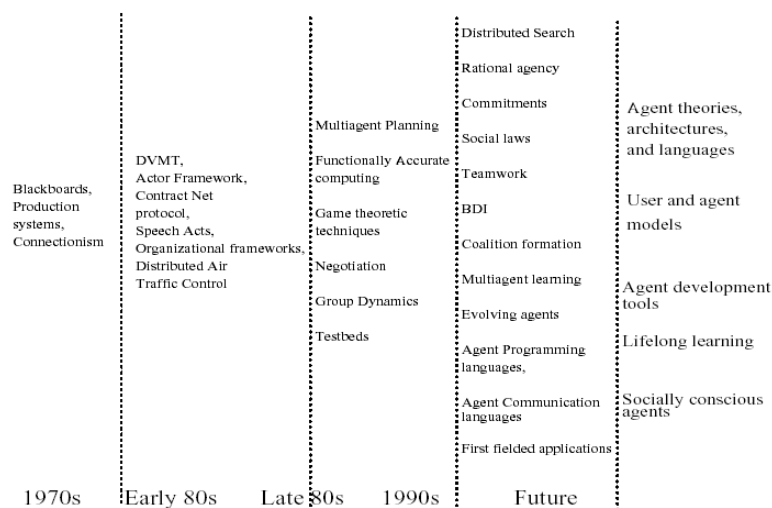
Desde el punto de vista de la Programación de la Producción las técnicas de inteligencia artificial se utilizan en la fabricación inteligente desde hace más de veinte años. Sin embargo, las recientes técnicas desarrolladas en los sistemas multiagente en el nuevo dominio de la inteligencia artificial distribuida han proporcionado nuevas e interesantes posibilidades. Durante los últimos años los investigadores han aplicado las técnicas basadas en la teoría de agentes a los sistemas productivos; planificación, programación y control, manipulación de materiales, gestión de la cadena de suministro, logística, etc.

Según Shen y Norrie (1999), las empresas fabriles del siglo XXI se encontraran en un entorno donde los mercados serán frecuentemente cambiantes, donde habrá nuevas tecnologías emergiendo continuamente, con competidores actuando de forma globalizada. Por lo que las estrategias relativas a los sistemas productivos deberían cambiar para soportar la competencia global, la innovación e introducción de nuevos productos, y los mercados sumamente reactivos. Estos sistemas de fabricación necesitaran satisfacer, según los autores, los siguientes requerimientos: Integración empresarial, organización distribuida, entornos heterogéneos, interoperabilidad, estructuras dinámicas y abierta, cooperación, integración de los humanos con el software y el hardware, agilidad, escalabilidad, tolerancia a fallos. Algunos de estos nuevos requerimientos son posibles soportarlos tecnológicamente con los sistemas basados en agentes.

4. Aproximación de la IAD a la Programación de la Producción

La programación de la producción ha sido ampliamente estudiada en la literatura mediante varios métodos; heurísticas, técnicas de propagación de restricciones, formalismo de problemas de satisfacción de restricciones, recocido simulado, búsqueda tabú, algoritmos genéticos, redes neuronales, etc. La tecnología de agentes es un nuevo y reciente intento de solucionar este problema.

Figura 1. Una vista cronológica de la investigación en MAS. Sen (1998).



Existe un amplio número de proyectos en los cuales ya se aplicó la técnica basada en agentes para solucionar diferentes aspectos relacionados con la programación de la producción; AARIA en Parunak *et al* (1998), ABACUS en McEleney *et al* (1998), ADDYMS en Butler y Ohtsubo (1992), AMC en Goldsmith e Interrante (1998), CAMPS en Miyashita (1998), CORTES en Sadeh y Fox (1989) o Sycara *et al* (1991), DAS en Burke y Prosser (1994), IFCF en Lin y Solberg (1992), LMS en Fordyce y Sullivan (1994), MASCADA en Bruckner *et al* (1998), MASCOT en Parunak (1993), Reagere en Berry y Kumura (1998), SFA en Parunak (1996), YAMS en Parunak (1987), y otros proyectos no identificados con un nombre concreto que se pueden encontrar.

Como se puede ver en la figura 1, Sen (1998) ya planteaba a finales de la década de los 90, algunos retos importantes para los investigadores de los Sistemas Multiagente. Entre ellos se comentarán los retos a más largo plazo.

- **Arquitectura de Agentes:** Se necesita una arquitectura comprensible que facilite la incorporación de conocimiento pre-compilado, información captada, modelos de negociación, capacidades de planificación, y módulos de comunicación.
- **Modelos de Usuarios y Agentes:** Para ser efectivos en la asistencia a los usuarios, los agentes no sólo necesitan representar las restricciones prescritas por los usuarios, sino deberían de ser capaces de representar y razonar con restricciones relajadas en forma de preferencias asociadas al usuario.
- **Consideraciones de Seguridad:** Deberían de preservar la información no revelando datos a agentes y usuarios no autorizados.
- **Flexibilidad y fiabilidad:** En grupos cooperativos o en coaliciones de agentes un agente tendrá acuerdos con otros agentes. Estos acuerdos hacen que el agente sea fiable para el grupo, pero debe tener en cuenta que sus propios intereses le puede hacer optar por nuevas oportunidades, lo que puede ir en contra de los acuerdos.
- **Aprendizaje continuo:** Para ser efectivos en un entorno abierto, los comportamientos estáticos son insuficientes. Es necesario aprender para trabajar con nuevos agentes en un grupo.

5. Nuevas Líneas de Investigación y su Aportación a la Programación de la Producción

Un estudio más reciente, Huhns *et al* (2005) algunos de los retos planteados por Sen (1998) ya han sido superados o están a punto de serlo, y propone nuevas líneas de investigación dentro de los Sistemas MultiAgente. Las líneas más destacables son:

- Proporcionar infraestructuras estables para la simulación y control de multiagentes a gran escala.
- Generar modelos de reputación y verdad que permitan afrontar de forma fiable la distribución de roles. Este aspecto ya era indicado por Sen (1998).
- Crear conceptos y técnicas de trabajo en equipo que se puedan aplicar rutinariamente, incluyendo negociación, planificación y replanificación en entornos dinámicos.

- Y por último, los MAS deberán de incorporar las capacidades de comportamientos reactivos y correctivos propios de cualquier sociedad.

Como se puede apreciar el campo de investigación en MAS para los próximos años se centran mucho en la autonomía del sistema visto como una sociedad donde se enfocan problemas del agente (individuo) y del sistema (sociedad). Se trata, por lo tanto de un punto de vista del Sistema Multiagente que cada vez lo asimila más a un entorno conocido como es el humano. Esta tendencia nos propone disponer de un sistema con las capacidades tecnológicas de una herramienta informática y la flexibilidad de un sistema real.

En las próximas dos décadas los MAS deberían aportar a la Programación de la Producción, a tenor de lo expresado con anterioridad, avances significativos, al menos, en los siguientes aspectos:

- Técnicas para el tratamiento de la alta complejidad de restricciones y objetivo mediante herramientas intuitivas:

El desarrollo de técnicas de aprendizaje continuo junto con modelos de agentes permitirá que existan sistemas dedicados a la fase de generación del modelo del mundo real que se desea afrontar respetando gran parte de su complejidad. Se trata de sistema que sepan analizar, a partir de premisas sencillas, su entorno. Aprender de él y modelarlo.

A partir del conocimiento generado el desarrollo de arquitecturas de agentes más avanzadas podrían permitir la fácil incorporación de ese conocimiento, en forma de modelo, a otro sistema más completo en el cual se podría incluir para formar supra-sistemas.

El desarrollo de esta técnica de tratamiento de la complejidad debería permitir la generación de modelos de Sistemas Productivos de gran complejidad (Cadenas de suministro, fabricas, etc.) mediante la autogeneración y sucesiva incorporación de modelos de niveles menores (taller, línea, etc.).

- Técnicas para la generación de Programas en entornos cambiantes:

El desarrollo de la flexibilidad de los MAS para ser capaces de formar parte de grupos sociales respetando acuerdos, así como la capacidad de aprendizaje continuo para poder abordar entornos dinámicos pueden ser los aspectos que impulsen en mayor medida el desarrollo de soluciones avanzadas en el campo de la Programación Dinámica de la Producción. En este sentido se podría pensar que, si bien, es difícil que se puedan alcanzar soluciones óptimas estas podrían incorporar la forma de reaccionar humana dentro de un marco cuantitativo para ofrecer soluciones políticamente razonables, y que satisfagan al múltiples interesados contrapuestos, dentro de la complejidad de un problema real.

Como se puede ver en los años los Sistemas Multiagente podrían proporcionar al campo del Programación de la Producción, no sólo flexibilidad y robustez, sino que incluso una capacidad de resolución de problemas más cercana al razonamiento humano/social y a la búsqueda de soluciones por consenso en el ámbito de los problemas complejos y dinámicos donde el óptimo es difícil de encontrar, y en muchos casos es dependiente de los intereses de una parte, y por lo tanto subjetivo. Para poder alcanzar estos objetivos se necesita entender las propiedades de cada sistema y la dinámica social con respecto a los comportamientos adaptativos/correctivos y la reputación basada en la verdad. Se alcanzará este reto mediante

modelos efectivos del sistema social que permita a los desarrolladores realizar simulaciones para alinearlos mejor con el mundo real.

Referencias

Avouris N. M. y Gasser L. (1992), editores de "Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis", Vol V, Computer and Information Science, Kluwer Academic Publishers, Boston MA.

Berry, N.M. y Kumura S. (1998). Evaluating the Design and Development of Reagere. In Working Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop, Minneapolis, MN.

S.Biundo; R.Aylett; M.beetz; D.Borrajo; A.Cesta; T.Grant; L.KcCluskey; A.Milani; G.Verfaillie. (2003) Technological Roadmap on IA Planning and Scheduling. S.Biundo, R.Aylett, M.beetz, D.Borrajo, A.Cesta, T.Grant, L.KcCluskey, A.Milani, and G.Verfaillie.

Bond A. H. y Gasser L. (1988), editores de Readings in Distributed Artificial Intelligence. San Francisco, California, Morgan Kaufman Publishers, San Mateo CA.

Brückner S., Wyns J., Peeters P. y Kollingbaum M. (1998). Designing Agents for the Manufacturing Process Control. En Proceedings of Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop - State of the Art & State of the Practice, AAAI Press, Albuquerque, New Mexico, pp. 40-46. (<http://www.mech.kuleuven.ac.be/pma/project/mascada/welcome.html>)

Burke P. y Prosser P. (1994). The Distributed Asynchronous Scheduler. Intelligent Scheduling, Zweben, M. and Fox, M.S., eds., Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, CA, pp. 309-339. (<http://www.cs.strath.ac.uk/biography/pat/>)

Butler J. y Ohtsubo H. (1992). ADDYMS: Architecture for Distributed Dynamic Manufacturing Scheduling. Artificial Intelligence Applications in Manufacturing, Famili, A., Nau, D.S., and Kim, S.H., (eds.), The AAAI Press, pp. 199-214.

Castelfranchi C. y Conte R. (1996), Distributed Artificial Intelligence and Social Science: Critical Issue, O'Hare G. M. P.y Jennings N. R. editores de Foundations of Distributed Artificial Intelligence, pp.527-542, John Wiley and Sons.

Conway, R. W.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W. (1967). *Theory of Scheduling*. Addison-Wesley Publishing Company.

Goldsmith, S.Y. y Interrante, L.D. (1998). "An Autonomous Manufacturing Collective for Job Shop Scheduling". *Proceedings of AI & Manufacturing Research Planning Workshop*, Albuquerque, NM, The AAAI Press, pp. 69-74. (<http://www.sandia.gov/>)

Hedberg S. (1996). "Agents for Sale: first wave of intelligence agents go commercial". *IEEE Expert*, 11(2):61-77.

Hewitt C. (1986). "Offices Are Open Systems". *ACM Transactions of Office Automation Systems*, 4(3):271-287.

Huhns, M., Singh M., Burstein M., Decker K., Durfee E., Finin T., Gasser L. y otros (2005), Research Directions for Serviced-Oriented Multiagent Systems, IEE Internet Computing, noviembre-diciembre 2005, pg 65-70.

Fordyce K. y Sullivan G.G. (1994). Logistics Management System (LMS): Integrating Decision Technologies for Dispatch Scheduling in Semiconductor Manufacturing. Intelligent Scheduling, Zweben, M. and Fox, M.S., eds., Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, CA, pp. 473-516.

Gasser L. y Huhns M. (1989), editores de "Distributed Artificial Intelligence", Vol. II, Morgan Kaufmann.

Iglesias Fernández, C. A. (1998). Definición de una metodología para el desarrollo de sistemas multiagente. PhD thesis, Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos. Universidad Politécnica de Madrid.

Jennings R., Corera J. M. y Laresgoiti I. (1995), Developing Industrial Multiagent Systems, First international Conference on Multiagent Systems, San Francisco, Lesser V. (ed). MIT press.

Lin G.Y.-J. y Solberg J.J. (1992). Integrated Shop Floor Control Using Autonomous Agents. IIE Transactions: Design and Manufacturing, 24(3), pp. 57-71. (<http://IE.www.ecn.purdue.edu/IE/>)

McEleney B., O'Hare G.M.P. y Sampson J. (1998). An Agent Based System for Reducing Changeover Delays in a Job-Shop Factory Environment. En Proc. of PAAM'98, London. (<http://www.co.umist.ac.uk/>)

Miyashita K. (1998). CAMPS: a constraint-based architecture for multi-agent planning and scheduling. Journal of Intelligent Manufacturing, 9(2), pp. 147-154.

Moulin B. y Chiab-draa B. (1996), Foundations of Distributed Artificial Intelligence, pp. 3-56, capítulo An Overview of Distributed Artificial Intelligence, John Wiley & Sons.

Nwana H. S. (1996), Software Agents: an overview, Software Engineering Review, 11(3), pp. 205-244, Cambridge University Press, 1996, URL: <http://www.labs.bt.com/projects/agents/publish/papers/agentreview.html>

Parunak V.D. (1987). Manufacturing Experience with the Contract Net. Distributed Artificial Intelligence, Huhns, M.N. ed., Pitman, pp. 285-310. (Description of one of the earliest agent-based manufacturing systems - YAMS (<http://www.irim.org/~van/>))

Parunak V.D. (1993). MASCOT: A virtual factory for research and development in manufacturing scheduling and control. Tech. Memo 93-02, Industrial Technology Institute. (<http://www.irim.org/~van/>)

Parunak V.D., Baker A. y Clark S. (1998). The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design. In Working Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop, Minneapolis, MN. (<http://www.aaria.uc.edu/>)

Parunak V.D. (1996). Workshop Report: Implementing Manufacturing Agents. Sponsored by the SFA project of NCMS in conjunction with PAAM'96. NCMS. (<http://www.erim.org/~van/>)

Sabah G. (1990), CAMEL : A Computational Model of Natural Language Understanding using Parallel Implementation, Proceedings of Ninth European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'90). Stockholm.

Sadeh N. y Fox M.S. (1989). CORTES: An Exploration into Micro-Opportunistic Job-Shop Scheduling. In Proceedings of Workshop on Manufacturing Production Scheduling at IJCAI-89, Detroit. (<http://agile.cimds.ri.cmu.edu/icll/index.html>)

Sen S. (1998), Multiagent Systems: Milestones and New Horizons.

Shen W. y Norrie D. H. (1999), Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State of the Art Survey, International Journal of Knowledge and Information Systems, 1 (2), pp. 129-156, 1999. Disponible <http://imsg.enme.ucalgary.ca/publication/abm.htm>.

Smith, Stephen (2001). Is Scheduling a Solved Problem? en "The Next Ten Years of Scheduling Research", Ed. por Cowling, P. y Kendall, G. San Francisco, CA, pp. 116-120.

Sycara K.P., Roth S.F., Sadeh N. y Fox M.S. (1991). Resource Allocation in Distributed Factory Scheduling. Intelligent Scheduling, Zweben, M. and Fox, M.S., eds., Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, CA, pp. 29-40.

