

## Arquitectura y diseño de sistemas de secuenciación: requisitos y perspectivas\*

José M. Framiñán Torres, Rafael Ruiz-Usano, Pedro L. González Rodríguez, José Miguel León Blanco

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Avenida de los Descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla. [jose@esi.us.es](mailto:jose@esi.us.es) (J.M. Framiñán), [usano@esi.us.es](mailto:usano@esi.us.es) (R. Ruiz Usano), [pedroluis@esi.us.es](mailto:pedroluis@esi.us.es) (P.L. González), [miguel@esi.us.es](mailto:miguel@esi.us.es) (J.M. León)

### Resumen

*A pesar de los avances realizados en la investigación en modelos de secuenciación, la mayor parte de autores señalan la carencia de sistemas de secuenciación adecuados a las necesidades de los entornos reales de secuenciación, lo que dificulta notablemente la aplicación de los modelos investigados. En este trabajo se realiza una revisión de los requisitos que deben cumplir estos sistemas desde los puntos de vista de participación de los usuarios, integración con los sistemas de información existentes en la fábrica, así como los requisitos que deben cumplir estos sistemas en términos de los algoritmos de resolución.*

**Palabras clave:** Secuenciación de trabajos, sistemas productivos

### 1. Introducción

La secuenciación de trabajos es, con seguridad, una de las áreas más intensamente estudiadas en la Dirección de Operaciones/Investigación Operativa en las últimas décadas. A pesar de las numerosas contribuciones a esta disciplina desde el campo teórico, dichas aportaciones no se han visto trasladadas a la práctica en muchos casos. Para una discusión sobre la diferencia entre los resultados teóricos y las aplicaciones prácticas de la secuenciación, ver al respecto (Gupta 1971), (MacCarthy y Liu 1993), o (McKay *et al.* 2002). A pesar de lo anterior, se han desarrollado diferentes sistemas de secuenciación con cierto éxito, tales como el sistema ISIS de (Fox y Smith 1984), OPIS de (Smith 1994), SONIA de (Collinot *et al.* 1988), Micro-Boss de (Sadash *et al.* 1998), TOSCA de (Beck 1993), o CUISE de (Pinedo y Yen 1997). No obstante, la mayoría de estos sistemas no son de propósito general, sino que cubren áreas específicas dentro del problema general de secuenciación, bien porque se centran en la 'secuenciación reactiva' (este término se definirá en el siguiente apartado), bien porque resuelven problemas de secuenciación 'ad hoc'. Tampoco existen apenas librerías de funciones o módulos que puedan integrarse o ser reutilizados en sistemas existentes, salvo algunas excepciones que actualmente se encuentran en estado de prototipos, como eOCEA, de (ORGroup *et al.* 2003). Además, estas pocas implementaciones existentes no siguen un diseño estándar de clases como los presentados en (Pinedo y Yen 1997, Blazewicz *et al.*

---

\* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación con financiación procedente del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto DPI2001-31110), y con cofinanciación proveniente del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

2001), por lo que es difícil pensar en la integración de estas implementaciones con otras aplicaciones.

En este trabajo se realiza una discusión de los requisitos que debe cumplir un sistema de secuenciación de manera que se pueda integrar estos requisitos en una arquitectura básica de sistemas de secuenciación.

## 2. Requisitos de un sistema de secuenciación

Como en cualquier otro sistema software, el primer paso para el diseño y desarrollo de un sistema de secuenciación lo constituye la captura de requisitos del mismo. La primera actividad en la captura de requisitos del sistema es el establecimiento de los límites del mismo. Así, en primer lugar es preciso investigar qué funciones deben (o no deben) ser cubiertas por un sistema de secuenciación. En general, existen dos vistas o niveles en la secuenciación, dependiendo del horizonte temporal empleado (Aytug *et al.* 1994):

- Un nivel superior que emplea la salida de la planificación de la producción para fijar las fechas de comienzo de cada trabajo en cada máquina. A este nivel se le conoce con el nombre de secuenciación de la entrada de trabajos (release scheduling).
- Un nivel inferior en el que se produce movimiento de los ítems en tiempo real. Este nivel es conocido con el nombre de secuenciación reactiva (reactive scheduling).

Además, existe un buen número de actividades en la fabricación que están relacionadas con la secuenciación. Quizás la más evidente es la planificación de la producción, la cual cubre la producción en un horizonte de varias semanas y, como ya se ha comentado, proporciona los datos precisos para la secuenciación de trabajos. A pesar de la clara conexión entre ambas actividades, en la mayor parte de ocasiones se abordan de forma separada, no obstante algunas excepciones (Iwata K y Fukuda 1989, Zhang y Mallur S 1994, Huang *et al.* 1995).

Respecto a los requisitos, los sistemas de secuenciación deben cumplir los siguientes (Sauer y Apelrath 1997):

- Presentación de la información
- Interactividad con el usuario
- Incorporación de la experiencia del experto en secuenciación
- Integración con el entorno de la organización, de forma que el sistema de secuenciación se encuentre integrado como parte del sistema de información de la empresa.
- Participación de los usuarios en el desarrollo del sistema de información
- Comunicación entre los niveles de secuenciación

Por otra parte, McKay *et al.* (McKay *et al.* 2002) describen un conjunto de requisitos para los sistemas de secuenciación, algunos de los cuales se refieren a los algoritmos de secuenciación y al uso del sistema. Con respecto a los algoritmos de secuenciación, éstos deben ser flexibles y configurables. Deben tener en cuenta cuestiones como la robustez de las secuencias o la necesidad de re-secuenciar parte de los trabajos. Por otra parte, deben ser capaces de manejar diversos criterios (secuenciación multicriterio). Finalmente, una característica que imponen es

el hecho de que deban aprender tras su uso. Por lo que respecta al uso del sistema, McKay *et al.* (McKay *et al.* 2002) ponen el acento en el diseño de la interfaz de usuario.

Para clasificar y resumir los requisitos anteriormente mencionados, los hemos dividido en las siguientes categorías:

- Participación del usuario en todo el ciclo de vida del sistema de secuenciación, incluyendo su diseño, la incorporación de la experiencia de los usuarios en el sistema, y la interacción entre usuario y sistema durante el proceso de toma de decisiones.
- Integración con los sistemas de información existentes, y en particular con los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP – *Enterprise Resource Planning*).
- Requisitos relacionados con los algoritmos a emplear en la secuenciación, incluyendo todos los requisitos planteados por MacKay *et al.*

Estas tres categorías son presentadas en detalle en las próximas secciones.

## **2.1. Participación del usuario**

De acuerdo con Sauer y Appelrath (Sauer y Apelrath 1997), la intervención humana en los sistemas de secuenciación puede ser llevada a cabo desde tres perspectivas diferentes: interacción, incorporación de la experiencia en secuenciación, y participación en el desarrollo del sistema de secuenciación.

Por lo que se refiere a la interacción, ningún autor cuestiona la necesidad de la interacción del decisor (humano) en los sistemas de secuenciación. Esta necesidad de interacción es crítica al deberse manejar diversos criterios de optimización. Sorprendentemente, la mayor parte de los algoritmos de resolución no proporcionan un conjunto de soluciones para el decisor (enfoques a posteriori), sino una única solución (enfoque a priori) (Framiñán *et al.* 2002).

En relación a la incorporación de la experiencia del usuario, existen un buen número de trabajos que tratan la aplicación de sistemas expertos a la secuenciación. Una lista de los beneficios potenciales de la aplicación de estos sistemas a la secuenciación es descrita, por ejemplo, por Reinschmidt *et al.* (Reinschmidt *et al.* 1990). No obstante, existe una gran controversia sobre la utilidad del empleo de sistemas expertos en secuenciación, al ser muchos investigadores escépticos acerca de la existencia de verdaderos expertos humanos en secuenciación (Steffen 1986), lo cual está motivado por el hecho de la mayor parte de entornos de secuenciación reales son demasiado complejos para las capacidades cognitivas humanas (Fox 1990). Además, incluso si es posible encontrar un experto humano en secuenciación, algunos autores consideran que el sistema experto asociado simplemente automatizaría las decisiones del humano, sin cuestionar si son buenas o malas (Kanet y Adelsberger 1987).

Por último, apenas se han realizado progresos en la participación de los usuarios en el desarrollo de sistemas de secuenciación, aunque esta cuestión posiblemente pueda ser facilitada por el desarrollo de lenguajes capaces de formular problemas de secuenciación (McKay *et al.* 2002).

## 2.2. Integración con los sistemas de información existentes

En lo que se refiere a la integración en el entorno de la organización, la integración de los sistemas de secuenciación quiere decir que el sistema (de secuenciación) debe ser capaz de importar los datos requeridos y exportar los resultados obtenidos desde/hacia el resto de sistemas de la empresa. En general, se requieren dos tipos de datos:

- Datos de las transacciones del sistema, como los tiempos de proceso, fechas de entrega, etc.
- Datos del proceso de negocio, como la configuración de las máquinas/recursos en la planta, la disponibilidad/intercambiabilidad de los mismos, etc.

Los dos tipos de datos deben ser introducidos en el sistema de secuenciación, por lo que una cuestión importante es definir el formato o lenguaje que permite la especificación precisa de los datos necesarios en los problemas de secuenciación. Dada la diversidad de estos problemas, la obtención de este lenguaje no es una tarea sencilla, y aunque existen intentos de formalización de estos lenguajes (Yen 1997, Zentner *et al.* 1998), estas propuestas no permiten el manejo de la mayor parte de los entornos reales de secuenciación.

## 2.3. Requisitos de los algoritmos de secuenciación

Todo sistema de secuenciación debe incluir una librería de algoritmos, la cual contendrá todos los algoritmos que pueden aplicarse a todos los problemas de secuenciación que sean tratados por el sistema (Pinedo 1993). En este sentido, es posible distinguir entre algoritmos específicos (aquellos diseñados para resolver un problema de secuenciación concreto) y algoritmos genéricos (aquellos que, en principio, pueden ser aplicados a todos los problemas de secuenciación – o al menos a la mayoría –). Aunque ambos tipos de algoritmos tienen ventajas e inconvenientes – ver McKay *et al.* (McKay *et al.* 2002) para una discusión al respecto –, la mayor parte de sistemas de secuenciación comerciales, incluyendo los sistemas APS (*Advanced Planning Systems*, sistemas avanzados de planificación) emplean algoritmos genéricos, ver al respecto (Knolmayer *et al.* 2002, Stadler y Kilger 2002, Dickersbach 2003).

Además de contener un conjunto más o menos grande de algoritmos, la librería de algoritmos debería poseer al menos las siguientes características:

- Extensibilidad, de forma que se puedan integrar nuevos algoritmos de una forma lo más sencilla posible. Esta característica es interesante en varios sentidos: por una parte permite la incorporación de los nuevos desarrollos – algoritmos – para problemas ya contemplados en la librería, y por otra permite la incorporación de problemas nuevos que pueden ser tratados. Además, si el procedimiento de integración de estos nuevos algoritmos es lo suficientemente sencillo, entonces también se facilita la participación de los usuarios en el diseño del sistema de secuenciación, cuestión comentada anteriormente. Por último, hay que tener en cuenta que el requisito de extensibilidad no sólo se aplica al hecho de que se puedan incorporar algoritmos completamente nuevos, sino que los algoritmos ya existentes en la librería puedan ser parametrizados o integrados en nuevos algoritmos compuestos.

- La librería de algoritmos debería proporcionar una ayuda a la elección del algoritmo para el problema concreto. Por una parte, es posible que el problema específico a resolver no encaje con ninguno de los problemas que puede ser resuelto por los algoritmos contenidos en la librería. Si es así, el sistema debería proponer o elegir el empleo de algoritmos que sí están incluidos en la librería y que pueden resolver problemas cercanos al problema original. Por otra parte, es posible que para resolver un problema específico se pueda emplear más de un algoritmo. De entre todos ellos, el sistema debe proponer o escoger el/los más adecuado/ade cuados en cada caso.

Con respecto a la extensibilidad de los sistemas de secuenciación, McKay *et al.* ponen de manifiesto que pocos sistemas contienen librerías de algoritmos que puedan ser ampliados de forma sencilla. La mayor parte de los sistemas APS comerciales o bien no pueden ser ampliados, o bien el procedimiento para hacerlo es altamente engorroso (Stadler y Kilger 2002).

Con respecto a las técnicas para seleccionar el algoritmo más apropiado en cada situación, existen pocas referencias, estando la mayoría de ellas dedicadas a propósitos muy específicos. Así, (Lamatsch *et al.* 1988) desarrollan un sistema que emplea una métrica para ajustar problemas de secuenciación a problemas ‘tipo’. En (Gupta *et al.* 2000) se emplea una red neuronal para seleccionar el mejor algoritmo aproximado para resolver un problema de secuenciación dado. En su artículo, el objetivo es la elección de aquél método que presenta una mayor calidad (estadística) en los resultados. No obstante, un sistema de selección más general debería tener en cuenta tanto datos elaborados por el sistema (como el grado de utilización de las máquinas, o la holgura en las fechas de entrega) como datos adicionales para tomar la decisión (el típico sería el tiempo máximo permitido para resolver el problema).

## Referencias

- Aytug, H.; Bhattacharyya, S.; Koehler, G. J.; Snowdon, J. L. (1994). A review of Machine Learning in Scheduling. *IIE Transactions on Engineering management*, Vol. 41, pp. 165-171.
- Beck, H. (1993). The Management of Job-Shop scheduling constraints in TOSCA. 2-14.
- Blazewicz, J.; Ecker, K. H.; Pesch, E.; Schmidt, G.; Weglarz, J. (2001). Computer Integrated Production Scheduling. 2, pp. 421-467.
- Collinot, A.; LePape, C.; Pinoteau, G. (1988). SONIA: A Knowledge-based scheduling system. *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 2, pp. 86-94.
- Dickersbach, J. T. (2003). *Supply Chain Management with APO*.
- Fox, M. S. (1990). Constraint-guided scheduling - A short history of research at CMU. *Computers in Industry*, Vol. 14, pp. 79-88.
- Fox, M. S.; Smith, S. F. (1984). ISIS - a knowledge-based system for factory scheduling. *Expert Systems*, Vol. 1, pp. 25-49.
- Framiñán, J. M.; Leisten, R.; Ruiz-Usano, R. (2002). Efficient heuristics for flowshop sequencing with the objectives of makespan and flowtime minimisation. *European Journal of Operational Research*, Vol. 141, pp. 559-569.
- Gupta, J. N. D. (1971). Flowshop scheduling via sorting analogy. 109, pp. 1-32.
- Gupta, J. N. D.; Sexton, R. S.; Tunc, E. A. (2000). Selecting Scheduling Heuristics Using Neural Networks. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 12, pp. 150-162.
- Huang, S. H.; Zhang, H.-C.; Smith, M. L. (1995). A progressive approach for the integration of process planning and scheduling. *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 456-464.
- Iwata K; Fukuda, Y. (1989). A new proposal of dynamic process planning in machine shop. *Proceedings of the CIRP International Workshop in Computer-Aided Process Planning*, pp.

- Kanet, J. ; Adelsberger, H. (1987). Expert systems in production scheduling. *European Journal of Operational Research*, Vol. 29, pp. 51-59.
- Knolmayer, G.; Mertens, P.; Zeier, A. (2002). *Supply Chain Management based on SAP Systems*. Springer.
- Lamatsch, A.; Morlock, M.; Neumann, K.; Rubach, K. (1988). SCHEDULE - An expert-like system for machine scheduling. *Annals of Operations Research*, Vol. 16, pp. 425-438.
- MacCarthy, B. L.; Liu, J. (1993). Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, pp. 59-79.
- McKay, K.; Pinedo, M. L.; Webster, S. (2002). Practice-Focused Research issues for scheduling systems. *Production and Operations Management*, Vol. 11, pp. 249-258.
- ORGroup, D. d. A. e. I. P. d. T.; Groupe MOGISALAAS CNRS; Scheduling Team Computer Science Laboratory University of Tours (2003). *eOCEA*. <http://www.ocea.li.univ-tours.fr/eoce/index.jsp>.
- Pinedo, M. L. (1993). *Scheduling: Theory, algorithms and systems*. Prentice Hall.
- Pinedo, M. L.; Yen, B. P. C. (1997). On the design and development of object-oriented scheduling systems. *Annals of Operations Research*, Vol. 70, pp. 359-378.
- Reinschmidt, K.; Slate, J.; Finn, G. (1990). Expert systems for plant scheduling using linear programming.
- Sadesh, N. M.; Hildum, D. W.; Laliberty, T. J.; McA'Nulty, J.; Kjenstad, D.; Tsen, A. (1998). A Blackboard Architecture for Integrating Process Planning and Production Scheduling. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 6, pp.
- Sauer, J. ; Apelrath, H.-J. (1997). Knowledge-based Design of Scheduling Systems. 18, pp.
- Smith, F. S. (1994). *OPIS: A Methodology and architecture for reactive scheduling*. Morgan Kaufmann.
- Stadler, H. ; Kilger, C. (2002). *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer.
- Steffen, M. (1986). A survey of artificial intelligence-based scheduling systems.
- Yen, B. P. C. (1997). *Scheduling description languages*.
- Zentner, M. G.; Elkamel, A.; Pekny, J. F.; Reklaitis, G. V. (1998). A language for describing process scheduling problems. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 22, pp. 125-145.
- Zhang, H.-C. ; Mallur S (1994). An integrated model of process planning and production scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 7, pp. 356-364.