

Programación de operaciones en planta en entornos cambiantes

Esther Álvarez de los Mozos¹, Francisco Javier Zubillaga Zubimendi²

¹ (Dra., Facultad de Ingeniería, Universidad de Deusto. Avda. Universidades, 24, 48007 Bilbao, ealvarez@eside.deusto.es)

² (Dr., Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao, Alameda Urquijo, s/n, 48013 Bilbao, oepezuf@bi.ehu.es)

RESUMEN

Los métodos clásicos de programación de operaciones en planta resultan poco eficaces en las plantas de producción reales ya que presuponen hipótesis escasamente realistas que difícilmente se cumplen en la práctica. Fundamentalmente, estas hipótesis están relacionadas con la consideración del entorno de fabricación como estático. Pero en la vida real las instalaciones productivas están sujetas a numerosos sucesos imprevistos que, si no se tienen adecuadamente en cuenta, desembocan en planes de producción inaceptables. Por otra parte, es necesario reaccionar con celeridad, dada la importancia económica de los costes indirectos asociados a las interrupciones que originan. De hecho, la capacidad de reacción rápida y la flexibilidad son requisitos clave a tener en cuenta en los sistemas de control, ya que contribuyen a reducir los tiempos de flujo, mejorar las tasas de utilización y el servicio al cliente. Por consiguiente, es preciso extender los modelos de scheduling clásicos con el fin de representar la fábrica de una manera más fidedigna. Los algoritmos genéticos constituyen una de las técnicas más prometedoras como alternativa a las técnicas clásicas, por su robustez y flexibilidad. Aunque los algoritmos genéticos se diseñaron originalmente para resolver problemas de optimización sin restricciones, se han utilizado con éxito en problemas de planificación de operaciones en planta. Por otra parte, la calidad y el tiempo de proceso depende del número de generaciones a probar y del número de organismos de la población. En el presente artículo, se describe la utilización de algoritmos genéticos para la planificación de operaciones en planta en un entorno real. Se han representado en el modelo eventos imprevistos tales como indisponibilidad de recursos o cambios en las órdenes de fabricación. En el contexto de un proyecto europeo perteneciente al programa de Crecimiento Competitivo y Sostenible del V Programa Marco, se describe un prototipo para la planificación dinámica de operaciones en planta utilizando algoritmos genéticos y se extraen algunas conclusiones acerca de la viabilidad y calidad de la solución.

Palabras clave: Programación dinámica de operaciones, algoritmos genéticos, job-shop scheduling.

1. Introducción

Los métodos tradicionales de programación de la producción no son capaces de proporcionar una reacción automática ante las excepciones que se producen en tiempo real en un plazo de tiempo razonable. Por lo tanto, las soluciones que obtienen no son eficientes. Por otra parte, la mayoría no son eficaces en las plantas de producción reales ya que presuponen hipótesis muy poco realistas que en la práctica difícilmente se cumplen. Estas hipótesis fundamentalmente están relacionadas con la consideración del entorno de producción como estático. Pero en las instalaciones de producción reales es muy habitual que se produzcan imprevistos tales como cambios en las órdenes de fabricación, fallos de máquina, etc.

Un sistema dinámico de programación de la producción que sea eficiente puede contribuir a reducir los tiempos de flujo, así como mejorar el nivel de utilización de los equipos y el servicio a los clientes.

Los principales requisitos que debe cumplir un planificador dinámico de operaciones son los siguientes [1]:

- **Tiempo corto de reacción:** Es importante que la información fluya a través del sistema de una forma rápida, así como minimizar el espacio de tiempo invertido en corregir planes de producción ante posibles perturbaciones. Las restricciones de tiempo pueden imponer soluciones de inferior rendimiento.
- **Capacidad de respuesta a condiciones imprevistas y urgentes:** Cada vez que se produzca un cambio relevante en la planta (por ejemplo, la llegada de una nueva orden, la cancelación de un trabajo, un fallo de máquina, etc.), el plan deberá modificarse siempre y cuando el impacto de la perturbación en el plan sea relevante.
- **Integración con el sistema de control de planta:** La información procedente del sistema de captura de datos en planta debe tenerse en cuenta en tiempo real con el fin de estar informados acerca de las posibles desviaciones respecto de los supuestos con los que se trabajó para la generación del plan inicial.
- **Integración con el planificador estático de operaciones en planta.** El planificador estático de operaciones en planta será el encargado de generar planes de forma off-line cuyos supuestos no siempre se cumplirán posteriormente durante la ejecución de dichos planes.
- **Participación humana en las decisiones:** Las limitaciones de las técnicas existentes, así como la imposibilidad de disponer de información fidedigna y completa, hace necesaria la participación humana en las decisiones, supliendo de este modo las carencias del modo automático de funcionamiento.

2. Estado del arte en programación de la producción

A lo largo de las últimas décadas se han aplicado diferentes técnicas a la problemática de la programación de la producción, tales como la Investigación Operativa, la Inteligencia Artificial o una mezcla de ambas. Hoy en día los enfoques considerados más adecuados para este fin son: las Reglas de Prioridad [5], [6], el Enfriamiento Simulado [8] y los Algoritmos Genéticos y Evolutivos [7]. Un compendio de dichas técnicas se puede encontrar en [4].

Las reglas de prioridad son procedimientos especialmente diseñados para producir buenas soluciones a problemas complejos en un intervalo de tiempo razonable. En el momento en que una máquina queda disponible, se decide cuál de los trabajos encolados (si queda alguno en la cola) se deberá procesar a continuación. La manera en que una máquina selecciona el siguiente trabajo a procesar entre los que están esperando en la cola se denomina regla de prioridad. Las reglas de prioridad no garantizan la obtención de una solución óptima pero son capaces de obtener soluciones casi óptimas en un tiempo de computación moderado, con lo que se pueden aplicar con éxito a problemas de magnitud considerable. La facilidad de implementación de las reglas de prioridad así como su bajo coste computacional las ha convertido en una de las técnicas más populares.

El enfriamiento simulado es una técnica de optimización combinatoria de propósito general que busca el mínimo de una función de muchas variables. El enfriamiento simulado es una técnica robusta, con capacidad para obtener el mínimo absoluto en vez del mínimo local [11]. Está pensada para problemas con muchos grados de libertad y una función objetivo que combine varios objetivos en conflicto. El enfriamiento simulado podría ser una técnica adecuada para la programación dinámica de producción ya que el tiempo invertido en generar soluciones factibles y su calidad pueden ser configuradas por el usuario a través de los valores de los parámetros del algoritmo.

Los algoritmos genéticos son métodos de optimización aproximados que utilizan una terminología basada en los procesos de evolución genética de las especies. Es decir, así como el enfriamiento simulado establece comparaciones entre el proceso físico de formación de sólidos cristalinos, los algoritmos genéticos utilizan la mecánica de la selección natural y de la genética para hallar soluciones óptimas a problemas de optimización combinatoria. Por otra parte, se han empleado con éxito en un importante número de aplicaciones científicas e industriales [13]. Las razones que justifican este significativo número de aplicaciones son bastante claras. Por una parte, no consumen muchos recursos computacionales pero son bastante poderosas a la hora de obtener soluciones óptimas. Por otra parte, no descansan en supuestos de linealidad que sí son necesarios en otro tipo de técnicas. En consecuencia, los algoritmos genéticos son robustos, pueden hacer frente a una gran variedad de tipos de problemas y trabajan con funciones no lineales de una manera eficiente. Finalmente, los algoritmos genéticos son conocidos por la facilidad con la que se pueden modificar. Incluso las modificaciones más pequeñas a un problema concreto pueden ocasionar importantes dificultades para muchos heurísticos pero, en cambio, modificar un algoritmo genético para modelizar variaciones respecto al problema original resulta muy sencillo.

Pero los modelos de planta a menudo son demasiado simples para poderlos utilizar con éxito en las aplicaciones industriales. Si los modelos de planta son más complejos y, por tanto, más próximos a la situación en planta, el proceso de resolución se divide en dos fases. Durante la primera fase se utiliza un algoritmo genético estándar, el cual normalmente se implementa a través de un software de propósito general, en el que al no considerarse todas las restricciones del sistema, puede dar origen a soluciones inviables. En la segunda fase se aplicarán varios heurísticos con objeto de reparar la solución original obtenida por el algoritmo genético, de manera que se asegure su viabilidad. Pero consideramos que este método tiene serias desventajas. Por una parte, el heurístico de reparación modifica la solución obtenida por el algoritmo genético con el fin de respetar todas las restricciones pero no considera ningún objetivo de optimización, por tanto, la calidad de la solución podría verse perjudicada. Por otra parte, los heurísticos de reparación pueden fracasar ya que no son totalmente eficaces.

En el presente artículo se describe un sistema de planificación dinámica que emplea un algoritmo evolutivo como técnica de resolución, que incorpora una heurística específica adaptada al problema.

3. Descripción del modelo de planta industrial

El modelo de planta industrial elegido para nuestra investigación es la producción discreta orientada al proceso en un entorno de fabricación dinámico. Para representar las características de la planta industrial hemos utilizado un modelo semántico entidad-relación extendido que ha servido para el desarrollo del software de prueba, implementado en C++.

Desde un punto de vista global, la fábrica que hemos utilizado como modelo de referencia posee varios centros de trabajo separados geográficamente. Cada centro de trabajo corresponde a una planta cuya producción se programa de forma independiente a las demás. Los siguientes parámetros de configuración general de la planta determinan el ámbito temporal del programa de producción a generar, así como algunos aspectos relativos a los objetivos de optimización:

- *Fecha Base Plan.* Fecha límite inferior a partir de la cual se asignan las operaciones de producción a programar. Se considera una restricción en la resolución del problema, es decir, esta fecha no puede retrasarse en ningún caso.
- *Fecha Horizonte Plan.* Fecha límite superior de asignación de las operaciones de producción a programar. No se considera una restricción sino un objetivo de optimización.
- *Porcentaje Coste por Retraso en Entrega.* Porcentaje de penalización a aplicar por retraso respecto a la fecha de entrega de los pedidos.
- *Porcentaje Coste por Retraso respecto al Horizonte Plan.* Porcentaje de penalización a aplicar por retraso respecto a la fecha de horizonte de programación.

Los componentes principales de la planta son:

- Conjunto de **piezas** o artículos a fabricar. En principio, todo pedido hace referencia a una cantidad definida de una única pieza. Para cada pieza existe el concepto de *plan de proceso* de la pieza, el cual se compone de uno o más procesos individuales que deben llevarse a cabo en su totalidad para la elaboración correcta de la pieza. En nuestro sistema el plan de proceso de una pieza no se considera único, es decir, pueden existir conjuntos alternativos de procesos que permitan su fabricación. Cada plan de proceso consta de uno o más procesos individuales de fabricación, es decir, tipos de operación necesarios para fabricar la pieza, los cuales se realizan de forma secuencial.
- Conjunto de **máquinas** o recursos principales de fabricación. En nuestro sistema se considera que una misma máquina puede realizar varios tipos de operación correspondientes a diversas piezas. Según esto cada máquina tiene asociado un coste y un tiempo de fabricación unitarios, así como un tiempo de cambio fijo, para cada tipo de operación y pieza que la máquina pueda realizar.
- Conjunto de **tipos de operación** que pueden realizar las máquinas de la planta (fresado, montaje, pintado, etc.).
- Conjunto de **características de las piezas**, que determinan los tiempos de cambio variable entre operaciones de las máquinas.
- Conjunto de **órdenes de trabajo** o pedidos a producir, cada uno correspondiente a una cierta cantidad de una pieza determinada. Toda orden tiene asociada una fecha de lanzamiento y una fecha de entrega.
- Conjunto de **operaciones** de fabricación, necesarias para producir las piezas de los pedidos. La producción de una orden o pedido consiste en la realización de tantas operaciones como procesos (tipos de operación) forman parte del plan de proceso de la

pieza correspondiente. Por tanto, las operaciones de los pedidos pueden interpretarse como las instancias o particularizaciones de los diferentes procesos de producción de las piezas.

4. Restricciones y Objetivos de Producción

Restricciones

Las restricciones del problema de la programación de producción pueden clasificarse en cuatro tipos: restricciones asociadas a las piezas, restricciones asociadas a las máquinas, restricciones asociadas a los pedidos u órdenes, y restricciones de carácter general.

Restricciones asociadas a las piezas

Las restricciones asociadas a las piezas que consideramos en nuestro sistema se refieren fundamentalmente a la *precedencia entre los procesos de fabricación de las piezas*. De acuerdo con cada plan de proceso, la fabricación de una pieza está formada por una secuencia invariable de procesos.

Restricciones asociadas a las máquinas

Las restricciones asociadas a las máquinas se refieren fundamentalmente a sus límites de funcionalidad. Son las siguientes:

- *Restricciones de operatividad de las máquinas*. Una máquina no puede realizar cualquier proceso de fabricación, sino sólo aquellos que permita su funcionalidad específica. Además, se presupone que los tiempos de cambio y de proceso son deterministas.
- *Restricciones de disponibilidad de las máquinas*. Una máquina sólo puede realizar una operación de fabricación en cada instante. Así mismo, una máquina averiada, en mantenimiento o en preparación no puede realizar operaciones de fabricación durante el tiempo de reparación, de puesta a punto y de cambio. Además, las operaciones no se interrumpen, es decir, se considera que, una vez comenzada una operación de proceso, ésta se hace hasta el final (salvo en caso de avería de la máquina). Finalmente, en el caso del prototipo actualmente desarrollado no hay restricciones temporales relativas a la existencia de calendarios y turnos de trabajo, es decir, todas las máquinas de la planta operan en tiempo continuo 24 horas al día.

Restricciones asociadas a las órdenes o pedidos

Las principales restricciones de este tipo que aparecen en el problema de la programación de producción son las *restricciones referentes al intervalo de fabricación de las órdenes*. En concreto, cada orden posee una fecha de lanzamiento la cual no puede ser retrasada en la programación de sus operaciones de fabricación.

Restricciones de carácter general

La única restricción de este tipo que hemos considerado es la *restricción referente al intervalo de programación*. En concreto, cada vez que se debe programar un conjunto de operaciones se fija una fecha base de programación, la cual no puede ser retrasada en ningún caso, es decir, las operaciones a programar no podrán comenzar antes de esta fecha.

Objetivos de Producción

En nuestro sistema de programación de producción los principales objetivos a lograr son los siguientes:

- *Reducción de los costes básicos de producción.*
- *Cumplimiento de fechas de entrega.*
- *Cumplimiento de fecha de horizonte de programación.*

De acuerdo con lo anterior, la función de coste global utilizada para evaluar la calidad de las soluciones en la resolución del problema viene dada por la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n (Cp(i) + Ce(i) + Ch(i))$$

donde:

- n es el número de operaciones de fabricación programadas.
- $Cp(i)$ es el coste básico de fabricación de la operación i .
- $Ce(i)$ es el coste por retraso en fecha de entrega de la operación i .
- $Ch(i)$ es el coste por retraso respecto al horizonte de programación de la operación i .

5. Diagrama de contexto

El sistema IS-OPTIMUS se compone de 4 módulos:

- **Optimizador de Materiales (OM):** Proporciona la solución de corte más óptima para el material en cuestión, minimizando el desperdicio y observando otras restricciones específicas de la empresa (fecha de entrega, coste del material, prioridad del cliente y recursos disponibles).
- **Scheduler Estático (SE):** Se trata de un programador de operaciones a capacidad finita que genera un plan de producción que no está conectado con la situación real en planta sino que trabaja con previsiones y que es capaz de responder a varios criterios de planificación (utilización de máquinas, cumplimiento de fechas, reducción de tiempos de cambio, etc.).
- **Scheduler Dinámico (SD):** Su función es reparar un plan de producción previamente generado por SE en respuesta a posibles eventos imprevistos tales como fallos de máquina, falta de materiales o cambios en las órdenes de producción. En este artículo la atención se centrará en este módulo.
- **Captura de Datos en Planta (CDP):** Interfaz entre el sistema IS-OPTIMUS y la planta de producción. Los datos de producción recogidos se almacenarán en la base de datos y se comunicará acerca de posibles incidencias a otros módulos del sistema.

El SE obtendrá un plan de producción inicial de forma periódica o bien como consecuencia de una petición del usuario. El plan se generará de forma off-line y, una vez lanzado, su ejecución será supervisada por el SD. Si ocurre un evento en planta mientras el plan está

realizándose, el CDP será el encargado de informar de esta incidencia al DS (de una forma directa o a través de la base de datos).

El SD se encargará de reparar el plan de producción estático si se ve afectado por eventos imprevistos: cambios en las órdenes de fabricación o eventos procedentes de planta. Si el SD no puede reparar el plan de producción actual, transferirá el control del plan al SE, el cual generará un nuevo plan desde cero, teniendo en cuenta la situación actual en planta. Por tanto, el SD trabajará coordinadamente con los módulos SE y CDP.

El Optimizador de Materiales funcionará de una forma más independiente que el resto de módulos. En lo que respecta a su relación con el SD, las decisiones relacionadas con los materiales obtenidas por el OM serán consideradas restricciones por el SD. Esto quiere decir que el SD no tratará de optimizar el material, de manera que no existirá una conexión directa entre ambos módulos.

Finalmente, existirá una relación importante entre el SD y el usuario del mismo, que podrá ser el responsable de producción o un usuario experto. Esta persona se encargará de introducir los eventos relacionados con las órdenes de fabricación, de validar el plan generado y será informado de los detalles relativos a la replanificación a través del interfaz de usuario del SD. Por otra parte, dicho usuario podrá visualizar un plan dinámico o conseguir informes acerca de los resultados de una planificación dinámica.

El diagrama de contexto que se muestra a continuación explica las principales interacciones existentes entre el Scheduler Dinámico y otros módulos del sistema. Para un caso determinado, el SE puede generar varios planes, uno de los cuales será seleccionado por el usuario para ser lanzado a la planta. Cuando el SE detecta que ha llegado la fecha de comienzo del plan, realizará un chequeo de consistencia de la base de datos con el fin de detectar si hay inconsistencias entre la situación de planta prevista en el plan y la situación real en ese momento. En caso de que las hubiera, se avisará al usuario, el cual podrá rechazarlo o aceptarlo a pesar de todo. Si lo acepta o si no se detectaran inconsistencias, el viejo plan de producción será reemplazado por otro nuevo. En tal caso, el SE cargará el nuevo plan en la base de datos, que se convertirá así en el nuevo plan activo. El SD será informado de este hecho y comenzará a monitorizar el nuevo plan.

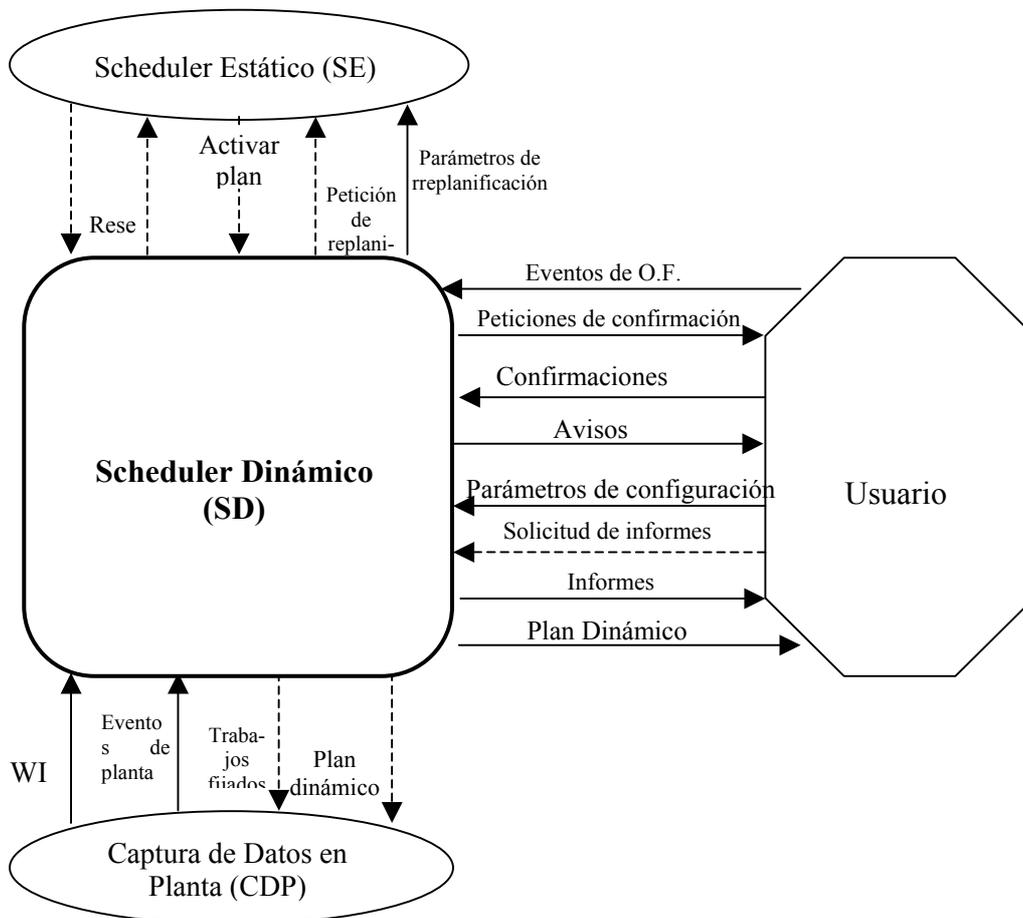


Fig. 1. Diagrama de contexto del Scheduler Dinámico.

Cuando un plan de producción está activo pueden ocurrir diversos eventos, los cuales pueden clasificarse en dos grupos: eventos procedentes de la planta de producción y cambios en las órdenes de fabricación. El primer grupo incluye los siguientes eventos:

- **Fallo de máquina:** Este evento puede introducirse manualmente por parte del usuario o bien de forma automática e informará al sistema de que la máquina no está funcionando.
- **Recuperación de máquina:** Se trata del evento opuesto al anterior y significa que la máquina estropeada vuelve a estar operativa.
- **Falta de materiales:** A través de esta opción el usuario puede especificar una falta de material que sólo afecte a algunas órdenes, o bien una falta global de material que afecte a todas las órdenes que tengan que realizarse empleando dicho material.
- **Llegada de materiales:** Este es el evento opuesto al anterior, que implica que las órdenes afectadas por la falta de material pueden continuar procesándose.
- **Ausencia inesperada de operario:** A través de este evento, el usuario puede lanzar un proceso de replanificación debido a la ausencia de un operario.

- **Presencia de operario:** Este es el evento opuesto al anterior, el cual supone que el operario ausente vuelve a estar disponible.
- **Falta de recurso auxiliar:** Cuando el usuario notifica una falta de recurso auxiliar, deberá introducir su código correspondiente a través de este evento.
- **Recuperación de recurso auxiliar:** Este es el evento contrario al anterior, el cual supone que el recurso faltante queda de nuevo disponible.

El segundo grupo incluye los siguientes eventos:

- **Llegada de nueva orden:** Esta opción permite al usuario introducir órdenes urgentes en la planta actual.
- **Priorizar orden:** A través de este evento, el usuario puede cambiar la prioridad de las órdenes de fabricación que estén abiertas, pero no en curso.
- **Cancelación de orden:** Mediante esta opción el usuario puede borrar órdenes del plan actual.
- **Suspensión de orden:** Este evento permite al usuario detener una operación durante un cierto intervalo de tiempo (y, por consiguiente, la correspondiente orden). Esta opción se utiliza con el fin de hacer comprobaciones de calidad.
- **Activación de orden:** Este es el evento contrario al anterior que permite reactivar la operación suspendida (y, como consecuencia la orden asociada).
- **Subcontratar operación:** Es posible subcontratar una operación de forma dinámica si se estima que no se dispone de los recursos productivos necesarios.
- **Finalizar orden subcontratada:** Este evento marca la introducción al flujo de producción de la orden alguna de cuyas operaciones ha sido subcontratada.

Los cambios en las órdenes de producción serán introducidas por el usuario a través del interfaz del SD, mientras que los eventos procedentes de la planta serán comunicados por el módulo CDP. A continuación, el SD analizará el impacto del evento en el plan de producción actual. Como resultado del análisis, decidirá si es necesario modificar el plan de producción actual. En caso afirmativo, deberá optar por estrategias de programación generativas o reactivas. Esto quiere decir que si el impacto es escaso, se optará por una respuesta reactiva, lo cual supondrá que sólo se realizará una pequeña modificación del plan actual. En caso contrario, el SD transferirá el control del plan al módulo SE, el cual generará un nuevo plan desde cero, considerando la situación actual en la planta.

El plan dinámico será mostrado al usuario a través de un diagrama de Gantt. El módulo SD también ofrecerá al usuario la oportunidad de obtener diferentes informes acerca de los resultados de la replanificación siempre que lo solicite. Una vez que el SD ha obtenido un plan, mostrará los indicadores de calidad correspondientes al usuario, el cual decidirá si quiere o no lanzarlo a planta. Si el plan se rechaza, el SD recurrirá al SE; en caso contrario, informará al módulo CDP acerca del lanzamiento a planta de un nuevo plan.

Una vez que el SD haya decidido que debe replanificar el SE, el SD informará al usuario acerca de la posibilidad de intervenir manualmente para resolver el problema. Si el usuario decide interactuar manualmente, el SD transferirá el control al SE. En caso contrario, el SD fijará la ejecución de algunos trabajos en relación con un intervalo de fijación configurable por el usuario. Dichos trabajos se procesarán en planta tal y como fueron planificados originalmente. Esta estrategia trata de impedir que la planta se detenga durante la obtención dinámica de un plan de producción. El SD avisará al usuario acerca de la cancelación del plan activo en un intervalo de tiempo equivalente al intervalo de fijación de trabajos, indicando cuáles son los trabajos fijados. Posteriormente, el SD cederá al control al SE, el cual se encargará de generar un nuevo plan de producción.

6. Conclusiones

El estudio realizado muestra la posibilidad de aplicar con éxito una técnica avanzada de optimización, como son los algoritmos genéticos y evolutivos, al problema de la programación de producción discreta, trabajando con un modelo de planta complejo y consiguiendo siempre soluciones factibles que verifican las restricciones del problema. Esta última característica se logra gracias a la incorporación de una heurística específica del problema en el proceso de generación de los organismos iniciales y en la mutación de organismos en sucesivas generaciones.

Algunas líneas futuras de ampliación posibles se mencionan a continuación. Actualmente la planta opera 24 horas al día, por lo que se deberán incorporar al modelo de planta las entidades necesarias para representar *calendarios y turnos de trabajo* variables, de uso habitual en la mayoría de las empresas de fabricación. Evidentemente, el calendario y los turnos de trabajo deberán tenerse en cuenta a la hora de determinar las fechas de inicio y fin de las operaciones.

Otro concepto nuevo a considerar en el sistema es el *lote de fabricación*, una subdivisión de la operación de fabricación que deberá tratarse como nuevo elemento unitario en la asignación de máquinas e intervalos de tiempo y que permitirá el procesamiento en paralelo de varios lotes pertenecientes a una misma orden de fabricación.

También se deberán tener en cuenta los *recursos auxiliares críticos*, que son aquellos que resultan imprescindibles para el proceso de producción y deben compartirse o son escasos: recursos humanos (operarios que controlan las máquinas), utensilios y herramientas, etc.

Asimismo, se actualizará la función de coste del problema, incorporando nuevos objetivos de optimización tales como:

- *Reducción del tiempo de fabricación.*
- *Optimización de la utilización de los recursos*, distribuyendo la carga de trabajo lo más posible.
- *Preferencias en el proceso de fabricación*: Idoneidad de ciertas máquinas respecto a otras del mismo tipo, o sobre la prioridad de unos pedidos sobre otros.
- *Coste por finalización adelantada*, en caso de que el usuario desee una programación JIT.

Una vez desarrollado el sistema completo con la incorporación de los elementos descritos

previamente (turnos y calendarios, lotes, recursos auxiliares críticos, nuevos objetivos), se procederá a un análisis riguroso del algoritmo desde el punto de vista de la calidad de las soluciones en comparación con otras técnicas básicas, como las reglas heurísticas de asignación, la búsqueda tabú y el enfriamiento simulado.

7. Referencias

- [1] Alvarez, E., Zubillaga, J., "Real-time shop-floor control in flexible manufacturing systems", *5th International Conference FAIM'95*, Stuttgart (Germany, Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, pp. 629-638, June, 1995.
- [2] M. Aarup, M. Zweben and M. S. Fox: *Intelligent Scheduling*. Morgan Kaufmann. 1994.
- [3] Baker, Kenneth R.: *Introduction to sequencing and scheduling*. John Wiley & Sons, 1974.
- [4] Brucker, Peter: *Scheduling algorithms*. Springer-Verlag. 1998.
- [5] Lázaro, J.M., Maseda, J.M., Díaz, F., Escalada, G. and Stureson, H.: "Reactive Scheduler for Discrete Manufacturing", en J. Dorn & K. A. Froeschl (eds.): *Scheduling of Production Processes*, Ellis Horwood, 1993.
- [6] J. Liu and B.L. MacCarthy: General heuristic procedures and solution strategies for FMS scheduling. *International Journal of Production Research*, 1999, Vol. 37, N° 11, 3305-3333.
- [7] Andrea Rossi, Gino Dini: Dynamic Scheduling of FMS using a Real-Time Genetic Algorithm. *International Journal of Production Research*, 2000, Vol. 38, N° 1.
- [8] S. Salleh, A. Zomaya: *Scheduling in Parallel Computing Systems: Fuzzy and Annealing Techniques*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] J.A. Stankovic, M. Spuri, K. Ramamritham: *Deadline Scheduling for Real-time Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [10] Shaw, M.J. and Whinston, A.B. "An Artificial Intelligence Approach to the Scheduling in Flexible Manufacturing Systems", *IIE Transactions*, 21(2), 70-83, 1989.
- [11] Singh Jain, A. and Meeran, S), "A State-of-The-Art Review of Job-Shop Scheduling Techniques", Department of Applied Physics, Electronic And Mechanical Engineering University Of Dundee, Dundee, Scotland, 1998.
- [12] Radhakrishnan S. and Ventura J., "Simulated annealing for parallel machine scheduling with earliness- tardiness penalties and sequence-dependent set-up times.", *International Journal of Production Research*. 2000, 38(10) 2233-2252, 2000.
- [13] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, publ. Addison-Wesley, 1989.