

## Análisis Comparativo de Métodos de Secuenciación para la Programación Dinámica de Operaciones

Esther Álvarez de los Mozos<sup>1</sup> y Francisco Javier Zubillaga Zubimendi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Organización. Universidad de Deusto, Avenida de las Universidades, 24 48007 Bilbao. ealvarez@eside.deusto.es

<sup>2</sup> Departamento de Organización. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad del País Vasco. Alameda de Urquijo, s/n. 48013 Bilbao. oezsecre@bi.ehu.es

### Resumen

*La mayoría de los métodos empleados en la programación de operaciones se basan en supuestos estáticos en relación con el entorno de fabricación y los pedidos de los clientes. Sin embargo, en el mundo real, es muy raro que se cumplan estos supuestos. En consecuencia, resulta necesario modificar los programas de producción frente a la aparición de sucesos inesperados en lo que respecta a la disponibilidad de los medios productivos o la prioridad de las órdenes de trabajo. En la práctica, es muy costoso diseñar nuevos programas para hacer frente a estos problemas, por lo que lo más habitual es utilizar soluciones aproximadas. Por una parte, las reglas heurísticas pueden proporcionar buenas soluciones a problemas complejos en tiempo real. Por otra parte, los algoritmos genéticos también pueden aplicarse con éxito a la programación dinámica de operaciones gracias a su flexibilidad para adaptarse al tiempo disponible para hallar una solución. En este artículo se comparan las soluciones aportadas por ambos métodos en un prototipo implementado en el contexto de un proyecto europeo perteneciente al programa Competitive and Sustainable Growth.*

**Palabras clave:** Programación dinámica de operaciones, reglas heurísticas, algoritmos genéticos y evolutivos.

### 1. Introducción

En esta comunicación \*, se realiza una comparativa entre dos métodos diferentes aplicados a la programación dinámica de operaciones, a saber, las reglas heurísticas y los algoritmos genéticos. Aunque estas técnicas funcionan de una manera bien distinta, comparten el mismo objetivo: modificar un programa de producción para hacer frente a cambios que afecten a la planta, o a las órdenes de producción, dando origen, por tanto, a un programa de producción diferente. La necesidad de modificar el programa de producción activo en un momento dado procede de la ocurrencia de un suceso inesperado, tal como una avería de máquina o la llegada de una orden de fabricación urgente.

En primer lugar, se mostrará un análisis del estado del arte en lo que respecta a las reglas heurísticas y a los algoritmos genéticos. A continuación, se expondrá una explicación general del método de trabajo que emplea cada técnica y posteriormente una explicación más

---

\* Este trabajo se deriva de la participación de la Universidad de Deusto en un proyecto de investigación financiado por la Comisión Europea dentro del programa "Competitive and Sustainable Growth", número de contrato G1RD-CT-2000-00296.

detallada del mismo. Esto nos permitirá disponer de una mejor comprensión de las diferencias existentes entre las soluciones proporcionadas por ambos métodos.

Finalmente, se expondrán los resultados de las pruebas realizadas con cada técnica procedentes de los modelos de dos diferentes plantas productivas, clasificadas por tipos de eventos. Cada prueba ha consistido en emular un evento, lo cual ha podido desencadenar un proceso de replanificación. Por cada prueba se han calculado diferentes indicadores de la calidad del plan resultante, junto con la cantidad de tiempo que se ha invertido para obtener dicha solución. Finalmente, se mostrará una tabla comparativa de resultados de ambas técnicas para las mismas pruebas.

## 2. Estado del arte

Se pueden encontrar numerosas fuentes bibliográficas que tratan de encontrar las técnicas más adecuadas para la programación de operaciones en planta. Sin embargo, no han tenido todo el éxito que hubiera cabido esperar (Salleh y Zomaya, 1999). Algunas de las técnicas de mayor éxito en el entorno industrial son las reglas heurísticas y los algoritmos genéticos y evolutivos.

En lo que respecta a las reglas heurísticas (RH), uno de los problemas más importantes que están pendientes de resolver es que no hay una regla que sea globalmente mejor que las demás. Estas reglas emplean datos como el tiempo de procesamiento (SPT), las fechas de entrega (EDD) o de los instantes de llegada (FIFO). Su eficacia depende, en gran medida, de las condiciones operacionales (por ejemplo, la presencia de cuellos de botella, la proximidad de las fechas de entrega, o la carga de trabajo de la planta) o de las medidas de rendimiento elegidas para medir la calidad del programa de producción resultante. Esto significa que una determinada regla puede resultar elegida gracias a que genera buenos resultados en algunos indicadores, aunque pueda arrojar peores resultados en otros. Por ello, muchas veces resulta difícil decidir qué regla es más adecuada a cada caso. Además de esto, existen combinaciones de reglas que se obtienen a partir de reglas más sencillas. Estas reglas suelen depender de la situación en la planta; por ejemplo, *Aplicar SPT hasta que la longitud de la cola exceda 5 posiciones, después cambiar a FIFO*. Esto evita que los trabajos cuyos tiempos de procesamiento sean largos se mantengan en la cola durante mucho tiempo.

Baker (1974) clasifica las reglas en dos grupos: locales y globales. Una regla es local si la asignación de prioridad sólo se basa en información acerca de los trabajos que se encuentran a la espera en la cola de la máquina afectada (por ejemplo, LPT). Una regla es global si, además, utiliza información de otras máquinas (por ejemplo, AWINQ). Shafei y Brunn (2000) investigan el rendimiento de varias reglas de secuenciación a partir de un método de horizonte de planificación continuo en un entorno de fabricación dinámico y sus resultados muestran que una regla de reciente creación, llamada SPT-C/R es la más adecuada para minimizar el coste global y que existe una relación entre la calidad del resultado y la longitud del horizonte de replanificación empleado. Los resultados de este estudio de simulación muestran que esta regla da los mejores resultados a lo largo de distintos horizontes de replanificación y bajo condiciones operativas diferentes. Jayamohan y Rajendran (2000) proporcionan un conjunto de nuevas reglas heurísticas (por ejemplo, FDD, PT+PW, PT+PW+ODD, etc.) para conseguir minimizar distintas medidas de rendimiento tales como el tiempo de flujo máximo y el retraso en plantas de producción muy dinámicas.

Tradicionalmente, la investigación en plantas de tipo job-shop sólo ha tenido en cuenta restricciones relativas a la disponibilidad de máquina y de mano de obra. Con la llegada de los sistemas de fabricación flexible y la fabricación justo a tiempo, se ha empezado a tener en cuenta la importancia de los recursos auxiliares en las actividades de control de planta y de programación de operaciones. A este respecto, Gargeya y Deane (1999) desarrollan un método de programación basada en contingencias en un entorno de fabricación dinámico restringido por recursos auxiliares. Se emplearon distintos tipos de indicadores, incluyendo la raíz cuadrada del retraso, el tiempo medio de estancia en el sistema y el número de cambios de recursos auxiliares. A medida que aumenta la utilización de la planta, el estudio revela que el algoritmo proporciona muy buenos resultados en los tres tipos de indicadores mencionados.

Los algoritmos genéticos (AG) son algoritmos de optimización aproximados que utilizan una terminología basada en los procesos de evolución genéticos de las especies. En realidad, los AG emplean los mecanismos de selección natural y la genética para encontrar soluciones óptimas a problemas de optimización combinatorios. Los AG surgieron a partir de los estudios llevados a cabo por John Holland en la Universidad de Michigan. Goldberg (1989) proporciona una interesante recopilación del trabajo práctico llevado a cabo en esta área.

Los AG pueden entenderse como una generalización de los algoritmos estocásticos de búsqueda local. El espacio de búsqueda de las soluciones candidatas se asemeja a un conjunto de organismos agrupados en poblaciones que evolucionan en el tiempo. La función objetivo del problema de optimización se implementa como una función de adaptación de organismos. La función de adaptación representa el grado de adaptación al entorno del organismo. Los AG se aplican a campos como la planificación de operaciones en planta, problemas de corte de materiales, problemas de nesting de componentes irregulares, el entrenamiento de redes neuronales y muchos otros problemas de optimización. Los AG presentan muchas ventajas de cara a su empleo en problemas de programación de operaciones en planta. La calidad de la solución y el tiempo de proceso dependen directamente de los parámetros de los AG, concretamente del número de organismos de la población y del máximo número de generaciones a probar. Esta característica les confiere gran flexibilidad. Rossi y Dini (2000) afirman que es posible encontrar los mejores valores de los parámetros de configuración de un AG a través de otro procedimiento de optimización como, por ejemplo, el enfriamiento simulado.

### 3. Descripción del sistema

El corazón del sistema es un planificador dinámico de operaciones que se encarga de hacer modificaciones al programa de producción original en respuesta a la aparición de sucesos imprevistos que puedan afectar a la viabilidad del programa de producción en curso. Una vez que el programa de producción generado de forma off-line se lanza a la planta, se convierte en el programa de producción activo. A partir de este momento, dicho programa de producción se somete a una monitorización por si alguna perturbación pudiera afectar a su validez. Primeramente, se definirán algunos términos importantes:

- **Operaciones afectadas:** Para un determinado evento, las operaciones afectadas por ese evento son aquellas operaciones que deben ser reasignadas a otra máquina o a otro operario, que tienen que retrasarse, adelantarse o quedar pendientes (ver siguiente párrafo).

- **Operaciones pendientes:** Operaciones que quedan sin asignación de recursos como consecuencia de una falta de capacidad en el horizonte de planificación en curso. Estas operaciones dispondrán de una marca (o flag) que indicará que dichas operaciones no disponen de asignación de tiempo ni de recursos.
- **Lotes:** Conjunto de piezas que pertenecen a la misma orden de fabricación y que se procesan juntas en la misma máquina. Cada operación pueden dividirse en varios lotes que pueden asignarse a distintas máquinas de un grupo de máquinas alternativas de la planta. El tamaño de lote es un concepto que depende del tipo de pieza. Si varios lotes de una misma operación se asocian a la misma máquina se deberán procesar consecutivamente.
- **Tareas:** Elementos básicos que componen un programa de producción. Representan las porciones de operación que están planificadas para una orden de fabricación determinada durante un turno de una máquina concreta. Por ejemplo, si un determinado lote no puede completarse a lo largo de un turno, se dividirá en distintas tareas hasta que se termine de procesar.

Las funcionalidades más importantes del sistema son las siguientes:

- Rápida obtención de un programa de producción de forma dinámica a partir del momento en que el sistema recibe información relativa a la llegada de un evento relevante.
- Visualización gráfica mediante un diagrama de Gantt de las tareas integrantes del plan dinámico, ordenadas por máquina. Por defecto, sólo se visualizarán las máquinas con operaciones reasignadas por el proceso dinámico de replanificación, aunque el usuario podrá también elegir las máquinas que desee se representen en la pantalla.
- Generación de informes acerca de la utilización de máquinas y de operarios, incluyendo información acerca de las tareas asignadas a cada uno de ellos.
- Presentación de indicadores de rendimiento del plan dinámico resultante, lo cual ayudará al usuario a tomar la decisión de aceptar o rechazar dicho plan.

### 3.1. Tipos de eventos

Los eventos que contempla el sistema se pueden clasificar en dos grandes grupos: eventos inesperados procedentes de la planta y cambios en las órdenes de producción.

#### 3.1.1. Eventos procedentes de la planta

El primer grupo incluye los siguientes eventos:

- **Avería de máquina (MB):** Este evento puede introducirse de forma manual a través de la interfaz de usuario, o de forma automática a través de un sistema de captura de datos, informando de la existencia de una parada no planificada de máquina. Además, si se dispone de ese dato, se recibirá información acerca de la duración estimada del intervalo de indisponibilidad de dicha máquina.

- **Recuperación de máquina (MR):** Éste es el evento opuesto al anterior, que informa al sistema de que la máquina averiada se ha reparado y está de nuevo operativa.
- **Falta de materiales (MS):** A través de esta opción, el usuario puede especificar una falta de material que solo afecte a una orden de fabricación, o una falta global de material que afecte a cada orden que emplee dicho material.
- **Llegada de materiales (AM):** Este es el evento opuesto al anterior, que supone que las órdenes afectadas por la falta de material ya pueden procesarse.
- **Ausencia inesperada de operario (AO):** Este evento informa de una ausencia temporal de un operario.
- **Presencia de operario (PO):** Este es el evento opuesto al anterior, que implica que el operario ausente ya está disponible.

### 3.1.2. Cambios en órdenes de fabricación

El segundo grupo incluye los siguientes eventos:

- **Llegada de un nuevo trabajo (NJ):** Este evento permite al usuario introducir órdenes urgentes en el programa de producción en curso.
- **Priorización de un trabajo (PJ):** A través de este evento, el usuario puede cambiar la prioridad de las órdenes abiertas pero no en curso.
- **Cancelación de un trabajo (JC):** Al elegir esta opción, el usuario puede borrar órdenes del plan en curso.
- **Suspensión de una orden de fabricación (SO):** Este evento permite al usuario detener una operación durante un cierto tiempo (y, por tanto, también su orden de fabricación asociada). Este evento es útil para la realización de comprobaciones de calidad.
- **Activación de una orden de fabricación (AO):** Este es el evento opuesto al anterior, que permite la activación de la operación suspendida (y de su orden asociada).
- **Subcontratación de una operación (SO):** Si no existe capacidad suficiente para llevar a cabo una operación en un determinado momento, a través de esta opción el usuario puede decidir subcontratarla de forma dinámica.
- **Operación subcontratada finalizada (SF):** Este evento permite introducir la operación subcontratada de nuevo en el flujo de producción.
- **Reprocesar piezas (RM):** Este evento permite informar al sistema de la cantidad de piezas que hay que reprocesar, así como de la operación y la orden de trabajo en la que se han detectado piezas defectuosas.
- **Reparar piezas (RP):** De forma similar al evento anterior, a través de este evento se informa al sistema de la cantidad de piezas a reparar, así como de la operación y la orden de trabajo en la que se han detectado piezas defectuosas.

- **Incrementar la cantidad (IQ):** A través de esta opción, el usuario puede introducir la cantidad de piezas que desee añadir de forma dinámica.

### 3.1.3. Cambios en las órdenes de trabajo

- **Aplicar horas extras (AO):** Este evento permite extender la duración de los turnos en un tiempo determinado, siguiendo los deseos del usuario.
- **Actualizar plan (UP):** Este evento supone la replanificación de todos los trabajos comprendidos en el horizonte de planificación en curso.

## 4. Descripción del módulo Algoritmo Genético (AG)

La característica más importante del módulo AG es que puede manejar distintos tipos de eventos de una manera homogénea. En lo que respecta al proceso de replanificación, consiste en los siguientes pasos:

- El módulo AG sólo tendrá en cuenta las operaciones afectadas por el suceso imprevisto; es decir, aquellas operaciones que no puedan ejecutarse tal y como habían sido programadas inicialmente.
- Una vez seleccionadas las operaciones afectadas, se dividirán en nuevas entidades (lotes), teniendo en cuenta el tamaño de lote definido por el usuario durante la fase de configuración.
- A continuación, los lotes obtenidos se asignarán a máquinas, intentando mantener la asignación original de recursos. Si dichos recursos no dispusieran de capacidad suficiente, el AG recurrirá a otras máquinas alternativas. Si no fuera posible hacerlo dentro del horizonte de planificación utilizado, los lotes correspondientes quedarán marcados como pendientes.
- Finalmente, los lotes se convertirán en nuevas operaciones y tareas que pasarán a integrar el programa de producción dinámico resultante.

El AG diseñado para planificar la producción se basa en el procedimiento general de un algoritmo genético evolutivo combinado con un heurístico específico adaptado al problema (Díaz y Álvarez, 2003). Dicho heurístico se aplica al proceso de generación de organismos en la población inicial, así como en la recombinación de genes para formar nuevos organismos-solución para próximas generaciones. El objetivo es generar organismos-solución factibles, es decir, que satisfagan todas las restricciones del problema. Esto significa que todos los programas de producción obtenidos pueden aplicarse en la situación actual de la planta, ya que cumplen todas las restricciones existentes. La información de entrada al algoritmo se compone de todas las entidades que integran el modelo de planta industrial, así como del programa de producción activo. A partir de todos los trabajos del programa de producción activo, el módulo AG tratará de replanificar sólo aquellos trabajos que se vean afectados por el evento a lo largo del horizonte de planificación. El módulo AG no está afectado por el tipo de imprevisto que originó el ciclo de replanificación de los trabajos pendientes. Además, los trabajos pendientes pueden abarcar todos los trabajos del programa de producción actual, o sólo un subconjunto de los mismos. Los imprevistos sucedidos que soporta el sistema se

tratan con anterioridad a la ejecución del módulo AG. Esta operación supone determinar en primer lugar cuáles son las operaciones afectadas y actualizar la información de planta afectada por el evento. Esta independencia y generalidad del AG le permite generar tanto programas de producción completos desde cero, como simples ajustes puntuales de algunos de los trabajos del programa de producción activo.

## 5. Descripción del módulo de Reglas Heurísticas (RH)

El módulo RH gestiona cada evento según un enfoque basado en el caso; es decir, sigue un procedimiento específico que tiene en cuenta los requisitos del usuario y los objetivos de fabricación. Por tanto, el módulo RH utilizará una lista de tareas afectadas que intentará reasignar en alguna máquina que esté libre. Si no existe suficiente capacidad a lo largo del horizonte de replanificación para realizar una determinada tarea en ninguna de las máquinas disponibles, dicha tarea quedará pendiente. Esto implica que todas las siguientes tareas de esa operación, así como las operaciones subsiguientes de la orden, también quedarán pendientes. Se han utilizado dos reglas básicas en este módulo (Smith, 1995):

- **Right Shifter (RSH):** Esta regla mueve hacia la derecha (retrasa) los trabajos, con respecto a la fecha original planificada.
- **Left Shifter (LSH):** Esta regla mueve hacia la izquierda (adelanta) los trabajos con respecto a la fecha planificada siempre que la disponibilidad de los recursos y las restricciones de precedencia lo permitan.

Por otra parte, se han desarrollado algunas reglas específicas, siguiendo los requisitos del usuario. Por ejemplo, en lo referente al evento de avería de máquina (MB), si se dispone de varias máquinas alternativas, se elegirá la que suponga un menor tiempo de preparación variable para esa operación y tipo de pieza. Si no hay máquinas alternativas, las tareas afectadas se retrasarán hasta el momento en que esté previsto que la máquina averiada se repare. Si el tiempo de indisponibilidad de la máquina es desconocido o excede el horizonte de planificación, las máquinas afectadas quedarán pendientes. En cuanto al evento contrario de recuperación de máquina, cada tarea que haya quedado pendiente se asignará a la máquina recuperada lo antes posible, incluso dando al usuario la posibilidad de interrumpir la tarea en curso y retrasando otras tareas que ya estaban planificadas para dar prioridad a las operaciones pendientes.

A continuación, se expondrá otro ejemplo relativo a la suspensión de una orden de fabricación (SO). En este caso, el tiempo ocioso que se genera en los recursos originalmente asignados a esa orden permitirá que las tareas subsiguientes se muevan hacia la izquierda (se adelanten), con el fin de utilizar al máximo la capacidad de los recursos. Por otra parte, cuando se recibe el evento contrario de activación de orden de fabricación (AO), las operaciones pendientes se replanificarán aprovechando los huecos disponibles, pero evitando la interrupción de los trabajos en curso o el retraso de otros trabajos ya planificados.

## 6. Pruebas

Se han realizado pruebas en dos fábricas. Una de ellas pertenece al sector metalúrgico, concretamente se dedica a la fabricación de reductores. Esta empresa está especialmente interesada en reducir los tiempos de preparación variable y los tiempos de suministro. En este caso, se han tenido en cuenta muchos elementos; en particular, 197 órdenes de fabricación,

395 operaciones, 460 tareas y 44 máquinas. La otra fábrica produce cartón para empaquetar comida y otros productos, pudiendo abarcar una importante variedad de productos en términos de tamaño, formas y peso. Para llevar a cabo las pruebas, se han tenido en cuenta las siguientes entidades: 38 órdenes de fabricación, 39 operaciones, 58 tareas y 2 máquinas. Estos datos definirán el plan de producción activo en la planta antes de que se emule un suceso imprevisto y se busque una solución para hacer frente a la nueva situación.

En el siguiente apartado, se representan los resultados de las pruebas que se han efectuado en los modelos de las dos fábricas, clasificados por módulos. Estos resultados se han obtenido utilizando un PENTIUM IV a 1,7 GHz.

### 6.1. Algoritmos genéticos

|  |           | Operaciones planificadas | Operaciones pendientes | Órdenes retrasadas | Retraso medio | Órdenes adelantadas | Adelanto medio | Máximo adelanto | Utilización de máquinas (%) |
|--|-----------|--------------------------|------------------------|--------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|
|  | <b>MB</b> | 6                        | 10                     | 1                  | 17.           | 1                   | 0.2            | 0.2             | 100                         |
|  |           | 1.8                      | 2                      | 0.5                | 4.0           | 0.0                 | 0              | 0               | 60.                         |
|  |           | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 0                           |
|  | <b>MR</b> | 13                       | 5                      | 1                  | 0.8           | 2                   | 0.7            | 0.7             | 100                         |
|  |           | 4.8                      | 0.8                    | 0.6                | 0.1           | 0.4                 | 0.2            | 0.2             | 66.                         |
|  |           | 2                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 0                           |
|  | <b>NJ</b> | 9                        | 18                     | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 70.                         |
|  |           | 3.7                      | 2.9                    | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 47.                         |
|  |           | 0                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 23.                         |
|  | <b>PJ</b> | 14                       | 2                      | 2                  | 1.7           | 6                   | 0.7            | 0.7             | 100                         |
|  |           | 7                        | 0.6                    | 1.6                | 1.0           | 2.6                 | 0.2            | 0.2             | 93.                         |
|  |           | 2                        | 0                      | 1                  | 0.0           | 1                   | 0.0            | 0.0             | 80.                         |
|  | <b>JC</b> | 25                       | 12                     | 3                  | 3.7           | 2                   | 2.7            | 4.2             | 83.                         |
|  |           | 9                        | 3.7                    | 1.5                | 1.7           | 0.7                 | 0.7            | 1.0             | 70.                         |
|  |           | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 63.                         |
|  | <b>OS</b> | 24                       | 28                     | 5                  | 1.7           | 8                   | 0.6            | 2.2             | 98.                         |
|  |           | 11.                      | 7.5                    | 2.8                | 0.7           | 2.6                 | 0.2            | 0.5             | 74.                         |
|  |           | 5                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 57.                         |
|  | <b>OR</b> | 29                       | 25                     | 1                  | 0.9           | 1                   | 3.4            | 3.4             | 100                         |
|  |           | 8.3                      | 6.1                    | 0.2                | 0.2           | 0.2                 | 0.4            | 0.4             | 70.                         |
|  |           | 0                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 16.                         |
|  | <b>SO</b> | 6                        | 4                      | 2                  | 2.9           | 2                   | 1.1            | 1.1             | 75.                         |
|  |           | 3.1                      | 1.6                    | 0.5                | 0.5           | 0.3                 | 0.1            | 0.1             | 62.                         |
|  |           | 1                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 30.                         |
|  | <b>SF</b> | 33                       | 3                      | 15                 | 1.8           | 10                  | 3.1            | 3.2             | 79.                         |
|  |           | 15.                      | 0.6                    | 6.7                | 0.7           | 4                   | 0.8            | 1.4             | 68.                         |
|  |           | 1                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 61.                         |
|  | <b>RM</b> | 13                       | 13                     | 3                  | 17.           | 3                   | 0.8            | 0.8             | 79.                         |
|  |           | 8.2                      | 9                      | 1                  | 12.           | 1.2                 | 0.1            | 0.1             | 65.                         |
|  |           | 3                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 16.                         |
|  | <b>RP</b> | 8                        | 17                     | 3                  | 3.8           | 2                   | 1.9            | 1.9             | 86.                         |
|  |           | 4                        | 6                      | 1                  | 1.4           | 0.8                 | 0.3            | 0.3             | 65.                         |
|  |           | 2                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 42.                         |
|  | <b>IQ</b> | 9                        | 5                      | 5                  | 0.9           | 3                   | 0.1            | 0.1             | 84.                         |
|  |           | 7                        | 2.4                    | 1.2                | 0.2           | 0.5                 | 0.0            | 0.0             | 65.                         |
|  |           | 2                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 21.                         |
|  | <b>OV</b> | 6                        | 14                     | 1                  | 0.0           | 3                   | 1.1            | 1.9             | 55.                         |
|  |           | 2.6                      | 8                      | 0.3                | 0.0           | 1                   | 0.3            | 0.6             | 42.                         |
|  |           | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 34.                         |
|  | <b>UP</b> | 64                       | 57                     | 18                 | 3.2           | 7                   | 0.4            | 2.2             | 96.                         |
|  |           | 41.                      | 33.                    | 10.                | 2.3           | 5                   | 0.2            | 1.0             | 89.                         |
|  |           | 29                       | 21                     | 7                  | 0.6           | 3                   | 0.0            | 0.1             | 81.                         |

Tabla 1. Resultados de pruebas para el módulo AG.

## 6.2 Reglas heurísticas

|  |    | Operaciones planificadas | Operaciones pendientes | Órdenes retrasadas | Retraso medio | Órdenes adelantadas | Adelanto medio | Máximo adelanto | Utilización de máquinas (%) |
|--|----|--------------------------|------------------------|--------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|
|  | MB | 5                        | 8                      | 1                  | 0.1           | 1                   | 3.4            | 3.4             | 87.                         |
|  |    | 1.5                      | 2.6                    | 0.1                | 0.0           | 0.0                 | 0.2            | 0.2             | 63.                         |
|  |    | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 41.                         |
|  | MR | 2                        | 10                     | 1                  | 1.5           | 1                   | 0.3            | 0.3             | 86.                         |
|  |    | 0.5                      | 4.1                    | 0.2                | 0.2           | 0.1                 | 0.0            | 0.0             | 75.                         |
|  |    | 0                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 57.                         |
|  | NJ | 4                        | 7                      | 1                  | 0.0           | 1                   | 0.5            | 0.5             | 80.                         |
|  |    | 3.2                      | 1.4                    | 0.2                | 0.0           | 0.4                 | 0.1            | 0.1             | 49.                         |
|  |    | 2                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 20.                         |
|  | PJ | 12                       | 6                      | 4                  | 0.1           | 1                   | 1.9            | 1.9             | 82.                         |
|  |    | 6.6                      | 2.4                    | 1.6                | 0.0           | 0.6                 | 0.4            | 0.4             | 77.                         |
|  |    | 4                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 79.                         |
|  | OS | 5                        | 1                      | 1                  | 13.           | 3                   | 0.5            | 0.5             | 80.                         |
|  |    | 3                        | 1                      | 0.2                | 2.6           | 0.6                 | 0.1            | 0.1             | 53.                         |
|  |    | 0                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 36.                         |
|  | OR | 1                        | 1                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 77.                         |
|  |    | 0.5                      | 0.5                    | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 74.                         |
|  |    | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 70.                         |
|  | SO | 2                        | 13                     | 0                  | 0             | 1                   | 1              | 1               | 76.                         |
|  |    | 1                        | 3.6                    | 0                  | 0             | 0.2                 | 0.2            | 0.2             | 50.                         |
|  |    | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 0                           |
|  | SF | 34                       | 2                      | 4                  | 0.4           | 8                   | 0.5            | 2.1             | 58.                         |
|  |    | 17                       | 1                      | 2                  | 0.2           | 4                   | 0.2            | 1.0             | 29.                         |
|  |    | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 0                           |
|  | RM | 32                       | 1                      | 11                 | 5.9           | 3                   | 0.2            | 0.7             | 78.                         |
|  |    | 12                       | 0.3                    | 3.6                | 1.7           | 1                   | 0.0            | 0.2             | 53.                         |
|  |    | 2                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 35.                         |
|  | RP | 19                       | 3                      | 1                  | 0.2           | 0                   | 0              | 0               | 77.                         |
|  |    | 9.3                      | 1                      | 0.3                | 0.0           | 0                   | 0              | 0               | 55.                         |
|  |    | 3                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 41.                         |
|  | IQ | 4                        | 1                      | 1                  | 0.0           | 0                   | 0              | 0               | 26.                         |
|  |    | 3.5                      | 1                      | 1                  | 0.0           | 0                   | 0              | 0               | 24.                         |
|  |    | 3                        | 1                      | 1                  | 0.0           | 0                   | 0              | 0               | 23.                         |

Tabla 2. Resultados de las pruebas para el módulo RH.

## 7. Conclusiones

|    | Operaciones planificadas | Operaciones pendientes | Órdenes retrasadas | Retraso medio | Órdenes adelantadas | Adelanto medio | Máximo adelanto | Utilización de máquinas (%) | Tiempo de CPU |
|----|--------------------------|------------------------|--------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|---------------|
| GA | 33                       | 10                     | 12                 | 17.64         | 6                   | 1.7            | 3.29            | 100                         | 17            |
|    | 4.03                     | 1.8                    | 1                  | 1.95          | 0.43                | 0.13           | 0.18            | 59.97                       | 4.1           |
|    | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 16.36                       | 1             |
| HR | 34                       | 10                     | 11                 | 11.75         | 18                  | 3.43           | 3.43            | 87.29                       | 15            |
|    | 3.6                      | 2.43                   | 0.63               | 0.5           | 0.45                | 0.14           | 0.19            | 59.51                       | 3.2           |
|    | 0                        | 0                      | 0                  | 0             | 0                   | 0              | 0               | 20.25                       | 1             |

Tabla 3. Resultados comparativos para los módulos AG y RH.

Como puede observarse, los resultados no son muy diferentes; sin embargo, sí se pueden destacar algunas ventajas y desventajas de cada método. Una ventaja del módulo RH es que consume menos recursos computacionales. Otro aspecto positivo es que el módulo RH

gestiona cada tipo de evento de forma específica, según las necesidades del usuario final en cada caso. Sin embargo, el módulo RH replanifica tareas y no operaciones con lo que las soluciones no son tan óptimas.

Por otra parte, los algoritmos genéticos permiten crear un nuevo programa de producción desde cero mientras que las reglas heurísticas sólo sirven para reparar un programa de producción ya existente. Además, los algoritmos genéticos dejan menos operaciones pendientes.

Como principales ventajas del sistema como conjunto, los usuarios están sumamente satisfecho con disponer de un programa que les permite cambiar un programa de producción de forma dinámica de una forma eficiente y eficaz. Por una parte, el tiempo que les lleva hacer una modificación ante un imprevisto es mucho menor. Por otra, los tiempos improductivos de las máquinas se han reducido significativamente y se ha logrado un mejor cumplimiento de las fechas de entrega.

## Referencias

- Baker, K. R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*, John Wiley & Sons.
- Díaz, F.; Alvarez, E. (2003). Reactive Scheduling in Job-Shop Environments: Alternative Approaches, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Production Research, Blacksburg, Virginia, USA, Agosto 3-7.
- Gargeya, V.G.; Deane, R.H. (1999). Scheduling in the dynamic job shop under auxiliary resource constraints: a simulation study, *International Journal of Production Research*, Vol.37, No.12, pp.2817-2834.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- Jayamohan, M.A.; Rajendran, C. (2000). New dispatching rules for shop scheduling; a step forward, *International Journal of Production Research*, Vol.38, No.3, pp.563-586.
- Rossi, A.; Dini, G. (2000) Dynamic Scheduling of FMS using a Real-Time Genetic Algorithm, *International Journal of Production Research*, Vol.38, No. 1, pp.1-20.
- Salleh, S.; Zomaya, A. (1999), *Scheduling in Parallel Computing Systems: Fuzzy and Annealing Techniques*. Kluwer Academic Publishers.
- Shafaei R.; Brunn P. (2000), Workshop scheduling using practical data. Part 1, 2, 3: A framework to integrate job releasing, routing and scheduling functions to create a robust predictive schedule, *International Journal of Production Research*, Vol.38, No.1, pp.85-99.
- Smith, S. F. (1995). OPIS: A Methodology and Architecture for Reactive Scheduling. In Brown, D.E., Scherer, W.T. (Eds), *Intelligent Scheduling Systems*, pp. 155-192, Kluwer Academic Publishers.