

Inteligencia Artificial

P.R. Muro; S.F. Smith;
J.L. Villarreal

Planificador de operaciones de fabricación basado en una arquitectura de pizarra

1. Introducción

Uno de los problemas más complejos en el control de un sistema de fabricación lo constituye la organización del flujo de las operaciones que deben ser realizadas por los recursos operativos del sistema. Este problema, conocido como problema de planificación de operaciones¹, puede establecerse en términos generales como el problema de realizar una asignación de recursos (máquinas, herramientas, robots, transportes, instalaciones de almacenamiento, etc.) a operaciones a lo largo del tiempo, de forma que conduzca a la realización de las órdenes de trabajo (compuestas por una secuencia de operaciones conducentes a la creación de un nuevo producto) en el instante oportuno y a un coste bajo. Las operaciones deben ser planificadas de forma que satisfagan las restricciones tecnológicas asociadas a los procesos de producción y las limitaciones de capacidad del conjunto de recursos compartidos. La dificultad del problema de planificación de operaciones se pone de manifiesto por las siguientes características:

- El problema del cálculo de un plan óptimo de operaciones resulta ser, excepto para casos elementales, NP-completo, incluso bajo hipótesis académicas que contemplen fuertes simplificaciones en las restricciones tecnológicas y en los criterios a optimizar [Garey, Johnson, 79].

- No siempre existen planes de operaciones para los que todas las restricciones puedan ser satisfechas.

- El comportamiento del entorno de un sistema de fabricación resulta impredecible.

- No existe un único problema de planificación de operaciones por lo que el establecimiento de un esquema general cuenta con innegables limitaciones.

El tratamiento de este problema se ha abordado fundamentalmente desde dos perspectivas diferentes. La primera y más tradicional está basada en la utilización de métodos de investigación operativa, mientras que la segunda, centrada en la utilización de aproximaciones más heurísticas, se basa en la aplicación de métodos de inteligencia artificial.

¹Traducción que hemos adoptado para el término inglés "scheduling". Existen otras posibles traducciones apuntadas por otros autores (programación, planificación a corto); sin embargo "planificación de operaciones" nos ha parecido la traducción más indicativa de su significado

1.1. Métodos de programación matemática

La técnica general de resolución de problemas es la satisfacción de restricciones y la aproximación dominante es la reformulación del problema como un problema de programación lineal (generalmente se utilizan el método simplex o el de Karmarkar). El método de resolución con **programación matemática** [Jeter, 86] parte de un modelo cuantitativo del problema y lo transforma en otro, con estructura más simple, que se resuelve con un método de optimización. Si la solución obtenida no es de calidad suficiente, se procede a una nueva reformulación del problema. Dentro de esta aproximación destacan cuatro métodos de optimización: programación lineal (fundamentalmente en sus versiones de programación lineal entera y 0-1), método de bifurcación y acotación ("branch and bound"), relajación lagrangiana y programación dinámica [Graves, 81]. La ventaja característica es la consecución de soluciones óptimas o cuasi óptimas. La desventaja gravísima de estos métodos se deriva de la imposibilidad de manejar la complejidad de la mayor parte de los problemas: abordan versiones del problema muy simplificadas y tienen un coste computacional muy alto.

Otra aproximación, más utilizada en la práctica, son las **reglas de despacho** ("dispatching rules") que trabajan con prioridades definidas según criterios locales. Funcionan como reglas de decisión que se aplican en el momento en que es necesaria una decisión de planificación particular [Panwalker, Iskander, 77]. En planificación, el método de resolución se basa en una simulación del sistema dirigida por eventos; los resultados de dicha simulación conforman el plan de operaciones. Como aspecto positivo, las reglas de despacho son sencillas de aplicar y proporcionan una base directa para realizar un control en tiempo real. Sin embargo, la confianza en estas técnicas es limitada: únicamente se han conseguido éxitos en la planificación de sistemas de fabricación relativamente simples, fundamentalmente debido a una visión miope de la factoría que proporciona una satisfacción local en lugar de la optimización global pretendida.

1.2. Métodos de inteligencia artificial

Las aproximaciones a la planificación de la producción basadas en técnicas de inteligencia artificial han surgido recientemente como alternativas a las aproximaciones de despacho [Dattero y col. 90]. Estas aproximaciones tratan la complejidad del problema de planificación de operaciones explotando el conocimiento disponible sobre el entorno de

producción y sus restricciones. Revisiones de tales aproximaciones pueden encontrarse en [Steffen, 86], [Kusiak, 88] y [Noronha, Sarma, 91]. Los métodos más utilizados han sido: aproximaciones basadas en reglas, negociación distribuida y búsqueda dirigida por restricciones. Las primeras se basan en la codificación de la experiencia de un experto en forma de reglas y generalmente adoptan una representación de la factoría orientada a objetos. Los inconvenientes provienen normalmente de la fase de adquisición del conocimiento; sin embargo en el caso específico de planificación de operaciones los inconvenientes se incrementan por no existir realmente expertos humanos que resuelvan adecuadamente el problema (a causa de la complejidad combinatoria del problema, los planificadores humanos proporcionan soluciones que destacan más por ser conservadoras que óptimas). En el método de *negociación distribuida* se representa el problema mediante agentes separados y distribuidos a través de la planta. Cada agente gestiona sus propias tareas y las relaciones entre agentes se definen mediante contratos. Los métodos de *búsqueda dirigida por restricciones* combinan técnicas de búsqueda, heurísticas y restricciones como guías en el espacio de búsqueda. Entre los ejemplos más representativos destacan los sistemas ISIS para planificación de operaciones en sistemas de fabricación [Fox, 83] o GARI, desarrollado para la planificación de procesos [Descotte, Latombe, 85].

El objetivo de este trabajo es presentar la arquitectura de un sistema "inteligente" para la planificación de operaciones en sistemas de fabricación. En el apartado 2 se presenta el soporte conceptual y técnico que justifica dicha arquitectura y se muestra su diagrama de bloques. El apartado 3 presenta el ciclo de control del planificador, así como los distintos tipos de fuentes de conocimiento (acciones de planificación y análisis), estrategias básicas y la aproximación adoptada para la caracterización de los conflictos que pueden surgir en el plan de operaciones elaborado. En el apartado 4 se realiza un extenso estudio experimental sobre un modelo de planta real y, finalmente, en el apartado 5 se establecen las principales conclusiones del trabajo.

2. Arquitectura del Planificador de Operaciones

La aproximación adoptada en el presente trabajo se basa en la metodología para planificación de operaciones desarrollada en el sistema OPIS [Ow, Smith, 88], [Smith y col., 90]. Esta metodología está sustentada en la visión de la planificación como una actividad dirigida por restricciones que puede soportar:

- la *generación* de planes de operaciones que reflejen de manera fiable las características y objetivos del entorno de producción,
- la *revisión incremental* de estos planes en respuesta a cambios no anticipados del estado de la factoría (fallos de máquinas, rechazos del control de calidad, etc.).

El plan de operaciones puede, de esta forma, proporcionar una guía en tiempo de ejecución no disponible en las aproximaciones basadas en reglas de despacho.

Adicionalmente, la metodología que se propone adopta una visión de la planificación de operaciones en la que la *generación* y *revisión* soportan el mismo esquema de procesamiento. En este marco, el sistema reconcilia de forma incremental las discrepancias que surgen entre el plan de operaciones previsto y el comportamiento real del entorno de producción. Para ello interpreta el plan de operaciones previsto como un conjunto de restricciones que han sido impuestas sobre la operación de la factoría [Smith, 87].

La elección de la arquitectura del planificador de operaciones se fundamenta en la idea de *razonamiento oportunista* [Ow, Smith, 88]. Este término se ha venido utilizando para caracterizar los procesos de resolución de problemas donde la actividad de razonamiento se dirige hacia aquellas acciones que aparecen como más prometedoras en términos del estado de resolución del problema considerado. La bondad de la aproximación adoptada en el sistema OPIS ya ha sido demostrada experimentalmente en [Ow, Smith, 88]. En dicho trabajo se compara una versión del sistema OPIS frente a su antecesor ISIS y a un sistema de despacho como COVERT. Si bien el número de tests realizados en dicho estudio es relativamente limitado (el elevado número de restricciones, criterios de producción a optimizar y posibilidades del sistema de fabricación hacen inabordable un estudio exhaustivo), los resultados demuestran claramente las ventajas de OPIS frente a las otras dos aproximaciones.

La *base de conocimiento* del sistema de planificación está formada por la *pizarra*, que contiene la información relativa a la hipótesis del plan considerado hasta el momento, conocimiento general relativo al modelo (como restricciones físicas, causales y de preferencia), así como conocimiento heurístico de alto nivel utilizado por el GAN.

2.1. Arquitectura de pizarra

La arquitectura del planificador de operaciones (mostrada en la **figura 1**), está basada en los principios de *arquitecturas de pizarra estándar* [Nii, 86a; Nii, 86b]. En la arquitectura de pizarra propuesta, los planes de operaciones son analizados, generados y revisados incrementalmente a través del uso combinado de una colección de diferentes métodos de planificación o procedimientos heurísticos denominados fuentes de conocimiento. El objetivo de cada fuente de conocimiento es contribuir con nueva información que pueda conducir a la solución del problema. Una fuente de conocimiento toma un conjunto de informaciones de la pizarra y las actualiza según el conocimiento especializado que tiene codificado, generalmente en forma de reglas o procedimientos [Elgelmor, Morgan, 88].

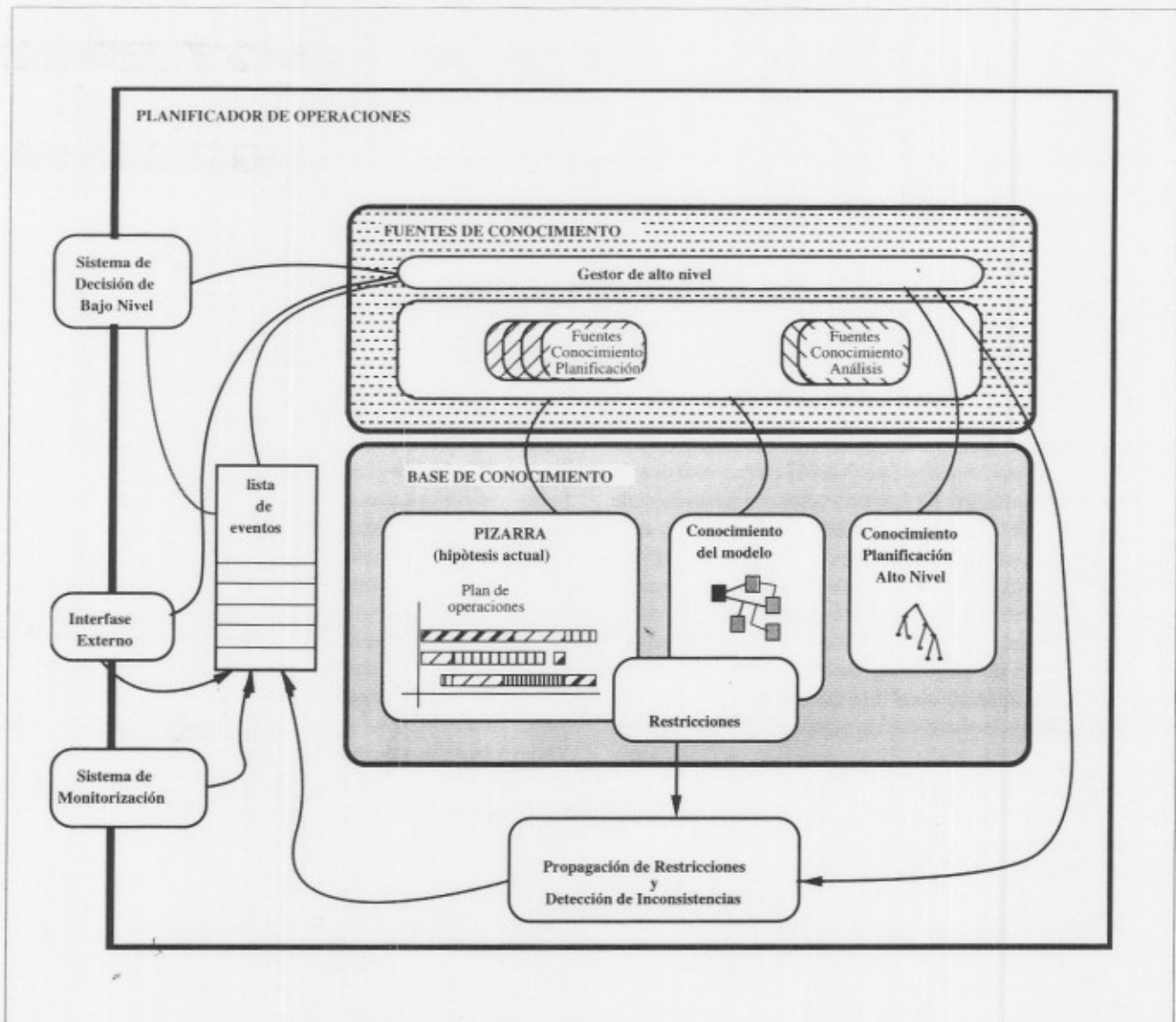


Fig. 1: Arquitectura del planificador

Considerando su aspecto funcional, las fuentes de conocimiento pueden ser agrupadas según dos tipos: las *acciones de planificación* que son fuentes de conocimiento cuya ejecución conlleva cambios en la hipótesis del plan de operaciones considerada; y las *acciones de análisis* que son fuentes de conocimiento que implican la evaluación y caracterización de los problemas encontrados en el plan de operaciones considerado.

2.2. GAN, gestor de alto nivel

La responsabilidad del uso y coordinación de estas fuentes de conocimiento está asumida por otra fuente de conocimiento especial denominada GAN que realiza funciones de control (fuente de conocimiento de control, según la aproximación adoptada en [Hayes, 85]), El GAN combina mecanismos de propagación de restricciones y mantenimiento de consistencia, con conocimiento heurístico de alto nivel que permite

relacionar las restricciones y parámetros del plan con estrategias específicas de planificación predictiva o reactiva.

El GAN es informado de los resultados de la actividad de las fuentes de conocimiento, de los cambios en el plan de operaciones y de los cambios que tienen lugar en la factoría por medio del envío de *eventos de control*. Los eventos contienen información relativa a las características de la solución (p.e. la utilización parece ser alta en un recurso particular), al progreso hecho hacia la solución final (p.e. se ha generado o revisado otro componente del plan), o permiten identificar problemas específicos de la solución considerada (p.e. violaciones de restricciones no relajables) [Smith, 87]. La invocación del planificador se realiza creando una tarea que active el GAN; lo que, dependiendo de la estrategia elegida, puede hacerse de dos formas: *modo generativo*, que provoca la generación de un nuevo plan de operaciones completo;

modo reactivo, que modifica el plan de operaciones previo para obtener uno nuevo donde se encuentren satisfechas las restricciones no relajables.

La representación utilizada en la *pizarra* incluye una especificación de los límites de tiempo sobre la ejecución de cada operación de fabricación que ha sido o puede ser planificada (restricciones temporales de las operaciones), y una especificación de la capacidad disponible de cada recurso a lo largo del tiempo (restricciones de capacidad de los recursos). La planificación de una operación en un recurso implica el consumo de cierta capacidad del recurso durante el intervalo que dure la operación. Cada vez que se toma una decisión de planificación para una operación, un sistema de mantenimiento del plan combina estas nuevas restricciones con las restricciones subyacentes en el modelado del sistema de fabricación (p. e. fechas de comienzo y finalización de las órdenes de producción, duraciones de las operaciones, relaciones de precedencia entre ellas, requerimientos de los recursos, etc.) para actualizar los límites temporales de las operaciones y las restricciones de disponibilidad de los recursos relacionados. Así, los límites temporales de las operaciones que todavía no han sido planificadas en un momento dado, reflejan el conjunto de decisiones de asignación compatibles tanto con las restricciones de operación del sistema de fabricación, como con las decisiones de planificación que ya han sido adoptadas.

3. Ciclo de Control del Planificador

El control de las actividades para la resolución del problema se realiza por medio de la fuente de conocimiento especializada GAN, con dos objetivos fundamentales: ejecuta el ciclo de control básico que es independiente del dominio y gestiona el conocimiento de alto nivel específico del dominio referido a la aplicabilidad de las fuentes de conocimiento. La coordinación

del esfuerzo del GAN se realiza a través de un proceso dirigido por eventos. Los eventos de control se envían para informar de cambios en el estado del plan de operaciones, introducidos internamente por la aplicación de fuentes de conocimiento, o generados externamente debido a actualizaciones del estado de la factoría reseñados por el módulo de monitorización (p.e. rotura de máquinas o retrasos en la finalización de operaciones). La coordinación de la actividad de planificación procede reactivamente en respuesta a los eventos de control enviados.

La **figura 2** muestra el ciclo de control básico del planificador, que puede verse como un bucle cerrado compuesto por varias etapas. Cuando el planificador es invocado, el ciclo de control se activa en caso de que exista algún evento en la lista de eventos pendientes. La selección de un evento implica la elección del punto donde se focalizará la actividad del planificador. Esto se materializa en la selección y ejecución de una fuente de conocimiento, que resolverá al menos parte del problema de planificación, pero que puede conducir a la creación de más eventos internos. El bucle finaliza cuando el conjunto de eventos, relevantes a la tarea del planificador, quede vacío. En los siguientes apartados se detallan los métodos componentes de este ciclo de control.

3.1. Gestión de eventos

El módulo de gestión de eventos trata de identificar el evento de control más prometedor, que proporcione la dirección más oportuna sobre la que orientar la actividad de resolución del problema. Dicho proceso se descompone funcionalmente en tres etapas:

- *Filtrado de eventos*: En ocasiones en las que el planificador ha sido invocado para una reacción limitada a consideraciones locales (p.e. un recurso particular durante un intervalo de

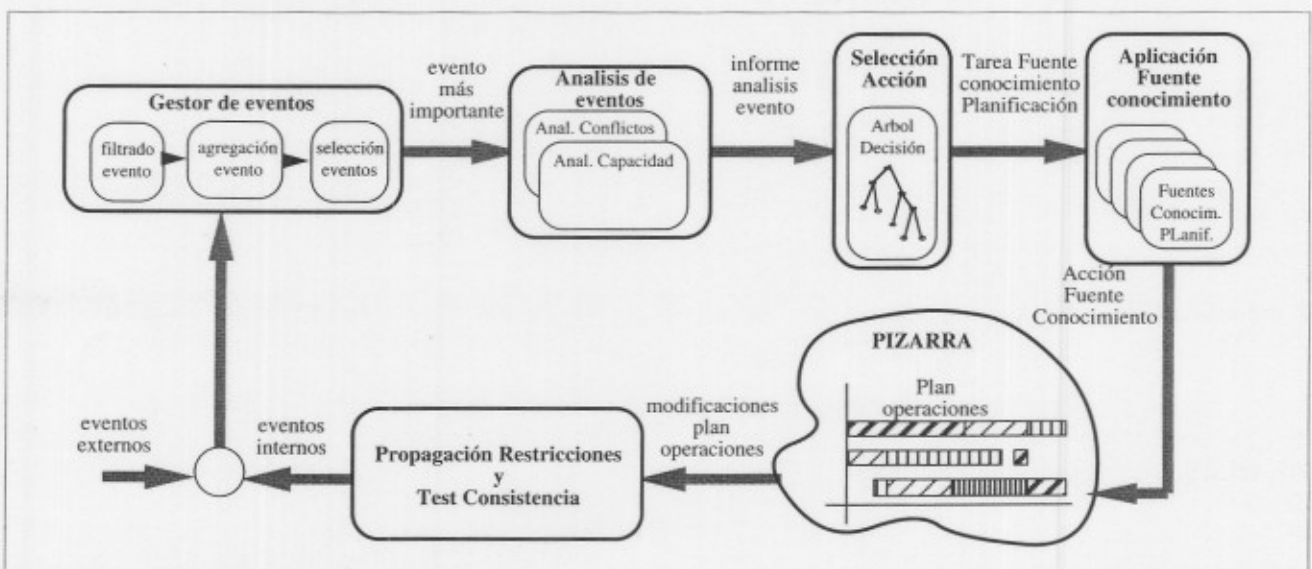


Fig. 2: Ciclo de control del planificador

tiempo limitado o una orden concreta), esta fase produce un efecto de filtrado, seleccionando únicamente los eventos directamente relacionados con dicho foco de interés.

- *Agregación de eventos*: Las inconsistencias surgidas en el plan de operaciones que han sido enviadas como eventos individuales, pueden estar relacionadas de alguna forma. Generalmente resulta más provechoso abordar estos problemas de forma agregada, para lo que se dispone de heurísticas de agregación cuyo objetivo es la detección de tales situaciones y la generación de los eventos agregados apropiados.

- *Selección de eventos*: Se aplican heurísticas de prioridad para seleccionar el evento más importante, sobre el que se focalizará el esfuerzo del planificador.

3.2. Análisis del evento

El evento de control porta información acerca del tipo de problema puntual que identifica, así como de las entidades (recursos y operaciones) involucradas. Sin embargo, con objeto de facilitar la elección de las fuentes de conocimiento más adecuadas, resulta útil disponer de otro tipo de información adicional, que proporcione información acerca de la magnitud e implicaciones del problema representado por el evento. Esta información se consigue aplicando selectivamente las fuentes de conocimiento de análisis que examinen, con más detalle, la porción de plan de operaciones que corresponde al entorno del punto de interés y al conflicto mismo. El contexto del evento es pues analizado y caracterizado y sus parámetros registrados en un *informe de análisis*. Se distinguen dos fuentes de conocimiento para análisis especializadas en diferentes objetivos:

El *analizador de capacidad*, CAN, proporciona información acerca de la carga de trabajo del sistema de fabricación, identificando las áreas en las que previsiblemente los recursos tendrán una alta contención. En funcionamiento en modo generativo, esto proporciona una base para estructurar dinámicamente la tarea de planificación. La estrategia utilizada es la de construir un bosquejo de plan de operaciones que satisfaga las limitaciones temporales de comienzo y finalización de las órdenes. En situaciones en las que se precisa la elección entre varios recursos, se utiliza una heurística de balanceo de línea ("line balancing heuristic"). La demanda de capacidad reflejada por este plan de operaciones se compara con la capacidad real de los recursos agregados (computando las relaciones demanda/capacidad) y de esta forma se identifican los posibles cuellos de botella.

El *analizador de conflictos*, CONAN, explota el conocimiento concerniente a la flexibilidad de las restricciones de tiempo y capacidad involucradas. Con este objeto calcula un *primer conjunto de parámetros* que se refieren a caracterizaciones locales del propio conflicto:

- *Duración del conflicto*: representa la extensión del conflicto y es

una medida de la validez de mantener como punto de enfoque la parte de plan de operaciones del recurso involucrado.

- *Tamaño del conflicto* representado por el número de operaciones en conflicto.

- *Contención del conflicto*: representa la contención relativa del recurso en el punto de enfoque, e indica las posibilidades de solución, restringiéndose a consideraciones locales del recurso.

Un *segundo conjunto de parámetros* se refieren a la caracterización del área de plan de operaciones que rodea al conflicto y expresan la flexibilidad, desde el punto de vista de la orden y las restricciones de capacidad de los recursos, en dicha área:

- *Espacio hacia delante*: trata de identificar espacios vacíos hacia delante en el plan de operaciones. Es un indicador de la modificabilidad de los tiempos de terminación de las órdenes del recurso que constituye el punto de enfoque.

- *Retraso previsto*: es una medida del retraso que llevan ya las órdenes. Indica la flexibilidad de las restricciones de tiempo impuestas por la propia orden.

- *Espacio detrás*: es una medida de la flexibilidad para desplazar hacia atrás los tiempos de comienzo de las operaciones.

- *Cuello de botella hacia adelante*: indica la existencia de un recurso cuello de botella para alguna de las órdenes en conflicto.

3.3. Fuentes de conocimiento de planificación

Cada fuente de conocimiento de planificación varía en relación con los tipos de problemas que es capaz de resolver, por medio de sus diferentes capacidades relativas a la solución de conflictos de restricciones particulares, y con los objetivos de optimización sobre los que puede hacer énfasis.

- El *planificador de órdenes*, PORD, permite generar o revisar decisiones de planificación relacionadas con alguna porción contigua del plan de operaciones correspondiente a una orden específica. Dado este enfoque, el PORD es adecuado para resolver conflictos centrados en las órdenes, fundamentalmente violaciones de precedencia entre operaciones correspondientes a una misma orden (que surgen, por ejemplo, al introducir operaciones de control de calidad imprevistas). Por la misma razón, este método resulta adecuado para satisfacer objetivos de producción centrados en las órdenes, tales como minimizar el trabajo en proceso, la tardanza media o ponderada, el número de órdenes tardías, o el coste de almacén, etc. El PORD emplea técnicas de búsqueda dirigida por restricciones desarrolladas originariamente en el sistema ISIS. Este método se caracteriza por el uso de una **búsqueda en rayo** para explorar distintas alternativas con respecto a la bondad con la que las decisiones

satisfacen las restricciones relevantes como pueden ser: el trabajo en proceso, la fecha debida (restricción de límite temporal), el coste de almacén por acabado temprano de productos, preferencias entre máquinas, etc.

- El *planificador de recursos*, PREC, proporciona un método para generar o revisar el plan de operaciones del recurso asignado a la tarea. Así, en contraste con el PORD, el PREC es adecuado para la solución de conflictos centrados en los recursos (p.e. violaciones de capacidad en un recurso). Este método está basado en la asunción de que la contención del recurso en cuestión es alta y, por tanto, no hay necesidad de introducir tiempo entre operaciones. Las decisiones de planificación son generadas mediante un proceso iterativo haciendo uso de una aproximación de tipo despacho. Estas heurísticas se aplican en dos fases: en la primera se asignan órdenes a cada máquina para lo que se utilizan las reglas de minimización de puesta en marcha y minimización de tardanza; en la segunda se desarrollan las secuencias de órdenes para cada máquina, para lo que se utilizan las reglas de fecha debida más temprana, mismo tiempo de puesta en marcha y tiempo de espera.

- El *desplazador de operaciones a la derecha*, DOP, implementa un método reactivo mucho menos sofisticado que resuelve los conflictos "empujando" hacia delante en el tiempo los tiempos de ejecución (previstos en el plan de operaciones) de las operaciones en conflicto, en una cantidad que sea suficiente para evitar el conflicto. Esos desplazamientos pueden introducir consecuentemente nuevos conflictos de tiempo y capacidad, que se resuelven con nuevos desplazamientos.

- El *conmutador de demandas*, CDEM, es un método reactivo especializado, aplicable en situaciones donde una operación ha resultado inesperadamente y significativamente retardada (p.e. como resultado de una acción de reproceso por no superar un control de calidad). Implementa un intercambio de la porción del plan de la orden afectada con la correspondiente porción de plan de otra orden del mismo tipo, con objeto de minimizar la tardanza combinada de ambas.

3.4. Selección y ejecución de la fuente de conocimiento

La especificación de una estrategia de resolución en la arquitectura aquí presentada, requiere la definición de las relaciones entre el conjunto de conflictos que pueden originarse durante el proceso de resolución del problema y el conjunto de métodos de planificación. Estas relaciones establecen qué acciones de planificación (fuentes de conocimiento) deberán elegirse, para cualquier estado del proceso de resolución.

Con el objeto de obtener y validar el conocimiento representado por las relaciones anteriores, se han realizado experiencias con un modelo de sistema de fabricación real. Durante dicha experimentación se han identificado un conjunto de

meta-reglas empíricas de control que muestran un "buen" comportamiento ante conflictos simulados en diferentes contextos. Dicho meta-conocimiento se ha integrado en el módulo de planificación mediante reglas precondition/acción. Para la implementación se ha hecho uso de la representación de reglas de producción disponibles en el lenguaje OPS5.

```
(p selecciona-POR-VP-baja-contencion :context :context
  (goal ^schema-name selection-goal
    ^status active] )
  (informe-analisis-conflicto
    ^schema-name] <ar>
    ^status] current
    ^duracion-conflicto >= 1
    ^contención] < 1
    ^tardanza-proyectada-corr > 0
    ^demandas-intercambiables () )
  —>
  (devuelve-fc-elegida $<ar> POR-VP
    "Gran sobreposición en conflicto, % 14T
    Baja contencion, % 14T
    Retraso proyectado positivo, % 14T
    Sin oportunidades para IND" ))
```

Fig. 3: Expresión de una metaregla del árbol de decisión en OPS5.

La figura 3 muestra la implementación de una metaregla típica, en este caso correspondiente a la selección del módulo POR-VP (planificador de órdenes con visibilidad parcial), para el caso de baja contención. Como puede observarse, la regla hace uso de los parámetros de caracterización del conflicto proporcionados por el informe de análisis de conflictos. El texto a imprimir proporciona información al sistema de interfase interactivo, acerca de las características del conflicto y la acción de planificación elegida.

El conocimiento heurístico de alto nivel a utilizar en este procedimiento decisorio se encuentra expresado mediante un árbol de decisión, donde los parámetros de caracterización de conflictos imponen la forma de navegación por sus ramas. La caracterización del evento de control, que ha sido proporcionada por el informe de análisis, es contrastada con los parámetros del árbol de decisión que representa la recopilación de las heurísticas de control de alto nivel. Estas heurísticas combinan información acerca del evento y su entorno con conocimiento relativo a la intensidad y fragilidad de las fuentes de conocimiento del planificador. El propósito final de la fase de selección de acciones es la generación de la tarea apropiada, que habrá de ser enviada a la fuente de conocimiento elegida. La aplicación de la acción oportunista conduce a cambios en el plan de operaciones, que pueden introducir inconsistencias con otros componentes de dicho plan.

3.5. Sistema de mantenimiento de consistencia del plan

El bucle de control se completa con un *sistema de mantenimiento de consistencia* del plan de operaciones, que utiliza las restricciones temporales y las limitaciones de capacidad especificadas en el modelo de la factoría para determinar las violaciones de restricciones implicadas por cada nueva aplicación de una base de conocimiento. El sistema de mantenimiento actualiza las descripciones sobre límites de tiempo asignados a operaciones y capacidad disponible de los recursos a lo largo del horizonte de tiempo. Esta propagación puede conducir a la detección de dos tipos de conflictos [LePape, Smith 87]: *conflictos de tiempo* que describen situaciones en que los límites de tiempo de dos operaciones que pertenecen a una misma orden son inconsistentes (p.e. cuando una operación se prevé que comience antes de que su anterior acabe); y *conflictos de capacidad* que describen situaciones en que las reservas de operaciones hechas en un recurso exceden su capacidad sobre cierto intervalo de tiempo.

4. Resultados experimentales

El objetivo que se plantea en el presente apartado es comprobar el funcionamiento del planificador de operaciones. Para ello, se parte de un plan de operaciones previamente elaborado, en el que se introduce un conflicto originado por una contingencia externa. El objetivo es valorar la calidad de las soluciones proporcionadas por el sistema de planificación, para lo que se proponen algunos parámetros que permiten su estimación.

El entorno de fabricación utilizado en los experimentos corresponde a una planta de fabricación de tarjetas instalada en la factoría IBM Card Line en Poughkeepsie, NY (EUA). El sistema consiste en una línea de ensamblaje y test de tarjetas, que contiene 10 sectores (recursos agregados). En la línea se realizan aproximadamente unas 18 operaciones a nivel sector por tarjeta. Aunque las tarjetas recorren dichos sectores esencialmente en secuencia, las operaciones de control de calidad pueden determinar operaciones adicionales de reparación y reprocesamiento. La planta recibe órdenes de trabajo con una fecha de entrega adjunta. Se asigna así mismo una fecha de entrada a cada orden, que especifica el instante más temprano en el que puede comenzar su procesamiento.

4.1. Estudio experimental del planificador de operaciones en modo reactivo

El objetivo de los experimentos es realizar un análisis comparativo de estrategias reactivas alternativas bajo diferentes circunstancias y comprobar la capacidad del planificador para seleccionar adecuadamente acciones en planificación reactiva. Con el propósito mencionado, se ha generado un plan de operaciones en el que se han considerado características tales como contención de los recursos, cumplimiento de

fechas debidas, cantidad de órdenes tardías, etc. La carga de producción consiste en 30 órdenes de trabajo, las operaciones para completar cada orden se han instanciado probabilísticamente, contabilizando un total de 510 operaciones. A partir de una situación de estabilidad identificada por el seguimiento fiel del plan de operaciones, se introducen dos tipos de contingencias externas: *roturas de máquinas y fallos en operaciones de proceso* (que generan operaciones adicionales de reparación). Estas contingencias provocan conflictos ante los que debe reaccionar el planificador.

4.2. Diseño de los experimentos

Los resultados que se presentan corresponden a una serie de doce experimentos. Cada experimento consiste en aplicar alternativamente al plan de operaciones inicial con el conflicto, las acciones de planificación reactiva, que denotaremos en las gráficas de resultados por los siguientes símbolos clave:

- PORD-VC: planificador de órdenes con visibilidad completa (el planificador se aplica a todas las operaciones),
- PORD-VP: planificador de órdenes con visibilidad parcial (que se aplica exclusivamente a las operaciones en conflicto),
- PREC: planificador de recursos,
- DOP: desplazador de operaciones a derecha,
- CDEM: conmutador de demandas,
- ALEA: elige una acción aleatoriamente.

Los resultados de los experimentos se analizaron en base a dos tipos de criterios para los que se adoptaron los parámetros de evaluación que se reseñan:

- *Criterios basados en la calidad del plan de operaciones*: COT (cambio en el número de órdenes tardías); CTT: cambio en tiempo de tardanza; y CTP (cambio en el tiempo de trabajo en proceso).

- *Criterios basados en la disrupción (alteración) del plan de operaciones* que informan de los cambios realizados en el plan de operaciones inicial y por tanto dan idea de la disrupción ocasionada en el plan y el coste computacional de la acción aplicada: NOC (número de órdenes cambiadas); NRC (número de reservas cambiadas); y TMCR (tiempo medio cambiado por reserva).

Permanece todavía el problema de determinar la mejor estrategia respecto al conjunto completo de medidas, con la dificultad de mezclar valores de diferentes magnitudes que pueden aportar diferentes pesos en la estimación global. Para poder llevar a cabo esta determinación se ha procedido en dos pasos:

- *Cálculo de una medida de prestaciones normalizada para cada criterio*. Consiste en la conversión de los valores absolutos recogidos en los experimentos a un valor normalizado.

La medida normalizada para cada criterio, ha sido calibrada con relación a valores medios de una serie de 26 experimentos, siguiendo la expresión clásica:

$$XN_{xi} = X_i^a - \text{Med}_x / \sqrt{\text{Var}_x}$$

donde: i es el número de experimento representado, $a \in \{\text{PORD-VP, PORD-VP, PREC, DOP, CDEM, ALEA}\}$ es la acción realizada,

X_i^a es el valor experimental en el experimento i al aplicar la acción a ,

Med_x es la media de todos los valores y Var_x es la varianza.

- *Cálculo de la medida normalizada para el conjunto de los criterios.* Consiste en un sumatorio ponderado de las medidas normalizadas respecto a cada uno de los criterios. Para la distribución de pesos a dar a cada uno de los criterios se dio una importancia del 75 % a los criterios relacionados con la calidad del plan de operaciones y del 25 % a los relacionados con su interrupción. La tabla siguiente muestra los distintos pesos que se han adoptado empíricamente (basados en la distinta importancia dada a los distintos criterios por un experto):

Criterio	COT	CTT	CTP	NOC	NRC	TMCR
Peso	0.1	0.6	0.05	0.1	0.05	0.1

La figura 4 recoge los resultados de conjunto normalizados para cada experimento y para cada acción de planificación.

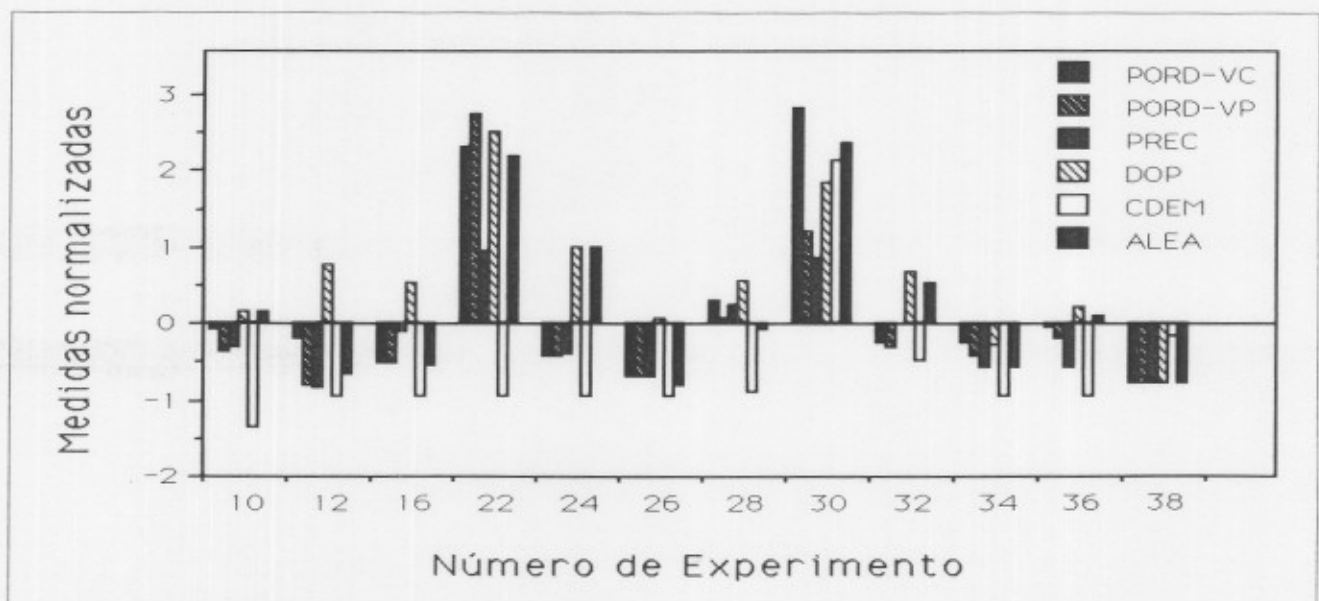


Figura 4: Resultados experimentales

Dicha figura pone de manifiesto cuál ha resultado ser la mejor política de acción para cada experimento reactivo. Como datos importantes cabría destacar que en el 60 % de los casos, la decisión proporcionada utilizando el metaconocimiento del sistema produjo los mejores resultados, y en el 88 % de los casos la decisión del sistema produjo unos resultados dentro del 7 % de los resultados obtenidos por la mejor política. A la vista de estos resultados se podría concluir la bondad del metaconocimiento de control utilizado por el planificador y de los parámetros utilizados para la caracterización de los conflictos del plan de operaciones. Sin embargo es de destacar también que existe un extenso margen, superando los porcentajes mencionados, para mejorar la aplicación de acciones, debido en gran medida a la extraordinaria complejidad que supone el desarrollo de una caracterización completa de los conflictos.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha abordado el desarrollo de una arquitectura para la planificación de operaciones de fabricación. La aproximación adoptada parte de los trabajos desarrollados en el sistema OPIS al que se le ha ido dotando de nuevas posibilidades. En primer lugar se ha modificado la arquitectura del planificador y se ha propuesto un nuevo ciclo de control. En segundo lugar se ha considerado insuficiente la información portada por los eventos, por lo que se ha dado énfasis a una etapa intermedia de análisis. En esta etapa se evalúan algunas características del evento y su entorno, para poder proceder a una elección más informada de la estrategia de planificación a realizar.

Para la caracterización de conflictos se proponen dos tipos de medidas: las primeras informan acerca de características locales (duración, tamaño y contención del conflicto) y las

segundas dan información sobre el área del plan de operaciones que rodea el conflicto (espacio hacia delante, retraso previsto, espacio atrás y cuello de botella hacia delante). Siguiendo esta caracterización, se propone una serie de reglas heurísticas que permiten elegir "una adecuada" fuente de conocimiento a aplicar para los eventos conflicto. Para realizar este proceso de deducción se propone una implementación mediante reglas de OPS5. Un objetivo del planificador que se propone, es el servir como herramienta de desarrollo de estrategias de planificación.

Finalmente se han mostrado los resultados de un análisis experimental para comprobar la adecuación de la aproximación. Los experimentos se centran en el análisis de la capacidad reactiva: el objetivo es comprobar la validez del metaconocimiento de control que es utilizado por el planificador, respecto a otro tipo de políticas que suponen aplicaciones más "ciegas" de las fuentes de conocimiento (hay que resaltar que la propia fase de experimentación ha servido de realimentación para la generación de las heurísticas de metaconocimiento).

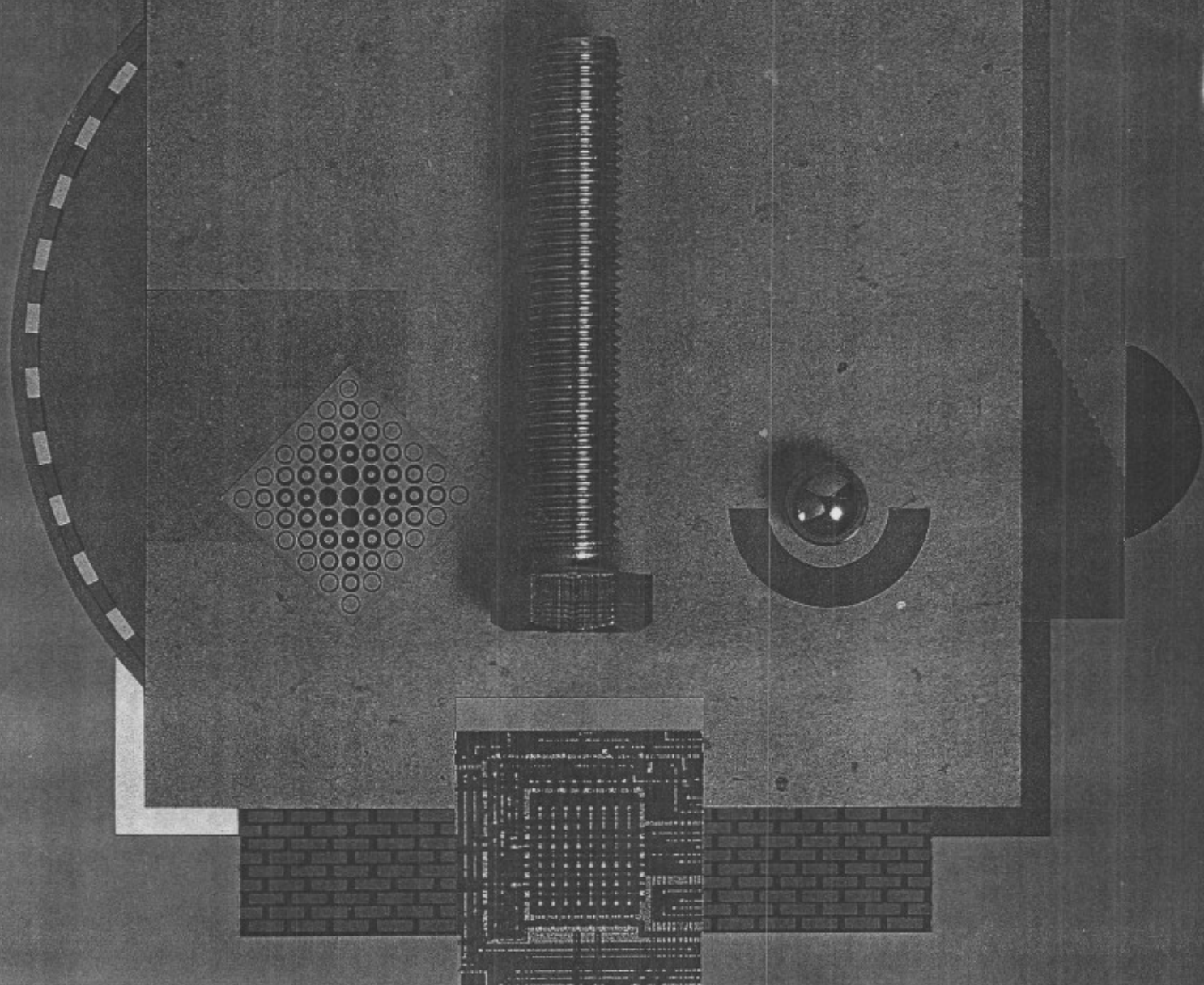
Agradecimientos

Este trabajo ha estado financiado en parte por el proyecto ROB91-0949 de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y por el proyecto IT-10/91 de la Diputación General de Aragón.

Bibliografía

- [Kusiak, 88] Kusiak A., edit. *Artificial Intelligence Implications for CIM*. IFS (Publ) Ltd/Springer-Verlag, Bedford, UK, 1988.
- [Dattero y col., 90] R.Dattero, J.Kanet, and E.White. *Enhancing manufacturing planning and control systems with artificial intelligence techniques*. Int. J. Computer Integrated Manufacturing, 3(2):84—95, 1990.
- [Descotte, Latombe, 85] Y.Descotte and J-C. Latombe. *Making compromises among antagonist constraints in a planner*. Artificial Intelligence, 27:183—217, 1990.
- [Elgelmore, Morgan, 88] R.S. Elgelmore and A.J. Morgan. *Blackboard Systems*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1988.
- [Fox, 83] M.S Fox. *Constraint Directed Search: A Case Study of Job-Shop Scheduling*. PhD thesis, Computer Science Dep., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA (USA), 1983.
- [Garey, Johnson, 79] M.R. Garey and D.S. Johnson. *Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman W.H. and Co, New York, 1979.
- [Graves, 81] S.C. Graves. *A review of production scheduling*. Operations Research, 29(4):646—675, 1981.
- [Hayes-Roth, 85] B.Hayes-Roth. *A blackboard architecture for control*. Artificial Intelligence, 26(2):251—321, 1985.
- [Jeter, 86] M.W. Jeter. *Mathematical Programming. An Introduction to Optimization*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1986.
- [LePape, Smith, 87] C.LePape and S.F. Smith. *Management of temporal constraints for factory scheduling*. In F.Bodart C.Rolland, M.Leonard, editor, Proc. IFIP TC8/WG 8.1 Working Conf. on Temporal Aspects in Information Systems (TAIS 87), pages 165-176. Elsevier Science Publishers, 1987.
- [Steffen, 86] Steffen M.S. *A survey of artificial intelligence-based scheduling systems*. In Procc. Fall Industrial Engineering Conference, Boston, MA, December 1986.
- [Nii, 86a] H.P. Nii. *Blackboard systems*. AI Magazine, 7(2):38—53, 1986.
- [Nii, 86b] H.P. Nii. *Blackboard systems*. AI Magazine, 7(3):82—106, 1986.
- [Noronha, Sarma, 91] S.J. Noronha and V.V.S. Sarma. *Knowledge-based approaches for scheduling problems: A survey*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 3(2):160—171, June 1991.
- [Ow, Smith, 88] P.S. Ow and S.F. Smith. *Annals of Operations Research: Approaches to Intelligent Decision Support*, chapter Viewing Scheduling as an Opportunistic Problem Solving Process. Batzer Scientific Publishing Co., 1988.
- [Panwlaker, Iskander, 77] S.S. Panwlaker and W.Iskander. *A survey of scheduling rules*. Operations Research, 25(1):45—61, 1977.
- [Smith, 87] S.F. Smith. *A constraint-based framework for reactive management of factory scheduling*. In Proceedings: International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, Charleston (South Carolina, U.S.A.), May 1987.
- [Smith y col., 90] S.F. Smith, P.S. Ow, N.Muscettola, J.Y Potvin, and D.C. Matthys. *Opis: An integrated framework for generating and revising factory schedules*. Journal of Operational Research Society, 41(6):539—552, 1990.

INTELEGENCIA ARTIFICIAL



98

Julio - Agosto 1992

Revista
de la Asociación
de Técnicos
de Informática

NOVA

NOVATICA

Revista
de la Asociación
de Técnicos
de Informática

Julio y agosto de 1992

Director

Julián Marcelo

Director Adjunto

Miguel Sarries Griñó

Ayudantes de dirección

Tomás Brunete, Luis Fuentes

Diseño gráfico

Juan Batallé

JUNTA EDITORIAL

Xavier Iribarne, Julián Marcelo
Jordi Rupmann, Miguel Sarries

CONSEJO EDITORIAL Y COORDINADORES DE SECCIONES

Arquitecturas

Antonio Pérez Ambite
FI-UPM: (91) 3367373
E-mail: aperez@fi.upm.es

Capítulo de estudiantes de ACM

Juan M. Dodero Beardo; José R. Yeste-Serrano
FI-UPM: (91) 7157412

Espiral (Formación)

María González: (93) 3718462
Miguel Doménech: (93) 4248979

Informática Gráfica

EUROGRAPHICS Sec. española
Roger Cabezas, Xavier Pueyo: (93) 4016667
E-mail: capueyo@fi.abrupc51.bitnet

Ingeniería del Conocimiento

Federico Barber, Vicente Boti
FI-UPV: (96) 3615051

Libertades e Informática

Luis Otero: (91) 4029391

Organización y Sistemas

Raúl M. Abril: (93) 3232877

Sistemas Abiertos

Alfonso Calvo Oria: (91) 4029391
Josep M^e Sellés: (93) 4012263

NOVATICA es el órgano oficial de Formación permanente de la ASOCIACION DE TECNICOS DE INFORMATICA (ATI)

Redacción (ATI Valencia)

Tirso de Molina 3,14^a, 46009 Valencia
Tel.(96) 3480418; Fax (96) 3480683

Administración (ATI Cataluña)

Gran Vía 657 en^a, 08010 Barcelona
Tel.(93) 2655601; Fax (93) 2655779

Administración (ATI Madrid)

Padilla 66,3^a, 28006 Madrid
Tel.(91) 4029391; Fax (91) 4029861

Publicidad: DIFINSA

Pza Lesseps 31, en^a, 08023 Barcelona
Tel.(93) 4154141; Fax (93) 4155556

Imprenta: NOVOPRINT, S.A.

C. de la Técnica s/n.
Ctra. Nacional II, km. 593
Sant Andreu de la Barca (Barcelona)

Depósito Legal: B 15.154-1975

ISBN: 0211-2124; CODEN NOVAEC

NOVATICA no asume forzosamente la opinión de los firmantes de artículos. La reproducción de éstos se autoriza (si se cita su procedencia) y se envía un ejemplar de lo publicado a la Redacción; salvo que las fuentes originales del artículo sólo hayan permitido la reproducción en Novática y mantengan sus derechos de propiedad.

Sumario

EDITORIAL: Nuevos estatutos de ATI para otros 25 años	3
Cartas al Director. Fe de erratas	
MONOGRAFIA: Inteligencia Artificial	
Presentación: Sistemas basados en el conocimiento	5
<i>José Cuena, Presidente de AEPIA</i>	
Series temporales y Redes neuronales	11
<i>J.A.Sigüenza; J.L.Piqueras; V. López; J.R.Dorronsoro</i>	
Planificador de operaciones de fabricación basado en una arquitectura de pizarra	19
<i>P.R.Muro Medrano; S.F.Smiuh; J.L.Villarroel</i>	
Un entorno para la extracción de información semántica del diccionario VOX	29
<i>A.Ageno; I.Castellón; M.A.Martí; F.Ribas; G.Rigau; H.Rodriguez; M.Taulé; F.Verdejo</i>	
Modelo Sigma genérico de razonamiento para la monitorización y el mantenimiento en Tiempo Real	45
<i>M.Núñez, F.Alcaraz; A.Hernández; J.L.Blázquez</i>	
Aprendizaje circunscriptivo de Reglas de primer orden mediante sesgos sintácticos y semánticos	56
<i>G.Núñez; U.Cortés</i>	
Verificación de Sistemas Expertos basados en reglas con arquitectura multinivel: problemas y soluciones	67
<i>P.Meseguer</i>	
Métodos básicos para la gestión de información temporal	76
<i>F.Barber; E.Onaindía; M.Alonso</i>	
SOCIEDAD DE LA INFORMACION	
Asociaciones	
IFIP, el comité técnico TC3	92
<i>Antonio Vaquero</i>	