

CONTROL BASADO EN AGENTES MEJORADOS CON TECNOLOGÍA AUTO-ID

Adolfo Cenjor Montalvo (1), Andrés García Higuera (2)

(1) Departamento de Ingeniería de Defensa. TecnoVe Security. Avda.
Alcazar, 8 – 13640 Herencia (Ciudad Real).

E-mail: acenjor@tecnove-security.com

(2) Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática.
Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, España.

E-mail: Andres.Garcia@uclm.es

Resumen: Los nuevos métodos de control altamente distribuido para sistemas complejos han generado una serie de nuevas filosofías basadas en la negociación entre sistemas que suponen un punto de encuentro entre el ingeniero de proceso y el informático. De entre estas filosofías de control, las más implementadas son las basadas en agentes, entre las que destaca el modelo PROSA. Este artículo presenta el planteamiento de cómo, gracias a sistemas de control altamente distribuidos basados en agentes y a la tecnología Auto-ID, el control negociado pasa de ser un mero planteamiento teórico a una situación tangible. Copyright © 2005 CEA-IFAC.

Palabras Clave: Fabricación, Control Distribuido, Agentes, Auto-ID.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas productivos se ven sometidos a un aumento de la complejidad, debido a los grandes requerimientos de flexibilidad y capacidad. Esta complejidad se hace aun más sensible en los grandes sistemas, lo cual hace que la gestión del control del sistema no resulte tarea trivial.

Tradicionalmente, el control se ha realizado de forma centralizada atendiendo a las necesidades anodinas que surgían. Sin embargo, para los requerimientos actuales, el control centralizado resulta ineficiente a causa de la gran complejidad que acarrea su diseño en el caso de grandes sistemas. Para afrontar la problemática de la creciente complejidad, se considera esencial la utilización de sistemas de control distribuidos. Estos sistemas distribuidos consisten, en esencia, en la división del sistema completo en partes o módulos autogestionados que interaccionan entre sí (estas interacciones se rigen, en

función de los elementos en los que se base el control, i.e., agentes, holones, etc).

Como complemento a estos sistemas puede utilizarse la tecnología Auto-ID. Se trata de una tecnología de última generación que permite identificar cualquier objeto en cualquier parte del mundo de forma instantánea (McFarlane, 2002). Su razón de ser fue la creación de un estándar de identificación capaz de otorgar la unicidad a cada producto, ya que el código de barras no puede aportar esta propiedad. Otra importante vertiente de esta tecnología la constituye su sistema de gestión de la información en tiempo real; información entendible por todos los componentes que conforman el sistema, posibilitando interacciones de distinto rango entre ellos. Así pues, Auto-ID resulta un elemento fundamental, en tanto que solventa los problemas de integración de los sistemas de control altamente distribuidos.

Este artículo se estructura en ocho secciones o apartados. El siguiente apartado introduce al lector en

el estado actual del control en sistemas productivos. La sección 3 presenta una metodología específica una vez definido el concepto de agente; mientras que la 4 presenta la tecnología Auto-ID. La sección 5 explica la integración de los agentes y la tecnología Auto-ID en el modelo utilizado. La siguiente sección muestra un ejemplo de aplicación. Y en la última, se presentan las conclusiones extraídas del análisis de este planteamiento.

2. ESTADO ACTUAL DEL CONTROL EN LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN

Los sistemas tradicionales de fabricación, a pesar de haber incrementado la fiabilidad y de haber conseguido una notable reducción de los costes de la producción, continúan teniendo el problema de la escasa flexibilidad que aportan al conjunto del sistema productivo, hecho que genera problemas de robustez cuando se dan perturbaciones en el entorno (García, 2003).

2.1 Tendencias de fabricación

Las tendencias actuales del mercado se basan en la producción a medida, siguiendo los requerimientos del cliente, y respetando los estrechos intervalos de tiempo para las entregas, lo que supone la necesidad de reaccionar rápidamente ante una demanda cada vez más variable. En los entornos complejos de producción se plantea la necesidad de que el sistema de gestión permita la actuación automática sobre los datos generados, lo cual se traduce en un alto grado de flexibilidad (Valckenaers and Van Brussel, 1994). Sin embargo, los sistemas tradicionales de control jerárquico avanzan adaptándose para casos de poca variedad y secuencias simples de producción, por lo que no resuelven la problemática actual.

La estrategia alternativa que se presenta es la utilización de sistemas de control altamente distribuidos basados en métodos negociados (Frayret et al., 2004). En lugar de diseñar sistemas de control monolíticos que deben ser programados para asegurar un comportamiento determinado, se divide el sistema en distintos componentes (Caridi and Cavalieri, 2004), como son los holones. La palabra holón, término acuñado por el filósofo alemán Arthur Koestler, deriva de los vocablos griegos *holos*, que significa completo o total, y del sufijo *on*, que significa partícula o parte, por lo que son entes que configuran distintas partes de un todo o sistema, y son completos ya que constituyen unidades autónomas de ejecución de estrategias dotadas de sus propias capacidades de control. Las propiedades principales de los holones son, pues, la autonomía, como ya se ha indicado, y la cooperación, ya que un conjunto de holones pueden desarrollar planes y llevarlos a cabo, conjuntamente (Suda, 1989). El conjunto de holones que cooperan para la obtención de un fin común, conforman una *holarquía*, que es una organización de carácter jerárquico. Otra forma

de dividir el sistema consiste en hacerlo por agentes. Los agentes también son subsistemas responsables de controlar y gestionar partes del dominio del sistema total. Las propiedades más importantes de los agentes son, análogamente, la autonomía y la cooperación. La diferencia sustancial que existe con los holones, es que las estructuras de agentes se pueden organizar tanto jerárquica como heterárquicamente (Bussman, 2003), lo cual, les confiere la capacidad de incluir entre sus interacciones con otros agentes, procesos de negociación, ya que no existen restricciones de niveles. Por lo tanto, pueden negociar entre ellos y, en función de sus características de diseño, reaccionar de forma idónea para satisfacer las necesidades del sistema. Con el objeto de desarrollar este concepto, han aparecido nuevas filosofías de programación orientadas a objetos o agentes. Y para paliar los tradicionales problemas de integración de los sistemas altamente distribuidos se están desarrollando nuevos sistemas de comunicación altamente expeditivos, como AUTO-ID.

2.2 Estado del arte

Muchas de las metodologías para el diseño de sistemas de software han sido propuestas en el pasado, al igual que algunos de los diseños de sistemas de control. Entre las metodologías propuestas se incluyen la programación dirigida a objetos, control de la fabricación y metodologías orientadas a agentes.

Un cuidadoso análisis de la amplia variedad de estas metodologías muestra que las existentes son inapropiadas o no lo suficientemente eficientes para el diseño de sistemas de control de la producción basado en agentes. Las metodologías orientadas a objetos, fundamentalmente, fallan a la hora de soportar el diseño de este tipo de sistemas debido a que los conceptos básicos de estas metodologías son poco apropiados para modelar el proceso de toma de decisiones para un sistema de control (Bussman, 2003). Dentro de estas metodologías se pueden enumerar algunas de ellas como el diseño orientado a objetos (ODD) propuesto por Booch et al. (1991) y la aportación del análisis de Coad y Yourdon. También Rumbaugh et al. en ese mismo año presentaron la técnica de modelado de objetos (OMT) y un año después, Robinson propuso el diseño jerárquico orientado a objetos (HOOD). Otro modelo es el diseño basado en responsabilidades, Wirfs-Brock et al. (1990).

Sin embargo, los objetos son demasiado pasivos, no encierran la activación de un comportamiento, sino que se limitan a intercambiar datos y comandos, mientras que los agentes, de manera proactiva, siguen sus propios objetivos. Los agentes, sin embargo, constituyen una especie de objetos mejorados capaces de establecer relaciones con otros agentes, relaciones que no estaban previstas a la hora del diseño de dicho agente. Además, son capaces de adaptar al entorno todas las correspondencias de

carácter relacional. Por lo tanto, las metodologías orientadas a objetos están dando paso a una filosofía más elaborada como es la de los sistemas basados en agentes, sobre todo en estos temas referentes al control de la producción. Las metodologías de control de la producción aportan modelos elaborados para capturar el estado del proceso productivo en cada instante de tiempo y el control de decisiones asociado. La toma de decisiones, como quiera que sea, se modela de forma centralizada o jerárquica, la cual se contrapone con los enfoques autónomos y cooperativos necesarios para los sistemas productivos futuros. Dentro de las metodologías de diseño de control de la producción, se encuentran varias como son el diseño de sistemas productivos basados en SADT/IDEF propuesto por Ross y Schoman (1977)/Bravoco y Yadav (1985), el modelado con sistemas discretos de Fanti et al. (1996) o el modelo planteado por Murata (1989) basado en redes de Petri. Por lo tanto, un diseñador puede confiar en las metodologías de producción existentes para diseñar el sistema productivo, pero, para el control del sistema, el diseñador necesita de una metodología que dictamine cómo efectuar el diseño de todos los aspectos referentes a la gran cantidad de sistemas basados en agentes.

Las limitaciones de las metodologías de control productivo y de las orientadas a objetos han inspirado muchos estudios sobre desarrollos de agentes y estructuras, más específicamente, metodologías de diseño de sistemas orientados a agentes, metodologías que parten de enfoques orientados a objetos. Entre ellas se cuentan las extensiones de metodologías orientadas al conocimiento, como la MAS-CommonKADS desarrollada por Iglesias et al. (1998) y que se incluye en el libro de Singh et al. (1998) sobre agentes inteligentes; o la diseñada por Glaser (1997), CoMoMAS, que aparece en el libro de Zhang y Lukose (1998). Cabe también mencionar las extensiones de metodologías orientadas a objetos, como la de Burmeister (1996), la metodología PROSA de Van Brussel et al. (1998) o el proyecto PABADIS propuesto por Lüder et al. (2004). Otras metodologías orientadas a agentes son las basadas en roles como MASB de Moulin B. y Brassard M. (1996), incluida en la publicación de Zhang y Lukose; la metodología GAIA planteada por Wooldridge et al. (2000) o la propuesta por DeLoach et al. (2001) llamada MaSE. Otro enfoque, dentro de las metodologías orientadas a agentes, son las orientadas al sistema como la MASSIVE, propuesta por Lind et al. (2001), la metodología Tropos propuesta por Bresciani et al. en el mismo año o la MESSAGE planteada por Caire et al. (2002), la cual se puede encontrar en "Agent-Oriented Software Engineering II" de Wooldridge et al., (2002). Además de orientadas al sistema, existen metodologías orientadas a la interacción o al comportamiento como la metodología Cassiopeia, de Collinot et al. (1996).

3. AGENTES

Los agentes son entes del sistema informático capaces de acometer acciones autónomas de forma flexible para lograr los objetivos de diseño. La flexibilidad implica que estos agentes están dotados de un carácter reactivo, ya que pueden percibir el estado del entorno y responder de forma instantánea a los cambios; también implica un carácter proactivo, ya que su comportamiento está dirigido a lograr los objetivos mediante la toma de iniciativas; y a la vez les confiere habilidades sociales, porque los agentes interactúan entre sí planteando procesos de negociación para alcanzar los objetivos (Wooldridge and Jennings, 1995).

3.1 Metodología Prosa

Dentro de todas las metodologías orientadas agentes, existen distintas vertientes, en función de la finalidad con la que ha sido concebida cada una de ellas. PROSA es una metodología enfocada a sistemas de fabricación y toda su estructura está cavilada para ese efecto. Por ende, es esta metodología la que mejor se ajusta al planteamiento que este artículo traza. Los conceptos detrás de PROSA no son necesariamente únicos y existen otras metodologías similares. Una de éstas, interesante por la utilización de conceptos paralelos, es PABADIS, Lüder et al. (2004).

Van Brussel et al. (1998) proponen una metodología para la identificación de agentes basada en el sistema PROSA (Product, Resource, Order Staff Architecture). El sistema PROSA consiste en identificar productos, recursos y órdenes de fabricación como agentes, que han de negociar entre sí a fin de obtener una solución satisfactoria para todos, englobándolos en distintos niveles de agentes o en el mismo, según proceda en cada caso. Estos agentes pueden ser agregados o especializados, en el sentido de la orientación a objetos, con el fin de crear una taxonomía de agentes para una aplicación específica de la fabricación.

El primer paso de esta metodología consiste en la identificación de agentes y de sus responsabilidades en dicha aplicación específica. Después, vienen otros pasos como son la determinación del diseño del agente, su implementación y la operatividad del sistema. El proceso de identificación es conducido por el sistema PROSA y se inicia con un método orientado a objetos para el sistema productivo. Por tanto, el diseñador selecciona los objetos del modelo que deben llegar a ser agentes, a pesar de que esta metodología no aporta ningún criterio para identificar los objetos de forma idónea. Finalmente, los agentes son clasificados en el sistema como agentes agregados o especializados. Van Brussel et al. (1998) proponen aplicar este enfoque a la jerarquía de asignación de recursos y a la jerarquía de planificación y ejecución en los sistemas productivos. PABADIS, como antes se ha indicado, básicamente, tiene el mismo fundamento pero se distinguen tres

tipos de agentes: agentes residentes (RA), agentes producto (PA) y agentes de gestión de planta (PMA) en lugar de agregados y especializados.

Existen otras metodologías similares pero dentro de todas ellas, en este trabajo se ha preferido utilizar PROSA ya que para el análisis de sistemas de fabricación flexible es la metodología que más fielmente se adapta al sistema y al entorno en su concepción. Esto es debido a que los elementos fundamentales de la estructura del sistema se pueden representar por agentes específicos, lo que confiere una alta flexibilidad al sistema. Dicha flexibilidad resulta imprescindible a causa de las múltiples perturbaciones sufridas y la gran variedad de productos que se pueden fabricar.

3.2 Concepto de Agente BDI

El estudio sobre las ideas de holones y agentes se han ido perfilando continuamente desde el momento de su concepción hasta la actualidad más reciente; concretándose la diferencia entre ambas ideas y determinándose que los agentes son más flexibles y adaptables a toda clase de sistemas. Esta característica los hace idóneos para enfrentarse a las exigencias futuras en detrimento de los holones (McFarlane, 1995). Hoy en día, las estructuras *heterárquicas* representan el reto de mayor relevancia en el diseño de sistemas multiagentes. En dichas estructuras, las organizaciones jerárquicas deben ser evitadas o, al menos, restringidas en gran medida, y conceptos como cooperación y competición entre agentes deben reemplazar a la supervisión y a las órdenes de rango (Valckenaers et al., 1998).

Para llevar a la práctica las estructuras mencionadas se puede recurrir a distintos métodos. Entre ellos cabe destacar el que dota a cada agente de una información asociada que define las creencias, los deseos y las intenciones del agente (BDI≡Beliefs-Desires-Intentions); lo que le aporta la capacidad de negociar e interactuar con otros agentes (Wooldridge and Jennings, 1995).

```
function accion(p:P):Accion
begin
  B:=brf(B, p)
  D:=options(B, I)
  I:=filter(B, D, I)
  return execute(I)
end function accion
```

Figura 1. Pseudocódigo estructura agente.

Los componentes básicos de los agentes BDI son las estructuras de datos, que representan las creencias, deseos e intenciones del agente; y las funciones, que representan el proceso de deliberación, determinando qué intención es la que se va a llevar a cabo y con qué medios. Las intenciones juegan un papel central en el modelo BDI ya que dotan de estabilidad al proceso de decisión y actúan determinando el razonamiento práctico del agente. Las arquitecturas

basadas en agentes BDI, son, por tanto, arquitecturas de razonamiento práctico, cuyo proceso de decisión es similar al procedimiento racional que usa cualquier persona en la toma de decisiones de su día a día. Por esta razón, resulta tan interesante la aplicación de este modelo.

Las funciones que determinan la deliberación del agente se pueden separar en cuatro:

- Función de revisión de creencias (*brf*), con la que establecer el nuevo conjunto de creencias actualizado con respecto al entorno. Esta función se representa en la ecuación (1), donde C denota las creencias y P las percepciones.

$$brf: \{C\}_0 \times \{P\} = \{C\}_1 \quad (1)$$

- Función de generación de opciones (*options*), representada en la ecuación (2), con la que se precisan las distintas posibilidades de actuación, lo que deriva en los deseos (D), a raíz de las creencias (C) y las intenciones (I).

$$options: \{C\} \times \{I\} = \{D\} \quad (2)$$

- Función filtro (*filter*), representada en la ecuación (3), que representa el proceso de deliberación y que determina las intenciones del agente derivadas de las creencias, los deseos y las intenciones, de forma que se actualizan las intenciones a realizar.

$$filter: \{C\} \times \{D\} \times \{I\}_0 = \{I\}_1 \quad (3)$$

- Función de ejecución de intención (*execute*), representada por (4), que precisa la ejecución de las intenciones.

$$execute: \{I\} \quad (4)$$

El pseudocódigo que determina esta estructura es el que aparece en la Figura 1.

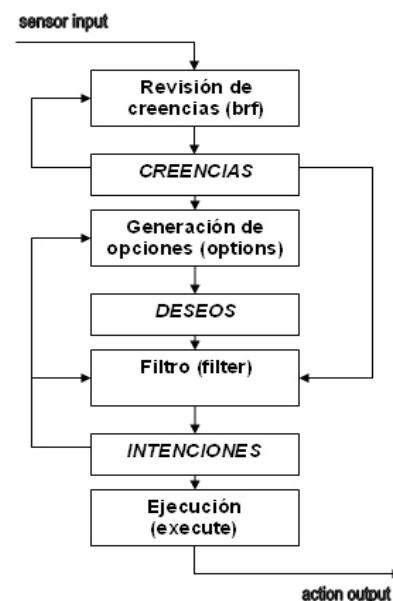


Figura 2. Diagrama de flujo de información

Las intenciones se van renovando de manera continua. Una vez definidas se van actualizando atendiendo al estado del entorno, que se analiza

mediante las percepciones sensoriales. A la par que las intenciones, se definen los deseos en cada instante, con éstos, las creencias, y, luego, se hace una revisión de las propias intenciones como se aprecia en el pseudocódigo de la Figura 1.

Este concepto puede ser ilustrado mediante un diagrama de flujo de información tal como se muestra en la Figura 2.

3.3 Definición de agentes y aplicación al caso de una célula de fabricación.

Con la definición de este tipo de agentes se quiere crear un sistema de negociación que gestione los sistemas productivos. La idea es aplicar esta filosofía de control a una célula de fabricación, como puede ser la existente en la ETSII-CR. Este concepto constituye una particularización a procesos específicos de fabricación, como el mecanizado, de las técnicas que fueron utilizadas en (Thorne et al., 2003) para el ensamblado. La distribución de dicha célula es la que se muestra en la Figura 3.

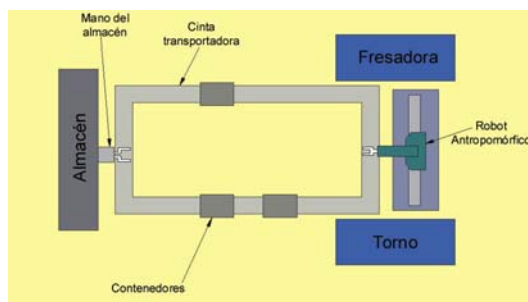


Figura 3. Esquema célula de fabricación flexible

Distinguimos los siguientes elementos básicos, como se puede apreciar en la Figura 4:

- Torno
- Fresa
- Cinta transportadora
- Almacén
- Robot antropomórfico

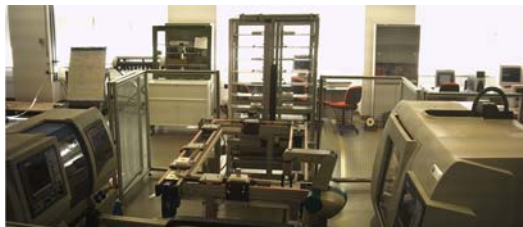


Figura 4. Célula de fabricación de la ETSII-CR.

Cada uno de ellos va a formar uno o varios agentes, agentes recurso. La estructuración básica de las interacciones entre los recursos, productos y órdenes se muestra en la Figura 5; donde se aprecia la forma en que estos elementos se comunican entre ellos para realizar la negociación. Generalmente, con un sistema implantado de forma coherente, la negociación es trivial en la mayoría de los casos. Sin embargo, en ocasiones, se pueden plantear

situaciones muy complejas causadas por elementos inesperados que perturban el sistema. Es en estos casos en los que resulta más evidente la utilidad y la bondad de esta filosofía.



Figura 5. Interacciones entre agentes.

La definición de los agentes se hace con una previa clasificación y la posterior definición tanto de creencias como de deseos e intenciones. En el caso particular de la célula propuesta se puede establecer la siguiente estructura:

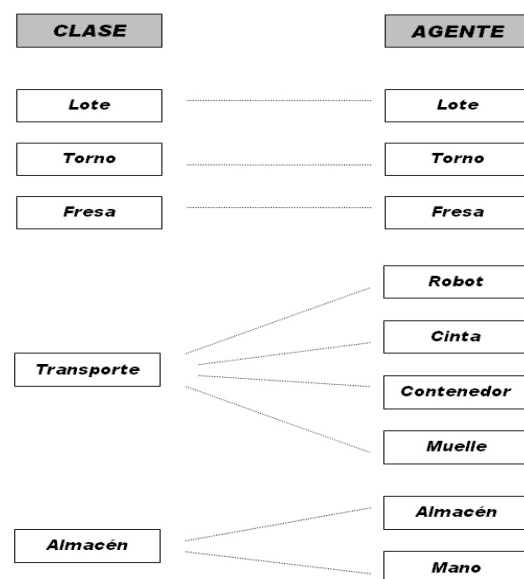


Figura 6. Clases y agentes asociados

CLASE LOTE: AGENTE LOTE

Creencias: Numeración unidad y lote, Características geométricas y químicas, Origen, Destino, Contenedor asignado, Prioridad de fabricación, Programa NC, Posibilidades de fabricación (si hay más de una ruta posible).

Deseos: Fabricación dentro de intervalo de tiempo asignado, Prioridad de fabricación en una determinada máquina-herramienta, Seguir una determinada ruta.

Intenciones: Ser fabricado con rapidez, adecuadamente y de la forma más barata y efectiva.

CLASE TORNO: AGENTE TORNO

Creencias: Numeración de pieza y lote a fabricar, Programa NC asociado, Estado de ocupación, Posibilidad de hacer su trabajo en fresa si hay saturación, Estado de trabajo (ceros y armado), Restricciones de uso.

Deseos: Fabricación rápida, atendiendo a las restricciones, Ocupación continua sin saturaciones.

Intenciones: Fabricar el producto más urgente con rapidez y minimizando tiempos muertos.

Se han planteado únicamente las estructuras de los agentes Lote y Torno ya que el resto de agentes tiene un fundamento análogo. Podemos ilustrar de forma esquemática las clases existentes y los agentes asociados en que se dividiría el conjunto de la célula, en la Figura 6.

3.4 Flujo de información

A continuación, a modo ilustrativo, se muestran algunas de las interacciones existentes entre los distintos agentes a la hora de intercambiar información para efectuar las negociaciones. En la Figura 7 está representado el funcionamiento del agente Lote. Toda la información requerida por este agente procede del agente Orden de fabricación, que es el que desde el inicio tiene toda la información necesaria para llevar a cabo las operaciones precisas. Tal como se ha planteado el sistema el agente "Lote" entra en juego en toda negociación, ya que es el elemento más crítico, y el resto de agentes están supeditados a él.



Figura 7. Flujo agente Lote

En la Figura 8, se refleja el modelo de intercambio del agente Torno (análogo al agente Fresa). El agente Torno debe intercambiar información y negociar con el agente Lote, atendiendo al estado del sistema (percepción interna) y a las percepciones externas, para llevar a cabo sus intenciones.

El resto de agentes tienen un comportamiento paralelo al indicado; conectan con el agente Lote, cuya información deriva directamente de la Orden de fabricación. En caso necesario habrán de tenerse en cuenta además las percepciones, tanto internas como externas, para apercibirse en cualquier instante de las perturbaciones que sucedan y plantear la negociación en función del estado del sistema.

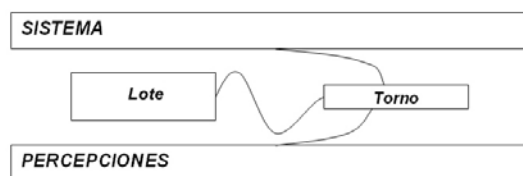


Figura 8. Flujo agente Torno.

4. TECNOLOGIA AUTO-ID

Se trata de una tecnología de identificación de objetos que proporciona a cada producto una identidad única. Supone una metodología de gestión de datos totalmente nueva que permite disponer de una gran cantidad de información a tiempo real. Esta tecnología se basa en las etiquetas de radiofrecuencia (Figura 9.) que van adheridas al producto, de las que

se puede leer y sobre las que se puede escribir, y la gestión de datos, utilizando redes locales e Internet.



Figura 9. Etiquetas de radiofrecuencia

El motivo de la utilización de la tecnología Auto-ID reside en la necesidad de almacenar más información que el código de barras y de manera más versátil, ya que el código de barras resulta insuficiente para almacenar toda la información requerida. La gran diferencia con el código de barras es que la etiqueta de RF está soportada por un sistema de gestión de la información muy superior (Engels and Sarma, 2002). Un sistema con su propio lenguaje para describir objetos y una organización de servidores conectados capaces de ofrecer la información requerida de forma instantánea (Figura 10).

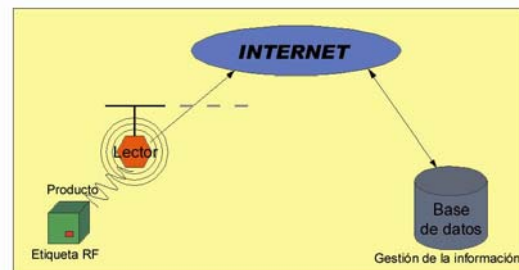


Figura 10. Esquema tecnología Auto-ID.

La tecnología Auto-ID tiene tres elementos fundamentales. Uno de ellos es el EPC (Electronic Product Code), código de 96 bits que identifica al producto de forma única, incluyendo campos para el fabricante, el producto y el número de serie. Este código permite la localización de la información relativa al producto en una base de datos conectada a la red del sistema (Brock, 2002).

PML (Physical Markup Language), es el lenguaje utilizado para la descripción de objetos físicos. Se basa en el lenguaje XML e incluye esquemas que nos permiten definir todas las características del producto, por lo que con los archivos PML tenemos gran cantidad de información relativa a los productos en una base de datos conectada al sistema (Floerkemeier and Koh, 2002).

Y el ONS (Object Naming Service), es el sistema que conecta el EPC con su archivo asociado PML de forma automática. Al introducir un determinado EPC, este servicio nos remite al archivo PML, mediante un servidor especializado. La exigencia primordial al ONS es la eficiencia y escalabilidad para poder soportar la ingente cuantía de transacciones de datos que se pueden producir al instaurar la tecnología Auto-ID (Thorne et al., 2003).

El proceso se inicia con la lectura de la etiqueta, que al ser excitada por el lector (Figura 11.) mediante la aplicación de un campo magnético, emite el EPC.

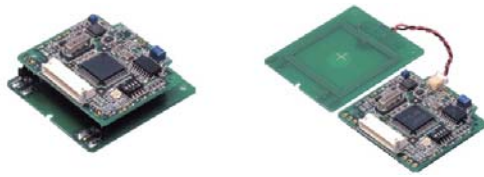


Figura 11. Sistema lectura/escritura de identificación por radiofrecuencia

El lector obtiene el código y lo comunica a un servidor local Savant (Figura 12). Una vez recibida la información, el servidor busca en su base de datos el archivo PML asociado a ese código de producto. En caso de encontrarlo, el proceso termina. Si no es así, el servidor local Savant remite el EPC al servidor local ONS, el cual emitirá una petición de localización de dicho PML. Una vez recibida la petición, la respuesta se da en forma de dirección IP, que es enviada al servidor Savant. Una vez obtenida la dirección IP, el servidor local Savant conecta con el servidor PML, que le facilita el archivo PML correspondiente. Con este paso, una vez encontrado el PML, el proceso finalizaría.

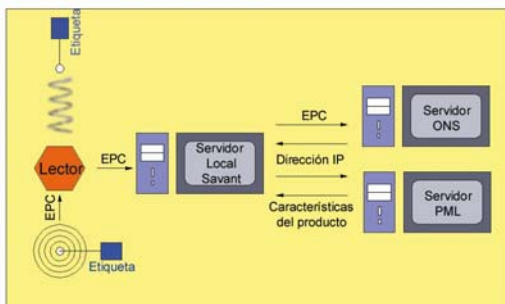


Figura 12. Estructura de la tecnología Auto-ID.

5. INTEGRACION DE LA TECNOLOGIA AUTO-ID EN EL MODELO PROSA

La estructura de agentes es un elemento consustancial al modelo PROSA ya que parte como punto fundamental de su concepción, como ya se ha explicado. Los agentes son los elementos que hacen posible que, dentro de esta metodología, a parte de darse un intercambio de información y comandos entre las distintas entidades que lo conforman, se dé el proceso de negociación. Esa es la diferencia básica con las estructuras de holones. Por tanto, la capacidad de negociación entre los agentes, hace que éstos sean indispensables dentro de esta metodología de programación.

Para una mejor comprensión del concepto de agente en el modelo PROSA, se puede plantear una analogía bastante ilustrativa. Se puede considerar la estructura de agentes como un mercado de competencia perfecta donde los agentes Lote, que representan los distintos productos a fabricar, son entes que cuentan

con un determinado capital que irán desembolsando a los distintos recursos para conseguir sus servicios. El capital será mayor o menor en función de las creencias de cada agente, es decir, cuanto mayor sea la prioridad e importancia de los agentes lote, mayor será el capital. Así pues, dentro del sistema se dará una oferta y una demanda, por lo tanto, considerando la oferta de recursos fija, cuanto mayor sea la demanda, mayor será el precio que exijan los recursos para proporcionar sus servicios. Cuando en el normal funcionamiento del sistema entra un agente Orden de fabricación, con sus agentes Lote asociados de mayor prioridad a los existentes, ello supone un aumento de la demanda, lo que hace que suba el precio a pagar por los recursos. Al contar con un mayor *poder adquisitivo* puede acceder a estos servicios en exclusividad. Si poco después entra en el sistema otro agente Orden de fabricación con mayor capital, será éste el que goce de los servicios de los agentes recursos, relegando al anterior a la espera. Si la demanda baja, bajarán los precios, por lo que los agentes Lote, que antes estaban en espera, podrán acceder a pagar la cuantía exigida. Este planteamiento es paralelo al funcionamiento real.

La limitación práctica de este planteamiento la constituye el hecho de que para que el “mercado” funcione correctamente se ha de tener una garantía de que los diferentes participantes disponen de la información requerida para competir en igualdad de condiciones. Es aquí donde entra en juego la tecnología Auto-ID. De esta forma, Auto-ID asume las funciones de identificación de objetos y en la gestión de la información.

En diferentes puntos de la célula de fabricación se sitúan lectores de radiofrecuencia para identificar los distintos productos, a través de su EPC, y para determinar sus agentes asociados. Cada paso que diese un producto determinado se reflejaría en el archivo PML asociado al EPC detectado por el lector. Además, cuando el producto llegue a los recursos para que se le efectúe alguna operación, gracias a la identificación, se conocerán las creencias de su agente asociado y de forma instantánea, el recurso sabrá la operación que debe realizar. Cuando se produzca alguna perturbación, todos los pasos dados estarán reflejados en el archivo PML, quedando guardado para cuando vuelva a entrar al sistema productivo.

6. APLICACIÓN A LA CÉLULA DE FABRICACIÓN DE LA ETSII-CR.

Como se ha explicado en el apartado 3, la célula de fabricación del laboratorio de mecánica de la ETSII-CR consta de diferentes elementos. La interacción y secuenciación de los procesos que tienen lugar en ellos requieren de un estudio detallado.

6.1 Planificación

Para comprobar la bondad de este planteamiento, cabe establecer una aplicación en el *scheduling* o planificación de tiempos de la producción. El fundamento de esta planificación radica en la óptima utilización de los recursos del sistema, mediante el estudio de tiempos del proceso, con la finalidad de que la utilización sea máxima y ello repercuta en un descenso de los costes de producción y en un incremento de la capacidad.

Existen una gran cantidad de referencias relacionadas con la optimización de la planificación, por lo que no se va a hacer aquí un repaso exhaustivo del tema. Cabe sin embargo nombrar a algún clásico como son los trabajos de Perkins y Kumar (1989). Estos trabajos están dedicados a campos tan específicos como la fabricación de circuitos impresos; en los que los lotes están perfectamente definidos a priori. En ese caso no se requiere de una flexibilidad equiparable a la necesaria en otros sistemas de fabricación más genéricos. En un entorno como este se pueden realizar complicados estudios de estabilidad como los desarrollados por los autores citados.

La planificación de tiempos de producción, no obstante, es aplicable a cualquier tipo de proceso, aunque resulta altamente recomendable para sistemas productivos por lotes, ya que para un sistema en cadena o por trabajos carece de sentido (He and Babayan, 2002). Su beneficio más claro se observa en sistemas sometidos a cierta aleatoriedad en la que los cambios son constantes e inesperados. Es en estos sistemas en los que una buena planificación puede tener repercusiones muy favorables.

Tradicionalmente, los tiempos de producción se han asignado basándose en técnicas relativamente sencillas. Las condiciones eran escasamente variables, por lo que con la ayuda de un plan maestro producción en el que se hiciese una desagregación a corto plazo, se obtenían buenos resultados. En la actualidad, el mercado está sometido a grandes irregularidad, y la dura competencia reinante en cualquier tipo de mercado, y en especial, en lo concerniente a la tecnología. Esto hace que la flexibilidad suponga el factor más importante de cualquier sistema, con el fin último de satisfacer la mayor parte de la demanda posible en el momento y con las condiciones deseadas.

En este apartado, se pretende trazar un estadio más allá del *scheduling* tradicional. Se va a plantear la posibilidad de que la planificación se realice de forma instantánea, en tiempo real, lo que podría denominarse como un *scheduling dinámico*. Esta posibilidad da lugar a unos planteamientos de gran complejidad que, por otra parte, puede ser necesaria en ciertos casos, pudiéndose destacar el trabajo de Dusonchet et al. (2003). Recientemente se están explorando otras alternativas más asequibles como

los métodos de asignación negociados. Estos pueden no dar lugar a soluciones óptimas pero si suficientes; a la vez que se reduce considerablemente la complejidad de los planteamientos teóricos. Los métodos de asignación basados en la negociación entre agentes se benefician especialmente de la integración de sistemas de adquisición y gestión de la información como los basados en Auto-ID (McFarlane, 2002).

6.2 Aplicación de la planificación al modelo

El escenario es un sistema de fabricación en el que, de forma constante, entran numerosos pedidos de subproductos mecanizados. Estos pedidos se introducen en el sistema y, de manera automática, se generan las órdenes de fabricación y sus agentes O.F. asociados. Estos agentes O.F., generarán, a su vez, agentes Lote (i.e., los productos a fabricar) que tendrán que negociar con los agentes de recursos y transporte para determinar, de acuerdo a sus creencias y sus deseos, cual es la orden de fabricación que se realiza en cada momento. Este enfoque da una idea del *scheduling dinámico*, de una planificación que no va a estar sujeta a lo programado en jornadas anteriores por el director de procesos, ni a ningún plan maestro de producción.

Así pues, los aspectos fundamentales que van a influir en los cambios de producción de un lote a otro van a ser el nivel de utilización del equipo y la prioridad de cada uno de los agentes Lote. Por lo tanto, en el momento en que entre un nuevo agente O.F. en el sistema, que genere un determinado número de agentes Lote asociados cuya prioridad sea mayor que la del agente en proceso o cuya utilización del equipamiento y recursos sea compatible, pasará automáticamente al proceso de fabricación. Este funcionamiento confiere una clara flexibilidad al sistema.

6.3 Proceso de selección y cambio

De forma ilustrativa, se muestra como sería este proceso de selección en tres instantes diferenciados (Figura 13 a 15).

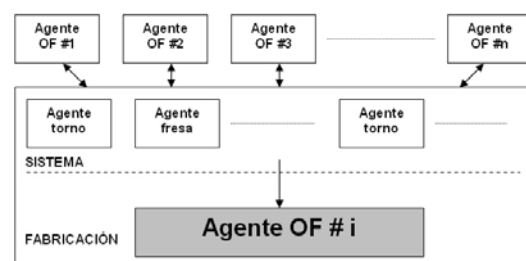


Figura 13. Sistema en el instante inicial.

i) $t = t_0$

El sistema de fabricación está funcionando de acuerdo con el agente O.F. #i, ya que es el agente cuya orden de fabricación asociada requiere mayor

prioridad de atención y el sistema de agentes ha decidido que acceda a la fase de fabricación supeditándola sobre el resto agentes O.F. No obstante, continúan entrando orden de fabricación que en cualquier instante pueden hacer cambiar la situación actual.

ii) $t = t_1$

En este instante, se produce la entrada de un nuevo agente, el agente O.F. #j, y comienza a realizar un proceso de negociación con los agentes del sistema de producción. Este agente O.F. tiene unas creencias que suponen una prioridad superior al agente en proceso.

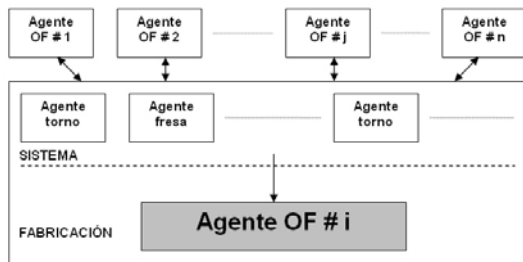


Figura 14: Sistema en el instante de entrada de OF #j.

iii) $t = t_2$

En este momento, en el que tras la negociación, el agente O.F. #j tiene una mayor ponderación que el resto de los agentes O.F. involucrados en el sistema, el agente O.F. #i sale del sistema productivo tras finalizar la pieza del lote en curso en la que se haya, se actualizan sus creencias, en cuanto a piezas que restan, etc, e introduce el nuevo agente sobre el que va a trabajar. Si posteriormente, no hay ningún agente O.F. cuya prioridad sea superior a la del agente O.F. #i, al termino del agente O.F. #j, será aquél el que entre a finalizar su fabricación.

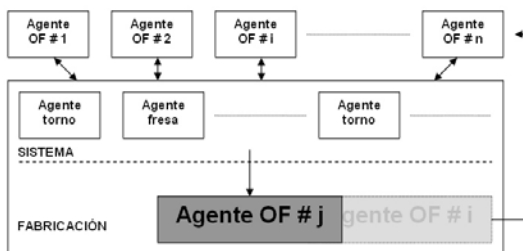


Figura 15. Sistema en la decisión de cambio.

En este caso, la complejidad de la realización de los lotes es mediana-alta, lo que implica que, normalmente, serán necesarias más de una operación en las máquinas-herramienta y, por tanto, resultará complicado el sincronizar más de una orden de fabricación de forma simultánea. Si se diese el caso en el que la secuencia de operaciones de un nuevo agente permitiese una mayor utilización de los recursos sin perturbar al agente en proceso, funcionarían ambas de manera simultánea, independientemente del nivel de prioridad de éste, ya

que, a parte de la prioridad, la utilización efectiva del sistema resulta de máxima relevancia.

Con todo este planteamiento, se presenta la posibilidad de la planificación dinámica como algo tangible. El sistema no está sujeto a terminar un lote para poder iniciar el siguiente, ni a un sistema FIFO, en el que la disposición del procedimiento de entrada de lotes es tan rígida. Este modelo aporta una gran flexibilidad basada en sistemas de negociación entre distintos agentes que van a optar por la opción más satisfactoria para satisfacer los requerimientos, además de un mayor rendimiento derivado de la mayor utilización.

A continuación, se muestra una visión comparativa de la planificación de un proceso de gestión tradicional y otro de gestión dinámica en la Tabla 1.

Tabla 1: Visión comparativa entre el sistema tradicional y el dinámico.

Visión comparativa	Scheduling tradicional	Scheduling dinámico
PRODUCCIÓN	FIFO	Por prioridad
FLEXIBILIDAD	Escasa	Alta
CAPACIDAD O.F.	Fija	Variable
	Burocracia	Agentes

La fase de implementación del sistema no se encuentra completamente cerrada. Hasta ahora se han elaborado tanto el programa que gobierna los lectores, con el que se consigue obtener toda la información incluida en las tarjetas (Figs. 16 y 17), como el que gestiona la información obtenida de las tarjetas RF.

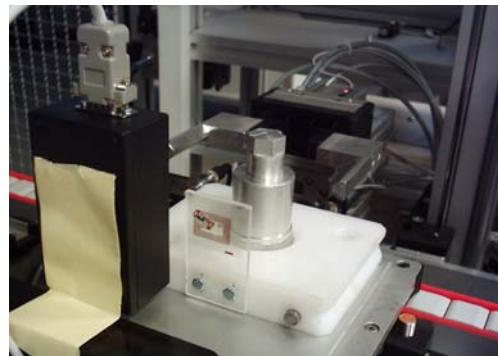


Figura 16. Entrada de un contenedor con RF Tag al muelle de carga donde se ubica un lector.

Sin embargo aún persisten algunos problemas de integración de estos programas con el software anterior de gestión de la célula, de naturaleza marcadamente jerárquica (Minitex V).

6.4 Ejemplo de aplicación

En este ejemplo, se tratará de mostrar las diferencias sustanciales entre la planificación de tiempos de producción de los sistemas tradicionales de gestión y los basados en estructuras de agentes, el dinámico. Nótese, que los datos de tiempos que aparecen en este ejemplo han sido tomados directamente sobre la

célula durante un ejercicio de funcionamiento normal.

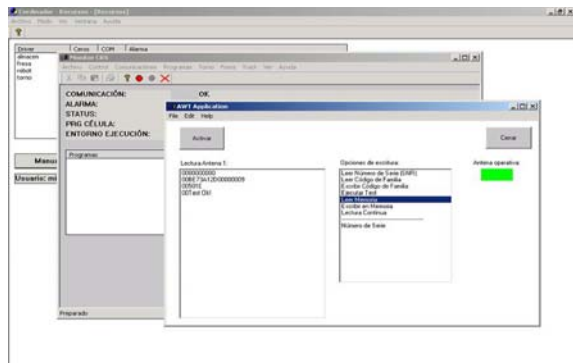


Figura 17. Interfaz del software de la célula y los lectores.

Se parte de un supuesto con tres pedidos de tres lotes de piezas distintas, con rutas de fabricación distintas, con prioridades distintas y con periodos de fabricación de distinta duración que se superponen temporalmente. Lo primero es determinar las características de cada uno de estos pedidos (Tabla 2).

Tabla 2. Pedidos de entrada

	Pedido 1	Pedido 2	Pedido 3
PIEZA	Pistón ref. 3127	Válvula ref. 1098	Arbol levas ref. 61
UNIDADES	42	25	36
FECHA/HORA	06/04/04	06/04/04	06/04/04
ENTRADA	17:00	18:00	19:15
FECHA/HORA	08/04/04	09/04/04	07/04/04
ENTREGA	08:30	19:30	04:30

El sistema trabaja las 24 horas del día en tres turnos. Estos pedidos se codifican y, de forma instantánea, se genera la orden de fabricación y su agente O.F. asociado donde constan todas las especificaciones necesarias para llevar a cabo la serie.

Las Tablas 3 a 5 muestran los tiempos para los diferentes pedidos. Nótese que la operaciones nombradas con P se refieren a fases de mecanizado y las referidas con A a las de transporte, cada una de ellas de distinta índole.

Tabla 3. Tiempos de proceso para el Pedido 1.

FASE MECANIZADO	P1.1	P2.1	P3.1	P4.1	-	-
TIEMPO MECANIZ.	3:15	3:36	2:17	0:15	-	-
FASE TRANSPORTE	A1.1	A2.1	A3.1	A4.1	A5.1	A6.1
TIEMPO TRANSPORTE	0:22	0:17	0:21	0:21	0:17	0:22

Tabla 4. Tiempos de proceso para el Pedido 2.

FASE MECANIZADO	P2.1	-	-	-
TIEMPO MECANIZ.	4:25	-	-	-
FASE TRANSPORTE	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4
TIEMPO TRANSPORTE	0:22	0:17	0:18	0:22

Tabla 5. Tiempos de proceso para el Pedido 3.

FASE MECANIZADO	P1.3	P2.3	P3.3	-	-
TIEMPO MECANIZADO	5:37	3:48	1:19	-	-
FASE TRANSPORTE	A1.3	A2.3	A3.3	A4.3	A5.3
TIEMPO TRANSPORTE	0:22	0:17	0:18	0:17	0:22

La secuencia de entrada de los pedidos es la siguiente (todo referido al día 06/04/04):

- El pedido 1 entra a las 17:00, con una prioridad media.
- El pedido 2 entra a las 18:00, con una prioridad baja.
- El pedido 3 entra a las 19:15, con prioridad alta.

Es claro que se va a dar un solapamiento de intenciones en el tiempo, por lo que tendremos que usar la planificación de tiempos para organizarlo. Las prioridades se establecen, lógicamente, en función del tiempo disponible para la realización del lote en cuestión.

Ahora, resulta apropiado determinar los diagramas Gantt para cada una de las piezas de los pedidos. Las Figuras 18 a 20 muestran estos resultados.

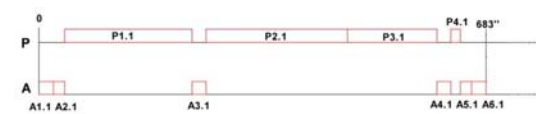


Figura 18. Diagrama Gantt de piezas Pedido 1.

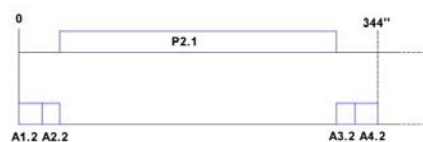


Figura 19. Diagrama Gantt de piezas Pedido 2.

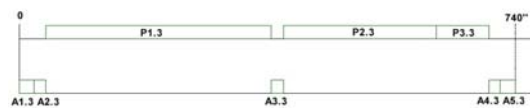


Figura 20. Diagrama Gantt de piezas Pedido 3.

El proceso de cada agente Lote gestionado por el agente O.F. #2, asociado al pedido 2, puede simultanearse con cada uno de los procesos de los otros dos pedidos, como se muestra a continuación.

Este diagrama (Figura 21) muestra la sincronización posible entre los agentes Lote asociados a los agentes O.F. #1 y O.F. #2. Se consigue gracias a alternar la utilización de la máquina-herramienta y los medios de transporte.



Figura 21. Diagrama Gantt Pedido 1 y Pedido 2.

Igual sucede con los agentes Lote asociados a los agentes O.F. #3 y O.F. #2 (Figura 22).



Figura 22. Diagrama Gantt Pedido 3 y Pedido 2.

Lo que queda por mostrar es el momento exacto del cambio de O.F. #1 a O.F. #3 (Figura 23). Recurriendo a las tablas de tiempos, el cambio se da cuando se han realizado 13 unidades del pedido 1 y 7 unidades del pedido 2. Se hace el cambio, se fabrican todas las unidades del pedido 3 y las restantes del pedido 2 y, posteriormente, se termina el pedido 1.

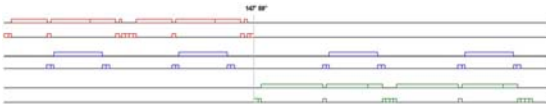


Figura 23. Diagrama Gantt de los tres pedidos.

La planificación general de producción de estos tres pedidos, según este planteamiento, se puede representar en el diagrama de la Figura 24, mediante barras, donde el triángulo verde situado entre las 04h y las 05h, supone la fecha límite de fabricación para el tercero de los pedidos, que aparece con rayado cruzado (Pedido 1:Rayado oblicuo; Pedido 2: Punteado):

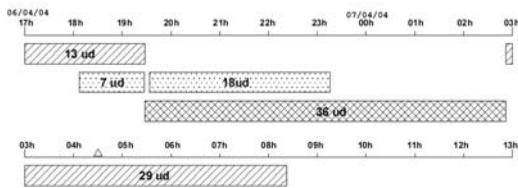


Figura 24. Diagrama de tiempos.

En contraposición al método expuesto en este artículo, se hace la comparativa de cómo resultaría el mismo análisis para un sistema tradicional, mostrando su planificación de tiempos (Figura 25).

Como se observa, para la planificación tradicional, el tercer pedido no se realiza a tiempo, ya que cuando ha de estar terminado, listo para la entrega, el pedido se encuentra en pleno proceso de fabricación. Por lo tanto, en este caso, con un proceso productivo tradicional no se hubiesen podido satisfacer las necesidades de nuestro cliente. Para el caso del sistema productivo con gestión basada en estructuras de agentes, el sistema habría respondido con la suficiente flexibilidad para adecuarse a las necesidades de forma instantánea; hubiese realizado

el pedido de mayor prioridad, Pedido 3, y luego los de prioridad inferior.

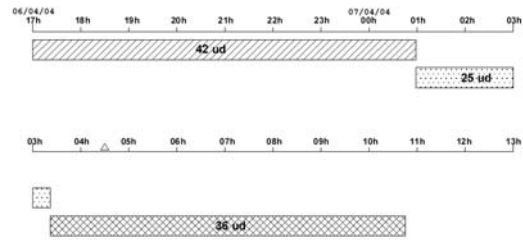


Figura 25. Diagrama de tiempos con proceso tradicional.

A parte del aumento de flexibilidad, el hecho de la mayor utilización posible del equipo como uno de los objetivos primordiales, hace que en algunos casos, como es este, se dé un incremento de capacidad y, por tanto, haya un ahorro de tiempo. Así pues, con el sistema tradicional, los tres pedidos llevarían una carga temporal de **17h 45' 26''** mientras que para el planteamiento sometido a estudio sería un total de **15h 22' 06''**, i.e., supondría un ahorro de tiempo del **13.45%**, lo cual se traduce en ahorro económico y mayor capacidad de atender la demanda.

Para el ejemplo se puede apreciar que el método de planificación utilizado en la comparación es especialmente básico. Sin embargo la comparación permite comprobar que el método negociado propuesto supone, en cualquier caso, un avance similar a lo que podría conseguirse con métodos de planificación más elaborados. Pero a favor de la negociación se puede añadir que el aumento de flexibilidad que supone el método propuesto implica además que, para el caso en que se produzcan perturbaciones en tiempo de producción (averías, escasez de material o herramientas...), los resultados que se obtendrían serían también favorables.

La bondad del planteamiento también se verá reflejada en el caso del funcionamiento ante perturbaciones. Tómese el ejemplo de que la perturbación consista en el fallo de una máquina-herramienta como el torno: el sistema podrá hacer frente a esta contingencia si los agentes "lote", dentro de sus creencias tienen incluidas las distintas opciones de fabricación; lo que en este caso se traduce en que se haya contemplado la posibilidad de que la fresadora asuma ciertas operaciones de torneado. Si el torno de la célula no está operativo, su agente asociado tampoco lo estará. Cuando el agente "lote" necesite un servicio por parte del agente "torno", una vez iniciado el proceso de negociación, tomará la determinación de negociar con el agente "fresa". De esta forma se podrán desbloquear pedidos prioritarios, aumentando el nivel de servicio y la productividad.

7. CONCLUSIONES

A modo de conclusión, se exponen las ventajas que conlleva la implantación de un sistema de gestión basado en estructuras de agentes, siguiendo el modelo PROSA y la tecnología de identificación Auto-ID, para una célula flexible de fabricación.

La ventaja más palpable radica en que el sistema productivo adquiere una alta flexibilidad. Como se ha mostrado, el control basado en agentes permite al sistema leer la situación que se da en cada momento, tanto interna como externamente, permitiendo una actuación inmediata. Esta filosofía proporciona al sistema la capacidad de adaptarse a cambios repentinos o perturbaciones ambientales de la forma más conveniente – lo que algunos autores denominan “agilidad”. Esto se consigue gracias al proceso de negociación inherente a la metodología utilizada.

Otra ventaja sensible es la mayor utilización del equipo. Esta ventaja se deriva de la estructuración de los agentes establecida por el diseñador, en cuanto a las creencias, deseos e intenciones de dichos agentes involucrados. Es decir, la utilización óptima debe ser una condición de diseño ya que uno de los fines últimos de este planteamiento es maximizar el tiempo de trabajo del equipo.

De estas dos ventajas se derivan dos hechos de gran importancia. En primer lugar, se da un aumento de la capacidad: la flexibilidad aumenta, lo que constituye la virtud de adaptación del sistema y, por tanto, de poder estructurar la producción de acuerdo a las necesidades de cada momento. El poder simultanear varios lotes, siempre que lo permitan sus secuencias de operaciones, es, obviamente, otra forma de aumentar la capacidad. En segundo lugar, por estas dos mismas razones, tácitamente, se produce una clara mejora en tiempo frente a los sistemas de fabricación tradicionales.

REFERENCIAS

- Booch, G. (1991). *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. Benjamin/Cummings: Redwood City, CA, USA.
- Bravoco, R.R. and S.B. Yadav (1985). *A Methodology to Model the Functional Structure of an Organization*. Computers In Industry, Vol. 6, pp 345-361.
- Bresciani, P., A. Perini., P.Giorgini, F. Giunchiglia, and J. Mylopoulos (2001). *A Knowledge Level Software Engineering Methodology for Agent-Oriented Programming*. Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents. Montreal, Canadá.
- Brock D.L. (2002). *The virtual electronic Product Code*. Auto-ID Centre White Papers.MIT.
- Burmeister B. (1996). *Models and Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design*. En Fisher K. (Ed.), *Working Notes of the KI'96 Workshop on Agent-Oriented Programming and Distributed Systems*. DFKI: Saarbrücken, Alemania.
- Bussman S. (2003). *An Agent-Oriented Design Methodology for Production Control*. PhD University of Southampton.
- Caridi M. and S. Cavalieri (2004). *Multi-Agent Systems in Production Planning and Control: An Overview*. Production Planning and Control, Vol. 15, No. 2, pp. 106-118.
- Coad P., and E. Yourdon (1991). *Object-Oriented Analysis*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Collinot A., A. Drogoul and P. Benhamou (1996). *Agent-Oriented Design of a Soccer Robot Team*. Proceedings of the Second International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS '96). AAAI Press: Menlo Park, CA, USA.
- DeLoach S.A., M.F. Wood and C.H. Sparkman (2001). *Multiagent Systems Engineering*. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 231-358.
- Dusonchet F. and M.O. Hongler (2003). *Continuous-Time Restless Bandit and Dynamic Scheduling for Make-to-Stock Production*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 19, No. 6, December 2003.
- Engels, D. W. and S. E. Sarma (2002). *The Reader Collision Problem*, to appear in the Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hammamet, Tunisia.
- Fanti M.P., B. Maione, G. Piscitelli and B. Turchiano (1996). *Systems Approach to Design Generic Software for Real-time Control of Flexible Manufacturing Systems*. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Vol. 26, No. 2, pp. 190-202.
- Floerkemeier C. and R. Koh (2002). *Technical Memo: Physical Mark-Up Language Update*. Auto-ID Centre White Papers. MIT.
- Frayret J.M., S. D'Amours, B. Montreuil (2004). *Coordination and Control in Distributed and Agent-Based Manufacturing Systems*. Production, Planning & Control, Taylor & Francis, Vol. 15, No. 1, pp. 42-54.
- Garcia A. (2003). *Célula de Empaquetado con Arquitectura de Control basada en Holones y*

- Tecnología de Identificación por Radiofrecuencia*. XXIV Jornadas de Automática FAE, León, España.
- He D. and A. Babayan (2002). *Scheduling Manufacturing Systems for Delay Product Differentiation in Agile Manufacturing*. International Journal of Production Research, Vol.40, No. 11, pp. 2461-2481
- Lind J (2001). *Iterative Software Engineering for Multiagent Systems – The MASSIVE Method*. Springer-Verlag: Berlín, Alemania.
- Lüder A., J. Peschke, T. Sauter, S. Deter and Diep D. (2004). *Distributed Intelligence for Plant Automation Based on Multi-Agent Systems: the PABADIS Approach*. Production Planning & Control, Taylor & Francis, Vol. 15, No. 2, pp. 201-212.
- McFarlane D. (1995). *Holonic Manufacturing Systems in Continuous Processing: Concepts and Control Requirements*. Advanced Summer Institute '95 on Life Cycle Approaches to Production Systems, pp. 273-282. Lisboa, Portugal.
- McFarlane D. (2002). *Auto-ID based Control: An Overview*. Auto-ID Centre White Papers. MIT.
- Murata T. (1989). *Petri Nets: Properties, Analysis and Applications*. Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 4, pp. 541 – 580.
- Perkins J.R. and P.R. Kumar (1989). *Stable, Distributed, Real-Time Scheduling of Flexible Manufacturing / Assembly / Dissassembly Systems*. IEEE Transactions on Automatic Control. 34, No. 2, pp. 139-148.
- Robinson P.J. (1992). *Hierarchical Object-Oriented Design*. Prentice-Hall:Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Ross D.T. and K.E. Schoman (1977). *Structured Analysis for Requirements Definition*. IEEE Transaction on Software Engineering, Vol. SE-3, No.1.
- Rumbaugh J., M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy and W.Lorensen (1991). *Object-Oriented Modelling and Design*. Prentice-Hall:Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Singh M.P., A. Rao and M. Wooldridge (1998). *Intelligent Agents IV (ATAL '97)*. LNAI 1365. Springer-Verlag: Berlín, Alemania.
- Suda, H. (1989). *Future Factory Systems Formulated in Japan*. Techno Japan, Vol. 22, pp. 15-25.
- Thorne A., D. McFarlane, S. Hodges, S. Smith, M. Harrison, J. Brusey and A. Garcia (2003). *The Auto-ID Automation Laboratory: Building Tomorrow's Systems Today*. Auto-ID Centre White Papers. MIT,
- Valckenaers, P. and H. Van Brussel (1994). *Theoretical Foundations for Preserving Flexibility in Manufacturing*. Advanced Summer Institute '94 in Computer Integrated Manufacturing & Industrial Automation (CIMIA). Universidad de Patras, Grecia.
- Valckenaers P., H. Van Brussel, J. Wyns, L. Bongaerts and P. Peeters (1998). *Designing Holonic Manufacturing Systems*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.14, No. 5-6, pp. 455-464.
- Van Brussel H., J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts and P. Peeter (1998). *Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA*. Computer in Industry, 37, pp. 255-274.
- Wirfs-Brock R., B. Wilkerson and L. Weiner (1990). *Designing Object-Oriented Software*. Prentice-Hall:Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Wooldridge M. and N. R. Jennings (1995). *Intelligent Agents: Theory and Practice*. Knowledge Engineering Review, Vol. 10, No. 2, pp. 115-152.
- Wooldridge M., G. Weiss, y P. Ciancarini (2002). *Agent-Oriented Software Engineering II*. LNCS 2222. Springer-Verlag: Berlín, Alemania.
- Wooldridge M., N.R. Jennings and D. Kinny, (2000). *The GAIA Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 3, No. 3, pp 285-312.
- Zhang C., and D. Lukose (1998). *Multi-Agent Systems – Methodologies and Applications*. LNAI 1087. Springer-Verlag: Berlín, Alemania.