

SISTEMA HETERÁRQUICO DE CONTROL BASADO EN AGENTES PARA SISTEMAS DE FABRICACIÓN: LA NUEVA METODOLOGÍA PROHA

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

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

E-mail: Andres.Garcia@uclm.es

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

E-mail: acenjor@tecnove-security.com

Resumen: Los nuevos métodos de control altamente distribuido para sistemas complejos han generado una serie de nuevas filosofías entre las que destacan las que utilizan tipos distintos de agentes para diferentes niveles conceptuales y de gestión (MAS). Pero estas arquitecturas basadas en la negociación entre sistemas independientes tienen el inconveniente de una excesiva dependencia en la calidad de la información. Si algún agente dispone de más información, la negociación estará viciada. Actualmente han aparecido nuevas tecnologías capaces de resolver este problema, un ejemplo de esto lo constituye la tecnología Auto-ID/EPC. Esta tecnología está siendo rápidamente adoptada por la industria para aplicaciones en logística; pero una vez que estos sistemas se encuentran disponibles en una instalación, el control de la fabricación puede beneficiarse tan profundamente de ellos que los MAS están llamados a convertirse en soluciones factibles capaces de aumentar la flexibilidad y la capacidad de los entornos productivos. Este artículo presenta una metodología para el control negociado en sistemas altamente distribuidos, que utiliza tecnología RFID para garantizar una adecuada disponibilidad de la información.
Copyright © 2007 CEA-IFAC.

Palabras Clave: Fabricación, Control Distribuido, Agentes, RFID-IMS.

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. El control centralizado tradicional dio paso a un control distribuido que permitía la simplificación del problema al dividirlo en partes más asequibles. La evolución de estos sistemas distribuidos ha dado lugar a técnicas que dividen el sistema completo en partes o módulos autogestionados que interactúan entre sí (estas interacciones se rigen, en función de los elementos en los que se base el control, i.e., agentes, holones, etc). Estos sistemas permiten realizar una gestión de la información instantánea. Sin embargo el control distribuido tiene el problema inherente de la dificultad de coordinación entre las partes.

Esta coordinación depende de una buena gestión de la información que se comparte. En este artículo, se plantea la utilización de la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) como medio que soporte la gestión de la información, lo que se denomina RFID-IMS (*Radio Frequency Identification – Information Management System*).

El presente artículo se estructura en cinco apartados incluyendo esta introducción. En el segundo apartado se lleva a cabo una revisión de las metodologías de control de la producción más relevantes desde el inicio de la aparición de éstas, centrando el análisis en las orientadas a objetos, las orientadas al control de la producción y las orientadas a agentes. En el tercer apartado se introduce el concepto de agente, mostrando una clasificación funcional de agentes y

analizando las estructuras de agentes deliberativos tipo BDI. El apartado 4 se centra en la tecnología RFID-IMS, sentando sus bases y aplicándola a los sistemas multi-agentes. En el siguiente apartado se presenta detalladamente la metodología PROHA. Por último, el apartado sexto muestra las conclusiones obtenidas de este enfoque en forma de ventajas y beneficios aportados por esta solución.

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. 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 & Van Brussel, 1994).

La estrategia para afrontar la complejidad que se asienta en los mercados 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 & Cavalieri, 2004), como son los holones. Un holón es un ente unitario autónomo y completo en sí mismo. 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 *et al.*, 2004), lo cual, les confiere la capacidad de incluir entre sus interacciones con otros agentes procesos de negociación. Con el objeto de desarrollar este concepto, han aparecido nuevas filosofías de programación orientadas a objetos o agentes.

2.2 Estado del arte

Muchas de las metodologías para el diseño de sistemas de software ya han sido propuestas 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 como las más relevantes aunque existen más.

Tras un minucioso análisis de la amplia variedad de estas metodologías se llega a la conclusión 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. Dentro de estas metodologías se pueden enumerar algunas de ellas como el diseño orientado a objetos (ODD) propuesto por Booch (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).

Los objetos son demasiado pasivos, no conllevan de forma inherente la activación de ningún tipo de comportamiento, sino que se limitan a intercambiar datos y comandos. Los agentes, sin embargo, actúan de forma proactiva, constituyen una especie de objetos mejorados capaces de establecer relaciones con otros agentes que no estaban previstas en el diseño. 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 unas filosofías 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, no obstante, 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 el desarrollo de sistemas de agentes que han derivado en la concepción de diversas metodologías. 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 que representan a todos y cada uno de los elementos del sistema considerados como individuales, funcionalmente hablando. Los agentes son capaces de acometer acciones autónomas de forma flexible. La flexibilidad implica que estos agentes están dotados de un carácter reactivo, ya que pueden responder de forma instantánea a los cambios, y también de un carácter pro-activo, ya que su comportamiento está dirigido a lograr los objetivos mediante la toma de iniciativas. Por la otra parte, la autonomía reside en su capacidad de controlar y modificar su estado interno y su comportamiento, pudiendo tomar decisiones de forma unilateral. Además de su autonomía, los agentes cuentan con habilidades sociales ya que son capaces de interactuar entre sí planteando procesos de negociación y coordinación para alcanzar los objetivos (Wooldridge & Jennings, 1995). Por tanto, las propiedades principales de los agentes se pueden resumir en cuatro: autonomía, habilidad social, reactividad y proactividad.

3.1 Tipología de agentes

Existen diversos tipos de agentes. La clasificación se realiza en función del comportamiento de cada uno de estos agentes. Existen una variedad importante de agentes ya que cada autor realiza su propia clasificación. No obstante son clasificaciones solapadas o análogas. En este artículo se efectúa una clasificación esencial y que, por ello, resulta de gran peso específico.

En primer lugar, se hallan los agentes *reactivos*. Estos agentes reciben información del entorno mediante sensores y, una vez que analizan la información recibida, actúan en consecuencia para garantizar la consecución de objetivos. Durante la ejecución de las acciones, el agente solo necesita tomar repetidas tomas del sensor y compararlas con las condiciones en ese instante para ejecutar las acciones pertinentes. El problema aparece si más de una condición del estado del sistema coincide con el mismo input sensorial. Para afrontar este problema se propusieron las arquitecturas de inclusiones (Brooks, 1986) (Figura 1). Cada condición está asociada con una lista de condiciones de menor ponderación a las cuales inhibe. Por lo tanto, una acción solo se ejecuta si no existen otras condiciones que inhiban la condición que la produce. Estas arquitecturas de agentes aseguran la reactividad del agente. La mayor desventaja de estas arquitecturas se aprecia en la dificultad de implementar comportamientos proactivos o dirigidos a satisfacer los objetivos. Las arquitecturas reactivas solo observan la situación actual y carecen de medios para iniciar cualquier otro tipo de comportamiento.

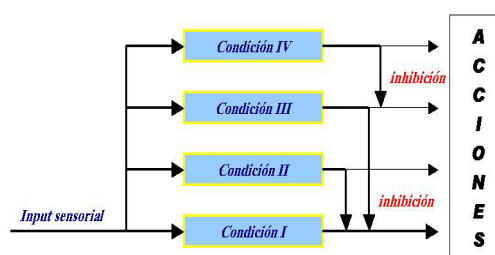


Figura 1. Arquitectura de inclusiones.

Otro tipo de agentes, son los *deliberativos*. Estos agentes derivan de la constante persecución de sistemas de inteligencia artificial simbólicos. Por lo tanto se consideran dentro de agentes de carácter proactivo. Como su nombre indica, son agentes que trabajan por medio de la deducción lógico y que presumen el estado del entorno mediante una base de datos de fórmulas de predicados lógicos. Por tanto, la toma de decisión se modela a través de un conjunto de reglas de deducción. Gracias a estas reglas y a la base de datos consiguen agentes cuyo comportamiento es una elegante aproximación a los sistemas reales. El problema que conllevan estos agentes es que su toma de decisiones está basada en la suposición de que el entorno no cambia

significativamente mientras los agentes deciden qué iniciativa tomar, por lo que no resulta muy apropiado para sistemas de gran dinamismo, debido a estas restricciones temporales. Para solucionar este problema, dentro de los agentes deliberativos, (Wooldridge & Jennings, 1995) introdujo el concepto de agente deliberativo BDI (*Beliefs-Desires-Intentions*) constituyendo un paso más allá, ya que además del proceso deliberativo incluye un razonamiento ejecutivo.

El otro tipo de agentes son los *híbridos*. Se trata de unos agentes cuyo comportamiento incluye mecanismos reactivos y deliberativos en su arquitectura. Las arquitecturas híbridas satisfacen todos los requerimientos de los agentes. Un agente híbrido es autónomo, reactivo y proactivo, además de ser capaz de establecer comportamientos sociales. La única desventaja que presentan estas arquitecturas es que resulta muy difícil para el diseñador de estos agentes coordinar las distintas categorías para provocar un comportamiento coherente. Estos agentes son el paradigma de los agentes, ya que resulta verdaderamente complicado determinar hasta qué punto diseñar el carácter reactivo y a partir de cuál el proactivo. Es decir, hasta qué punto se puede definir dentro de las características de diseño cómo solucionar cualquier tipo de problema, si reactivamente o proactivamente. ¿Qué actitud aportará más beneficios? Efectivamente es difícil y aún no existe ninguna metodología explícita para programar tales arquitecturas, lo cual se presupone harto complejo.

3.2 Agentes deliberativos BDI

La arquitectura BDI (*Beliefs-Desires-Intentions*) tiene sus raíces en el razonamiento práctico (Rao & Georgeff, 1992). El razonamiento práctico involucra dos procesos importantes como son la decisión de qué objetivos perseguir y cómo hacerlo. El primer proceso se denomina deliberación y el segundo, razonamiento ejecutivo. El proceso de decisión comienza con la identificación de las *opciones* de ejecución que se plantean. Tras identificar el conjunto de alternativas posibles, se debe escoger algunas de ellas y acometerlas. Estas opciones elegidas se convierten en *intenciones*, las cuales determinan las acciones de los agentes. Por tanto, las intenciones deben realimentar las condiciones futuras del razonamiento práctico para poder alcanzar los objetivos. Las intenciones juegan un papel crucial en el proceso de razonamiento práctico, ya que las intenciones tienen tendencia a liderar la ejecución de las acciones. Además cuando se ha adoptado una intención, el hecho de tomar dicha intención restringe en gran medida el razonamiento práctico futuro. Otro rasgo interesante es que las intenciones persisten, como cualquiera que tiene intención de lograr un objetivo, pero si la razón que motiva la intención desaparece, existe un punto racional para cesar en el empeño. Por último, las intenciones están estrechamente ligadas a las creencias a cerca del

futuro, i.e., si existe una intención debe existir la creencia de que se conseguirá el objetivo de esa intención.

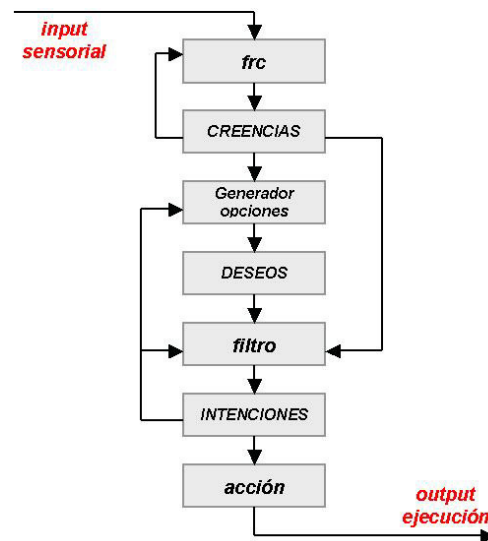


Figura 2. Razonamiento práctico de los agentes BDI.

El problema que aparece en el proceso de diseño del razonamiento práctico es la consecución de un sistema con una buena distribución de propiedades. Parece especialmente claro que un agente en ocasiones debe cejar en ciertas intenciones cuando no crea poder lograrlas, pero igualmente claro parece el hecho de que resulta beneficioso que en ocasiones el agente se detenga a reconsiderar sus intenciones. Este proceso, que en primera instancia representa un sistema de gran dinamismo, supone un dilema. Por una parte, un agente que no se detiene lo suficiente a reconsiderar sus intenciones seguirá intentando lograrlas incluso después de que resulte claro el hecho de su incapacidad para alcanzarlas. Por la otra parte, un agente que constantemente reconsidera sus intenciones puede malgastar un tiempo necesario para satisfacerlas, y se corre el riesgo de no llegar a satisfacerlas nunca. Por tanto, este dilema se puede resumir en la siguiente pregunta: ¿Hasta qué punto conviene reconsiderar las intenciones? Este dilema es el problema del balance entre el comportamiento proactivo y el comportamiento reactivo; es análogo a la situación de los agentes híbridos, pero desde la perspectiva de que se es reactivo siempre y cuando no se pueda ser proactivo. Para resolver este dilema se instauró el *ratio de cambio del entorno* (γ), que determina que actitud tomar en cada situación. (Wooldridge et al., 2000).

El proceso de razonamiento práctico se estructura gracias a siete componentes principales que interactúan para ejecutar dicho proceso (Figura 2):

1. *Función de revisión de creencias (frc)*, la cual toma un input sensorial y las creencias actuales del agente, y en base a ello, determina un nuevo conjunto de creencias.
2. *Conjunto de creencias actuales*, representando la información que el agente reúne acerca del entorno actual.

3. *Función generadora de opciones*, que determina las opciones viables para el agente (i.e., sus deseos) a partir de las creencias y de las intenciones actuales.
4. *Conjunto de opciones actuales (deseos)*, representando los posibles sentidos de acciones válidas para el agente.
5. *Función filtro*, representa el proceso de deliberación de los agentes y determinan sus intenciones en base a las creencias, deseos e intenciones actuales.
6. *Conjunto de intenciones actuales*, representa aquellos estados del sistema los cuales los agentes se han comprometido a conseguir.
7. *Función selectiva de acciones*, que determina que acción se llevará a cabo atendiendo las intenciones actuales.

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.

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

A partir de las expresiones (1), (2), (3) y (4), se puede determinar la función de acción de un agente siguiendo el pseudocódigo de la Figura 3.

```

function acción (p:P):A
begin
  C:= frc (C,p);
  D:= opciones(C,I);
  I:= filtro (C, D, I);
  return ejecución (I)
end function acción

```

Figura 3. Pseudocódigo de un agente BDI.

4. TECNOLOGIA RFID-IMS

Esta tecnología responde a las siglas inglesas *Radio Frequency Identification – Information Management System*. Se trata de una tecnología que fue concebida con el objetivo de soportar todo el tratamiento de la información que se genera en los sistemas de gran dinamismo y proporcionar dicha información al sistema para poder realizar la toma de decisiones de forma instantánea. Es decir, es un sistema que permite flexibilizar el acceso a la información.

4.1 Bases de la tecnología: RFID

Si se analiza la denominación de esta tecnología se pueden extraer los dos conceptos básicos que la articulan. Por un lado, *RFID* es la tecnología de identificación por radiofrecuencia. Esta tecnología se basa en tarjetas de radiofrecuencia (Figura 4) y antenas o sensores RF de lectura y/o escritura (según se precise). Las tarjetas son elementos, habitualmente planos, que van unidos a los elementos que se desean identificar y están formados por una antena receptora y emisora, un bobinado y un chip (Figura 5). En el chip pueden incluirse gran cantidad de información, según el tipo. Algunas de ellas solo permiten almacenar un código de 96 ó 128 bits, mientras que otras, además de la codificación de la pieza, permiten guardar otra información añadida, ya que tienen de 512 bits en adelante.



Figura 4. Tarjetas RF.

Los sensores RF son aparatos capaces de crear campos electromagnéticos a diferentes frecuencias y en distintos áreas en función de su potencia. Son los encargados de obtener la información incluida en las tarjetas y de escribir en ellas los datos que procedan en cada momento.

El funcionamiento es sencillo. Cuando una tarjeta entra en el campo de acción de un sensor RF, se induce una corriente eléctrica en el bobinado gracias a la radiación electromagnética. Dicha corriente alimenta el chip y hace que éste emita la información que se desea obtener. En las tarjetas de alta capacidad se accede a los distintos fragmentos de la memoria del chip variando la señal electromagnética de excitación.

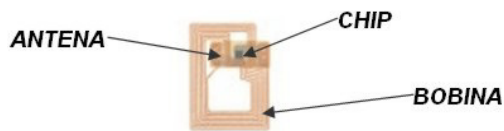


Figura 5. Parte de una tarjeta RF.

4.2 Bases de la tecnología: IMS

Se trata de un sistema de gestión de la información; la que almacenan las tarjetas y la disponible en bases de datos. Se puede gestionar la información mediante un computador y un servidor local que aloje la base de datos cuando los usuarios de la información sean de carácter local. Cuando los usuarios potenciales adquieren un carácter global hay que facilitar un servidor global (el más conocido es Internet) y en las ubicaciones donde se encuentren los usuarios se requiere de un servidor local conectado al global, además del computador. Este es el caso de la tecnología Auto-ID/EPC (Figura 6).

Es importante señalar que las hojas de la base de datos pueden estar dentro del propio servidor o pueden estar en las tarjetas RF de cada uno de los elementos si su capacidad lo permite. Este último caso, hace que el servidor solo gestione los códigos de dichas hojas y los trasposos de información asociada.

Así pues, cuando un objeto lleva adherida una de las tarjetas y se encuentra en alguna de las fases del proceso productivo sea este cual sea, se puede conocer de manera instantánea la situación de ese objeto, todas las modificaciones que ha sufrido, las que le quedan, según su proceso productivo, y todos los detalles asociados que se consideren relevantes para su seguimiento y fabricación. Todo ello, se puede conocer mediante la instalación de sensores RF en punto estratégicos del proceso que estén en continua conexión con el servidor.

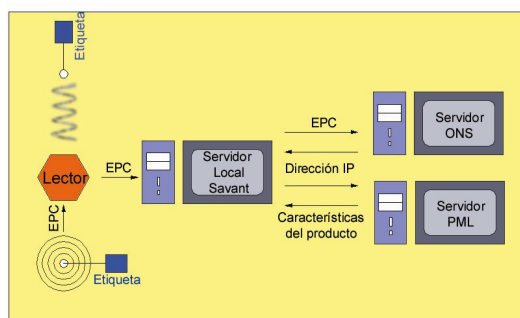


Figura 6. Gestión de datos de Auto-ID/EPC.

Este enfoque fue concebido para la gestión y el control de sistemas logísticos. Este artículo introduce la aplicación de esta tecnología en entornos productivos. Ya que un sistema de este tipo permite garantizar la disponibilidad de la información en todos los puntos del sistema. La información en las etiquetas sirve como enlace que da acceso a toda la información necesaria relacionada con la pieza que la lleva.

4.3 Sistema RFID-IMS / MAS

Este punto se centra en la aplicación de la tecnología RFID-IMS, que fue pensada para la gestión de la información en sistemas logísticos, a entornos productivos controlados por sistemas multiagentes (MAS). En esta nueva aplicación, la utilidad funcional más relevante que aporta es la posibilidad de conseguir que los productos sean *inteligentes*. Un producto inteligente es aquel que sabe exactamente por qué línea del proceso debe ir en cada momento. El sistema multiagente que controla la producción es capaz de saber en cada momento toda la información relativa al producto mediante las tarjetas RF adheridas a cada producto. A partir de esto, el MAS define el paso siguiente de este producto, atendiendo a las directrices de diseño, a pesar de que haya contratiempos. Estos sistemas permiten decidir de forma instantánea las acciones a ejecutar, en contraposición con los sistemas centralizados en los que la definición de itinerarios se efectúa al inicio del proceso siendo inamovible en el transcurso. La forma de obtener la información pasa por la utilización de un sistema RFID-IMS, de forma que se puede decir que el producto autogestiona sus movimientos; de ahí viene la idea de producto inteligente.

El término de producto inteligente es una idea original de las aplicaciones logísticas que en el s. XX se planteaba como una quimera. Hoy en día, gracias a las tecnologías que han emergido recientemente, como es el caso de la tecnología RFID-IMS, y a las nuevas filosofías de ingeniería del software, como las orientadas a objetos o las basadas en agentes, esta idea se ha convertido en una realidad tangible. El salto cualitativo se enmarca en el empleo de este concepto a los ambientes productivos. Este hecho supone muchos más beneficios en su aplicación a sistemas multi-agentes que a infraestructuras logísticas, ya que no solo se controlan los trayectos y la codificación de la información propia del producto sino que además el producto *sabe* que operaciones le deben ser realizadas para pasar de ser un producto en bruto a ser un producto acabado y a donde debe dirigirse, sin ningún tipo de intervención humana en el proceso.

Por tanto, se puede globalizar que estos sistemas RFID-IMS aplicados a MAS proporcionan un control inteligente y flexible para su aplicación en producción. El MAS controla el sistema de forma instantánea, el ser humano solo tiene que determinar las características del diseño y la implementación. Estas nuevas soluciones podrán ahora ser denominadas con mayor precisión como: Sistemas Inteligentes de Fabricación mejorados con Identificación de Productos por Radio-Frecuencia (RFID-IMS II: RFID-enhanced Intelligent Manufacturing Systems); lo que constituye una importante extensión de los RFID-IMS ya discutidos.

5. METODOLOGÍA PROHA

En este apartado se presenta y evalúa la metodología PROHA para el diseño de sistemas basados en agentes para el control de la producción. PROHA son las siglas de Product, Resource, Order Heterarchical Architecture. Se trata de un modelo RFID-IMSII construido a partir de PROSA (Van Brussel et al., 1998), del cual se toma como referencia el proceso de agentificación de los productos, recursos y órdenes del sistema. El proceso de diseño se basa en el planteamiento de un sistema heterárquico de agentes deliberativos, en concreto, de agentes BDI. Esta metodología se adapta a los sistemas de grandes dimensiones y alta complejidad ya que permite crear sistemas software que representan cada uno de los elementos que configuran el sistema productivo a fin de facilitar su gestión y control. Estos agentes interactúan de forma heterárquica a pesar de estar en sistemas multinivel. Esta circunstancia hace que los procesos de toma de decisiones sean más efectivos que en otras metodologías, ya que los procesos de coordinación y negociación de iniciativas pueden ser llevados a cabo por cualquier tipo de agente, sin tener en cuenta su peso específico real. Este comportamiento evita que negocien los agentes de jerarquías superiores a los que verdaderamente intervienen en la resolución del problema. Esta es la principal diferencia que existe entre un modelo basado en holones y este basado en agentes; el primero representa sistemas donde existe una clara jerarquía mientras que el segundo puede establecer tanto comportamientos jerárquicos como heterárquicos.

La metodología de PROHA se centra principalmente en tres procesos, (i) la agentificación o identificación de agentes, (ii) la definición de los agentes y de las características de diseño y (iii) la definición de los protocolos de interacción (Figura 7).

5.1 Proceso de agentificación

El *proceso de agentificación* se estructura en cuatro pasos. En primer lugar, se realiza la *identificación y determinación de las clases*. Este proceso requiere de un alto grado de abstracción para ser eficaz. Consiste en observar el sistema productivo de forma global y en pleno funcionamiento, reconocer los distintos elementos que lo forman e intentar agrupar los elementos en conjuntos funcionales básicos, que serán las clases. Una vez hechas las agrupaciones que representan a las clases, se ha de definir semánticamente cada agrupación, i.e., determinar las características estructurales y funcionales de ese grupo dentro del sistema productivo.

En segundo término se procede a la *identificación de los agentes que integran cada clase*. Una vez identificadas y definidas las clases, se procede a la identificación de los agentes del sistema mediante la

asociación a los elementos físicos que lo integran. Así pues, hay que atender a los elementos que, por sus funciones u objetivos, puedan integrarse dentro de las clases ya determinadas. Una vez identificados, se les asocia al sistema como agentes. Se puede identificar un agente asociado a una determinada máquina, como una unidad, o se puede desglosar esa máquina en un conjunto de agentes. Lo idóneo es tratar como agente a todo aquel elemento que sea significativo en el proceso productivo, funcionalmente hablando.

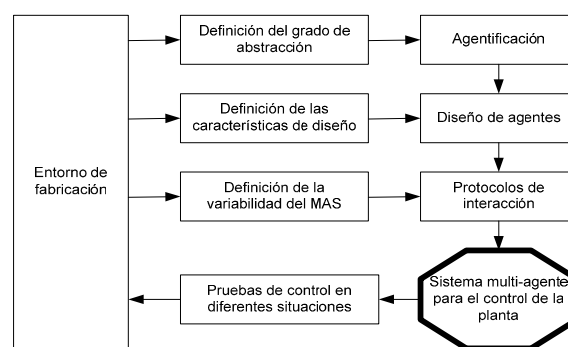


Figura 7. Esquema de implementación.

El siguiente paso es la *creación de la taxonomía de agentes*. Definidas las clases e identificados los agentes pertenecientes a cada clase, hay que catalogarlos según sea su condición en tres grupos bien diferenciados: productos, recursos y órdenes. Los productos son todos los elementos que sean insumos en bruto o semielaborados, y más en general, todo aquel fragmento de material que se encuentre dentro del sistema (o en espera) y que sea susceptible de sufrir alguna operación de transformación. Se considera recurso a todo elemento que pueda ofrecer algún tipo de servicio a los productos o ayudar a que otros recursos puedan ofrecer sus servicios, es decir, que pueden asistir tanto a productos como a otros recursos. Por último, toma carácter de orden todo aquel elemento que se integre en la burocracia del sistema y que determine cuales son las condiciones y los pormenores con los que debe trabajar el sistema.

Por último, la *definición de la estructura*. Todos los agentes dentro del sistema se encontrarán en un mismo nivel, de forma que todos pueden interactuar con todos. Por tanto, se trata de una jerarquía ausente o heterarquía. El funcionamiento de las interacciones en un sistema mono-nivel es análogo a un sistema jerárquico con la diferencia de que los agentes recurso son solicitados por todo el resto de agentes al mismo nivel. Se podría decir que su funcionamiento es paralelo a un sistema económico de competencia perfecta donde la oferta es de conocimiento libre y quien más esté dispuesto a pagar es el primero que accede al servicio.

El grado de abstracción para llevar a cabo una identificación de clases y agentes adecuada debe fijarse atendiendo a las tomas de decisiones. Toda tarea de fabricación proviene de otras tareas de toma

de decisiones. Cuando se ha de tomar una decisión, considerando la consecuente acción física, deben intervenir en ella una serie de elementos del sistema y, por tanto, de agentes. Pues bien, el grado de abstracción debe ser tal, que se considere como agente todo elemento significativo del entorno que se estime con entidad propia a la hora de llevar a cabo cualquier tipo de proceso en dicho entorno.

5.2 Definición de los agentes

Esta es la *fase de diseño* donde se establecen la estructura de los agentes y sus características de diseño. En función del tipo de agente, las características de diseño varían en mayor o menor medida, pero la estructura es la misma para todos ellos. Como se ha indicado al introducir el modelo PROHA, los agentes que lo componen son de tipo deliberativo, más sucintamente, agentes BDI. Por tanto, la estructura del diseño de cada uno de estos agentes se divide en cuatro partes: tres de ellas dedicadas a la definición de los deseos, creencias e intenciones, y la última dedicada al análisis de las percepciones obtenidas del entorno por medio de los sensores. Estas cuatro facetas del diseño de los agentes deben ser claramente definidas en la programación de estos sistemas software.

Las *creencias* determinan la base de conocimientos del agente. Dentro de las características de diseño, las creencias es la información que debe tener fija cada agente para poder realizar la toma de iniciativas, mediante procesos de negociación y coordinación. Las creencias se determinan a partir de la actualización de dichas creencias en un instante anterior, mediante la percepción del entorno.

Los *deseos*, como su propio nombre indica, define cuales son las pretensiones que tienen los agentes dentro del sistema productivo. El hecho de que tengan esas pretensiones no quiere decir que siempre se pueda conseguir satisfacerlas. Estos deseos determinan las posibilidades de actuación, mediante las creencias y las intenciones.

Las *intenciones* representan aquellos estados del sistema a los que los agentes se comprometen a conseguir. Las intenciones se actualizan constantemente gracias a los deseos, creencias y las propias intenciones en un instante anterior, con el fin de determinar hasta que punto pueden ser ejecutadas. Se actualizan para determinar la factibilidad de alcanzar los objetivos. Existen ocasiones en las que, a pesar de las intenciones, no se pueden conseguir los objetivos, por lo que el agente debe saber determinar cuando se encuentra en esa situación para abortar el intento. Si no se abortase conllevaría una pérdida de tiempo necesario. No obstante, en sí mismos son persistentes, ya que no pueden perder las directrices de actuación. En definitiva, las intenciones son persistentes, se pueda, o no, lograr materializar dichas intenciones.

Las *percepciones* son toda la información que define el estado instantáneo de un sistema. Dicha información se obtiene mediante sensores de varios tipos. Se establece un flujo de información continuo para poder actualizar el sistema de creencias, deseos e intenciones. Todo este proceso se apoya en la tecnología RFID-IMS, anteriormente definida.

5.3 Modelos de interacción

Genéricamente, una interacción es cualquier tipo de intercambio de información que de algún modo influye en la actuación de otros agentes, por lo que las interacciones pueden tomar muy diversas formas. Las más relevantes son la coordinación y la negociación, utilizadas en gran cantidad de sistemas basados en agentes, al igual que en PROHA.

La *coordinación* es el proceso mediante el cual los agentes se aseguran que la sociedad de agentes que forman actúa correctamente (Jennings, 1996). Mientras que el proceso de coordinación resulta inapreciable, la ausencia de dicho proceso se convierte en inmediatamente aparente. Tanto en PROHA como en el resto de MAS (*Multi-Agent Systems*), la coordinación no es una propiedad implícita al sistema sino a los agentes; en los MAS la coordinación se torna especialmente compleja ya que no existe un control centralizado sino que los agentes están distribuidos por lo que cada agente puede escoger las acciones a realizar de forma autónoma. En el establecimiento de la coordinación, la dificultad viene, en primer lugar, porque las acciones de los agentes se pueden interferir unas con otras; en segundo lugar, porque puede haber restricciones globales que acoten el diseño; y finalmente, porque un solo agente no es capaz de alcanzar los objetivos del sistema sino que necesita de otros agentes (Bussmann *et al.*, 2004). Para definir la coordinación se requiere de la definición de las posibles dependencias existentes entre los agentes. Se puede tomar la coordinación como la gestión de las dependencias entre agente de forma que si no existen dependencias no hay nada que coordinar (Malone & Crowston, 1994): (i) *Dependencia Unilateral*, cuando un agente depende de otro pero no al contrario; (ii) *Dependencia Mutua*, cuando dos agentes dependen el uno del otro para alcanzar el mismo objetivo; y (iii) *Dependencia Recíproca*, cuando dos agentes dependen el uno del otro para obtener objetivos distintos. Una vez se definen las dependencias que existen entre el total de agentes del sistema, hay que definir los modelos relacionales y los mecanismos de coordinación. Las relaciones se reparten en relaciones entre agentes para conseguir objetivos donde se pueden nombrar las relaciones como innecesarias, necesarias, suficientes, extensivas, sumisas y/o competitivas, y en relaciones de mutua exclusión entre aquellos agentes que a pesar de tener el mismo interés no aportan nada en la coordinación.

El otro tipo de interacción a detallar es la *negociación*. La negociación es el proceso mediante

el cual la toma de decisiones se efectúa gracias a dos o más partes. Dichas partes primero enuncian demandas contradictorias o diferentes, cuando menos, y posteriormente, las van corrigiendo hasta un punto común mediante un proceso de concesión o de búsqueda de nuevas alternativas. Uno de los objetivos de los MAS es permitir que los agentes negocien entre ellos a fin de resolver cualquier tipo de conflicto (Wooldridge, 2002). La negociación en PROHA se rige según el modelo GEM (*General Equilibrium Market*), capaz de optimizar la asignación de bienes y recursos entre los agentes a través de la determinación del precio de mercado, que consiste en variar el precio de mercado hasta encontrar una óptima asignación de bienes. Siendo más preciso, GEM (Sandholm, 1999) consiste en un sistema de productores y consumidores que generan o consumen bienes y servicios. Por tanto, la estructura de agentes es como un mercado de competencia perfecta donde los agentes “lote”, que representan los distintos productos a fabricar, son individuos que cuentan con un determinado capital que irán desembolsando cuando quieran acceder a los distintos recursos para conseguir sus servicios. El capital será proporcional a la prioridad e importancia de los agentes “lote”. Así pues, dentro del sistema se dará una oferta y una demanda por lo que, considerando la oferta de recursos fija, cuanto mayor sea la demanda, mayor será el precio que exijan los agentes “recurso” 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 que los existentes, ello supone un aumento de la demanda y, por tanto, de los precios. Al contar con un mayor *poder adquisitivo*, estos agentes pueden 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 “recurso”, 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 (Cenjor & García, 2005). Este planteamiento es paralelo al funcionamiento real de la negociación en PROHA. Al igual que en la vida real, es preciso, para obtener los mayores beneficios, disponer de información veraz y reciente. Esta necesidad queda cubierta ya que la tecnología RFID-IMS asume las funciones de identificación de objetos y de la gestión de la información.

5.4 Características de los protocolos de interacción.

Llegado el punto en el que se ha de programar el protocolo de interacción es preciso estudiar más detenidamente el concepto de dependencia. Una dependencia es un conjunto de tareas de decisión (tareas que deben realizar los agentes para llevar a cabo la toma de decisiones) y un conjunto de restricciones no lineales y de preferencias, de forma que las tareas de decisión deben ser satisfechas. Cada una de estas tareas de decisión especifica unos

posibles *puntos de inicio* en la que poder ser realizadas estas tareas. Además, dichas tareas de decisión en combinación con las restricciones de carácter no lineal y las preferencias determinan cual será la *meta* que debe ser lograda (Bussmann *et al.*, 2002). Pues bien, cualquier protocolo de interacción pensado para resolver las dependencias, debe ser capaz de alcanzar las *metas* a partir de cualquier posible *punto de inicio*. Por lo tanto, los puntos de inicio y la meta de cualquier dependencia determinan la funcionalidad que se requiere del protocolo de interacción. De ello se extrae la idea de que el análisis de este par de conceptos, puntos de inicio y meta, determinará cual de los protocolos existentes será el que mejor se adapte al sistema sometido a estudio.

Un *punto de inicio* de una dependencia cualquiera está definido por las tareas de decisión que encuentran una dependencia y las restricciones que delimitan la toma de decisiones. (i) Lo primero que se debe determinar de forma segura es si los agentes involucrados en la dependencia sometida a estudio son fijos, es decir, invariables o si por el contrario están sujetos a cambios y varían con regularidad. (ii) Un segundo punto importante que debe determinarse claramente, es el tipo de compatibilidad existente entre las restricciones y las preferencias involucradas en una dependencia. Existen tres tipos de compatibilidades: una en la que solo existen restricciones que limitan las alternativas en la toma de decisiones; otra en la que, además de las restricciones, existen preferencias, al menos una, compatibles. Por último, el caso de preferencias contrapuestas se da cuando las preferencias de los agentes favorecen a unos y perjudican a otros. El diseño del protocolo en los dos primeros casos es sencillo, pero también debe ser capaz de reconciliar posturas en el tercer caso. (iii) Dentro de la descripción del punto de inicio resta la determinación de la existencia de restricciones globales en caso de que existan más de dos agentes, que es lo habitual. Se considera global cuando hay más de dos agentes y existe una restricción y/o preferencia global. En cualquier otro caso, se denomina como no local.

También es necesario plantear las distintas posibilidades que caracterizan cada una de las *metas*.

Para alcanzar cualquier meta es preciso determinar qué acciones deben ejecutarse y qué agente debe acometer qué acción. Para establecer estos dos puntos se debe saber qué relaciones existen entre las distintas tareas de decisión, y es obvio que éstas existen ya que los agentes interactúan. Pero no todos los agentes tienen que acometer las acciones en relación con el resto de agentes, sino que pueden existir subgrupos de agentes totalmente independientes al resto de agentes en cuanto a la ejecución y satisfacción de las tareas y, por tanto, de las decisiones (Bussmann *et al.*, 2004). Estos subgrupos se denominan sociedades de cometidos (*joint commitments*). Un conjunto de cometidos se

denomina sociedad de cometidos “si el fallo en la satisfacción de alguno de los cometidos arriesga la consecución de otros”. Por lo tanto, un conjunto de cometidos solo tiene sentido si se pueden satisfacer todos los cometidos (Jennings, 1996). (iv) Un factor importante, por tanto, es la determinación del número de sociedades de cometidos que entran en juego y si el número requerido de dichas sociedades es conocido antes de efectuar la interacción o debe ser definido por el protocolo de interacción. Puede que el número de sociedades se determine en el proceso de diseño del MAS; puede que se determine antes de la interacción, por lo que sería fijo; o puede que se determine mediante el protocolo de interacción, es decir, que sería variable. (v) Es necesario establecer el tamaño de las sociedades de cometidos, es decir, establecer el número de agentes involucrados en cada uno de ellos. Del mismo modo que el punto anterior, se determina, bien en el diseño del sistema, bien antes de la interacción, o bien en pleno proceso interactivo resultando variable. (vi) Una vez definidos los aspectos externos de las sociedades de cometidos, hay que establecer el estado interno de estas sociedades, i.e., las relaciones entre los cometidos y los conjuntos de agentes. Existen cuatro opciones posibles: por un lado, se puede dar un solapamiento múltiple, en el que un agente esté involucrado en más de una sociedad de cometidos; también, un solapamiento único, en el que el agente solo se encuentra en una sociedad, como mucho; existen relaciones tipo cobertura completa, en la que cada agente se encuentra en al menos una sociedad; y por último, puede darse una cobertura incompleta, en la que no todos los agentes deben estar involucrado en alguna sociedad de cometidos.

Para alcanzar las metas también es necesario definir bien los roles que toman los agentes, ya que los roles describen comportamientos específicos, de forma que cualquier meta puede ser caracterizada mediante los roles adoptados por los agentes. Por consiguiente, es preciso analizar el estado general de los agentes que definen el proceso y su variabilidad. (vii) En este aspecto, el primer punto que se presenta como indispensable es la asignación de roles, i.e., si los roles de los agentes son fijos y se determinan antes de cualquier tipo de interacción, o si por el contrario, los roles de los agentes son variables y deben ser determinados por el protocolo de interacción.

Si se hace hincapié en la determinación de las metas, probablemente haya que prestar especial atención al protocolo de interacción y a los procesos interactivos que conlleva. El protocolo de interacción resuelve cualquier tipo de dependencia siempre y cuando sea capaz de alcanzar cualquier meta a partir de cualquier situación inicial. Sin embargo, cualquier tipo de proceso interactivo puede conllevar distintos tipos de restricciones. Los más comunes son la posible incapacidad por parte del agente de transmitir la información a otros agentes y la posible complicación del proceso en el que los agentes realizan tomas de decisión y eligen las acciones a

ejecutar. De estos dos problemas surgen otros dos puntos que alinean el protocolo de interacción. (viii) El primero se centra en establecer que cantidad de información local debe ser global para estar hábil para el uso de otros agentes. La información susceptible de ser difundida son las decisiones alternativas, las restricciones y preferencias locales i información relativa al escenario local. En este contexto, se contemplan dos niveles de habilitación de la información: por un lado, se plantea la divulgación de las decisiones alternativas y la posibilidad de hacerlo con el escenario local de decisión (nunca las preferencias ni las restricciones); y por el otro lado, se establece la difusión adicional de restricciones y preferencias. Este segundo nivel facilita encontrar la resolución del problema.

El segundo de los problemas (ix) hace emerger la pregunta de hasta qué punto se debe delegar. Es decir, ¿hasta qué punto aceptará un agente una decisión que el resto de agentes consideran lo más beneficioso para el conjunto y en qué circunstancias? Se trazan dos niveles básicos de delegación con respecto al poder de decisión: un primer nivel de no delegación, en el que los agentes pueden rechazar cualquier proposición, y un nivel de delegación parcial en el que se acepta toda proposición que cumpla ciertos requisitos impuestos por el agente (Bussmann *et al.*, 2004).

Los nueve criterios o principios expuestos determinan las características estructurales del protocolo de interacción utilizado por PROHA para establecer el MAS de un sistema productivo. Como es obvio cuanto más dinámico sea el sistema, mayor complicación conlleva el diseño del protocolo ya que necesita tener un carácter proactivo para soportar a los agentes.

6. CONCLUSIONES

De la conjunción entre RFID-IMS y MAS se obtiene RFID-IMSII. En este escrito se ha presentado un ejemplo de metodología de diseño para el control basado en esta última filosofía: PROHA. Es importante incidir en el hecho de que la metodología PROHA ha sido concebida para ser implementada en entornos productivos.

Se trata de una metodología basada en agentes ya que se ha demostrado que los agentes son los elementos que mejor describen las situaciones dinámicas, en detrimento de otros elementos como los objetos, debido a su capacidad de negociar y coordinarse para buscar el mismo fin. Además, los agentes permiten crear ambientes heterárquicos, lo cual era intangible con los objetos o con los holones. Este hecho hace que los agentes que representan el sistema flexibilicen de forma más eficiente el control de la producción. Se introducen en PROHA mecanismos que hacen más efectivo el proceso de negociación ya que solo involucra a los afectados, sin tener

necesidad de interactuar con los miembros principales de su clase; este hecho deriva directamente del carácter heterárquico de la metodología.

El inconveniente tradicional de este tipo de filosofía es la dificultad de acceso a la información; de forma que todos los participantes en la negociación dispongan de los mismos datos. Ya que la existencia de elementos mal informados frente a otros con información privilegiada viciaría completamente el proceso de negociación entre agentes. La tecnología RFID-IMS se revela como una excelente respuesta para dar solución al problema de integración entre las partes del sistema distribuido.

Para la implantación de este modelo se realiza un proceso de agentificación, paralelo al de otras metodologías basadas en agentes de reciente aparición. La determinación de las características de diseño del sistema se centra en el diseño de la estructura interna de los agentes y del protocolo de interacción por el que se rigen las interacciones. Los agentes siguen el modelo estructural BDI (Beliefs-Desires-Intentions), mientras que para la elaboración del protocolo de interacción o la elección de alguno entre los ya creados, se han estructurado una serie de puntos de referencia a los cuales hay que atender para determinar las características que ha de tener el protocolo que gobierne las interacciones de un determinado MAS.

Por lo tanto, PROHA es una metodología especialmente versátil a la hora de ser aplicada a cualquier tipo de entorno ya que sus características de diseño le permiten adaptarse mejor a situaciones nuevas. Ello conlleva un aumento de flexibilidad en la implementación sobre el sistema real. En definitiva, se puede decir que PROHA constituye un paso hacia delante en la consecución de sistemas productivos inteligentes basados en sistemas multi-agentes.

Los trabajos descritos en este artículo están siendo utilizados para el control, tanto de sistemas experimentales en el laboratorio, como en instalaciones reales (más información en <http://autolog.uclm.es>). Los resultados de este proceso de aplicación constituyen la base de próximos artículos.

REFERENCIAS

- Booch, G. (1991). *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. Benjamin/Cummings: Redwood City, CA, USA
- Bravoco, R.R. & 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, & J. Mylopoulos (2001). *A Knowledge Level Software Engineering Methodology for Agent-Oriented Programming*. Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents. Montreal, Canada.
- Brooks R.A. (1986). *A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, pp. 14 – 23.
- Burmeister B. (1996). *Models and Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design*. In Fisher K. (Ed.), Working Notes of the KI'96 Workshop on Agent-Oriented Programming and Distributed Systems. DFKI: Saarbrücken, Germany.
- Bussmann S., N.R. Jennings & M. Wooldridge (2002). *Re-use of Interaction Protocols for Agent-Based Control Applications*. Proceedings of the Third International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering, Bologna, Italy.
- Bussmann S., N.R. Jennings & M. Wooldridge (2004). *Multiagent Systems for Manufacturing Control. A Design Methodology*. Springer Series on Agent Technology. Springer-Verlag: Berlin, Germany.
- Caridi M. & S. Cavalieri (2004). *Multi-Agent Systems in Production Planning and Control: An Overview*. Production Planning and Control, Vol. 15, No. 2, pp. 106-118.
- Cenjor A. & A. García (2005). *Control Basado en Agentes Mejorados con la Tecnología Auto-ID*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Accepted in Vol. 2, No. 2.
- Coad P., & E. Yourdon (1991). *Object-Oriented Analysis*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Collinot A., A. Drogoul & 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 & C.H. Sparkman (2001). *Multiagent Systems Engineering*. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 231-358.
- Fanti M.P., B. Maione, G. Piscitelli & 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.

- 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, Spain.
- Jennings N.R. (1996). *Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence*. In O'Hare G. M. P. & N.R. Jennings (Eds.). *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. pp. 187 – 210. John Wiley & Sons: New York, NY, USA.
- Lind J (2001). *Iterative Software Engineering for Multiagent Systems – The MASSIVE Method*. Springer-Verlag: Berlin, Germany.
- Lüder A., J. Peschke, T. Sauter, S. Deter & 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.
- Malone T.W. & K. Crowston (1994). *The Interdisciplinary Study of Coordination*. ACM Computing Surveys, Vol. 26, No. 1, pp. 87 – 119.
- Murata T. (1989). *Petri Nets: Properties, Analysis and Applications*. Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 4, pp. 541 – 580.
- Rao A.S. & M.P. Georgeff (1992). *An Abstract Architecture for Rational Agents*. Third International Conference on Principles of Knowledge Representations and Reasoning (KR '92), pp. 439 – 449. Boston, MA, USA.
- Robinson P.J. (1992). *Hierarchical Object-Oriented Design*. Prentice-Hall:Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Ross D.T. & 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 & W.Lorensen (1991). *Object-Oriented Modelling and Design*. Prentice-Hall:Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Sandholm T.W. (1999). *Distributed Rational Decision Making*. Weiss G. (Ed.), *Multi-agent Systems*, pp. 201 – 258. MIT Press: Cambridge, MA, USA.
- Singh M.P., A. Rao & M. Wooldridge (1998). *Intelligent Agents IV (ATAL '97)*. LNAI 1365. Springer-Verlag: Berlin, Germany.
- Suda, H. (1989). *Future Factory Systems Formulated in Japan*. Techno Japan, Vol. 22, pp. 15-25.
- Valckenaers, P. & H. Van Brussel (1994). *Theoretical Foundations for Preserving Flexibility in Manufacturing*. Advanced Summer Institute '94 in Computer Integrated Manufacturing & Industrial Automation (CIMIA). University of Patras, Greece.
- Van Brussel H., J. Wyls, P. Valckenaers, L. Bongaerts & P. Peeter (1998). *Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA*. Computer in Industry, 37, pp. 255-274.
- Wirfs-Brock R., B. Wilkerson & 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., 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.
- Wooldridge M., G. Weiss, y P. Ciancarini (2002). *Agent-Oriented Software Engineering II*. LNCS 2222. Springer-Verlag: Berlin, Germany.
- Zhang C., & D. Lukose (1998). *Multi-Agent Systems – Methodologies and Applications*. LNAI 1087. Springer-Verlag: Berlin, Germany.