

Implementación del Control en Planta de un Centro de Distribución Automatizado mediante Agentes Físicos y RFID

Javier de las Morenas^{a,*}, Andrés García^b, Fernando Martínez^a, Pablo García Ansola^a

^a Grupo Autolog. E.I.M.I.A. Universidad de Castilla-La Mancha. Plaza Manuel Meca 1, 13400 Almadén (Ciudad Real), España.

^b Grupo Autolog. E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. Camilo José Cela s/n.13071 Ciudad Real, España.

Resumen

En la última década, la aplicación de la tecnología de sistemas multiagente para el control en planta ha generado gran expectación por parte de profesionales e investigadores. El uso de esta tecnología, por la propia definición de los agentes como: sistemas reactivos (capaces de responder ante cambios en el entorno), proactivos (generando iniciativas dirigidas a alcanzar sus objetivos), autónomos y con capacidades sociales (la toma de decisiones está consensuada), ha propiciado la aparición de gran cantidad de iniciativas. Lamentablemente, la mayoría de estas iniciativas se reducen únicamente a definiciones de agentes, declaración de intenciones o simulaciones, o bien constituyen propuestas demasiado ambiciosas, lo que ha impedido que la industria adopte este tipo de soluciones. Este artículo presenta una aproximación para la implementación de los agentes encargados del control en planta, conocidos como agentes físicos u holones, sobre una plataforma experimental que representa las instalaciones de un centro de distribución automatizado. Se ha tomado como punto de partida el concepto de holón, pero se ha adaptado de manera que la toma de decisiones tenga lugar en el controlador industrial. El trabajo se ha centrado en alcanzar una toma de decisiones en planta inteligente. Se definen dos tipos de agentes y se ha modelado, mediante redes de Petri, la forma en la que interactúan estos agentes en la toma de decisiones que surgen en el funcionamiento de una planta inteligente. Finalmente los modelos se han implementado sobre autómatas programables. *Copyright © 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.*

Palabras Clave:

PLCs, Agentes Físicos, Control en planta, RFID, Redes de Petri.

1. Introducción

En un mercado en el que se demandan productos a medida y tiempos de entrega mínimos, los fabricantes están siendo obligados a ser capaces de llevar a cabo una personalización en masa, sin desatender la capacidad de reacción ante cambios en las demandas de los clientes. Bajo estas condiciones, las empresas tienen que responder a las necesidades de los consumidores mejorando sus capacidades de flexibilidad y agilidad, mientras mantienen sus niveles de productividad y calidad para no perder competitividad.

Los requerimientos en las empresas han ido evolucionando desde los tradicionales criterios de rendimiento, descritos en términos de óptimos estáticos, o cercanos, hacia nuevos criterios de rendimiento, cuantificados en términos de reactividad, adaptabilidad, agilidad y robustez (Leitão, 2009). Así mismo, la manipulación de materiales ha alcanzado gran importancia en la industria, debido a que los costes asociados a estos procesos superan el 30% de los costes de producción total (Sujono y

Lashkari, 2007). La manipulación de materiales engloba todos los procesos de movimiento, almacenaje, protección y control a lo largo de los procesos de producción y de distribución, incluyendo el consumo y la venta.

Tradicionalmente, el control de los sistemas ha adquirido una forma centralizada, que resulta suficiente para atender a las necesidades más comunes. Sin embargo, para alcanzar los requerimientos actuales, el control centralizado resulta ineficiente, a causa del gran esfuerzo que acarrea su diseño, a medida que los sistemas crecen en tamaño y complejidad. Es más, estas soluciones son incapaces de responder adecuadamente ante la aparición de perturbaciones, debido a la rigidez de sus arquitecturas. Imprevistos tales como: la llegada de pedidos de última hora, retrasos en la recepción de materias primas o averías, conllevan desviaciones en los planes de producción iniciales y suponen retrasos y situaciones de parada.

La forma de afrontar este problema ha sido distribuyendo la toma de decisiones en diferentes entidades, alcanzando sistemas de control no centralizados, (distribuidos), lo que hace posible la división del sistema total en subsistemas más pequeños y sencillos. Un enfoque prometedor consiste en considerar los elementos de los sistemas como un conglomerado de unidades distribuidas, autónomas, inteligentes y reutilizables, que operan como un conjunto colaborativo de entidades (Mendes et al.,

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos:
javier.delasmorenas@uclm.es, andres.garcia@uclm.es,
fernando.mgarcia@uclm.es, pablo.garcia@uclm.es
URL: autolog.uclm.es

2008). Como resultado de las negociaciones entre los elementos, se generan sistemas dinámicos que interactúan entre ellos para alcanzar objetivos locales y globales (Wooldridge, 2002). En estos sistemas es fundamental contar con información actualizada del entorno para llevar a cabo una toma de decisiones acertada. Siguiendo estos principios, desde el punto de vista de la investigación, existen diferentes iniciativas para el desarrollo de sistemas de control distribuidos para su utilización en la industria, destacando los sistemas multiagente (*Multi Agent System, MAS*) (Pechouček y Mařík, 2008) y los sistemas de fabricación basados en holones (*Holonic Manufacturing System, HMS*) (Brennan et al., 2011), presentando ambos grandes similitudes.

Paralelamente, las nuevas técnicas de identificación y seguimiento de productos mediante etiquetas de radio-frecuencia (RFID) se presentan como una herramienta decisiva para paliar los tradicionales problemas de integración en los sistemas altamente distribuidos.

En este artículo se propone la combinación de los sistemas multiagente junto con la identificación por radio-frecuencia para el control en planta de un centro de distribución, centrándose en el actual talón de Aquiles: la implementación de los agentes encargados del control en planta en controladores industriales, los conocidos agentes físicos. Para ello, se toma como punto de partida el concepto de holón, pero se adapta de forma que la toma de decisiones continúe en el controlador: Obteniendo sistemas robustos y reactivos para su aplicación en la industria.

En los siguientes apartados se presenta en primer lugar el estado del arte relacionado con este trabajo; concretamente la utilización de agentes en el control en planta. En el tercer apartado, se presenta la solución propuesta, en la que se combinan la tecnología de agentes con RFID y se modela la toma de decisiones mediante redes de Petri. Seguidamente, se implementa la solución propuesta en una plataforma experimental, que representa las instalaciones de un centro de distribución, sobre controladores lógicos programables (PLCs). Finalmente, se detallan las conclusiones y se proponen diferentes trabajos futuros destinados a ampliar este estudio.

2. Estado del Arte

Las arquitecturas de agentes se caracterizan por ser autónomas, reactivas, proactivas y con capacidades sociales (Wooldridge y Jennings, 1995), haciendo posible su aplicación en entornos altamente estocásticos, lo que las convierte en candidatas idóneas para su aplicación en entornos dinámicos.

En los últimos años, la tecnología de agentes, proveniente de las ciencias computacionales, ha empezado a usarse en la programación de los procesos de fabricación, en primera instancia, y para controlar la consecución de la misma, en planta. En esta línea, cabe destacar la arquitectura pionera propuesta por Van Brussel et al. (1998) conocida como PROSA (*Product, Resource, Order Staff Architecture*), que consiste en identificar productos, recursos y órdenes de fabricación como holones, que han de negociar entre sí con el fin de obtener una solución satisfactoria para el conjunto de los agentes. La arquitectura ADACOR (*ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems*) (Leitão, 2011) define una arquitectura de agentes muy similar a la que propone PROSA, pero a la que se le añade un holón coordinador para alinear el funcionamiento global del sistema. García Ansola et al. (2011) en MAS-DUO propone la división entre agentes del sistema de información y los agentes físicos. Este es un enfoque que refleja

la realidad industrial, en la que la gestión de la empresa está separada del control en planta. Este hecho tiene su origen en los inicios de la empresa, cuando se subcontrata a una empresa para instalar el sistema de gestión, (ERP), y a otra para la puesta en marcha de la planta. No existen intereses comerciales en la integración completa por lo que se complica la puesta en marcha real de un sistema único. Un ejemplo claro puede verse con Siemens, empresa de automatización, y SAP, empresa de ERP, que mantienen sus modelos de negocio específicos en cada área de conocimiento de forma dividida.

Desde el punto de vista de metodologías, DACS (*Designing Agent-based Control Systems*) (Bussmann et al., 2004) es una metodología para el diseño de sistemas de control en la producción. Esta metodología se basa en tres pasos: análisis de toma de decisiones, identificación de agentes y selección de protocolos de interacción. Es un trabajo teórico que indica que hay que implementar cada agente de manera independiente, pero no da detalles de cómo hacerlo, además de no indicar arquitecturas ni plataformas PC para ello.

Existen algunos ejemplos de plataformas experimentales que se han desarrollado para probar la tecnología de agentes o la tecnología RFID. Soylemezoglu et al. (2006) implementa EPC-IS (*Electronic Product Code Information Service*), en la que se combina RFID con repositorios web para compartir la información de productos con todos los actores de la cadena de distribución. Zacharewicz et al. (2011) se centra en el uso de RFID en entornos refrigerados para, de esta forma, comprobar su funcionamiento en entornos hostiles. Thorne et al. (2003) y también Vrba et al. (Vrba et al., 2011) presentan plataformas en las que se ponen en marcha sistemas multiagente, en una célula de fabricación flexible en la Universidad de Cambridge, en el primer trabajo, y en un entorno simulado, en el segundo. En Vrba et al. (2011) se muestra la aplicación de agentes en una célula de fabricación en los laboratorios ACIN de la Universidad Técnica de Viena. Una aproximación que combina ambas tecnologías, RFID y los sistemas multiagente, se puede encontrar en Vrba et al. (2008), con el uso del software de simulaciones MAST.

Sin embargo, la tecnología de agentes ha sido desarrollada para funcionar en ordenadores personales (PCs). Esto representa un problema para la aplicación de agentes en entornos industriales y más específicamente para el control en planta, ya que actualmente los equipos de control, (autómatas y robots), no permiten ejecutar aplicaciones de agentes, o a lo sumo de agentes reactivos con pocas capacidades. Una alternativa es el uso de soft PLCs, programas de autómatas que se ejecutan en máquinas virtuales que cuentan con gran potencia de cálculo, pero que, cuando funcionan sobre sistemas operativos no deterministas, pierden la reactividad y robustez necesarias en planta.

Una forma de afrontar este problema ha sido mediante el concepto de holón. Los holones se definen como elementos autónomos y cooperativos que representan los componentes en los que puede dividirse un sistema de fabricación con control descentralizado. Los holones pueden organizarse en estructuras jerárquicas o heterárquicas.

Cada holón contiene una parte física capaz de influir físicamente en el mundo real, (dispositivos, herramientas,...) y una parte de control, responsable del control de la parte física y de la comunicación con el resto de los holones (Mařík et al., 2002). En la bibliografía se pueden encontrar ejemplos de la implementación de estos holones –también llamados agentes físicos para resaltar su capacidad de influir en su entorno– en diversos trabajos (Pechouček y Mařík, 2008; Sallez et al., 2010;

Vrba et al., 2011). En todos ellos se usa el estándar de comunicaciones FIPA para la programación de la parte de alto nivel y el estándar IEC-61499 para la implementación de la parte física, tal y como se muestra en la Figura 1.

El estándar internacional IEC-61499 (Vyatkin, 2011), también conocido como arquitectura de bloques de funciones, ha sido desarrollado por el consorcio HMS (*Holonic Manufacturing Systems*) dentro del modelo de los Sistemas de Fabricación Inteligente (*Intelligent Manufacturing Systems, IMS*). Este estándar se basa en el IEC-1131-3, (programación en escalera), que es el lenguaje estándar de programación de autómatas programables. Esta nueva arquitectura tiene la ventaja de que permite la separación de los flujos de información de los flujos de eventos, entre diferentes bloques de funciones. Múltiples bloques de función, residentes en los diferentes autómatas dentro de unas instalaciones, pueden agruparse para desarrollar el proceso de control deseado. Los agentes son los que realizarían la toma de decisiones en ordenadores, y mediante el uso de redes, la llevarían a la práctica ejecutando en los autómatas los bloques de función relacionados.

Con el uso de los agentes físicos u holones, (término usado indistintamente en la bibliografía), el control se descentraliza pero sigue estando fuera de los controladores industriales. Esta solución, aunque muy prometedora, no es lo suficientemente robusta y reactiva para su aplicación en el control en tiempo real a nivel de planta, ya que al alejar la toma de decisiones del control en planta aparecen retrasos a causa de las comunicaciones entre el ordenador y el autómata, no garantizándose la reactividad del controlador y con ello la robustez del sistema. Además la complejidad de los sistemas hace difícil la aparición de aplicaciones en tiempo real (Theiss et al., 2009). Se pone de manifiesto la necesidad de que sea el controlador, (PLC), el que ejecute la toma de decisiones en tiempo real, para garantizar la reactividad y robustez del sistema. Es más, los agentes responden principalmente a altos niveles de abstracción, que son útiles para proporcionar autonomía e inteligencia, pero fallan a la hora de tratar restricciones en tiempo real. En el siguiente apartado se describe cómo pueden obtener beneficios de las ventajas de utilizar los sistemas multiagente, pero manteniendo la toma de decisiones en los controladores industriales.

3. Sistema Propuesto

En este artículo se parte de la arquitectura MAS-DUO (García Ansola et al., 2011) y se complementa con el concepto RFID-IMS (García y Cenjor, 2007) que propone el uso de RFID para generar visibilidad, (aumentar la información disponible en el sistema para garantizar una toma de decisiones correcta), en los sistemas multiagente. La arquitectura MAS-DUO se ha dividido en diferentes comunidades de agentes del nivel de gestión y de agentes del nivel de planta.

Los agentes de gestión son:

- ERP (*Enterprise Resource Planning*). Constituido por una comunidad de agentes a cargo de la planificación a nivel de empresa.
- WMS (*Warehouse Management System*). Constituido por una comunidad de agentes encargados de la gestión del almacén.
- Tracking (Seguimiento). Son los agentes que actualizan la información del estado de planta, a partir de los datos recibidos por el sistema RFID. Esta información contiene la localización de los productos dentro de la planta.

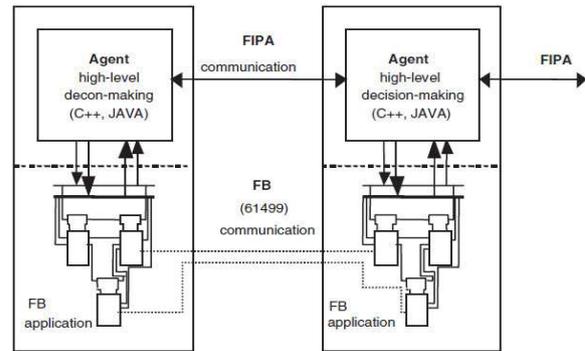


Figura 1. Implementación de holones(Vrba et al., 2011)

- CRM (*Customer Relationship Management*). Constituido por los agentes encargados de gestionar clientes y pedidos.

Los agentes que forman el nivel de planta, tomando como referencia la arquitectura PROSA propuesta por Van Brussel et al. (1998), son los siguientes:

- Producto. Tipo de agente que representa a cada uno de los productos del sistema. En este caso se representa cada uno de los palés del centro de distribución como un agente producto.
- Recurso. Los agentes recurso representan todos los recursos del centro de distribución, tales como máquinas y sistemas de manipulación de cargas, (cruces, cintas de cadenas y rodillos)

Esta organización se ha definido como semi-heterárquica por dos motivos: las restricciones que imponen los elementos físicos del entorno real y la negociación que ofrece un sistema de gestión multiagente, totalmente heterárquico. El grado de deliberación se diluye según se acerca al entorno físico, debido a las restricciones del mismo. Pero esto no supone una desventaja, debido a que las decisiones del entorno físico están sometidas a una programación inicialmente cargada en el PLC, que es el último responsable en tomar las decisiones.

Los agentes del nivel superior, (agentes de gestión), al estar organizados de forma heterárquica, toman decisiones con un mayor grado de negociación que los agentes de niveles inferiores, (agentes de planta), lo que supone una ventaja al tener comportamientos deliberativos que mejoran la toma de decisiones. Los agentes de gestión han de negociar la forma de completar los pedidos, llevando a cabo una planificación que tenga en cuenta los productos existentes en el almacén, los que se van a producir y los que se van a recibir por los muelles de carga. Si a los agentes de gestión se les proporciona información de la situación de la planta, es posible incluir en la negociación a los productos en curso dentro del centro de distribución y a los que están en los muelles de carga esperando a ser expedidos. Esto es posible con el uso de RFID y asociando la identificación de los productos con posiciones dentro del centro de distribución, lo que permite la reasignación de productos a otros pedidos.

Tras la negociación de los agentes de gestión, se generan las tareas, (en forma de instrucciones), que es necesario realizar en planta, asignándoles un nivel de prioridad.

Cada instrucción se envía al nivel de planta donde se asocia a un agente producto, que dirigirá su elaboración negociando con el resto de agentes producto y recurso de planta. Esta es una producción dirigida por los productos, siguiendo las filosofías de productos inteligentes propuesta por McFarlane et al. (2013). Como los agentes de gestión siguen deliberando la mejor

planificación, puede ocurrir que, tras la rotura de máquinas o la llegada de un pedido urgente, entre otros motivos, se estime que esa instrucción no es óptima, por lo que los agentes de gestión podrían modificarla atendiendo a su localización, (uso de RFID). En este caso, simplemente con actualizarla en planta, el agente producto que la porta actualizaría sus objetivos. De este modo se alcanza una toma de decisiones inteligente sin necesidad de que los agentes de planta cuenten con muchos recursos computacionales.

El agente producto se localizará en los equipos de control industrial, que comúnmente son PLCs. De este modo se integra todo el holón en el PLC, al contrario de lo que propone la implementación de los holones bajo IEC-61499 y FIPA. Recordemos como, en esa propuesta, una parte del holón se encuentra en el controlador industrial (PLC), pero la capacidad de negociación se encuentra en un ordenador, existiendo un desacoplamiento entre ambos que puede conducir a sistemas poco reactivos y poco robustos. Los agentes de planta propuestos serán holones, que estarán completamente integrados en los PLCs.

Esta división, (agentes de gestión y de planta), es asimilable a tomar el concepto de holón y llevarlo a su máxima expresión, contando con una parte, (agentes de gestión), que negocia el funcionamiento y otra parte, (agentes de planta), que influye en el mundo real, poniendo en práctica la planificación negociada.

En el estado del arte se ha constatado que el desarrollo actual de la tecnología de agentes permite alcanzar la funcionalidad expuesta para los agentes de gestión, por lo que su desarrollo no es objeto en este artículo. El problema surge a la hora de llevar a la práctica la planificación consensuada por los agentes de gestión. Es aquí donde entran en juego los agentes de planta. En los apartados siguientes se presenta la forma en la que las instrucciones generadas por el nivel de gestión influyen en el funcionamiento de los agentes de planta, sin necesidad de que exista un ente de control centralizado ni una supervisión constante, manteniendo el control en planta en los controladores industriales.

3.1. Toma de decisiones en planta

Las tomas de decisiones que aparecen en el nivel de planta se corresponden con la colisión de varios agentes producto en su demanda de utilizar/consumir un recurso de la planta, (cintas transportadoras, máquinas, etc.). En el caso de las intersecciones, se puede dar el caso en el que varios productos converjan en una intersección (Figura 2.a), y sea necesario elegir cuál de los productos es el prioritario. Por otro lado, se puede dar el caso de que un producto llega a una bifurcación donde puede tomar varios caminos (Figura 2.b) y, dependiendo del camino que tome, se le realizará un proceso, se le aplicará algún tipo de inspección o se le dirigirá hacia un destino. También es posible que exista un caso mixto, en el que varios productos primero convergen en un punto y después divergen hacia varios (Figura 2.c). Otra toma de decisiones se da en la entrada de una máquina con capacidad para desarrollar múltiples procesos; en este caso habrá que seleccionar los procesos que son necesarios para cada producto (Figura 2.d). Los agentes encargados de dirigir estas tareas, mediante negociaciones, son los agentes físicos, es decir, los del nivel de planta de la arquitectura de control presentada: productos y recursos.

La forma de modelar estas tomas de decisiones ha sido mediante redes de Petri. Las redes de Petri (*Petri Nets*, PN) (Murata, 1989) constituyen una herramienta para la descripción de Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos (DEDS: *Discrete*

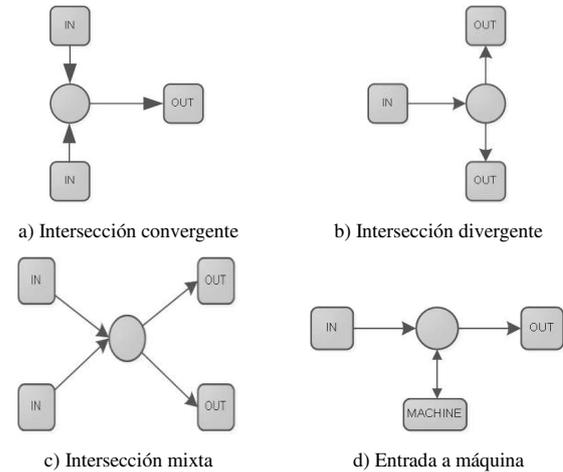


Figura 2. Toma de decisiones a nivel de planta.

Event Dynamic Systems), que abstraen la lógica de implementación de cada función de la planta. Las redes de Petri identifican el estado de los recursos de la planta y analizan su disponibilidad para atender los diferentes productos/peticiones. En los siguientes subapartados se modelan cada una de las tomas de decisiones, que aparecen en el funcionamiento en planta de un centro de distribución, utilizando las Redes de Petri.

3.2. Intersección convergente.

En primer lugar se va a modelar, de forma genérica, el funcionamiento de una intersección convergente, a la que llegan agentes producto desde una cinta transportadora 1 (c1) y desde una cinta 2 (c2). Se cuenta con el agente recurso cruce o intersección y un agente producto por cada producto/palé que intenta acceder al cruce. Existe la posibilidad de que concurran dos agentes producto simultáneamente. Como se puede observar en la PN (Figura 3), cada vez que se detecta un agente producto en el cruce (transición t1), se inicia la negociación (posición p1). Para el caso en el que incidan varios productos simultáneamente (transición t4) se inicia una negociación (posición p4) para decidir cuál de los agentes producto, que intentan acceder a la intersección, tiene mayor prioridad. Recordemos que la prioridad para elaborar cada producto se había negociado en el nivel de

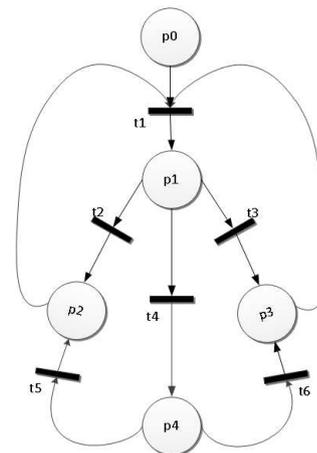


Figura 3. PN de una intersección convergente

gestión y puede cambiarse ante perturbaciones. Una vez concluida la toma de decisiones, el agente recurso (cruce/intersección) dispara (transición t5 o t6) las acciones necesarias (lugar p2 o p3) para que pase el producto elegido. Con el agente restante, o en el caso de que sólo exista un agente producto a la entrada de la intersección, la negociación es inmediata y el agente cruce da paso al agente producto disparando la transición t2 o t3, que llevan a realizar las acciones contenidas en la posición p2 o p3, respectivamente. Este modelo es fácilmente extensible al caso de una intersección convergente a la que llegan n productos.

Posiciones:

- P0: Estado inicial.
- P1: Es una negociación previa en la que se evalúan los agentes involucrados en la misma. Si sólo hay un agente producto y un agente recurso, la negociación es inmediata.
- P2: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para dejar pasar al agente producto procedente de c1.
- P3: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para dejar pasar al agente producto procedente de c2.
- P4: Lleva a cabo la negociación entre los agentes involucrados en la toma de decisiones, para así deliberar y determinar el orden de paso en la intersección. En primera instancia, en este proceso, el agente recurso evaluará cual es el agente producto que tiene mayor prioridad de elaboración, (prioridad que fue asignada por los agentes de gestión). Si tras la primera instancia no hay solución, (agentes con mismo nivel de prioridad), se consulta el nivel de prioridad de los agentes adyacentes y se pondera con el nivel de saturación de las cintas transportadoras.

Transiciones:

- t1: Se activa con la presencia de algún agente producto en alguna de las entradas de una intersección.
- t2: Se activa con la presencia de un agente producto en c1 y la no presencia de agente producto en c2.
- t3: Se activa con la presencia de un agente producto en c2 y la no presencia de agente producto en c1.
- t4: Se activa con la presencia de un agente producto en c1 y la presencia de agente producto en c2.
- t5: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p4, se determina que pase primero el agente producto procedente de c1.
- t6: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p4, se determina que pase primero el agente producto procedente de c2.

3.3. Intersección divergente.

A continuación se va a modelar de forma genérica el funcionamiento de una intersección divergente, desde la que un agente producto puede tomar diferentes caminos. Se cuenta con el agente recurso cruce o intersección y con el agente producto. Como se puede observar en la PN (Figura 4), se inicia un diálogo (posición p1) cada vez que llega un agente producto al agente cruce (transición t1). Recordemos que cada agente producto porta una instrucción con su destino. El agente cruce contiene la información relativa a las rutas que se pueden seguir desde ese

cruce. Se denominan como: cinta transportadora 1 (c1), cinta 2 (c2) y cinta 3 (c3) los posibles caminos que el producto puede tomar. Tras la negociación, el agente recurso dirige al agente producto hacia una de las posibles rutas: c1, c2 o c3, (posiciones p2, p3 o p4), a través del disparo de las transiciones t2, t3 o t4.

Es necesario aclarar que la toma de decisiones en una intersección divergente es selectora, ya que se toma al agente producto como unidad indivisible. Sin embargo, si entendemos como divergencia de simultaneidad el hecho de que a un producto se le puedan realizar 2 acciones simultáneas, (por ejemplo ponerle una etiqueta y enviarlo a una dirección determinada), entonces sí que habría situaciones de divergencia de simultaneidad.

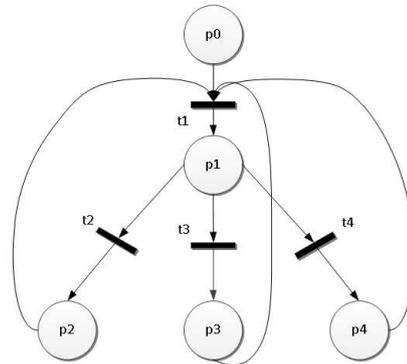


Figura 4. PN de una intersección divergente

Posiciones:

- P0: Estado inicial.
- P1: Lleva a cabo la negociación entre los agentes involucrados en la toma de decisiones, para así deliberar y decidir el camino a seguir tras la intersección. Este proceso de negociación está dirigido en función del destino que desea alcanzar el agente producto.
- P2: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para enviar al agente producto a la cinta transportadora c1.
- P3: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para enviar al agente producto a la cinta transportadora c2.
- P4: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para enviar al agente producto a la cinta transportadora c3.

Transiciones:

- t1: Se activa cuando llega un agente producto al cruce.
- t2: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p1, se determina que el agente producto va a continuar por el camino p2.
- t3: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p1, se determina que el agente producto va a continuar por el camino p3.
- t4: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p1, se determina que el agente producto va a continuar por el camino p4.

3.4. Intersección mixta

Este tipo de intersección es una combinación de las dos anteriores. En esta intersección convergen diferentes productos en un punto y, a partir de ahí, pueden tomar diferentes caminos. No

se detallan las transiciones y posiciones del mismo por su similitud con las anteriores.

3.5. Entrada a Máquina.

En este punto se va a modelar de forma genérica el funcionamiento de una máquina, (agente recurso), que ofrece diferentes procesos a un agente producto que se encuentra en su entrada. Como puede observarse en la Figura 5, cuando un agente producto llega a la entrada de la máquina (transición t1), se inicia una negociación entre el agente producto y el agente recurso (p1). De esta negociación se determina la realización de una serie de procesos con el disparo de las transiciones t2 o t3; o ninguna de ellas (t4). Una vez desarrollados los procesos (p2 o p3) el producto abandona la máquina (p4).

Posiciones:

- P0: Estado inicial.
- P1: Lleva a cabo la negociación entre los agentes involucrados en la toma de decisiones, para así deliberar y determinar los procesos que requiere el producto.
- P2: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para procesar los trabajos ofrecidos por p2.
- P3: Posee la secuencia de tareas que se deben llevar a cabo para procesar los trabajos ofrecidos por p3.
- P4: Posee la secuencia de tareas necesarias para dejar el producto en la salida de la máquina.

Transiciones:

- t1: Se activa con la llegada de un agente producto a la máquina.
- t2: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p1, se determina que el agente producto requiere que se le realicen los procesos de p2.
- t3: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p1, se determina que el agente producto requiere que se le realicen los procesos de p3.
- t4: Se activa si, tras la negociación llevada a cabo en la posición p1, se determina que el agente producto no requiere ninguno de los procesos ofrecidos por la máquina.
- t5: Se activa tras realizar los procesos incluidos en el lugar p2.
- t6: Se activa tras realizar los procesos incluidos en el lugar p3.

Se pone de manifiesto que, para alcanzar una toma de

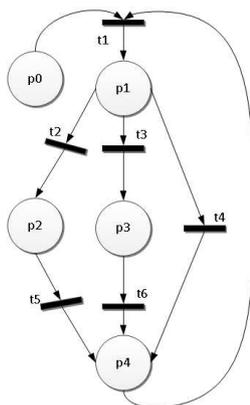


Figura 5. PN de entrada de máquina

decisiones correcta en planta, es necesario que las instrucciones que portan los agentes producto sean lo más correctas posible. De aquí la necesidad de que los agentes de gestión cuenten con información del estado de la planta para realizar una planificación correcta. Para ello se utilizan lectores RFID y se identifican los productos mediante etiquetas RFID.

Con los modelos de redes de Petri desarrollados, se puede observar como las tomas de decisiones pasan de estar localizadas en computadoras desligadas del controlador, (como ocurre en los sistemas centralizados o en los procedimientos basados en holones), a realizarse en el dispositivo de control en planta.

3.6. Estado de falla.

Para evitar la pérdida de la secuencia de las redes de Petri modeladas en los subapartados anteriores, se incluyen rutinas que funcionan en paralelo y se encargan de supervisar el perfecto funcionamiento de la red. De este modo, con el uso de temporizadores y de tiempos de duración máximos, se puede mover el estado de la red a posiciones de seguridad, en las que se solicita intervención de un operario o se solicita información adicional al nivel de gestión o se realizan rutinas para reiniciar el estado de la red. El modelo se muestra en la Figura 6.

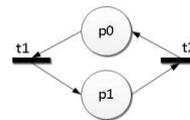


Figura 6. PN de estado de falla.

Posiciones:

- P0: Estado inicial.
- P1: Solicitud de intervención exterior

Transiciones:

- t1: Se activa cuando se supera el umbral marcado para realizar una tarea.
- t2: Se activa tras la corrección realizada por el operario o el nivel de gestión.

4. Prueba del Concepto: RFID-IMS

El propósito de este apartado es mostrar la implementación propuesta de agentes físicos sobre la plataforma experimental del Grupo AutoLog en la ETSII-CR. Para ello se describe, en primer lugar, la plataforma experimental y, a continuación, se muestra la implementación.

4.1. Plataforma Experimental

La plataforma experimental se muestra en la Figura 7. Está formada por la combinación de una parte física y otra virtual y representa las instalaciones de un centro de distribución. La virtualización se ha realizado mediante el software Grasp10 de BYG Systems y se controla de forma remota con una red de autómatas. Para alcanzar este funcionamiento ha sido necesario desarrollar una aplicación en JAVA que hace de puente entre las variables de los autómatas y las variables de Grasp. Esta aplicación hace uso de las librerías S7-beans de Siemens y de la capacidad de Grasp para trabajar bajo demanda vía *sockets*, consiguiendo que los autómatas lean los sensores de la virtualización y ejecuten su control sobre el centro de distribución en Grasp. En la parte virtual de la plataforma se representan los procesos de almacenaje y distribución, mientras que la parte física



Figura 7. Detalle de la plataforma experimental.

representa los procesos de carga y descarga que tienen lugar en las zonas de recepción y expedición de materiales, también conocidos como muelles de carga. Adicionalmente, se cuenta con una zona de producción de distintos tipos de productos. La plataforma experimental se ha diseñado buscando la máxima similitud con un centro de distribución real. Para alcanzar este objetivo, el control de la plataforma se le ha asignado a equipos industriales; esto es, equipos que, actualmente, realizan el control de los distintos elementos del área de producción y distribución en diferentes empresas.

La plataforma experimental se ha desarrollado basándose en los planos de las instalaciones del centro de distribución que aparecen en la Figura 8. Como puede observarse en dicha figura, estas instalaciones están divididas en dos plantas, denominadas Nivel 0 y Nivel 1. En el nivel inferior se realizan las entradas de productos al almacén, mientras que en el nivel superior es donde se llevan a cabo las salidas de productos y la preparación de palés mezclados o *picking*. Las instalaciones se componen de una serie de mesas de rodillos y cadenas, transelevadores, elevadores, zona de estanterías, zonas de entrada y salida de productos, zonas de preparación de picking y puntos de control. Una descripción detallada de la plataforma puede encontrarse en Encinas et al. (2012).

La plataforma cuenta con los siguientes controladores:

- S7-300 CPU313C-2DP con un módulo de comunicaciones CP-343-1 Advance. Es un autómata que cuenta con comunicaciones Profibus-DP, MPI, TCP/IP e Industrial Ethernet. Dentro de la red Profibus-DP actúa como maestro de red, por lo que tiene acceso a la periferia descentralizada de la misma.
- S7-200 CPU224 con EM277. Autómata que, con el módulo EM277, es capaz de conectarse a una red Profibus-DP. Se dispone de 6 unidades para controlar cada una de las partes que componen la plataforma, desde la simulación (uno para cada nivel y uno por trans-elevador, un total de 5), hasta la maqueta física, (el sexto). De este modo el control de la plataforma recae directamente sobre estos controladores.
- S7-1200 CPU1212C con pantalla HMI KTP600 en color. La zona de control se simula y controla a través de este autómata.
- Controlador NXP-1000 del Robot Motoman HP3. Utilizado para manipular las cargas físicas que entran en las instalaciones.

Existe comunicación Industrial Ethernet entre el S7-300 y el

S7-1200, o lo que es lo mismo, entre la zona de producción y la zona de distribución. Existe una red Profibus-DP entre el S7-300 y los 6 autómatas S7-200, configurada a 12 MB/s y con 10 estaciones, para maximizar la transferencia de datos. Adicionalmente, se han dispuesto dos PCs conectados en red para, por un lado, ejecutar la virtualización de la plataforma y, por otro, el sistema de gestión multiagente.

La plataforma también incorpora sistemas de monitorización; los más importantes son los lectores RFID.

4.2. Simulación de escenarios

Los puntos de tomas de decisiones presentes en la plataforma experimental son los que se muestran en la Figura 8. Como puede observarse en la figura, hay un total de 16 puntos de tomas de decisiones en el sistema.

Se ha comprobado el funcionamiento de la planta llevando a cabo un estudio en el entorno de simulación Witness (Figura 9). En la simulación se han modelado las instalaciones del centro de distribución correspondiente a la plataforma experimental, la entrada de productos (producción), la salida de productos (demanda) y la funcionalidad propuesta.

Sobre el modelo de la planta se ha analizado y validado el funcionamiento del sistema frente a varios escenarios. Los escenarios han sido ejecutados durante 700.000 segundos con un tiempo de *warmup*, (tiempo para estabilizar la simulación en el que no se almacenan resultados), de 50.000 segundos. Los escenarios y sus resultados son los siguientes:

- Escenario 1: El sistema trabaja en condiciones de funcionamiento normales o cotidianas. Bajo dichas condiciones el sistema es capaz de completar los pedidos en un tiempo medio de 20,6 minutos.
- Escenario 2: Se simula la rotura de uno de los transelevadores. En estas condiciones, el sistema completa los pedidos en 24,7 minutos de media, lo que supone un 20% más de tiempo con respecto al caso anterior.
- Escenario 3: Se simula la rotura de dos transelevadores. Recordar que el sistema cuenta con tres transelevadores. En estas condiciones, el sistema completa los pedidos en 55,2 minutos de media, lo que supone un 167% más de tiempo con respecto al escenario 1.

El procedimiento seguido en los escenarios 2 y 3 consiste en informar de la rotura al nivel de gestión, para que este recalcula la planificación, modificando las instrucciones que portan los agentes producto del nivel de planta.

Mediante el desarrollo de estos escenarios se comprueba el buen funcionamiento del sistema ante estados no conocidos, (ante situaciones imprevistas, perturbaciones o averías), como la rotura de transelevadores. Se puede comprobar como el sistema disminuye su rendimiento, al perder recursos principales, pero es capaz de adaptarse a las nuevas condiciones y seguir trabajando, demostrando su robustez. Este buen funcionamiento se debe a la posibilidad con la que cuentan los agentes de gestión de modificar los objetivos contenidos en las instrucciones que portan los agentes producto.

4.3. Implementación

Las diferentes secciones de la plataforma están controladas por cada uno de los autómatas S7-200, que junto al S7-300, forman una red Profibus-DP. El PLC Maestro es el encargado de canalizar todas las instrucciones transmitidas desde el nivel de gestión y repartirlas a los PLC esclavos de destino, así como

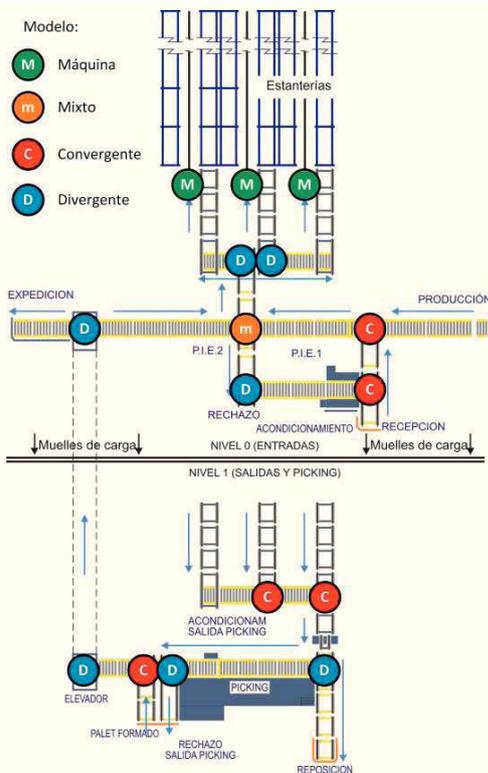


Figura 8. Localización de las tomas de decisión en la instalación

enviar la confirmación de la finalización de las mismas. El PLC Maestro se ha programado para gestionar toda la información mediante bloques de funciones. Cada PLC dispone de áreas de memoria reservadas como entradas de datos para la llegada de nuevas instrucciones. Cada nueva instrucción genera un agente producto que evoluciona dentro de la zona que controla dicho PLC. Una vez que concluye la instrucción o si el agente producto necesita avanzar hacia otra zona, (otro PLC), la instrucción tiene que pasar por el maestro de red.

Para el caso considerado de la plataforma experimental, las instrucciones presentan la estructura que se muestra en la Figura

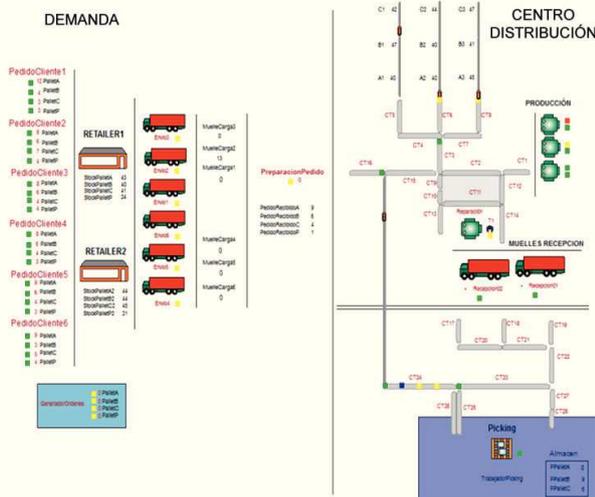


Figura 9. Modelo simulado en Witness.

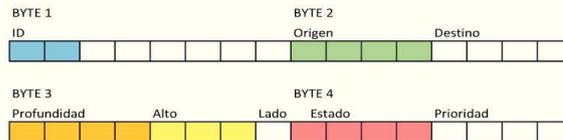


Figura 11. Plantilla de instrucción.

11. Se trata de una cadena binaria de 4 Bytes, (equivalente a un *Double Word* en variables PLC), que evoluciona por la memoria del PLC. Esto es, la planta está mapeada en la memoria de los autómatas y ligada a la realidad. Cada agente producto porta una instrucción que se corresponde con un palé en la realidad. Conforme evoluciona el agente producto en la planta, su palé avanza en la realidad. La instrucción incorpora: identificación del palé dentro del sistema de control, origen y destino del mismo, procesos restantes, un conjunto de *flags*, habilitados para la escritura de posibles errores producidos durante el cumplimiento de la instrucción y un espacio reservado para definir la prioridad de cada instrucción. Esta información se utiliza para negociar en las tomas de decisiones modeladas en el subapartado 3.1.

Para implementar las Redes de Petri en los PLCs se usan los diagramas de escalera o diagramas de contactos, (*LD, Ladder Diagram*). Estos diagramas están formados por contactos normalmente abiertos, normalmente cerrados, salidas, (representados por bobinas), y funciones. Las pautas que se siguen para convertir posiciones y transiciones (PN) a contactos (*LD*) se han ido perfeccionando desde (Uzam et al., 1996), hasta llegar a automatizar dicho proceso (Brusey et al., 2008), o definir estrictas reglas de formalización (Moreira y Basilio, 2011). Este proceso se basa en que las posiciones se representan como salidas (bobinas) y las transiciones como contactos.

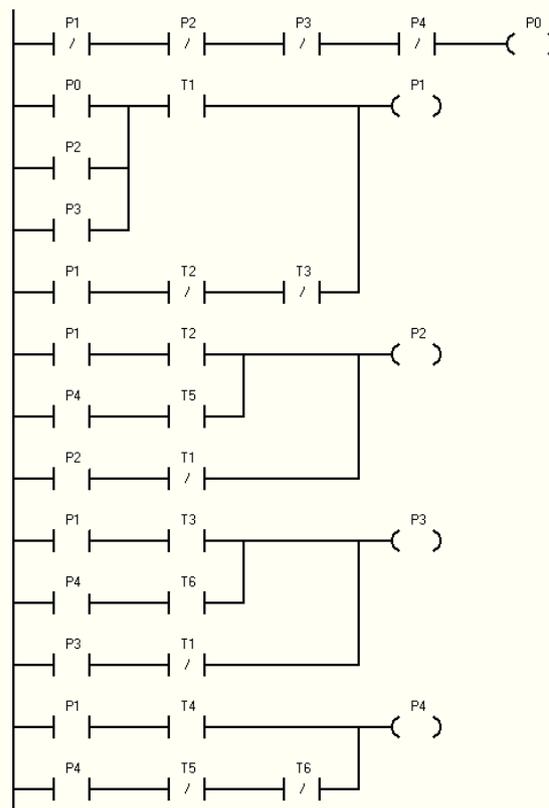


Figura 10. Diagrama de contactos de una intersección convergente

posición cuando, estando en una posición precedente, se dispare la transición que une ambas posiciones y nos mantendremos en dicha posición mientras no se dispare la transición de un arco saliente.

La acción de disparo se asocia con un contacto normalmente abierto y la de no disparo con un contacto normalmente cerrado. A cada salida (posición en la PN) se le asociarán los procesos contenidos en dicha posición.

Un ejemplo de conversión a diagramas de escalera se muestra en la Figura 10, en la que se representa el programa de una intersección convergente (PN de la Figura 3) bajo el entorno STEP 7-Micro/WIN de Siemens.

La red se inicializa bajo la premisa: si no está activa ninguna posición se marca la posición inicial (P0). La conversión de la Red de Petri a diagrama de contactos se implementa de la manera que se indica a continuación.

Cabe destacar la implementación de la negociación asociada a la posición P4. El marcado llegará a ese lugar si hay dos agentes producto en la entrada del agente recurso intersección convergente.

La posición p4 lanza la subrutina de negociación convergente, (Figura 12), cuyas variables de entrada son las posiciones de memoria que albergan la información de la instrucción y el agente producto asociado. Puede verse, (Figura 12), que se trata de una función modular, que puede llamarse cada vez que sea necesario llevar a cabo una negociación en una intersección convergente de dos productos. Este modelo es fácilmente extrapolable al caso de “n” productos.

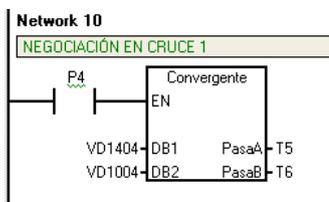


Figura 12 . Llamada a rutina de negociación convergente.

La subrutina convergente, (Figura 13), tiene dos datos de entrada, que representan las instrucciones, ocupando 4 bytes y dos salidas booleanas. Hace uso de dos variables temporales para extraer el dato de prioridad de cada instrucción. En esta subrutina se evalúa el nivel de prioridad de dos instrucciones. Puede verse (Figura 13) como, en primer lugar, se filtra el campo que contiene la prioridad, (atendiendo a la posición donde se encuentra dentro de la instrucción), y a continuación se evalúa cuál de ellas es la que conlleva la mayor prelación. En el caso de que ambas instrucciones tengan prioridades iguales, entra en juego el nivel de saturación de las cintas, mediante consulta a los agentes producto y recurso adyacentes.

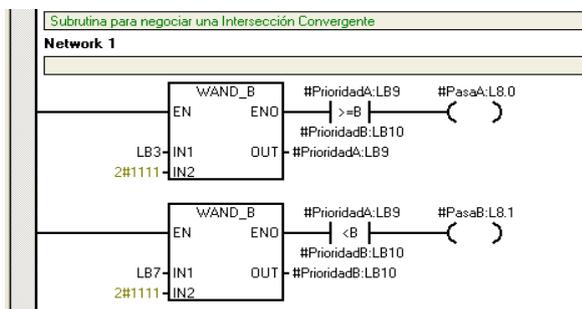


Figura 13. Implementación de negociación convergente.

Siguiendo las mismas pautas se pueden implementar cada una de las tomas de decisiones modeladas mediante Redes de Petri.

4.4. Resultados

Tras implementar en la plataforma los modelos de tomas de decisiones, se han realizado una serie de pruebas de funcionalidad. En primer lugar se han generado instrucciones individualmente indicando: posición inicial, posición final y prioridad. Para el caso en el que entra un palé al centro de distribución, desde producción o recepción, y ha de almacenarse en una ubicación preestablecida del almacén, se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema al constatar que tanto el agente producto avanza en las áreas de memoria de los autómatas, como el palé físico al que se corresponde avanza en el centro de distribución de la plataforma experimental. De este modo, también se ha comprobado que la toma de decisiones entre el agente producto y los agentes recurso se realiza correctamente y el perfecto funcionamiento de la red Profibus DP, ya que el agente producto que porta la instrucción ha de pasar por varios autómatas.

Gradualmente, se ha aumentado el número de agentes producto en el centro de distribución, llegándose a ejecutar 37 agentes producto y 16 agentes recurso simultáneamente, lo que supone más de un 80% de ocupación de los sistemas de manipulación de materiales con los que cuenta la plataforma.

El tiempo de respuesta del sistema es directamente proporcional al tiempo de ciclo, (*Scan Time*), del autómatas. En nuestro caso se han monitorizado las variables SMW24 y SMW26, que indican los valores mínimos y máximos del *Scan Time*, obteniendo unos tiempos de ciclo entre 5 y 8 ms. Este tiempo es el que influye en el tiempo de retardo del sistema.

En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en función del estado de ocupación de las instalaciones, (observando las cintas transportadoras, CTs), el número de agentes y el tiempo medio que necesita el sistema para completar una instrucción. Se observa como al aumentar el número de agentes producto en las instalaciones, y con ello el número de productos en las instalaciones, el tiempo necesario para completar una instrucción aumenta como media un 18%.

Tabla 1: Comparativa de resultados

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
CTs en las instalaciones	46	46	46
Nº de agentes producto	1	18	37
Nº de agentes recurso	16	16	16
% Ocupación instalación	2,2%	39,1%	80,4%
Scan Time PLC	5 ms	6,3 ms	8 ms
Tiempo medio instrucción	0,85min	0,92min	1,03min

En relación al porcentaje de fallos del sistema, hay que destacar que los controladores industriales son equipos que, al ser sometidos a pruebas de ensayo, han demostrado ser lo suficientemente robustos para garantizar una tolerancia ante fallos muy elevada. Sin embargo, por la idiosincrasia de la plataforma experimental usada, han existido fallos puntuales en la actualización de los valores de sensores, a medida que aumenta el número de palés en las instalaciones, lo que da lugar a un breve mal funcionamiento, (inferior a 2 segundos), lo que también empeora el tiempo necesario para completar una instrucción. El responsable de estos fallos es la interfaz que hace de puente entre los sensores y actuadores virtuales de la visualización y los autómatas. Estos fallos no existirían en una instalación real.

Otras pruebas realizadas han sido las de modificar instrucciones en curso. No se han observado retrasos apreciables en la modificación.

En relación a las características de los agentes se ha comprobado:

- La reactividad de los agentes. Cada agente responde e interacciona con los elementos de su entorno.
- Su autonomía, al ser entes independientes que dirigen su funcionamiento. Tómese como ejemplo cada uno de los agentes producto que evoluciona en la plataforma de manera autónoma sin supervisión ni control.
- La proactividad. En todo momento, el funcionamiento de los agentes está dirigido a alcanzar los objetivos marcados en la planificación, que en este caso son el destino final y los procesos que requieren.
- La capacidad social. La toma de decisiones implementada la se realiza por negociación entre los agentes involucrados.

Por último, comentar que, para alinear el funcionamiento individual de los agentes con los objetivos generales del sistema, se han reservado áreas de memoria para modificar las instrucciones en curso, y de esta forma incidir en el funcionamiento de los agentes del nivel de planta. Este hecho tiene las ventajas que se presentan a continuación.

4.5. Respuesta ante Imprevistos

El protocolo de prioridades implementado en los agentes producto y recurso, y la posibilidad de su modificación en tiempo real, suponen un gran avance en los sistemas de control. Particularmente en los casos de replanificación, en los que tras la llegada de una incidencia, (p.e. el caso de un pedido urgente), es necesario modificar la planificación actual para responder a las nuevas necesidades impuestas. En un sistema tradicional esto conllevaría la introducción de nuevas órdenes de forma manual, con la consiguiente desviación en la planificación, o la imposibilidad de actuar. Con el enfoque propuesto, el sistema, además de generar nuevas instrucciones de manera automática, puede modificar las ya existentes en planta alterando su prioridad, su destino, o reasignándolas a otro pedido. Al modificar la información de las instrucciones se influye directamente en el funcionamiento de los agentes producto y, con ello, en el funcionamiento de la planta.

Adicionalmente, un factor clave en esta forma de actuar es la existencia de lectores RFID en localizaciones específicas. Con ellos se genera la visibilidad necesaria para que los agentes de gestión modifiquen de manera eficiente las instrucciones en planta y no se hostigue de manera innecesaria a los agentes producto. Tomemos el caso de un pedido que está a falta de una instrucción para estar completo. Los agentes de gestión, con el afán de finalizar dicho pedido, empezarán a aumentar la prioridad de la instrucción pendiente. Sin embargo, puede darse el caso de que ese aumento de prioridad no suponga ventajas en la compleción del pedido, ya que este se encuentra en las proximidades de la cinta de transporte de salida, pero se encuentra bloqueado por otros pedidos e instrucciones. Con el hostigamiento llevado a cabo por los agentes de gestión se puede llegar a saturar el canal de comunicaciones sin mejorar los resultados. Gracias a la incorporación de los lectores RFID, y a etiquetar cada palé con una etiqueta RF, los agentes de gestión tienen una imagen del estado de la planta, lo que permite reasignar productos a los pedidos más urgentes y disminuye el tiempo de compleción de pedidos en momentos críticos. Esto

permite incorporar a los pedidos en curso en los procesos de replanificación, alcanzándose así sistemas con una agilidad no vista hasta ahora.

5. Conclusiones

En este trabajo se analiza el problema de la implementación de la tecnología de agentes en entornos industriales, los conocidos agentes físicos. La motivación de su aplicación recae en la necesidad de generar sistemas de control reactivos y capaces de hacer frente a los imprevistos que surgen en el funcionamiento cotidiano de las empresas, a la par que distribuidos, para poder manejar la complejidad de los sistemas. Se ha tomado como referencia el concepto RFID-IMS, que aplica la tecnología RFID a los sistemas multiagente para aumentar la visibilidad de los sistemas. Se ha definido una arquitectura de agentes, dividida en dos niveles: planta, (control de planta), y gestión, en la que la parte de gestión se encarga de la planificación de tareas, (generando instrucciones), mientras que el nivel de planta es el que lleva a cabo esa planificación. Para ello, cada instrucción se asocia a un agente producto que se encargará de cumplirla, en coordinación con el resto de agentes producto y recurso de la planta.

El objetivo de RFID es el de aumentar la visibilidad en el funcionamiento del nivel de gestión, ya que proporciona información del estado de planta sin necesidad de saturar el bus de comunicaciones de los agentes. Esta visibilidad mejora la planificación de tareas.

Esta es una producción dirigida por los productos, siguiendo las filosofías de productos inteligentes propuesta por McFarlane et al. (2013). Cada uno de estos agentes producto avanza por las áreas de memoria de los autómatas y se corresponde con palés físicos de las instalaciones.

Se han modelado las tomas de decisiones que aparecen en la manipulación de cargas, en un centro de distribución, mediante el uso de las Redes de Petri. Se han identificado cuatro tipos de tomas de decisiones: intersección convergente, intersección divergente, intersección mixta y entrada a máquina. Estas tomas de decisiones se resuelven mediante negociación entre los agentes de planta, (producto y recurso), tomando la información contenida en las instrucciones provenientes del nivel de gestión, tal como: prioridad de elaboración, procesos necesarios y destino final del producto.

Las tomas de decisiones modeladas han sido implementadas satisfactoriamente sobre los autómatas que controlan una plataforma experimental, que representa las instalaciones de un centro de distribución. Se ha mostrado como esta implementación tiene unos tiempos de respuesta adecuados, a la par que se ponen de manifiesto las cualidades de los agentes.

Se ha demostrado como las tomas de decisiones de planta pasan de estar localizadas en computadoras desligadas del controlador, (como ocurre en las arquitecturas de holones o en sistemas centralizados), a realizarse en el dispositivo de control de planta, garantizando de este modo la reactividad y robustez necesaria en los sistemas actuales.

Adicionalmente, la posibilidad de modificar en tiempo real la información de las instrucciones que indican los objetivos del sistema y la visibilidad que proporciona RFID de la planta, faculta al sistema para hacer replanificaciones en las que se incluyen los productos en curso.

En líneas futuras, este trabajo estudiará la posibilidad de incluir nuevas capacidades en los agentes recurso del nivel de

planta, (como contar con recursos móviles, AGVs) e investigará su aplicación en la preparación de pedidos picking, parte importante dentro de un centro de distribución

English Summary

Physical Agents and RFID for the implementation of the Shop Floor Control on a Distribution Centre.

Abstract

The application of the multi-agent systems technology for shop-floor control has generated great expectations among professionals and researchers in the last decade. The use of this technology conveys, by the definition of the agents, reactive systems (able to respond to changes), proactive systems (their behavior is oriented towards the achievement of predefined objectives), autonomy, and social skills (consensual decision making), causing the emergence of many initiatives. Unfortunately, most references on this field are mainly concerned with: the definition of agents, statements of intent, simulations or rather ambitious proposals; which prevents industry from adopting this technology.

This paper presents an approach to implement the agents in charge of the shop floor control, known as physical agents or holons, on a test bench that represent the installations of an automated distributed center. The concept of holon has been adapted to keep the decision making in the industrial controller. The work is focused on reach an intelligent decision making at the shop floor. For what, two kind of agents have been defined, and the decision makings at shop floor have been modelled by means of Petri Nets. Finally, models have been implemented over programmable logic controllers.

Keywords:

PLCs, Multi-Agent System, Shop Floor Control, RFID, Petri nets.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado con el respaldo del Ministerio Español de Economía y Competitividad mediante la ayuda de referencia DPI2012-35227 al proyecto de título: “Sipail: Seguimiento Integral en Producción, Automatización Industrial y Logística”.

Referencias

- Brennan, R., Gruver, W., Hall, K., 2011. Forward-Special Issue on Industrial Applications of Holonic Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews* 41, 1-3.
- Brusey, J., McFarlane, D.C., Thorne, A., 2008. Nonautonomous Elementary Net Systems and Their Application to Programmable Logic Control. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on* 38, 397-409.
- Bussmann, S., Jennings, N., Wooldridge, M.J., 2004. Multiagent systems for manufacturing control: a design methodology. Springer-Verlag New York Inc.
- Encinas, J., García, A., de las Morenas, J., 2012. Improvements in operations management applied to a 3D simulation connected to a physical platform. *Journal of Intelligent Manufacturing* 23, 845-856.
- García, A., Cenjor, A., 2007. Sistema Heterárquico de Control Basado en Agentes para Sistemas de Fabricación. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI)* 4, 83.
- García Ansola, P., de las Morenas, J., García, A., Otamendi, J., 2011. Distributed decision support system for airport ground handling management using WSN and MAS. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25, 544-553.
- Leitão, P., 2009. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22, 979-991.
- Leitão, P., 2011. A holonic disturbance management architecture for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 49, 1269-1284.
- Mařík, V., Fletcher, M., Pěchouček, M., 2002. Holons & agents: recent developments and mutual impacts. *Multi-Agent Systems and Applications II*, 89-106.
- McFarlane, D., Giannikas, V., Wong, A.Y., Harrison, M., 2013. Intelligent Products in the Supply Chain - 10 Years on, Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics. Springer Berlin Heidelberg, pp. 103-117.
- Mendes, J.M., Leitão, P., Colombo, A.W., Restivo, F., 2008. Service-oriented control architecture for reconfigurable production systems, 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics., pp. 744-749.
- Moreira, M.V., Basilio, J.C., 2011. Bridging the Gap Between Design and Implementation of Discrete-Event Controllers. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* 11, 48-65.
- Murata, T., 1989. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the Ieee* 77, 541-580.
- Pechouček, M., Mařík, V., 2008. Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 17, 397-431.
- Sallez, Y., Berger, T., Raileanu, S., Chaabane, S., Trentesaux, D., 2010. Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23, 1314-1326.
- Soylemezoglu, A., Zawodniok, M., Cha, K., Hall, D., Birt, J., Saygin, C., Sarangapani, J., 2006. A testbed architecture for Auto-ID technologies. *Assembly Automation* 26, 127-136.
- Sujono, S., Lashkari, R.S., 2007. A multi-objective model of operation allocation and material handling system selection in FMS design. *International Journal of Production Economics* 105, 116-133.
- Theiss, S., Vasyutynskyy, V., Kabitzsch, K., 2009. Software Agents in Industry: A Customized Framework in Theory and Praxis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 5, 147-156.
- Thorne, A., McFarlane, D., Hodges, S., Smith, S., Harrison, M., Brusey, J., Garcia, A., 2003. The AutoID Automation Laboratory: Building Tomorrow's Systems Today. Auto-ID Centre White Papers. University of Cambridge.
- Uzam, M., Jones, A.H., Ajlouni, N., 1996. Conversion of Petri net controllers for manufacturing systems into ladder logic diagrams, *Emerging Technologies and Factory Automation, 1996. EFTA '96. Proceedings., 1996 IEEE Conference on*, pp. 649-655 vol.642.
- Van Brussel, H., Wyls, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., Peeters, P., 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry* 37, 255-274.
- Vrba, P., Macurek, F., Mařík, V., 2008. Using radio frequency identification in agent-based control systems for industrial applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21, 331-342.
- Vrba, P., Tichý, P., Mařík, V., Hall, K.H., Staron, R.J., Maturana, F.P., Kadera, P., 2011. Rockwell Automation's Holonic and Multiagent Control Systems Compendium. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews* 41, 14-30.
- Vyatkin, V., 2011. IEC 61499 as Enabler of Distributed and Intelligent Automation: State-of-the-Art Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1-1.
- Wooldridge, M., Jennings, N., 1995. Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering Review* 10, 115-152.
- Wooldridge, M.J., 2002. An introduction to multiagent systems. Wiley.
- Zacharewicz, G., Deschamps, J.-C., Francois, J., 2011. Distributed simulation platform to design advanced RFID based freight transportation systems. *Computers in Industry* 66, 597-612.