

Sistemas de control de la producción basados en colonias de hormigas

Juan José Lavios Villahoz¹, Miguel Ángel Mariscal Saldaña¹, Óscar González Alcántara¹, Ignacio Fontaneda González¹

¹ Area de Organización de Empresas. Dpto. Ingeniería Civil. Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Av. Cantabria s/n, 09005 Burgos. jjlavios@ubu.es, mariscal@ubu.es, ojgonzalez@ubu.es, ifontane@ubu.es

Resumen

En este artículo se muestran algunas de las principales aplicaciones que se han desarrollado en el ámbito del control dinámico de la producción utilizando mecanismos de coordinación basados en sistemas naturales. Estos sistemas presentan dos características fundamentales: la emergencia del comportamiento global deseado a partir de agentes simples y la coherencia del mismo, es decir, un patrón estable de comportamiento de forma que se tenga un sentido de "identidad" a lo largo del tiempo.

Palabras clave: Control descentralizado de la producción, Sistemas multi-agente

1. Introducción

La intensificación de la competencia que se viene produciendo en los últimos años debido a la globalización de los mercados, ha llevado a las empresas a tener que evolucionar hacia estructuras distribuidas donde las decisiones se toman de forma descentralizada, principalmente para mejorar su respuesta ante los cambios y dotarlas de una mayor flexibilidad.

En las actividades de programación de la producción estas características son particularmente necesarias dado que los sistemas de programación de la producción utilizados necesitan de tiempos de cálculo importantes que limitan su utilización. Los sistemas tradicionales de planificación tratan de realizar de antemano un plan que optimice las operaciones de producción para el siguiente periodo. Sin embargo los cambios que se producen en la realidad hacen que dichos planes queden obsoletos en el momento en que se lanzan a producción. Nunca se consigue el óptimo que se había planificado, ya que las condiciones con que se habían planteado han cambiado.

Los sistemas multiagente han demostrado su utilidad como herramienta de modelado de sistemas distribuidos. Uno de los atractivos de los estos sistemas es su capacidad para organizar conjuntos de agentes y adaptarse de forma dinámica a las circunstancias cambiantes sin necesidad de que exista un control superior que controle el sistema. En el desarrollo de sistemas multiagentes existen dos tendencias: la primera busca el desarrollo de agentes con altas capacidades que pretenderían emular la inteligencia humana, mientras que la segunda busca lo contrario, el desarrollo de agentes simples cuyas interacciones lleven a que emerja el comportamiento deseado del sistema. Un recurso utilizado para definir el comportamiento de

los elementos y sus interacciones ha sido la observación de sistemas naturales cuyos mecanismos de coordinación han demostrado ser eficientes.

Colonias de hormigas que encuentran la ruta más corta entre la fuente de alimento y el hormiguero, las termitas en la construcción de sus nidos o los bancos de peces y bandadas de pájaros a la hora de desplazarse de forma conjunta como mecanismo de defensa ante posibles depredadores son modelos que la naturaleza nos brinda. Estos sistemas se caracterizan por estar compuestos por un número elevado de individuos simples que siguen unas mismas pautas de comportamiento, y que mediante la interacción de los individuos y con el entorno, y sin ningún tipo de control centralizado resuelven problemas complejos. En todos ellos, el comportamiento conjunto del sistema no está planificado sino que se mantiene por la dinámica de sus interacciones, adaptándose a los cambios que se van produciendo. Esta idea base es la que utilizaremos en el desarrollo de sistemas multiagente dedicados a la programación de recursos.

2. Sistemas naturales

Existen sistemas naturales, como las colonias de insectos en las que un número elevado de individuos siguen todas las mismas reglas de comportamiento. Mediante la interacción de los individuos y con el entorno, y sin ningún tipo de control centralizado realizan la asignación de tareas entre los individuos de la colonia o la distribución de portadores entre las fuentes de alimento disponible. (Hirsh & Gordon 2001) Estas colonias de insectos las tareas funcionan de forma distribuida en el sentido de que funcionan sin ningún tipo de organización jerárquica. La información se encuentra dispersa a lo largo de toda la colonia. La existencia de un procesamiento paralelo se manifiesta en la capacidad de la colonia de responder a información que se encuentra fuera del alcance de la capacidad sensorial o cognitiva de un individuo dado.

Otra característica interesante es que los individuos no interactúan de forma directa, sino indirecta mediante señales que van dejando en el entorno (como en el caso de las feromonas que depositan las hormigas). Esto hace que sean una alternativa a los sistemas de coordinación mediante negociación, ya que consumen menos recursos en el proceso de coordinación.

Por último, indicar que son sistemas no planificados. Mientras que los sistemas tradicionales de planificación tratan de realizar de antemano un plan que optimice las operaciones de producción para el siguiente periodo (día, semana...) los sistemas naturales no planifican, sino que ajustan sus operaciones a los cambios del entorno. Los cambios que se producen en la realidad hace que en los sistemas tradicionales, dichos planes queden invalidados: nunca se consigue el óptimo que se había planificado. En el caso de los sistemas naturales, la dinámica de su comportamiento se mantiene por la dinámica de sus interacciones, que no viene impuesta por un plan externo.

El potencial de estos sistemas ha sido utilizado en distintos campos de investigación y estas aplicaciones han logrado un elevado grado de desarrollo. Un ejemplo es la aplicación a la resolución del problema del viajante. (Dorigo & Gambardella 1997)

Podemos citar algunos ejemplos de sistemas naturales compuestos por entidades simples que en base a la interacción entre los individuos consiguen un comportamiento complejo del

sistema a partir del comportamiento de cada individuo. Cada individuo sigue una serie de reglas simples. (Parunak 1997):

- Hormigas: las hormigas construyen redes de caminos que conectan sus nidos con las fuentes de comida disponible. Esas redes consiguen minimizar la energía que gastan las hormigas en trasladar la comida desde su punto de origen al nido. Las hormigas van dejando un rastro de feromona que hace que los caminos más eficientes sean los más transitados, y por tanto se refuerce su uso, mientras que los menos eficientes son abandonados.
- Termitas: construcción del nido. Enormes nidos de termita (de hasta 5 m de altura y hasta diez toneladas de masa) son construidos sin que exista ningún individuo que lo coordine. Este mecanismo se realiza también a través de feromonas que van junto con cada carga que deposita cada termita. Esto hace que todas las termitas terminen depositando su carga en el mismo lugar, con lo que el nido se va construyendo.
- Bancos de peces y bandadas de pájaros: Los peces y los pájaros exhiben un comportamiento como sistema basado en el comportamiento de cada individuo. El banco o la bandada se desplaza como si fuera una sola entidad. Cada individuo sigue unas reglas simples: (i) mantener una separación mínima con el objeto más cercano u otros pájaros, (ii) igualar la velocidad (módulo y dirección) de los pájaros más cercanos, (iii) permanecer cerca del centro del grupo. De esta forma el banco o bandada actúa como un conjunto que responde a las acciones de cada individuo y que adapta su estructura. Aunque cada pájaro o pez percibe solo los movimientos de sus compañeros más cercanos, sus respuestas a estos movimientos se propagan a otros, de modo que el sistema en conjunto muestra una coordinación global.

¿Qué es lo que resulta atractivo de estos sistemas? Que son capaces de lograr sistemas en los que, utilizando agentes simples que se rigen mediante reglas, aparece un comportamiento complejo en el sistema.

Plantear un sistema multiagente basado en agentes simples presenta ventajas significativas respecto a su planteamiento mediante agentes complejos, con comportamiento inteligente. Estas son:

- la construcción de cada agente es sencilla.
- la incorporación o la salida del sistema de un determinado agente se realiza de forma fácil
- si el tamaño del individuo respecto al sistema es lo suficientemente pequeño cualquier incidencia sobre el individuo no afecta de forma significativa en el sistema. Se puede reconfigurar sin que provoque una grave alteración en todo el sistema (pensemos como afecta al hormiguero la desaparición de una hormiga porque se haya perdido o porque haya muerto en el camino)

2.1 Características buscadas: emergencia del comportamiento, coherencia, robustez y auto-organización

Una de las características que deben mostrar los sistemas compuestos por agentes simples es la emergencia del comportamiento global (De Wolf & Holvoet 2005). El comportamiento global debe emerger de la interacción entre los elementos que lo conforman. Las propiedades emergentes en el nivel del sistema no son reducibles al nivel de las partes que lo componen. Esto significa que las propiedades emergentes no pueden ser estudiadas separando físicamente las unidades en las que se divide y analizándolas. Sin embargo, si que es posible ser estudiadas en el contexto del sistema al cual pertenecen.

Los sistemas que presentan comportamientos emergentes deben presentar además coherencia, es decir, un patrón estable de comportamiento de forma que se tenga un sentido de “identidad” a lo largo del tiempo, aunque esto no impida que sea dinámico.

El sistema que se obtenga debe ser robusto. Los comportamientos emergentes tienen una relativa baja sensibilidad a las perturbaciones o a los errores. El fallo de una entidad individual no puede causar un fallo completo del comportamiento emergente. Estos sistemas, y dado que el procesamiento de información no está jerárquicamente organizado sino que se realiza de forma paralela y distribuida, son especialmente vulnerables a la propagación y uso de información errónea. Para protegerse contra esto algunos sistemas han desarrollado estrategias de defensa como puede ser el uso de información redundante.

El sistema se organiza por sí mismo, sin ninguna influencia, manipulación o control externo, sólo a través de la interacción de los individuos que lo conforman. La relación del sistema y las partes es doble: Son las interacciones de las partes las que posibilitan el comportamiento emergente, y, a su vez, la estructura emergente influye en sus componentes. p.e. en el caso de las hormigas que van indicando el camino hacia el alimento, el camino influye en el comportamiento de las hormigas induciéndolas a seguirlo.

2.2 Colonias de hormigas como paradigma de sistemas basados en agentes simples

Podemos encontrar las características indicadas en el punto anterior en los sistemas de hormigas en el proceso de búsqueda y traslado del alimento al hormiguero. El mecanismo de interacción utilizado por las hormigas es conocido como *stigmergy*. Este concepto describe una forma de interacción asíncrona e indirecta entre individuos usando el entorno como medio para la transmisión de información. La comunicación entre individuos de una colonia de insectos se produce por modificaciones locales inducidas en su entorno. El término *Stigmergy* recoge el proceso mediante el cual una determinada señal (*stigma*) provoca una acción (*ergon*). Las colonias de hormigas emplean un mecanismo de coordinación basado en la diseminación de una sustancia (feromona) en el entorno.

La característica de estos sistemas es que los participantes no se comunican directamente y de modo síncrono con otros, incluso no tienen que conocer la existencia de otros. Sin embargo, el empleo de un elemento de mediación en la comunicación (la feromona) hace el mecanismo de cooperación efectivo y eficiente.

Las hormigas están dotadas de un grado de inteligencia bajo y su capacidad de percepción del entorno está muy limitada. Las hormigas actúan siguiendo la siguiente estrategia:

- si no hay feromonas las hormigas exploran el entorno de forma aleatoria.
- las hormigas van dejando a su paso feromonas que se evaporan con el paso del tiempo.
- las hormigas escogen de forma preferente los caminos señalados por las feromonas de modo que cuanto más intenso es el olor de la feromona más probabilidad hay de que siga ese camino, mientras que un camino con una intensidad de feromona bajo es poco probable que sea seguido.

Esta simple estrategia hace que la colonia escoja la ruta óptima desde el nido a la fuente de alimento. Esto puede ser explicado del siguiente modo (Gao, Luo, & Yang 2005):

- inicialmente las hormigas siguen cualquier camino de modo aleatorio.

- supongamos que inicialmente hay dos hormigas que toman distintas decisiones de forma aleatoria. Cuando la primera hormiga vuelva en ese momento la ruta más corta tendrá más feromonas y por tanto tendrá más probabilidad de ser elegida. El rastro de feromona que va dejando esta hormiga reforzará el camino.
- cuando la hormiga que ha llegado más tarde (porque ha cogido el camino más largo) vuelva, habrá más probabilidades de que escoja el camino más corto, reforzándolo también de este modo.
- incluso si la segunda hormiga ha elegido como camino de vuelta el más largo el refuerzo que se producirá en el camino al paso de la hormiga (ya que va depositando el rastro de feromonas) será menor que en el camino más corto dado que el tiempo que transcurre desde que sale la hormiga hasta que llega al hormiguero es mayor. Esto es debido a que el efecto de la feromona se va disipando con el tiempo.
- como resultado de lo anterior, las hormigas tenderán cada vez con más probabilidad a ir por el camino más corto, siendo un proceso que se va reforzando de forma positiva.

De la observación del comportamiento de las hormigas podemos extraer las siguientes conclusiones:

- las hormigas se coordinan mediante un mecanismo de cooperación implícito, es decir, que cada individuo no demanda al resto que coopere. Por tanto, podemos pensar que los participantes no saben de la existencia de los demás y que forman una comunidad.
- cada individuo es simple y reactivo. No tienen intención de cooperar con otros, por tanto no necesitan comunicarse directamente con ellos ni planificar funciones.
- los individuos interactúan de forma indirecta y asíncrona. No interactúan con otros directamente. Usan el entorno como medio. A través de él perciben y actualizan la información para llevar a cabo la comunicación.
- los individuos toman decisiones de acuerdo a una información agregada. El camino indicado por la feromona está construido por muchas hormigas, por tanto agrega la información a partir de las decisiones tomadas por todos los individuos.
- la búsqueda aleatoria de cada individuo hace que sea posible encontrar nuevas soluciones y alejarse de óptimos locales
- la evaporación de las feromonas permite borrar la información que no esté actualizada. El problema puede converger rápidamente hacia una solución.
- Además de la información que dos individuos pueden transmitirse entre sí, otra variable que resulta fundamental es el tiempo que transcurren entre las interacciones, sirviendo este tiempo para confirmar y evaluar la magnitud de la perturbación.

3. Sistemas desarrollados que utilizan sistemas de coordinación basados en colonias de hormigas

Aunque quizá la aplicación más conocida de estos sistemas es la desarrollada en problemas estáticos, como la aplicación a la resolución del problema del viajante, también están siendo aplicados en problemas dinámicos como es el caso de control de la producción. En este punto revisamos algunas de las arquitecturas de control en producción que utilizan sistemas de coordinación basados en los mecanismos de coordinación que utilizan las colonias de hormigas para encontrar la ruta óptima que une la fuente de alimento y el hormiguero. Para ello se analiza como los elementos clave que posibilitan la coordinación en el medio natural han sido implementados en las diferentes soluciones propuestas.

3.1 MASCADA

El proyecto MASCADA investiga la aplicación de la tecnología agente a los sistemas de producción flexible. Su descripción más detallada aparece en (Peeters et al. 2001)

Su objetivo central es la gestión de las perturbaciones y los cambios que se producen en la actividad diaria del taller de producción, de forma que el control se adapte a estas situaciones sin que se tengan que desarrollar mecanismos específicos para gestionar cada una de las perturbaciones.

Características de MASCADA:

- Naturaleza distribuida. Asociada al sistema físico que representa (recursos, nodos de decisión), cada elemento de la planta tiene su correspondiente ubicación en el modelo.
- Utiliza la arquitectura PROSA, acrónimo de *Product, Resource, Order y Staff* (Van Brussel et al. 1998)
- Toma de decisiones por niveles. Plantea un nivel inicial donde se toman decisiones básicas (en este caso comprobar cuáles son las posibles rutas y evitar los bloqueos en las mismas). Otro nivel posterior trataría de optimizar las rutas.
- Los agentes tienen un conocimiento parcial de su entorno. No tienen un modelo del sistema general puesto que solo requieren de un conocimiento limitado del sistema global y tratan con la información que está disponible localmente. Los agentes sólo interactúan con su entorno local y no con otros agentes. Esto hace que introducir o quitar agentes al modelo sea fácil, puesto que cada agente no conoce la existencia de otros.

MASCADA trata de integrar el mecanismo de coordinación mediante feromonas en el control de la producción. En este caso la el papel de la colonia de hormigas lo toma un conjunto de agentes que conforma una sociedad artificial. Esta sociedad de agentes tiene que cumplir las tareas propias de control de la producción. Se necesita crear unos mecanismos de coordinación para crear un comportamiento global coherente a partir de las actividades de cada agente individual.

Para modelar el sistema de control de forma acorde con los principios de las sociedades de insectos introduce los tres conceptos fundamentales en las estructuras software:

- el papel de cada hormiga individual que se encarga de la toma de decisión, interpretación de la información (recepción de las señales) y de la diseminación de la información (depósito de la feromona). Este papel lo toman los *agentes orden* (agentes que representan a las órdenes de fabricación) y *agentes recurso* (agentes que representan los recursos de fabricación).
- la feromona que se representa mediante un “objeto feromona” que es portador de cualquier tipo de información relacionada con la producción. Una de las características de este objeto es la “intensidad”, característica cuyo valor se va reduciendo con el tiempo y que va a ser la que determine la importancia y la precedencia sobre otros “objetos feromona”, por tanto será fundamental a la hora de establecer prioridades en la propagación.
- El concepto de *entorno* en el que opera la hormiga es traspasado en el modelo como “*entorno de feromona*” y que sirve para poder extender el *objeto feromona*. Se trata esencialmente de una red de *agentes recurso* conectados entre sí de acuerdo con las rutas físicas de transporte en la planta de producción. Los nodos en esta estructura representan lugares en cada recurso donde pueden depositarse las feromonas, y los vínculos representan los caminos a lo largo de los cuales se propagan las feromonas.

En este modelo tanto los agentes orden como los agentes recurso toman decisiones puesto que ambos persiguen el objetivo de terminar un producto bajo unas determinadas restricciones de tiempo y de coste. En este proceso de toma de decisiones los agentes observan la información en su entorno local. Estos mismos agentes generan información que puede a su vez estimular el comportamiento y guiar las decisiones de otros agentes.

La toma de decisiones se toma en dos pasos: un primer paso se descartan las opciones no viables y en un segundo paso se elige de entre las opciones factibles aquella considerada óptima conforme a un determinado criterio, dando preferencia a las soluciones con un grado de atractivo, dado por la feromona, mayor.

3.2 ADACOR

El sistema de control de la producción que utiliza ADACOR se mueve entre dos estados: uno de tipo descentralizado y otro centralizado. El objetivo es conseguir una arquitectura que sea tan descentralizada como sea posible y tan centralizada como sea necesario de modo que el sistema es capaz de pasar por distintos grados intermedios según las necesidades de cada momento. (Leitao, Colombo, & Restivo 2005) Para hacerlo utiliza un sistema que también está basado en las técnicas de coordinación utilizadas por las colonias de hormigas.

ADACOR alterna entre dos estados: uno estacionario en el que el control del sistema reside en los supervisores y en los niveles de coordinación con el fin de lograr una optimización global del proceso productivo, y otro estado transitorio que se activa cuando ocurre alguna incidencia y hace que el sistema se comporte de modo más reactivo, reaccionando de modo más ágil y adaptable.

La arquitectura base de ADACOR está basada en PROSA (Van Brussel, Wyns, Valckenaers, Bongaerts, & Peeters 1998), de hecho definen tres agentes básicos de forma similar, como son un agente de producto, con toda la información relacionada con el producto y responsable de su programación a corto plazo, agente de tarea, que se encarga de cada orden de fabricación lanzada sea ejecutada, y un agente operacional, que representa a cada recurso de producción. Sin embargo, ADACOR define un cuarto agente, agente supervisor, diferente al agente staff definido en PROSA, que es el que posibilita el paso de una organización jerárquica a otra más descentralizada.

En este sistema las feromonas sirven para propagar la información y provocar un cambio de estado en los agentes que la reciben. Son las que consiguen que el sistema sea capaz pasar de una estructura planificada a otra reactiva mediante las feromonas según se necesite. Así, cuando ocurre una determinada interrupción en la producción el Agente Orden que lo detecta aumenta el valor de un parámetro propio de cada agente llamado *factor de autonomía* y propaga a los otros agentes la necesidad de reorganizarse depositando una *feromona* que contiene la información a propagar. Al percibir la presencia de la feromona, los agentes aumentan a su vez el valor de su factor de autonomía, reorganizándose mediante una estructura heterárquica y adquiriendo un comportamiento totalmente reactivo por parte de los agentes. Los agentes permanecen en este estado estacionario durante un tiempo limitado (tiempo de reestablecimiento). Una vez pasado este tiempo el agente comprueba si sigue percibiendo la feromona. Si esta está aún activa el agente permanece en la fase transitoria hasta que termina el tiempo de reestablecimiento y comprueba que la feromona ya no está. Una vez que el sistema se ha recuperado de la interrupción, los agentes reducen su factor de autonomía, volviendo el sistema al estado inicial.

3.3 Mecanismo de cooperación para control de planta (Gao, Luo, & Yang 2005)

En este sistema son los productos que han de ser realizados son vistos como elementos activos. Este sistema establece una semejanza entre las hormigas que tratan de buscar el camino más corto desde la fuente de alimento hasta el hormiguero y las los productos que buscan qué ruta a través de los recursos en planta les va a permitir pasar desde el estado inicial al estado de producto terminado en un tiempo más breve.

Otra de las características del mecanismo de coordinación de las hormigas que trata de imitar es el hecho de que las hormigas se mueven de modo reactivo y es el mecanismo de interacción el que lleva a un comportamiento del sistema que tiende a ser óptimo.

En el sistema natural el entorno contiene al problema (se trata de establecer el camino más corto en ese entorno determinado) y a su vez contiene la información. En el sistema productivo el sistema físico que determina el problema no contiene la información, sino que hay que crear un entorno específico que permita contener la información. Para facilitar la definición de este entorno existirá una correspondencia entre la estructura funcional del sistema físico y del sistema de información. En este sistema de información está formado por una serie de nodos que se corresponden con los recursos. Cada recurso posee distintas habilidades. Cada nodo recogerá la *habilidades* asociadas a cada recurso. La feromona que se cree estará relacionada con una determinada habilidad, de forma que representará la atracción por la correspondiente *habilidad de producción*.

Para realizar la topología del sistema de control de planta y facilitar la comparación de recursos productivos con las mismas funciones, entorno de información está organizado por la estructura funcional del taller. La lista de habilidades reúne toda la información de la misma función, que puede ser realizada en recursos productivos diferentes . Cuando se necesita una determinada función, es fácil conocer así que recursos pueden realizarla y permite comparar y decidir quien la hace mejor.

Aunque en la naturaleza la información está distribuida, aquí se ha optado por almacenarla en una base de datos central gestionada por un agente de información. Este agente deberá gestionar la información y dar respuesta a las solicitudes de información que le realicen otros agentes.

En este modelo el *agente de componente* asume la función de la hormiga. El *agente de componente* representa el producto a realizar. Es el responsable de tomar las decisiones necesarias para que se vayan realizando las operaciones e irá almacenando toda la información sobre el componente que se va procesando.

La responsabilidad máxima del *agente de componente* es realizar la elección de la ruta que va a tomar el producto al que va asociado, es decir, elegir qué recurso debe ser utilizado para realizar la siguiente tarea. En este proceso, y de modo similar a como lo hacen las hormigas estos agente elegirán de forma aleatoria, dando más oportunidades a las máquinas que tengan más feromonas.

Otro de los elementos que modela es la feromona. Para el sistema natural de coordinación de hormigas, la feromona es el elemento básico de información y reside en la ruta a la cual se asocia. La función de la feromona es indicar la atracción hacia la ruta en la cual se encuentra.

Se caracteriza por su simplicidad, puesto que no contiene información detallada sobre el problema que resuelve. Otra de las características de las feromonas es la evaporación. En el sistema de producción se ha creado un *objeto feromona* que asume las funciones equivalentes de la feromona en el mundo natural. El *objeto feromona* reside en una de las ubicaciones creadas e indica la atracción hacia la correspondiente habilidad del recurso ligado a esa ubicación. Uno de sus componentes es el que señala el grado de atracción que indica.

El *objeto feromona* tiene dos algoritmos: el algoritmo de evaporación y el algoritmo de modificación. La función del algoritmo de evaporación es disminuir la cantidad del valor de la feromona conforme pasa el tiempo. El algoritmo de modificación podría ser empleado para aumentar el valor de la feromona en una cierta cantidad. En el proceso de producción cualquier agente que utiliza una determinada habilidad puede invocar el algoritmo de modificación de la feromona con el fin de reflejar la superioridad o inferioridad de su propia solución.

Podemos dividir el proceso de cooperación entre agentes en cuatro fases:

En una primera fase el sistema se inicializa. Para el agente de información del entorno busca agentes de recursos en el sistema para poder generar una lista de habilidades y de nodos de información. El sistema comienza a enviar cada unidad de tiempo que para una señal que invoca el algoritmo de vaporación del objeto feromona.

La segunda fase comienza cuando llega una nueva orden de trabajo al sistema. Entonces el agente de sistema crea un agente de componente (producto en curso) para cada nuevo componente. El agente de componente toma la información acerca del producto, que se encuentra en el agente de producto.

En la tercera fase se produce la selección de la ruta. Es el propio agente de componente quien se encarga de realizarla. Para ello solicita al agente del sistema la lista de posibles recursos que puede utilizar para realizar la siguiente operación. El agente de componente realizará la selección de recurso utilizando un algoritmo aleatorio que da más probabilidades cuanto mayor sea el valor de la feromona.

La cuarta y última fase abarcaría la realización de la operación, de forma que pasaría al recurso elegido en el caso de que esté libre, y si está ocupado se situaría en la cola de espera. Si pasado un tiempo no es procesado, tratará de elegir otro recurso repitiendo el proceso.

Si durante el proceso existe algún problema como un fallo en la ejecución de la tarea, una avería o parada de la máquina el *agente de recurso* informa al *agente de información del entorno* para que revise la lista de habilidades y el nodo de información para evitar que el recurso sea elegido por algún otro producto, hasta que el problema sea subsanado.

Al finalizar la tarea realizada sobre un producto por parte de un recurso productivo, se actualiza el valor de la feromona en el *agente de información del entorno*.

4. Conclusiones

Los sistemas naturales tienen un alto potencial como arquetipos a imitar en el modelado de sistemas. Las colonias de hormigas constituyen un modelo ampliamente imitado en la resolución de problemas. Las características que los hacen atractivos son principalmente la

descentralización de los mismos y el alto grado de reacción a los cambios en el entorno. En este artículo se han mostrado algunas de las principales aplicaciones que se han desarrollado en el ámbito del control dinámico de la producción utilizando estos sistemas como referencia.. Cada uno de ellos utiliza el mismo arquetipo de distinto modo, asignando los roles básicos a agentes y funciones distintas. Sin embargo todos consiguen dos características fundamentales: la emergencia del comportamiento global deseado a partir de agentes simples y la coherencia del mismo.

Referencias

De Wolf, T. & Holvoet, T. 2005, "Emergence Versus Self-Organisation: Different Concepts but Promising When Combined", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3464, pp. 1-15.

Dorigo, M. & Gambardella, L. M. 1997, "Ant colonies for the travelling salesman problem", *Biosystems*, vol. 43, no. 2, pp. 73-81.

Gao, Q., Luo, X., & Yang, S. 2005, "Stigmergic cooperation mechanism for shop floor control system", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 7 - 8, pp. 743-753.

Hirsh, A. E. & Gordon, D. M. 2001, "Distributed problem solving in social insects", *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 31, no. 1-4, pp. 199-221.

Leitao, P., Colombo, A. W., & Restivo, F. J. 2005, "ADACOR: A collaborative production automation and control architecture", *Ieee Intelligent Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 58-66.

Parunak, H. V. 1997, "'Go to the ant": Engineering principles from natural multi-agent systems", *Annals of Operations Research*, vol. 75, pp. 69-101.

Peeters, P., Van Brussel, H., Valckenaers, P., Wyns, J., Bongaerts, L., Kollingbaum, M., & Heikkila, T. 2001, "Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops", *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 343-352.

Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., & Peeters, P. 1998, "Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA", *Computers in Industry*, vol. 37, no. 3, pp. 255-274.