

## Diseño conceptual e implementación de prototipo de un sistema holónico y un sistema de eventos discretos

### Conceptual design and prototype implementation of a holonic system and a discrete event system

Isaías Simón-Marmolejo <sup>a</sup>, René Cruz-Guerrero <sup>b</sup>, Isidro J. González-Hernández <sup>c</sup>, Rafael Granillo-Macías <sup>d</sup>, Francisca Santana-Robles <sup>e</sup>

---

#### Abstract:

The problem after creating a Holonic Manufacturing System (HMS), as observed in the literature, is to create real-time control strategies based on events and distributed information processing that act on flexible production systems. Seen from the previous perspective, this research project will seek to implement a communication bridge between an HMS and a discrete event simulation model that will emulate a flexible manufacturing system. This proposal exposes historical background to the subject, as well as a methodological proposal used to create a synchronous communication bridge between the HMS and the simulation model.

#### Keywords:

*Holonic Manufacturing System, communication models, simulation of discrete events.*

---

#### Resumen:

El problema después de crear un Sistema Holónico de Manufactura (HMS, por sus siglas en inglés) según se observa en la literatura, es crear estrategias de control en tiempo real basadas en eventos y procesamiento de información distribuida que actúen sobre los sistemas de producción flexibles. Visto desde la perspectiva anterior, el presente proyecto de investigación buscará validar un puente de comunicación entre un HMS y un modelo de simulación de eventos discretos mismo que emulará a un sistema de manufactura flexible. La presente propuesta, expone antecedentes históricos al tema, además de una propuesta metodológica usada para crear un puente de comunicación síncrono entre el HMS y el modelo de simulación.

#### Palabras Clave:

*Sistema Holónico de Manufactura, modelos de comunicación, simulación de eventos discretos.*

---

### Introducción

El éxito de una empresa ya no se mide por su capacidad para producir un único producto a un coste eficaz, sino

más bien se hace referencia a su flexibilidad, agilidad y versatilidad (*Botti y Giret, 2008*), las compañías se dirigen hacia la virtualización y la colaboración a corto plazo, esto cambia su antiguo objetivo (optimización del proceso), por las nuevas estrategias globales que van desde las

---

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-2116-6192>, Email: isaíasm@uaeh.edu.mx

<sup>b</sup> Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-1276-2419>, Email: rcruz@itesa.edu.mx

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-2805-6674>, Email: igonzalez@uaeh.edu.mx

<sup>d</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-1015-667X>, Email: rafaelgm@uaeh.edu.mx

<sup>e</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-3301-9790>, Email: profe\_7739@uaeh.edu.mx

funciones de diseño hasta el envío del producto, que impliquen integración de la empresa, organización distribuida, cooperación, agilidad, escalabilidad, flexibilidad, calidad, tolerancia a fallos, adaptabilidad a los cambios del entorno y robustez contra la ocurrencia de fallos o cambios, mismas que se han convertido en la clave del éxito en muchas organizaciones (Araúzoa et al., 2015, Nahmias 2013 y Rosenzweig y Easton, 2013).

Lo antes dicho, puede lograrse si las herramientas, máquinas y entornos de fabricación industrial integrados con control masivo de software se convierten en predeterminados objetivos de una organización. A esto, los métodos de fabricación se dirigen hacia sistemas de manufactura totalmente automatizados y no tripulados, que podría ser muy flexibles, reconfigurables, reutilizables, e interoperables, así como autónomos e inteligentes, considerados como una de las formas útiles de tratar con las expectativas del cliente (Oztemel, 2010). Un Sistema Holónico de Manufactura (HMS, por sus siglas en inglés) es un importante avance en el campo del control descentralizado para Sistemas de Manufactura Inteligentes (SMI), mismo que está diseñado a través de módulos autónomos, cooperativos e inteligentes capaces de reconfigurar los sistemas de fabricación de forma automática en respuesta a nuevos requerimientos del sistema o cambios ambientales del mismo, tales como perturbaciones externas que pudieran afectar el comportamiento de las máquinas o bien programas de producción de acuerdo con las necesidades inmediatas e inherentes, lo que es importante puesto que con esto se permite, por ejemplo: la manipulación de averías en los equipos, reprogramación de ordenes en tiempo real, etc., logrando así un sistema de manufactura suficientemente ágil para hacer frente a cambios inesperados. El problema después de crear un HMS según se observa en la literatura, es crear estrategias de control en tiempo real basadas en eventos y procesamiento de información distribuida. Visto desde la perspectiva anterior, el presente proyecto de investigación buscará crear un puente de comunicación (interfaz) entre un HMS y un modelo de simulación de eventos discretos mismo que emulará el control ejercido a un sistema de manufactura flexible el cual utiliza una biblioteca particular de objetos del software de simulación FlexSim®.

Derivado de lo anterior y dados los resultados a la fecha, el presente documento muestra avances en el estado del arte referente al tema de HMS, sistemas de eventos discretos y lo concerniente al protocolo de comunicación entre ambas aplicaciones.

## Desarrollo

### Sistemas holónicos

El concepto holónico surge en la obra del autor y filósofo húngaro Arthur Koestler en 1967, quien intentó capturar el comportamiento de los sistemas complejos, considerándolos ser un todo y a la vez una parte (Nahmias, 2013, Koestler, 1967). Para describir una unidad básica de la organización en los sistemas biológicos y sociales, Koestler inventó la palabra "holón", que viene de la combinación de la palabra griega "holo" que significa todo o entero, y del sufijo "on" que expresa una parte o una partícula, los holones se comportan "en parte como totalidades y completamente como partes", Koestler también propuso el concepto de Open-Ended Hierarchy (OEH) o Jerarquía Indefinida como una arquitectura formada de holones, llamada holarquía (Babiceanu y Chen, 2006). Una Holarquía, es un conjunto de holones que pueden cooperar para alcanzar una meta o un objetivo, la misma, define reglas básicas para la cooperación de estos, limitando su autonomía. Una de sus características más llamativas es que su estructura se puede adaptar y optimizar constantemente, ofreciendo una gran versatilidad a los cambios que se pueden desarrollar en el entorno. Algunas de las cualidades holónicas son: autonomía, reactividad, proactividad, cooperación, re-organización, racionalidad, aprendizaje, recursión y procesamiento físico.

Los elementos que componen a un holón son, "cuerpo", en el que se desarrollan los procesos de transformación, transporte, almacenamiento (realizados por reactores, compresores, almacenes, etc.), "cabeza", aquí se desarrollan los procesos de toma de decisiones respecto de la producción, basados en el conocimiento que se tiene del proceso de producción y de los recursos (hombres y máquinas), y "cuello", éste es la interfaz entre el "cuerpo" y la "cabeza", es toda la infraestructura teleinformática que almacena, soporta y transporta la información. En relación a este último, frecuentemente hace uso del Protocolo de Control de Transmisión (TCP, por sus siglas en inglés) y del Protocolo de Internet (IP, por sus siglas en inglés) para la comunicación de los datos digitales. El TCP/IP es clasificado funcionalmente a nivel de red según el modelo del Sistema de Interconexión Abierto (OSI, por sus siglas en inglés).

En la literatura revisada pocas arquitecturas exponen a detalle como los diferentes holones se definen, comunican y comparte conocimiento. La Tabla 1 muestra una síntesis de arquitecturas concebidas en los últimos años; los holones básicos usados, el tipo de control empleado, técnicas tomadas en caso de perturbaciones del sistema, la tecnología empleada en la construcción del modelo y el nivel de implementación alcanzado.

Dispositivo de control de un holón ADAPtive holonic COntrol aRchitecture (ADACOR)

En este mismo sentido, pero desde otro punto de vista, el modelo de concepción de un holón genérico ADACOR (Leitão y Restivo, 2006), muestra un dispositivo de control lógico (Logical Control Device, LCD) y un recurso físico capaz de realizar la operación de manufactura. El dispositivo LCD es organizado en tres componentes principales: comunicación (ComC), decisión (DeC) e interfaz física (PIC). El componente comunicación es responsable de la interacción inter-holón apoyando el intercambio de conocimiento local por los holones distribuidos.

Finalmente, el componente de interfaz física tiene como objetivo proporcionar mecanismos para apoyar la integración de recursos basados en el concepto de recursos virtuales y el modelo cliente-servidor.

De lo anterior, el compartir información entre holones, tanto de sus habilidades como del conocimiento del ambiente que lo rodea, les permite a éstos desarrollar sistemas de estructura compleja estables y autosuficientes además de eficientes en el uso de recursos y robustos ante perturbaciones tanto internas como externas (Leitão y Restivo, 2008, Rosenzweig y Easton, 2013). Obsérvese la Figura 1.

Arquitectura	Control	Perturbaciones	Tecnología
PROSA (Brussel et al., 1998)	Control Jerárquico y heterárquico Algoritmos y sistemas heredados	No es definida	No es definida
RMS-HA (Wang et al., 2005)	Control Jerárquico y heterárquico	Se menciona sin detalles	No es definida
ADACOR (Leitão y Restivo, 2006)	Control Jerárquico y heterárquico • Holones distribuidos y escalables • Robusta y dinámica	Diseminación de feromonas El mecanismo de estabilización se basa en un mecanismo de control clásico "Proportional, Integrative and Derivative (PID)".	• JADE • JESS • Red Ethernet • TCP/IP • Redes de Petri Lenguaje de comunicación FIPAACL Especificaciones FIPA
Enfoque Holónico (Araújo et al., 2015)	• Heurístico distribuido • Programación distribuida • Programación centralizada • Robusta, dinámica y estocástica	Reacción ante eventos inesperados y se adapta mediante negociaciones y subastas.	• JADE • JESS • CNP Especificaciones FIPA
ADACOR <sup>2</sup> (Barbosa et al., 2015)	Control descentralizado a nivel micro y macro. • Auto-organización comportamiento • Auto-organización estructural	Se da a tres niveles: • Nivel 0 (emergencia) • Nivel 1 (auto-organización de estructura local) • Nivel 2 (reorganización de estructura física) Mecanismo de feromonas semejante a ADACOR	• JADE • JESS • Algoritmos genéticos. Lenguaje de comunicación FIPAACL Especificaciones FIPA
H2CM (Indriago et al., 2016)	Sistema de control híbrido (HCS)	No es definida	Se limita a indicar a Java

Tabla 1. Arquitectura de un HMS.

Fuente: Elaboración propia

El componente de decisión regula el comportamiento de cada holón (detección, decisión, actuación y aprendizaje). Así, el holón está disponible continuamente para tomar una decisión de acuerdo con los conocimientos disponibles y con la técnica de toma de decisiones implementada. El conocimiento se adquiere mediante la detección del medio ambiente y la llegada de mensajes de otros holones. Después de tomar una decisión, las acciones seleccionadas, en forma de comandos para actuadores, mensajes para otros holones o ejecución de procedimientos, se envían y ejecutan. Se evalúan los resultados de las acciones ejecutadas y se genera nuevo conocimiento. Conocimiento que debe ser almacenado.

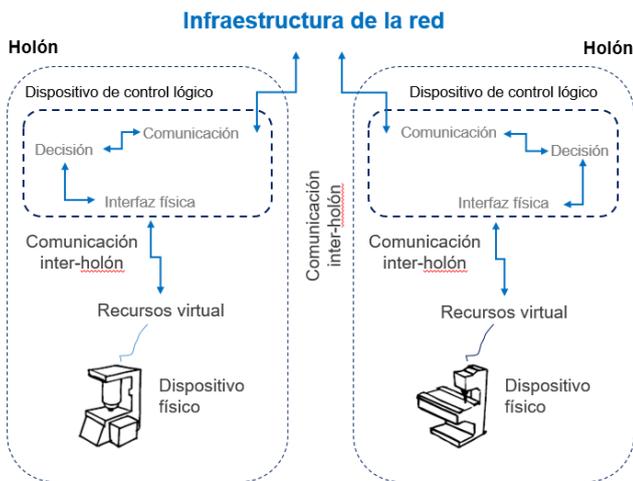


Figura 1. Modelo de control de un Holón ADACOR  
Fuente: Leitão y Restivo (2006).

Un enfoque adicional propuesto por la referencia *Barbosa et al. (2015)*, implica una arquitectura ADACOR a nivel de planta y en sistemas de manufactura flexibles especialmente organizados con producción job shop, misma que propone cuatro tipos de holones de manufactura de acuerdo con sus funciones y objetivos: productos (HP), tareas (HT), operativo (HO) y un holón supervisor (HS), entre los cuales hay diferentes tipos de interacciones durante el ciclo de vida de una orden de producción, como se muestra en la Figura 2.

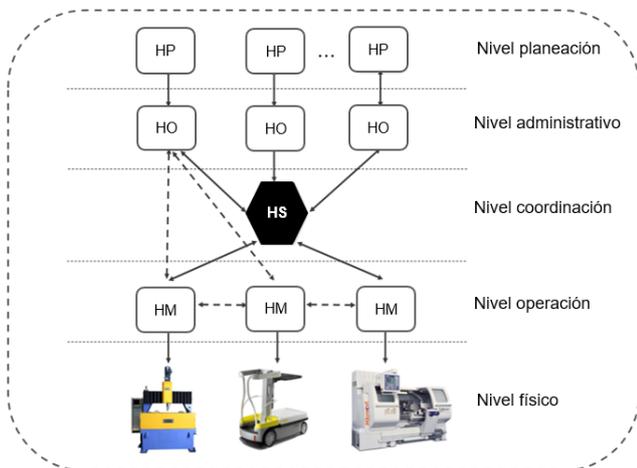


Figura 2. Holones clase ADACOR en interacción

Fuente: *Barbosa et al. (2015)*.

En la Figura 2, los holones producto colocados en el nivel de planeación de procesos interactúan con los holones tarea puestos a nivel de administración para el

intercambio de información de productos y planificación de procesos, además, los holones producto interactúan indirectamente con los holones operativo y supervisor durante la elaboración de planes de procesos alternativos. Esto es necesario para verificar que los holones operativos están disponibles en la planta. Finalmente, para una coordinación global y optimizada, los holones tarea interactúan con los holones supervisor colocados a nivel de coordinación. El holón supervisor representa la coordinación y optimización global usando control descentralizado y es responsable de la formación y la coordinación de grupos de holones.

El comportamiento dinámico de cada clase holón ADACOR y la sincronización entre los modelos individuales utilizan redes de Petri de alto nivel. Las pruebas de correlación y validación se realizan a través de un sistema de control de manufactura prototipo (plataforma de laboratorio semi-virtual) y se hace uso de la tecnología JADE (Java Agent Development framework) para crear holones, autónomos, inteligentes y cooperativos, en un ambiente modular, descentralizado y reutilizable, bajo los criterios de la “Fundación para Agentes Físicos Inteligentes (FIPA, por sus siglas en inglés)”. Por último, se hace notar que la comunicación entre los holones distribuidos se realiza a través de una red Ethernet utilizando el protocolo TCP/IP, donde los mensajes se codifican utilizando el Lenguaje de Comunicación entre Agentes (Agent Communication Language, ACL) definido por la FIPA (FIPA-ACL). Esto es de gran importancia pues con ello se logra una dinámica de reorganización equilibrando de manera binaria un estado estacionario y un estado transitorio para la adaptación del control de la producción en función del nivel de perturbación del sistema. La Figura 3 ejemplifica el control ejercido sobre un sistema ADACOR.

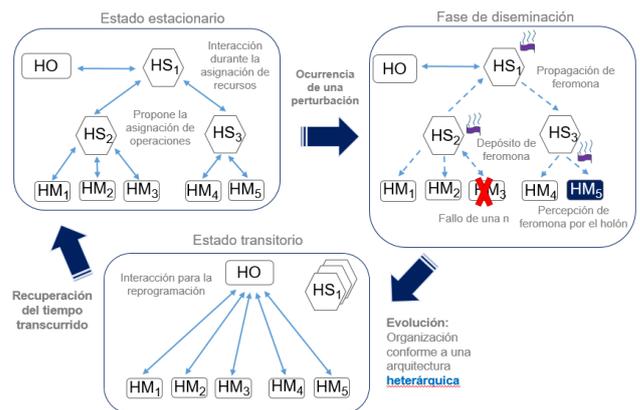


Figura 3. Reorganización dinámica bajo el enfoque ADACOR, soportada con una arquitectura de control híbrida.

Fuente: *Barbosa et al. (2015)*.

En el estado estacionario (Figura 3), los holones están organizados en una estructura jerárquica, el holón supervisor juega el papel de coordinación y optimizan la programación de sus subordinados organizados en grupos. El sistema funciona conforme a esta configuración hasta que se detecta una perturbación, el holón operativo que sufre la perturbación "HO3" detecta primeramente el problema e intenta recuperarse a nivel local mediante la realización de un autodiagnóstico, si la recuperación del mismo no tiene éxito, su factor de autonomía se incrementa y se propaga la necesidad de reorganización a otros holones en el sistema, como sucede en los sistemas biológicos cuando existe un daño, el mecanismo de propagación implica depositar una feromona en el holón supervisor vecino, la cual se propaga posteriormente a otros HS, así, los otros holones (en este caso HO5) que detectan las feromonas de los holones supervisor aumentan sus factores de autonomía de acuerdo a la intensidad de la feromona y su conocimiento local, con lo que se propaga una reorganización emergente de los holones supervisor vecinos. En el estado transitorio, los holones tarea interactúan directamente con los holones operación para lograr una programación alternativa en un corto período de tiempo, logrando capacidad de respuesta. Durante este estado, los holones supervisores continúan elaborando programas optimizados, pero ahora sólo los holones con bajos factores de autonomía aceptarán las propuestas. Los holones permanecen en estado transitorio durante un tiempo de restablecimiento, que es típicamente un corto período de tiempo, una vez transcurrido este tiempo, se comprueba si el olor de feromonas se ha disipado o todavía está activo, si la feromona todavía está activa, los holones permanecen en estado transitorio durante un tiempo de restablecimiento adicional, hasta que la feromona se ha disipado. Este mecanismo de gran alcance permite que el sistema responda rápidamente a las perturbaciones, logrando el equilibrio nuevamente a un estado estacionario después de su disipación. Pese al potencial y la innovación introducida por la incorporación de este mecanismo de auto-organización, el sistema de control sólo se balancea entre dos estados predefinidos y no es capaz de evolucionar a otras estructuras de control nuevas, por lo que no se le puede considerar como un sistema verdaderamente capaz de evolucionar y reconfigurarse. Por lo tanto, el tema sigue siendo un problema abierto como tema de investigación de interés para otros estudios.

#### MAS como plataforma en el modelado de HMS

En las propuestas donde se hace notar la tecnología empleada (ADACOR, MES-HMS Enfoque Holónico, ADACOR2 y otras arquitecturas), los holones son construidos bajo tecnologías de sistemas de múltiples agentes (MAS, Multi-Agent Systems) mediante un sistema middleware totalmente distribuido de nombre JADE, donde es posible la implementación de distintos tipos de holones como agentes JADE usando para ello la clase Agent proporcionada para tal efecto, así como librerías Java. Asimismo, para lograr la inteligencia de los holones se ha utilizado un motor de reglas implementado

en la plataforma Java Expert System Shell (JESS). La principal razón del uso de estas tecnologías tiene su fundamento en lo siguiente:

La investigación MAS está motivada por la programación de sistemas distribuidos, está dirigida al comportamiento social de las entidades inteligentes, y está principalmente involucrada en la investigación de modelos conductuales, estrategias de cooperación y coordinación, inteligencia, tareas de optimización de performance, aprendizaje de experiencias propias, creación de coaliciones, etc. Por otro lado, los holones, como paradigma, tienen las siguientes características básicas: autonomía, cooperación, auto-organización y reconfigurabilidad, donde la comunicación, la colaboración y la negociación son esenciales para la coordinación del sistema. Estas características, se podrían llamar "propiedades de comportamiento", los holones tienen "propiedades estructurales". Uno de ellos es la "recursividad", que permite que los holones sean hechos internamente de entidades auto-similares (holones), que de nuevo pueden ser hechas de holones y así sucesivamente (hasta llegar a un nivel atómico en el que una nueva subdivisión es imposible o inútil para la aplicación de dominio), *Botti y Giret (2008)*. Otra propiedad estructural importante, definida por el consorcio HMS (*HMS, 1994*), es que los holones usualmente comprenden una parte de procesamiento de información con una parte de procesamiento físico opcional. De esta forma, un HMS es, por definición, un enfoque de sistemas de producción específico para el control inteligente distribuido. La investigación HMS está fuertemente relacionada con la investigación del MAS en la comunidad de IAD (Inteligencia Artificial Distribuida), como *Ulmer et al., (2000)* y *Indriago et al., (2016)* declararon: "el paradigma de sistemas de múltiples agentes parece ser muy adecuado para la implementación de una abstracción holónica en un problema que se distribuye fundamentalmente en la naturaleza".

De esta manera y dado que JADE es la tecnología software de sistemas de múltiples agentes ampliamente aceptada por la comunidad de sistemas holónicos (*Leitão y Vrba, 2011*), los principales proyectos de investigación en el tema han recurrido a esta plataforma en intención de proporcionar un entorno de ejecución para agentes software. Con ello, es posible la implementación de distintos tipos de holones como agentes JADE usando la clase Agent proporcionada para tal efecto y acorde con las especificaciones FIPA y una serie de librerías Java que facilitan implementar los principales componentes de los agentes: los comportamientos y las interacciones (*Araújo et al., 2015*). Así, esta clase Agent que tiene ya implementadas las funcionalidades básicas de los agentes (búsqueda de otros agentes, comunicación, gestión de comportamientos, gestión de la línea de espera de mensajes, etc.) se extiende para crear las clases que representan cada tipo holón de un sistema de manufactura (holones producto, tarea, recurso, supervisor, etc., según sea el caso), añadiendo en cada arquitectura los comportamientos e interacciones descritos.

Agentes Inteligentes

A principios de los noventa los agentes y los sistemas basados en agentes comenzaron a convertirse en un importante tema de investigación. Estos sistemas basados en agentes se han relacionado con aplicaciones para la vida en una enorme cantidad de disciplinas, especialmente en los sectores industriales y de servicios donde los avances maduran constantemente.

Posteriormente, se introduce el paradigma de agentes de software inteligentes en el campo de la IAD y su utilización en el área de fabricación, con el objetivo de diseñar sistemas distribuidos con un alto grado de complejidad como una técnica para entender y simular sociedades o bien sistemas de producción (*D'Inverno y Luck, 2001*). Un agente es una entidad capaz de percibir su entorno, procesar tales percepciones y responder o actuar en su entorno de manera racional, percibiendo con sensores y afectando al entorno con actuadores (*Wooldridge, 2009*), estos continuamente están realizando procesos que les indican qué hacer y cómo, estas entidades se comunican con otros agentes para resolver de forma adecuada su trabajo. Son capaces de incorporar más de una tecnología de Inteligencia Artificial (IA, por sus siglas en inglés); éstos pueden aprender y trabajar al mismo tiempo mediante la percepción de su medio ambiente con la ayuda de sensores y actuadores en un entorno abierto y dinámico en el sentido de estar observando y actuando sobre él con el fin de alcanzar sus objetivos (*Oztemel, 2010, Wooldridge, 2009, Wooldridge y Jennings, 1995*). Para referirse a esta entidad o poder hacer uso del término agente o agentes (avanzados) se dan algunas propiedades mostradas como sigue:

**Autonomía:** Un agente inteligente tiene control sobre su comportamiento (opera sin la intervención directa de seres humanos u otras entidades del mundo exterior). Tiene el control exclusivo sobre su estado interno y sus objetivos y es la única instancia que puede cambiar.

**Respuesta/Situación:** Un agente está equipado con sensores y actuadores que desde su interfaz directa con su entorno percibe su medio ambiente al recibir inundaciones sensoriales de él. Responde de manera oportuna al cambio relevante en el mismo a través de sus actuadores.

**Proactividad:** Un agente más sofisticado actúa no sólo de manera responsiva, sino que puede ser oportunista y actuar por iniciativa (puede anticipar proactivamente posibles cambios en su entorno y reaccionar ante ellos).

**Orientado a objetivos:** Un agente inteligente está dirigido por objetivos. Esto implica que toma iniciativa donde quiera que haya una oportunidad de trabajar hacia sus metas.

**Comportamiento inteligente:** Un agente tiene amplia experiencia y conocimiento en un área específica y bien definida. Son capaces de tratar y resolver problemas en este dominio.

**Habilidades sociales/comunicación:** Un agente interactúa directamente con los seres humanos y/o con otros agentes en la búsqueda de sus objetivos individuales, organizacionales y/o combinados.

Especialmente, los agentes más inteligentes tienen que lidiar con todo tipo de situaciones (impredecibles) en las que pueden necesitar la ayuda de otros agentes. Por lo

tanto, pueden recopilar y mantener el conocimiento sobre otros agentes (su contacto, capacidades (subjetivas), fiabilidad, sobresalto, etc.) y sus conocidos.

**Capacidad de aprendizaje:** Para que los agentes sean adaptativos y autónomos necesitan ser capaces de aprender sin intervención desde el exterior. Según Maes (1997), el aprendizaje tiene que ser incremental, tiene que tener en cuenta el ruido, no está supervisado y puede hacer uso del conocimiento de fondo proporcionado por el usuario y/o el desarrollador del sistema.

En la Figura 4 se muestra la arquitectura general de un agente, el cual consta de tres componentes esenciales: percepción, cognición y acción. La percepción recibe entradas provenientes del medio ambiente a través de sensores y las transmite al módulo de la cognición para ser procesadas. Este proceso puede incluir filtros y priorizar el orden de importancia. La cognición implica procesar la información percibida y, en consecuencia, tomar una decisión. Este proceso requiere de distintos métodos de sistemas inteligentes, tales como aprendizaje e implantación. Y el mecanismo de la acción de un agente, puede hacer frente a situaciones inesperadas y adaptarse a nuevas situaciones lo más rápido posible.

La clasificación de los agentes como sistemas reactivos, sistemas cognitivos y sistemas deliberativos, implica lo siguiente:

El sistema reactivo busca que un agente se asemeje a un actor, reaccionando sólo a estímulos externos, con poca o ninguna comunicación. El enfoque cognitivo de agentes es considerado a menudo como agentes bastante complejos, que tiene internamente modelos simbólicos del mundo y de sus habilidades o pericia, con capacidad de razonamiento y comunicación sofisticada. Un agente deliberativo, respectivamente (cognitivo), es sinónimo de agente proactivo o una especialización del mismo. Su comportamiento y arquitectura son razonablemente sofisticados.

Los deseos representan los objetivos del agente (es decir, describen lo que el agente desea lograr). Se puede distinguir entre objetivos a corto plazo y objetivos a largo plazo. Los objetivos a largo plazo son los que realmente conducen el comportamiento de un agente y, por lo tanto, son comparativamente estables y abstractos. Los objetivos a corto plazo sólo reflejan las metas que el agente desea lograr en una situación específica. Éstos pueden expresar como máximo lo que el agente puede hacer en esta situación específica y, por lo general, sólo tienen un carácter temporal. La planificación inteligente es un proceso complejo especialmente si el plan resultante es comparativamente sofisticado y abarca un gran espacio de solución que crece exponencialmente. Durante este tiempo de planificación, el entorno puede cambiar de una manera que hace que la ejecución del plan real (parcialmente) sea obsoleta o sub-óptimo. Por lo tanto, una replanificación inmediata puede ser necesaria. Al respecto, en *Vlahavas y Vrakas (2005)* se tiene la idea de que los agentes deliberativos son especialmente útiles cuando se requiere pasar de una situación razonable a una sofisticada (sin embargo, no en

tiempo real) debido a su capacidad para producir soluciones de alta calidad, independientes del dominio.

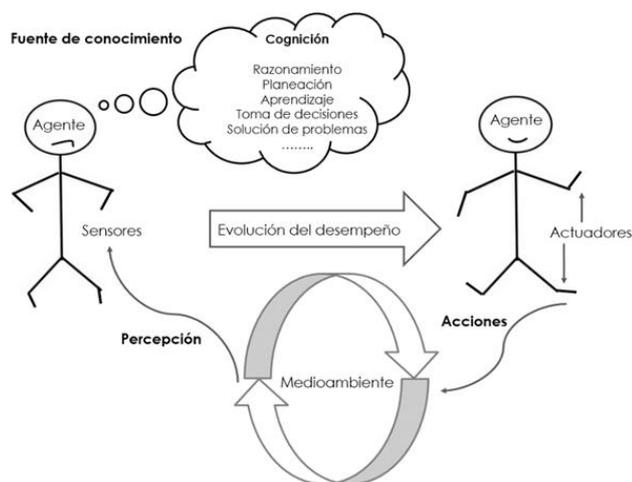


Figura 4. Arquitectura general de un agente inteligente Fuente: Oztemel (2010).

### Metodología para la interfaz

Lograr interconectar a un sistema holónico desarrollado en una plataforma JADE bajo la tecnología MAS con un modelo de simulación de eventos discretos, donde sea posible visualizar la emulación de una celda de manufactura con la finalidad de tener parámetros de decisión para desarrollar e innovar una unidad de control distribuido y descentralizado que admitan la reorganización de holones ante una serie de perturbaciones, no es una tarea fácil. Pese a ello, es necesario si realmente lo que se desea es avanzar en proyectos futuros donde se busque la reorganización física en tiempo de ejecución de un sistema de manufactura flexible. Para tal efecto, se espera que la comunicación entre ambos sistemas se realice en un modo síncrono. A ello, la toma de decisiones, la autonomía y control descentralizado, los requerimientos en tiempo real, el grado de confianza y las funciones automáticas que el servicio debe de ofrecer suponen una complejidad para su trabajo en conjunto, por ejemplo, la comunicación entre las partes involucradas podría ser bidireccional, pero, esto podría suponer una carga de trabajo en el equipo ya que podría contar con varios elementos que se estén comunicando con él al mismo tiempo, generando una excesiva carga de trabajo para la toma de decisiones que MAS deba de tomar, tanto si el sistema este ordenado bajo una estructura jerárquica o heterárquica. La administración correcta de los recursos disponibles supondría un excelente o pésimo diseño de acuerdo al orden de los elementos que se estén comunicando, por lo que se denota un problema de gran complejidad.

Acciones de la investigación

- a) Analizar y entender el modelo del HMS con el que cuenta la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).
- b) Emular el sistema de manufactura flexible de la UAEH, a través de la simulación de eventos discretos para integrar y visualizar en tercera dimensión el comportamiento de todos los elementos del sistema.
- c) Crear una interfaz gráfica de usuario y un holón supervisor capaz de interconectar al sistema holónico con el simulador de eventos discretos para establecer un ambiente de comunicación adecuado entre estos últimos sistemas.
- d) Experimentar distintos escenarios a diferentes intervalos de tiempo, con la finalidad de confirmar la viabilidad del sistema de control holónico o en su caso redefinir condiciones inadecuadas.

### Desarrollo del estudio

Durante la revisión del estado del arte preliminar, se observa lo siguiente:

Respecto a la comunicación entre holones, en algunos casos, se indica que ésta se hace a través de una red Ethernet utilizando el protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) con el lenguaje de comunicación FIPA-ACL (Foundation for Intelligent Physical Agents- Unified Modelling Language). Sin embargo, la mayoría de los autores sólo mencionan el tema sin hacer notar la importancia del mismo en los sistemas holónicos.

De acuerdo con estas bondades, se piensa que un HMS es un importante avance en el campo del control descentralizado para SMI (Oztemel, 2010). Razón por la que, en nuestros días, investigaciones respecto a HMS juegan un papel importante frente al desafío de lograr la máxima flexibilidad en un sistema manufactura ante perturbaciones que pudieran afectarlo. Sin embargo, es importante hacer notar dos aspectos de la manufactura holónica de singular importancia:

- Estrategias de control en tiempo real basadas en eventos.
- Procesamiento de información distribuida.

Las dos características antes descritas logran que los HMS sean capaces de alterar la configuración de las máquinas y los programas de producción de acuerdo con las necesidades inmediatas e inherentes, lo que es importante puesto que con esto se permite, por ejemplo: la manipulación de averías en los equipos, reprogramación en tiempo real, etc., logrando así un sistema de manufactura suficientemente ágil para hacer frente a cambios inesperados (Oztemel, 2010).

Propuesta de solución del problema

Una vez creado el modelo virtual de la celda de manufactura de la UAEH utilizando una biblioteca particular de objetos del software de simulación

FlexSim®. Se creará una interfaz gráfica de usuario, que actuará como un cliente de la red y transmitirá los mensajes que provienen de la parte física emulada (recursos: tornos, fresadoras, conveyors, robots, almacenes de disposición y recuperación automáticos, entre otros) al HMS, y viceversa, los holones del sistema emitirán mensajes al holón supervisor en intención de crear un ambiente de comunicación entre ambos sistemas. La comunicación entre el HMS y el modelo de simulación se realizarán en un modo síncrono, tal como se expone en las referencias (Blanc et al., 2008, Leroudier et al., 1980 y Liraviasl et al., 2015). De igual manera, se espera que el holón supervisor actúe como enrutador y garantice que los mensajes recibidos del entorno lleguen al holón al que están destinados, de manera semejante a lo que se expone en la referencia (Galland et al., 2001 y Galland et al., 2014). Véase la Figura 5.

Después de revisar la literatura, se espera que la comunicación entre holones se realice través de una red Ethernet utilizando el protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) con el lenguaje de comunicación FIPA-ACL (Foundation for Intelligent Physical Agents- Unified Modelling Language).

MES / HMS (JADE Sistema de múltiples agentes)

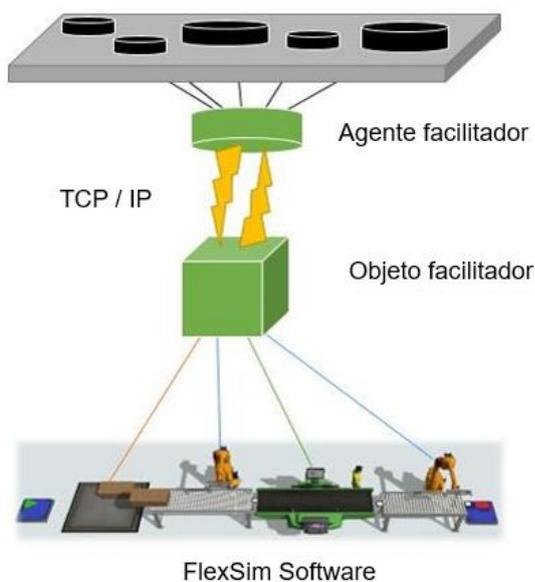


Figura 5. Ejemplo gráfico de la interfaz entre un HMS y un simulador de eventos discretos.

Fuente: Blanc et al. (2008).

## Conclusiones

A grandes rasgos, el mecanismo que se trabajará para obtener el grado de Ingeniería en Sistemas Computacionales, durante la estancia de investigación de la UAEH implica emular el flujo de información proveniente del sistema físico. Se espera que los agentes

definidos en JADE recibirán estos mensajes por medio del holón supervisor y los traten como si fueran mensajes de un sistema real a través de su interfaz gráfica; como respuesta, el HMS regresará un primer mensaje al holón supervisor para informar al sistema de eventos discretos sobre la acción que debe realizar, y un segundo mensaje para informar al emulador que debe reanudar la simulación. Los resultados probarán que es posible mantener un conocimiento dinámico del ambiente que rodea a los holones y que la semántica de los mensajes intercambiados entre los mismos es coherente para todo grupo de holones. Por otro lado, siendo estas entidades autónomas y cooperantes será posible lograr un entorno virtual 3D en el cual ciertas variables o fenómenos naturales que ocurren como perturbación en un sistema de producción evolucionen siguiendo un enfoque de dinámica de sistemas, que de igual forma permitan la experimentación bajo condiciones de operación normales y de emergencia, con distintos escenarios a distintos tiempos.

## Referencias

- Araújo, J. A., Martínez, R., Laviós, J. J., Martína, J.J.B. (2015). Programación y control de sistemas de fabricación flexibles: un enfoque holónico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 12, pp. 58–68.
- Babiceanu, R. F., Chen, F. F. (2006). *Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 17, pp. 111–131.
- Barbosa, J., Leitao, P., Adam, E., Trentesaux, D. (2015). *Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution*. *Computers in Industry*, vol. 66, pp. 99–111.
- Brussel, H. V., 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.
- Blanc, P., Demongodin, I., Castagna, P. A. (2008) *Holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 21, No. 3, p. 315–330.
- Botti, G., Giret, A. (2008). *Holonic manufacturing systems*, en ANEMONA. A multi- agent methodology for holonic manufacturing systems, D.T. Pham, Ed. Springer: Departamento de Sistemas Informáticos y Computación (DSIC), pp. 1–20.
- D’Inverno, M., Luck, M. (2001). *Understanding Agent Systems*. Springer-Verlag, Berlin. 191 p. ISBN 978-3-662-04609-8
- Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., Campagne, J. P. (2001). *Méthodologie pour la simulation de systèmes industriels complexes distribués au travers d’une étude de cas*. En Proc. of the 4th Conference "Génie Industriel", Aix-en-Provence, Marseille, Ajaccio (France). Vol. 2, p. 673–684.
- Galland, S., Gaud, N. (2014). *Holonic Model of a Virtual 3D Indoor Environment for Crowd Simulation*. En Proc. of International Workshop on Environments for Multiagent Systems (E4MAS14), IFAAMAS, Paris, France, Springer.

- HMS P.R. (1994). *HMS Requirements*. [http://hms.ifw.uni-hannover.de/HMS Server](http://hms.ifw.uni-hannover.de/HMS%20Server).
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Castagna, P., Chaco`n, E. (2016). *H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems*. *Computers in industry*, vol. 77, pp. 15–28.
- Koestler, A. (1967). *The ghost in the machine*. Arkana, pp. 384.
- Leitão, P., Vrba P. (2011). *Recent developments and future trends of industrial Agents*. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 6867, p.15–28.
- Leroudier, J., Renault, D., Renault, M. (1980). *Etude de la gestion des événements dans une simulation a événements discrets*. En: Proceedings of the Research Report IRIA- IRISA.
- Leitão, P., Restivo, F. (2006). *ADACOR: a holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control*. *Computers in industry*. vol. 57, no. 2, pp. 121–130, 2006.
- Leitão, P., Restivo, F. (2008). *Implementation of a Holonic Control System in a Flexible Manufacturing System*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 38, No. 5, p. 699–709.
- Liraviasl, K.K, Elmaraghy, H., Hanafy, M., Samy, S.N. (2015). *A Framework for Modelling Reconfigurable Manufacturing Systems Using Hybridized Discrete-Event and Agent-based Simulation*. *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 48, No. 3, p 1490–1495.
- Maes, P. (1997). *Modeling adaptive autonomous agents*. En: Langton C. G. (Eds.), *Artificial Life*. London, England: The MIT Press, pp. 135– 162. ISBN 0 262-62112-6
- Nahmias, S. (2013). *Production and operations analysis*. En 6ha Revides edition. London, Ed. McGraw: Hill Higher Education, pp. 736.
- Oztemel, E. (2010). *Intelligent manufacturing systems*. En: Benyoucef, L., Grabot B. (Eds.), *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Cardiff, United Kingdom, pp. 1–41. ISBN 978-1-84996-118-9.
- Rosenzweig, E., Easton, G. (2013). *Tradeoffs in manufacturing? a meta analysis and critique of the literature*, *Production and Operations Management*, vol. 19, no. 2, pp.127–141.
- Unland, R. (2015). *Industrial agents*. En: Leitão, P., Karnouskos, S. (Eds.), *Industrial agents: Emerging application of software agents in industry*. 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Punithavathy Govindaradjane, 2015. p. 23–44. ISBN 978-0-12-800341-1.
- Ulieru, M., Stefanoiu, D., Norrie, D. (2000). *Holonic self-organization of multi-agent systems by fuzzy modeling with application to intelligent manufacturing*. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 3, p.1661–1666
- Vlahavas, I., Vrakas, D. (2005). *Intelligent Techniques for Planning*. IGI Global. 360 p. ISBN 1-59140-450-9
- Wang, F., Xu, D., Tan, M., Wan, Z. (2005). *A holonic architecture for reconfigurable manufacturing systems*, *Mechatronics Engineering Department*, pp. 905–909.
- Wooldridge, M. (2009). *An Introduction to MultiAgent Systems*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. Second Edt, 2009, 453 p. ISBN 978-0-470-51946-2