

## Progresos en los sistemas de manufactura inteligentes según el paradigma holónico

SIMÓN-MARMOLEJO, Isaías\*†, LÓPEZ-ORTEGA, Omar, RAMOS-VELASCO, Luis Enrique y CRUZ, René

Recibido Octubre 9, 2017; Aceptado Diciembre 15, 2017

### Resumen

El objetivo del presente artículo, es describir la evolución, tendencias y novedades de los sistemas de manufactura inteligentes desarrollados según el paradigma holónico. Los resultados del análisis claro y sistemático de una selección de artículos hallados en la literatura, suscitan el concepto de manufactura holónico desde el punto de vista conceptual, y muestran que, entender e integrar holones en una plataforma bajo la tecnología de sistemas de múltiples agentes (Multi-Agent Systems, MAS) que representen dispositivos físicos (máquinas, robots, cintas transportadoras, almacenes, productos, etc.) y entidades no físicas (órdenes de clientes, órdenes de manufactura, planes de producción, programas globales de producción, entre otros) de un sistema de producción no es una tarea fácil, sobre todo porque las pocas aplicaciones industriales cubren una amplia gama de dominios y la mayoría de las arquitecturas reportadas en la literatura se encuentran en ambientes académicos, de laboratorio y no en plantas de producción reales. Por otro lado, se describen aportes críticos que llevan a nuevos investigadores a discernir cuál/cuáles son los modelos teóricos, que se considera apropiados y confiables para modelar sistemas holónicos. El artículo concluye que la tecnología de los Sistemas Holónicos de Manufactura (Holonc Manufacturing Systems, HMS) es un campo de investigación activo, que permite incluir diferentes áreas del conocimiento para su implementación en aplicaciones reales, temas de interés futuros en la investigación.

**Sistemas de manufactura tradicionales, sistemas de manufactura flexibles, sistemas de manufactura inteligentes, sistemas de manufactura holónicos**

### Abstract

The objective of this article is to describe the evolution, trends and innovations of the intelligent manufacturing systems developed according to the holonic paradigm. The results of a clear and systematic analysis of a selection of articles found in the literature raise the concept of holonic manufacturing from the conceptual point of view and show that understanding and integrating holons in a platform under the technology of Multi-Agent Systems (MAS) representing physical devices (machines, robots, conveyors, warehouses, products, etc.) and non-physical entities (customer orders, manufacturing orders, production plans, among others) of a production system is not an easy task, especially since the few industrial applications cover a wide range of domains and most of the architectures reported in the literature are found in academic, laboratory and not actual production plants. On the other hand, we describe critical contributions that lead new researchers to discern which/which are the theoretical models, which are considered appropriate and reliable to model holonic systems. The article concludes that Holonic Manufacturing Systems (HMS) technology is an active field of research, which allows the inclusion of different areas of knowledge for implementation in real applications, topics of future interest in research.

**Traditional manufacturing systems, Flexible manufacturing systems, Intelligent manufacturing systems, Holonic manufacturing systems**

**Citación:** SIMÓN-MARMOLEJO, Isaías, LÓPEZ-ORTEGA, Omar, RAMOS-VELASCO, Luis Enrique y CRUZ, René. Progresos en los sistemas de manufactura inteligentes según el paradigma holónico. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2017, 4-13: 61-76

\*Correspondencia al Autor: (Correo Electrónico: isaias.simn@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En la última década se observan cambios significativos en el entorno de manufactura: pasan de economías locales hacia economías globales, con necesidades de clientes pidiendo productos de mayor calidad a menores costos, altamente personalizados y con un ciclo de vida corto (Leitão y Restivo, 2006), por lo que los sistemas de manufactura tradicionales, basados en estructuras jerárquicas de control habituales y rígidas, ya no pueden hacer frente a estos exigentes desafíos (Nagel et al., 1991, N.R.C., 1998). Es por esto que actualmente para que un sistema de manufactura sea competitivo en el mercado bajo estas consideraciones, deberá adoptar características y estrategias globales que vayan desde las funciones de diseño de fabricación hasta el envío del producto que impliquen inteligencia, flexibilidad, calidad, adaptabilidad a los cambios del entorno, rapidez de respuesta y robustez contra la ocurrencia de disturbios, mismas que se han convertido en la clave del éxito en muchas organizaciones (Araújo et al., 2015, Nahmias, 2013, Rosenzweig y Easton, 2013).

Para lograr tal efecto, la automatización es un indicador clave en la manufactura, el auto-comportamiento de las máquinas industriales logra menores costos de operación, niveles de producción más altos y productos que cumplen con la calidad y necesidades de los clientes desde el diseño hasta el envío de los mismos. Sin embargo, aunque la tecnología de un Sistema de Manufactura Flexible (SMF) proporcione todas estas ventajas, la automatización no es suficiente para brindar una verdadera ventaja competitiva.

En este sentido, Oztemel (2010) menciona que nuevos métodos de fabricación están surgiendo hacia sistemas de manufactura totalmente automatizados y no tripulados, que podría ser muy flexible, reconfigurable, reutilizable, e interoperables, así como autónomos e inteligentes considerados como una de las formas útiles de tratar con las expectativas del cliente. Así, en un intento de modelar sistemas de manufactura fundamentados en analogías de la naturaleza o sistemas de organización social, las tendencias evolutivas en el tema siguen aumentando hacia el diseño de sistemas de manufactura con capacidad de auto-organizarse basados en módulos autónomos, biotecnología y conceptos holónicos que permitan una mejor gestión de la producción (Tharumarajah et al., 1996).

Sin embargo, esta nueva tecnología que no sólo es cada vez más compleja de controlar sino que también presenta una serie de problemas de decisión, junto con los cambios ambientales con incrementos dinámicos, actividades complejas y disturbios en el sistema, imponen nuevas restricciones en función de programación, que deben adaptarse en consecuencia a pesar de las capacidades y bondades hasta ahora alcanzadas, razón por la que concebir y analizar esta analogía desde el punto de vista teórico práctico requiere del entendimiento de la evolución, tendencia y terminología que comprende este nuevo paradigma para aprovechar al máximo los beneficios que contrae el concepto de manufactura holónica.

En las siguientes secciones se presenta los orígenes del concepto holónico, la sección 2 provee información de los SMI incluyendo un análisis de los cambios y progreso histórico de los sistemas de manufactura.

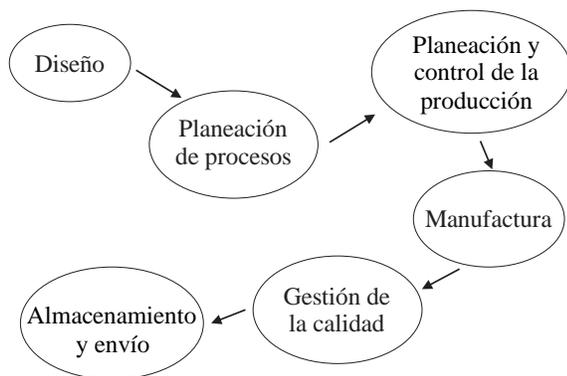
También son revisadas tecnologías fundamentales de inteligencia artificial para establecer la base de los MAS (sección 3). Seguido a esto, en la sección 4 se mencionan las características básicas de los HMS, sus entidades constituyentes y se proporciona la arquitectura respectiva. La sección 5, resalta las bondades de MAS en beneficio de los HMS. Finalmente el documento resalta en el apartado 6 y 7 un resumen y las conclusiones puntuales de este nuevo paradigma.

### Evolución de los sistemas de manufactura

Esta sección, provee una revisión general de los cambios que han venido sufriendo los Sistemas de Manufactura Tradicionales (SMT), hasta lo que son los Sistemas de Manufactura Inteligentes (SMI). Información más detallada al respecto puede encontrarse en Oztemel (2010).

### Sistemas de manufactura tradicionales

Para entender los enfoques comunes de los SMI, es importante hacer una revisión de los SMT. Este tipo de sistemas recibe entradas (material, conocimiento, energía, recursos humanos, etc.) y transforma éstas internamente mediante diferentes procesos para finalmente entregar un producto terminado a la salida, véase la Figura 1.



**Figura 1** Componentes de un sistema de manufactura tradicional (Oztemel, 2010)

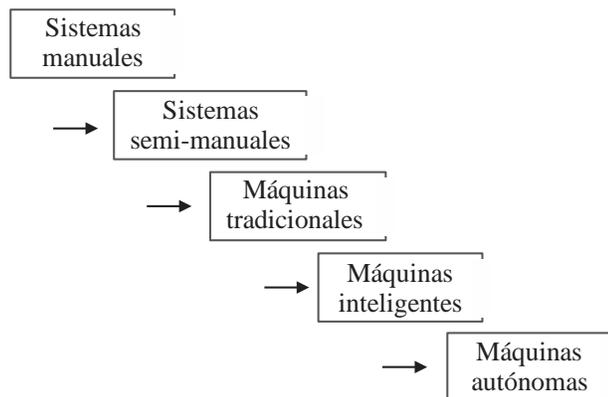
Cada componente, se constituye de un conjunto de actividades con el fin de obtener un producto terminado, esta misma serie de etapas, tienen la intención de mantener la calidad general de los procesos de fabricación y del mismo producto procesado en coordinación con máquinas y equipos presentes en el sistema de producción.

### Cambios en los sistemas de manufactura

En este entendido y para seguir al margen de la competencia, Oztemel (2010) afirma que los avances en los SMT se han relacionado tanto con máquinas y sistemas de producción tecnológicos, como con otros aspectos que influyen en su desempeño:

- Cambios tecnológicos en los sistemas mecánicos de producción.
- Métodos de manufactura.
- Cambios en la planeación de la producción y administrativos.
- Cambios ambientales.
- Cambios gerenciales.
- Expectativa y necesidades de los clientes.

Respectivo a los *cambios tecnológicos en los sistemas mecánicos de producción*, actualmente, las operaciones de mecanizado se han transforman en sistemas autónomos capaces de manejar actividades de manufactura relacionadas con todos lo aspecto de producción y cuestiones medioambientales, como tal, los progresos tecnológicos incluyen tanto cambios en la tecnología de manufactura como infraestructura respectiva, la Figura 2 muestra tendencias históricas a lo largo de esta línea.

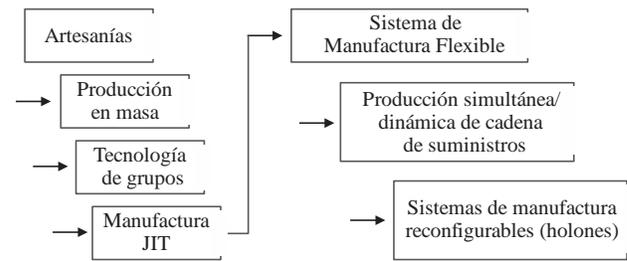


**Figura 2** Evolución en los procesos de producción (Oztemel, 2010)

En paralelo a los avances presentes en los sistemas de mecanizado, nuevos productos y procesos de producción también están siendo establecidos en las siguientes áreas:

- Sistemas de información y automatización.
- Prototipado rápido.
- Sistemas de manufactura inteligentes y autónomos.
- Materiales inteligentes.
- Nano y biotecnologías.
- I+D en procesos y productos.

Los cambios en los métodos de manufactura, también son evidentes en los sistemas de manufactura. La Figura 3, señala el progreso que se ha venido dando hasta nuestros días.



**Figura 3** Evolución en los métodos de manufactura (Oztemel, 2010)

La Figura 3, muestra que los respectivos cambios están en marcha, y no es difícil prever fábricas totalmente no tripuladas y máquinas virtuales que dominen a los sistemas de manufactura, los cuales podría ser muy flexibles, reconfigurables, reutilizables, e interoperable, y la tendencia a evolucionar en este aspecto todavía sigue aumentando con los HMS.

Por otro lado, los cambios en la planeación de la producción y administrativos contraen nuevas aportaciones, pasando de la Planeación Individual de Productos a Planeación de Requerimiento de Materiales (MRP), Planeación de Recursos de Manufactura (MRP II), Manufactura Just in Time (JIT), Planificación de Recursos Empresariales (ERP), Administración de Recursos Empresariales (ERM), Administración Estratégica de Recursos Empresariales (SERM), Manufactura Ágil y Esbelta, hasta el actual paradigma E-Manufacturing para los sistemas de información basados en entornos globales que permite a los diseñadores de productos una mejor y más fácil comunicación, haciendo posible compartir y colaborar durante el desarrollo de nuevos productos. Al mismo tiempo, la integración también permite a los empleados llevar a cabo sus actividades de forma remota (De Souza et al., 2010).

Por otro lado, los desarrollos ecológicos o cambios ambientales en las áreas de fabricación son regulados por órganos responsables de hacen todo lo posible para mantener la seguridad del medio ambiente y proporcionar normas que no contravengan con la salud y el medio ambiente. Actualmente, el calentamiento global, la contaminación del aire, el análisis de factores ambientales, etc., son la principal preocupación de los sistemas de producción, es aquí donde los sistemas inteligentes pueden ser muy útiles para manejar los requisitos y mantener los espacios de producción bajo regulaciones ambientales.

Los cambios gerenciales. Son otro motivo de preocupación, que tiene un efecto potencial sobre los sistemas de producción. El progreso en los enfoques de gestión desde el comienzo de la revolución industrial ha evolucionado pasando de la administración en talleres, administración por objetivos, hasta la administración estratégica, vistos estos como cambios dramáticos en los últimos 100 años.

Otro factor de suma importancia son sin duda las expectativas y necesidades de los clientes quienes se convirtieron con el paso de los años en elementos claves de la ventaja competitiva. Hoy en día algunos productos incluso desvían la atención de las nuevas expectativas de los clientes, que a su vez impulsan nuevos enfoques aplicados a los sistemas de producción, esta tendencia hacia la compra de productos realizada por los clientes evoluciona desde la compra de cualquier producto disponible en el mercado, lo que se desea comprar, selección alternativa de productos, búsqueda de productos con capacidad múltiples hasta productos que sean capaces de satisfacer sus necesidades futuras.

A manera de conclusión al tema, Oztemel, (2010) afirma que los avances en los SMT y la combinación de la enorme cantidad de variables que se pueden observar, han recibido mucha atención en investigación e industria alrededor de todo el mundo, por lo que ya no es una fantasía pensar que existen sistemas inteligentes los cuales pueden ser considerados como una de las formas útiles de tratar con las expectativas del cliente, quienes van desde cuestionar al clientes para diseñar los productos según necesidades particulares hasta producir exactamente el diseño sedeado. La integración de los sistemas de manufactura y realidad virtual con la que cuentan hoy en día algunos sistemas productivos de clase mundial pueden lograr de manera fácil que esto suceda, razón por la que investigaciones recientes buscan garantizar sistemas de control con niveles de rendimiento mínimo en el caso de circunstancias imprevistas, predecir el comportamiento de las órdenes individuales, el uso generalizado de sistemas de control en entornos industriales (uso de la información global), etc. Sin embargo, lo anterior tiene su origen en técnicas de inteligencia artificial las cuales se han utilizado en la manufactura inteligente desde hace más de veinte años (Botti y Giret, 2008).

### **Sistemas de manufactura inteligentes e inteligencia artificial**

Los equipos de expertos de la industria, científicos e ingenieros de las naciones industriales más importantes del mundo, trabajaron juntos desde 1992 hasta 1994 para construir y probar un marco para la colaboración internacional en Sistemas de Manufactura Inteligentes (Botti y Giret, 2008). Los SMI son los que realizan las funciones de manufactura como si los operadores humanos estuviesen haciendo el trabajo (Kusiak, 2000), y están equipados con un nivel suficiente de inteligencia (técnicas de Inteligencia Artificial, IA) para realizar estas actividades.

La IA, es considerada como una rama de la computación y relaciona un fenómeno natural con una analogía artificial a través de programas de computador el cual trata con comportamiento inteligente y es capaz de exhibir este mismo (Shen et al., 2001).

Shen et al. (2001) refieren que en 1965 con el proyecto DENTRAL, la inteligencia artificial desarrollo el campo de Sistemas Expertos (SE), quienes pueden imitar la capacidad mental del hombre y relacionar reglas de sintaxis del lenguaje hablado y escrito sobre la base de la experiencia, para luego hacer juicios acerca de un problema, cuya solución se logra con mejores juicios y más rápidamente que el ser humano (Kusiak, 2000). Por ejemplo, el conocimiento es procesado en lugar de los datos, algoritmos tradicionales se sustituyen por algoritmos heurísticos; y en lugar de representación numérica, representación simbólica se toma como el foco principal, con lo que es posible exhibir comportamiento inteligente al tomar decisiones sobre la base de los conocimientos disponibles, realizar acciones con conocimiento incierto e incluso inexacto e incompleto (Oztemel, 2010).

Por otro lado, es importante hacer notar que un SE es un tipo particular de Sistemas Basado en Conocimiento (Knowledge-Based Systems, KBSs) y este a su vez es un tipo de sistema inteligente en el sentido de almacenar, gestionar y estar relacionado con el saber o las capacidades humanas (Villena et al., 2012). Al hablar de KBSs en general, simplemente se está haciendo referencia a que lo más importante del sistema es el conocimiento que almacena y que gestiona, es decir, una visión estructural. Modelar el contenido de los mensajes a intercambiar entre pares de los KBSs es un problema semántico (significado, sentido o interpretación de signos lingüísticos).

Seguido a esto y derivado del problema para almacenar datos o conclusiones particulares e intentar compartir conocimiento entre localidades singulares las investigaciones en el área dieron origen a un nuevo paradigma de nombre “Inteligencia Artificial Distribuida”, misma que involucra estudios de distribución de procesos inteligentes sobre entidades independientes (Shen et al., 2001). De esta manera, la inteligencia artificial se enfocó inicialmente en el comportamiento de entidades singulares, mientras que la inteligencia artificial distribuida se interesó en el comportamiento de la interacción de múltiples entidades llamadas agentes.

### Sistemas de múltiples agentes

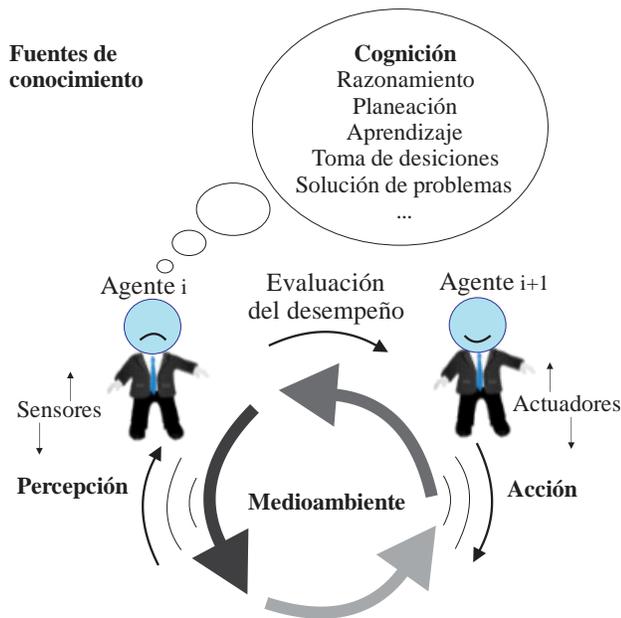
A principios de los noventa, los agentes y los sistemas basados en agentes comenzaron a convertirse en un importante tema de investigación que pronto llegó a ser uno de los temas más interesantes y con mayor financiamiento en el área de informática. Aspectos de interés destacan que la investigación basada en agentes no solo atrajo a investigadores en áreas de informática, sino que también a científicos destacados en otras disciplinas de investigación básica, como sistemas de producción, ingeniería de control, biología, sociología, etc. (Unland, 2015). En lo que refiere a sectores industriales, D’Inverno et al. (2001) menciona que debido a la enorme necesidad de intentar cumplir los requisitos impuestos actualmente a las empresas de la industria, se introducen por primera vez el paradigma de agentes de software inteligentes en el campo de la Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) y su utilización en el área de fabricación, con el objetivo de diseñar sistemas complejos distribuidos como una técnica para entender y simular sociedades o bien sistemas de producción.

Bellifemine et al. (2004) puntualiza que no existe una definición única para definir a un agente pero describe que todas las definiciones coinciden en que un agente es esencialmente un componente de software especial que tiene la autonomía que proporciona una interfaz interoperable a un sistema arbitrario y/o se comporta como un agente humano, trabajando para algunos clientes en la búsqueda de su propia agenda. Un grupo de estos agentes componen a un sistema de múltiples agentes (MAS), mismo que pueden modelar sistemas complejos e introducir la posibilidad de que los agentes tengan objetivos comunes o contrapuestos, estos agentes pueden interactuar unos con otros tanto indirectamente (actuando sobre el medio ambiente) o directamente (a través de la comunicación y la negociación), además, los agentes pueden decidir cooperar para beneficio mutuo o pueden competir para servir a sus propios intereses.

De acuerdo con Unland (2015), un agente inteligente es un sistema (o entidad computacional) que resuelve problemas y está orientada a objetivos, es caracterizado entre otras cosas por su autonomía, proactividad y su habilidad para comunicarse, en el ejercicio de sus funciones previstas. Ser autónomo significa poder llevar a cabo tareas complejas de forma independiente y a menudo a largo plazo. Ser proactivo implica que pueden tomar la iniciativa para llevar a cabo una tarea determinada, incluso sin un estímulo explícito de un usuario externo; y ser comunicativo permite la interacción con otras entidades para ayudar en la consecución de sus propios objetivos y de los demás. El modelo arquitectónico de una aplicación orientada agente es intrínsecamente igual a igual, así cualquier agente es capaz de iniciar la comunicación con cualquier otro agente o ser objeto de una comunicación entrante en cualquier momento.

Pueden poseer tanto sistemas de hardware como de software y son capaces de incorporar más de una tecnología de IA, estos pueden aprender y trabajar al mismo tiempo, mediante la percepción de su medio ambiente con la ayuda de sensores y actuadores. La arquitectura general de un agente se presenta en la Figura 4.

Como se observa en la Figura 4, hay tres componentes principales: 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 de acuerdo con el orden de importancia. La cognición implica procesar la información percibida y en consecuencia se toma una decisión, este proceso puede requerir de distintos métodos de sistemas inteligentes tales como aprendizaje e implantación; el mecanismo de la cognición de un agente también puede hacer frente a situaciones inesperadas y adaptarse a nuevas situaciones lo más rápido posible. Por lo tanto, una arquitectura altamente dinámica y flexible debe ser establecida. La acción lleva a cabo la orden recibida de la cognición mediante los respectivos actuadores; por ejemplo, cuando un robot realiza cambios en su operación o se detiene conforme se encuentra una barrera delante.



**Figura 4** Arquitectura general de un agente inteligente [7]

Una vez que el agente actúa, podrían cambiarse las señales ambientales y con ello nueva información se generaría, esto inmediatamente puede ser avistado por la percepción, y la acción respectiva se genera para que los efectores puedan operar nuevamente.

Si es necesario, un agente puede ser móvil, con la capacidad de viajar entre distintos nodos de una red informática, puede ser veraz, proporcionando la certeza de que no va a comunicar deliberadamente información falsa, puede ser benevolente, siempre tratando de llevar a cabo lo que se pide de él, puede ser racional, actuando siempre con el fin de alcanzar sus metas y nunca para evitar que sus metas se logran, y puede aprender, adaptarse a su entorno y adaptarse a los deseos de sus usuarios, entre muchas otras habilidades (Oztemel, 2010).

De esta manera, la tecnología de agentes ha sido objeto de un amplio debate en la investigación dentro de la comunidad científica desde hace varios años, observando, aplicaciones recientes vinculadas a sistemas multi-agentes en amplias variedades de aplicaciones comerciales que van desde sistemas relativamente pequeños para la asistencia de personal hasta sistemas complejos con misión crítica como sistemas industriales en temas de control de procesos, diagnósticos del sistema, manufactura, logística transporte, gestión de redes, etc.

### Sistemas holónicos de manufactura

El concepto holónico se originó a partir de la obra del autor y filósofo húngaro Arthur Koestler quien intentó capturar el comportamiento de los sistemas complejos, considerando sus entidades constitutivas de ser tanto totalidades y partes al mismo tiempo (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 significa una parte o una partícula, donde como integrantes de una organización social, los holones se comportan "en parte como totalidades y completamente como partes", según la manera en que se observen, 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). El concepto evolucionó de holón, holarquía a fabricación holónica y con los años a HMS mismo que a la fecha es un importante avance en el campo del control descentralizado para un SMI (Araúzoa et al., 2015,).

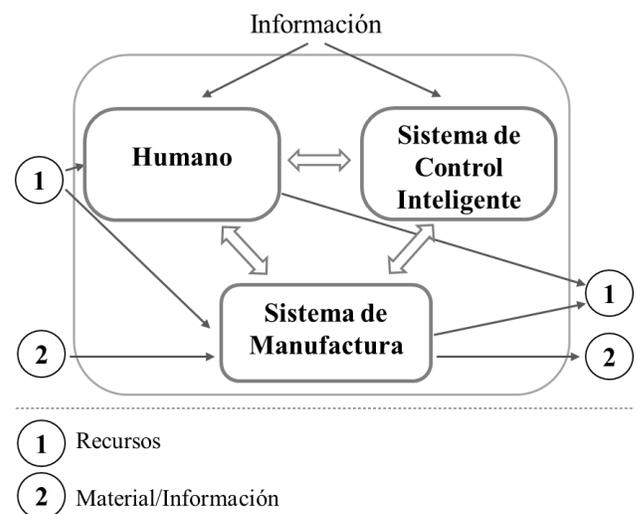
La idea de utilizar el concepto holónico en el diseño de sistemas de fabricación surgió a principios de 1990 en el programa de SMI como una solución para hacer frente al aumento de la frecuencia en los cambios que afecta a todo el mundo de los negocios incluido el sector manufacturero (Babiceanu y Chen, 2006). Para 1994 un consorcio de investigadores con más de 30 socios; académicos e industriales de Australia, Canadá, Europa, Japón y Estados Unidos aprobaron la manufactura holónica como parte de un proyecto internacional de SMI, cuyo objetivo fue desarrollar las herramientas y la aplicación del concepto holónico en el mundo real de la industria manufacturera, y así obtener los beneficios potenciales que ofrecen organizaciones holónicas como "la estabilidad en la ocurrencia de perturbaciones, la capacidad de adaptación frente a los cambios y el uso eficiente de los recursos disponibles" (Van Brussel et al., 1998). Para guiar la investigación en el área, los participantes del consorcio SMI, establecieron una serie de definiciones de trabajo claves en las entidades constitutivas de los sistemas holónicos (Christensen, 1994):

**Holón:** Es un bloque de construcción autónomo y cooperativo de un sistema de fabricación para la transformación, transporte, almacenamiento y/o validación de la información u objetos físicos, se compone en parte de procesamiento de información y a menudo es una parte de procesamiento físico, puede o no ser parte de otro holón del mismo rango, de orden superior o inferior que proporcione el procesamiento necesario, la información y las interfaces humanas con el mundo exterior (véase Figura 5).

**Holarquía:** Un sistema de holones que pueden cooperar para lograr una meta u objetivo.

El sistema se divide básicamente en la parte de procesamiento físico y la parte de procesamiento de la información, ambas constituyen un conjunto de componentes holónicos (holarquía). La parte de procesamiento físico transforma la materia prima en productos terminados a través de las actividades autónomas y cooperativas de los componentes holónicos. Los datos requeridos en los procesos físicos se generan y determinan en la sección de procesamiento de la información, que también se constituye de un conjunto de componentes holónicos.

**HMS:** Una holarquía que integra toda la gama de actividades de fabricación, desde la entrada de materia prima al sistema de producción, el diseño, la planeación, producción, calidad, inventarios hasta la comercialización del producto terminado, reflejada como una empresa de manufactura ágil.



**Figura 5** Modelo de actividad genérica de un holón (Christensen, 1994)

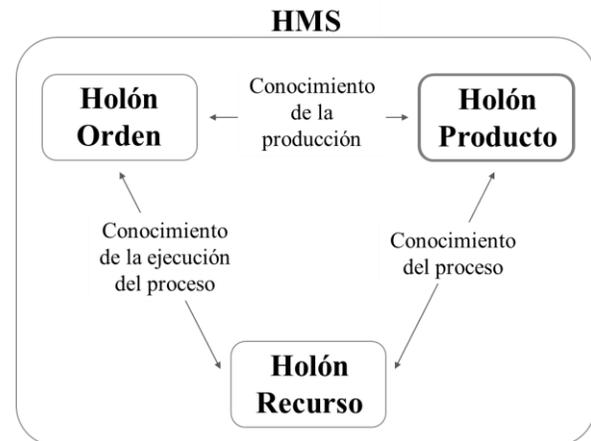
Dichas características hacen de un holón un bloque de construcción que está diseñados para reflejar el hecho de que las distintas unidades de manufactura se comporten de una manera autónoma, cooperativa, auto-organizada y reconfigurable:

- Autonomía: Capacidad de una entidad para crear y controlar la ejecución de sus planes y/o estrategias.
- Cooperación: Un proceso por el cual un conjunto de entidades desarrolla planes mutuamente aceptables y ejecuta estos planes.
- Auto-organización: Es la capacidad de las unidades de fabricación para reunirse y auto-organizarse con el fin de alcanzar una meta de producción.
- Reconfigurabilidad: Capacidad funcional de una unidad de fabricación para ser simplemente alterada de una manera oportuna y rentable.

### Estructura de un HMS

En Van Brussel et al. (1998) se describe la arquitectura de un HMS con referencia en tres tipos de holones básicos: holones orden, holones producto y holones recurso, cada uno de ellos es responsable de un aspecto de control de fabricación, ya sea logística, planificación tecnológica, o capacidades de recursos, respectivamente. Estos holones están estructurados utilizando conceptos orientados a objetos como la agregación y la especialización. Dichos holones son controlados por un holón denominado Staff empleando una estructura de sistemas expertos en su apoyo. La estructura permite el uso de algoritmos centralizados y la incorporación de sistemas heredados.

Así en Van Brussel et al., (1998) se desarrolló la arquitectura Product-Resource-Order-Staff Architecture (PROSA), que se refiere a los diferentes tipos de holones constituyentes. La Figura 6, muestra la constitución de un HMS u holarquía de manufactura compuesta por los holones base.



**Figura 6** Bloques de construcción básico de un HMS y sus relaciones (Van Brussel et al., 1998)

Como se muestra en la Figura 6, estos tres tipos de holones intercambiar conocimientos sobre el sistema de manufactura. El holón producto y el holón recurso se comunican y se transmiten el conocimiento del proceso, mientras que el mismo holón producto y holón orden intercambio conocimientos de producción, y el holón recurso con el holón orden comparten el conocimiento de la ejecución del proceso. En la Figura 6, se puede observar que la información es bidireccional, es decir que cualquiera de los holones tiene información y conocimiento del HMS.

Por otro lado, Leitão y Restivo (2006) propone una arquitectura de control definida como ADaptive holonic COntrol aRchitecture (ADACOR), la cual tiene como objetivo contribuir en la mejora del desempeño de los sistemas de control de manufactura en términos de reacción ágil ante emergencias y cambios de las empresas caracterizados por frecuentes perturbaciones. El enfoque de la arquitectura ADACOR, es a nivel de planta y en sistemas de manufactura flexibles especialmente organizados con producción job shop. ADACOR 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 7.

En la Figura 7, los holones producto, colocados en el nivel de planificación 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 holones operativo y supervisor durante la elaboración de planes de procesos alternativos, esto es necesario para verificar que los holones operativo están disponibles en la planta, finalmente para la coordinación global y optimizado, los holones tarea interactúan con los holones supervisor colocados a nivel de coordinación.

Tomando las bases anteriores, pero desde otro enfoque, uno de los artículos más recientes y de gran importancia para la presente investigación es Barbosa et al. (2015), inspirado en teorías biológicas y evolutivas, y a través de la auto-organización y principios del caos, la estructura holónica ADACOR<sup>2</sup> se propone como una evolución de la arquitectura de control holónica ADACOR, la nueva estructura busca lograr un sistema reconfigurable con capacidad evolutiva por lo que considera la introducción de un mecanismo de auto-organización de dos vectores: la auto-organización del comportamiento, que se encuentra a nivel micro y que permite al sistema responder sin problemas a perturbaciones, y la auto-organización estructural, que se muestran a nivel macro la cual admite al sistema reaccionar drásticamente, con ello el sistema ADACOR<sup>2</sup> logra una multitud de configuraciones dinámicas. La Figura 8 muestra cómo se dan estos cambios de manera general.

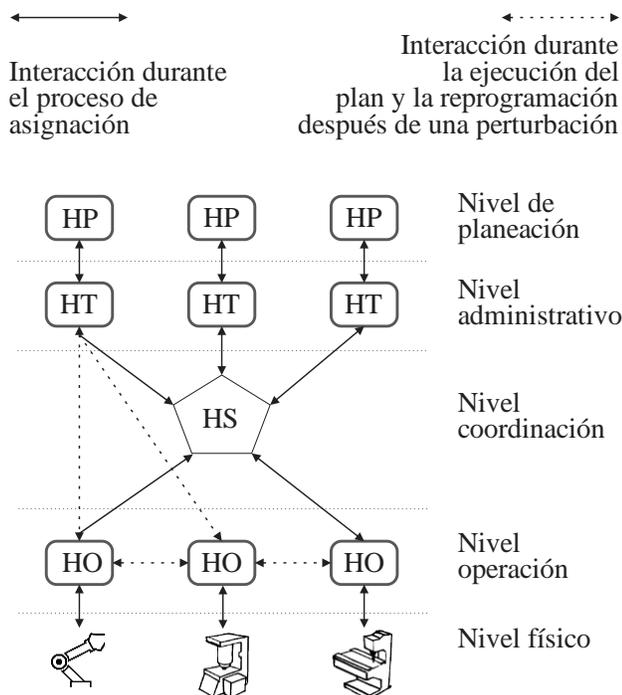
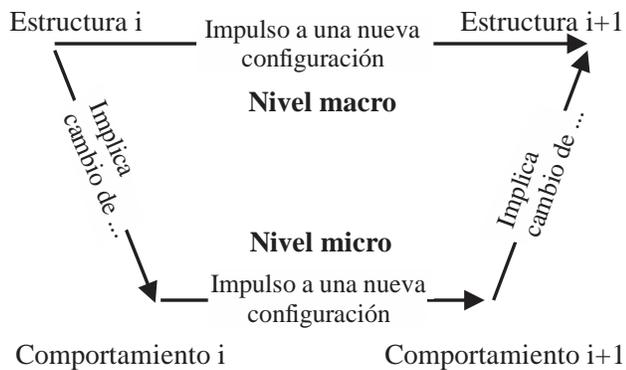


Figura 7 Holones clase ADACOR en interacción (Leitão y Restivo, 2006)

El módulo aborda dos tipos de componentes de auto-organización y comprende principalmente el seguimiento, el descubrimiento, el razonamiento, el aprendizaje, un estabilizador de nerviosismo y componentes despachador.



**Figura 8** ADACOR2: Interacción entre los niveles micro y macro (Barbosa et al., 2015)

### Comportamiento de las entidad de un HMS

A manera de ejemplo, se da al lector una visión deliberada al extremo con el fin de poner de relieve los elementos clave de un HMS. En un principio, un sistema de manufactura holónico sólo se compone de un conjunto de holones operativo, no organizados que forman a un holón supervisor. A la llegada de un pedido, el holón supervisor crea un holón tarea que empieza a negociar con los holones operativo la prestación de determinados procesos de producción. Durante el proceso de negociación, el holón tarea exige propiedades específicas de la tarea u operación por realizar, tales como calidad o rendimiento, mientras que los holones operativo tratan de maximizar su utilización. Al final de la negociación, los holones operativo se organizan para formar la línea de producción necesaria y el holón orden inicia la creación de holones producto a procesar.

Seguido a esto, holones producto entran en la holarquía de manufactura y negocian de inmediato recursos físicos con el fin de conseguir ser procesados. Una vez que estas operaciones se han realizado en un recurso físico, la pieza de trabajo reinicia la negociación con las (próximas) operaciones restantes. Tanto en la estructura ADACOR como en ADACOR<sup>2</sup> en estado estacionario, los holones están organizados en una estructura jerárquica, la actividad general del holón supervisor juegan el papel de coordinación y optimizan la programación de sus subordinados organizados en grupos, su trabajo es mantener una negociación permanente entre holones tarea y holones operativo asegurando que la carga de holones producto se distribuyan de manera eficiente en los recursos físicos disponibles para alcanzar los objetivos globales de esta holarquía, el sistema funciona con forme a esta configuración hasta que se detecta una perturbación. Sin un holón operativo sufre la perturbación éste 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, compartiendo la carga de trabajo como sucede en los sistemas biológicos cuando existe un daño, más información puede consultarse en Van Brussel et al., (1998), Leitão y Restivo 2006, Barbosa et al. (2015).

De esta forma, los HMS están diseñados a través de módulos autónomos, cooperativas 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. Sin embargo, es importante hacer notar dos aspectos de la manufactura holónica:

- Estrategias de control en tiempo real basados 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.

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

Bajo estos supuestos y para evaluar la arquitectura antes descrita, se han desarrollado diversos experimentos de simulación, donde es importante comentar que tanto PROSA, ADACOR, ADACOR<sup>2</sup>, como otras arquitecturas propuestas, utilizan la tecnología de sistemas de múltiples agentes mediante un sistema middleware totalmente distribuido de nombre JADE (Java Agent DEvelopment framework), respetando plenamente las especificaciones FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents). Así mismo, 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 de la tecnología de agentes tiene su fundamento en lo siguiente:

### **Tecnología de los HMS**

Pese a los avances tecnológicos alcanzados a la fecha, los MAS desarrollados no consideran el impacto global de un sistema de producción, por lo que los resultados obtenidos no son realistas, además de que existen dos diferencias marcadas entre las entidades constitutivas de un MAS y un HMS:

- La primera de ellas está relacionado con la agregación de holones en la arquitectura holónica. Paolucci y Sacile (2005) observaron que “holones en una holarquía son bastante similares a los agentes en un sistema de múltiples agentes, si uno no tiene en cuenta el hecho de que un holón puede contener otros holones”.
- La otra diferencia proviene de las capacidades de modelado de las entidades constitutivas de los dos tipos de sistemas, mientras que los agentes son entidades de software puro y hardware base, los holones pueden incluir sistemas de mayor potencia tanto de hardware como software dentro del sistema modelado.

Pese a estas diferencias, un MAS es la única plataforma identificada como la herramienta de modelado para el desarrollo de sistemas holónicos. Las características de autonomía, cooperación, reactividad y proactividad de los agentes hacen de una organización de agentes o arquitectura MAS una herramienta adecuada para aplicar los conceptos de HMS (Radu y Chen, 2006). Por lo tanto, la investigación respectiva a HMS está fuertemente relacionada con la investigación del MAS en la comunidad de IAD. Como Ulrieru et al. (2000) declaró, "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 ha 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 para ello 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, 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 productos, holones tareas, holones operativo y holones supervisor), añadiendo en cada caso los comportamientos e interacciones descritos en el apartado anterior.

### Resumiendo

Es así, como la aplicación de los conceptos holónicos a la fabricación fue motivada inicialmente por la incapacidad de los SMT para hacer frente a la evolución de los productos dentro de instalaciones de manufactura existentes y para mantener los niveles de rendimiento satisfactorios fuera de las condiciones de funcionamiento normales, y dado que el concepto de HMS combina las mejores características de la organización jerárquica y heterárquica, se conserva la estabilidad de jerarquía mientras que se proporciona la flexibilidad dinámica de heterarquía necesaria para operar un sistema de manufactura de la mejor manera posible (autonomía, alta flexibilidad y agilidad) (Botti y Giret, 2008).

Hechas las observaciones anteriores, se puede conceptualizar que el entorno de producción, abarca diferentes dominios de aplicación como el control de la producción, la programación de la producción y la planificación de la producción, lo que resulta adecuado para dar cabida a la aplicación de un sistema de control holónico. No obstante, entender e integrar holones en una plataforma de agentes de software inteligente que represente los componentes físicos de un sistema de producción no es una tarea fácil, sobre todo porque las pocas aplicaciones industriales cubren una amplia gama de dominios y la mayoría de las aplicaciones reportadas se encuentran en ambientes académicos, de laboratorio y no en plantas reales.

### Conclusion y trabajos futuros

En este artículo se describen los antecedentes de los HMS iniciando el análisis desde el origen de un SMT hasta la descripción de los sistemas de manufactura flexibles y SMI. Los SMT son difíciles de controlar y predecir debido a razones operativas y estructurales, por otro lado los SMI han venido evolucionando rápidamente y se desarrollan en plazos de tiempo muy cortos, con lo que se hace evidente que los SMI serán dominantes en los sistemas de manufactura mediante la aplicación del paradigma holónico. Por tanto, se puede concluir que la tecnología de los HMS es un campo de investigación activo, que permite incluir diferentes áreas del conocimiento para su implementación en aplicaciones reales.

En este entendido, el objetivo general de la presente investigación busca desarrollar un sistema de control inteligente de la producción haciendo uso del paradigma de manufactura holónico, que permita vincular flexibilidad, modularidad y control descentralizado en sistemas productivos complejos.

Con ello, será posible alcanzar una mejor ventaja competitiva al tomar decisiones adecuadas dentro de un sistema adaptable que haga uso correcto de los recursos limitados.

En consecuencia en un futuro se probará la hipótesis de que mediante el modelo de un sistema generalizado de producción basado en un HMS, es posible desarrollar un sistema de control inteligente de la producción innovador, el cual promueva una línea de base para la fabricación de unidades autónomas, altamente flexibles, ágiles, reutilizables y modulares.

Dentro de los trabajos de investigación por desarrollar son: modelado, análisis, diseño e implementación de un HMS.

### Referencias

- Araújo, J.A.; Martínez, R.; Laviós, J.J.; Martínez, J.J.B. (2015). Programación y control de sistemas de fabricación flexibles: un enfoque holónico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12, 58-68.
- Babiceanu, R.F.; Chen, F.F. (2006). Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, 111-131.
- Barbosa, José; Leitao, Paulo; Adam, Emmanuel; Trentesaux, Damien. (2015). Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. *Computers in Industry*, 66, 99-111.
- Bellifemine, Fabio; Caire, Giovanni; Greenwood, Dominic. (2004). *Developing multi-agent systems with JADE*. Wiley Series in Agent Technology, Series Editor: Michael Wooldridge, Liverpool University, UK. 286 p. ISBN: 978-0-470-05747-6 (HB).
- Botti, Vicent; Giret Adriana. (2008). A multi-agent methodology for holonic manufacturing systems. *Holonic Manufacturing Systems*, Hardcover, XVI, Capítulo 2, 7-20.
- Christensen, J. (1994). *Holonic Manufacturing Systems - Initial Architecture and Standards Directions*. At First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hannover, Germany.
- D'Inverno, Mark; Luck, Michael. 2001. *Understanding Agent Systems*, Springer-Verlag, Berlin. 191 p. ISBN 978-3-662-04609-8.
- De Souza, J.; Teixeira, E.; Álvares, A.; Ferreira, J. 2010. An internet-oriented management and control system in a distributed manufacturing environment. *International Journal Manufacturing Research*, 5(1) 5-25.
- Koestler, Arthur. (1967). *The ghost in the machine*. Arkana. 384 p. ISBN 9780140191929.
- Kusiak, Andrew. (2000). *Computational intelligence in design and manufacturing*. John Wiley and Sons, 560 p. ISBN: 978-0-471-34879-5.
- Leitão, Paulo; Restivo, Francisco. (2006). ADACOR: a holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 57(2), 21-130.
- Leitão, Paulo; Vrba Pavel. (2011). Recent developments and future trends of industrial Agents. *Lecture Notes in Computer Science*. 6867, p.15-28.
- N.R.C. (U.S.). (1998). *Visionary manufacturing challenges for 2020*. National Academy Press, Washington, DC. 172 p. ISBN 0-309-06182-2.

Nagel, Roger; Dove, Rick; Goldman, Steven; Preiss, Kenneth.; I.I. of Lehigh University; U. States; D. of Defense; O. of Managing Technology. (1991). 21st century manufacturing enterprise strategy. Lacoocca Institute. Lehigh University. Bethlehem, PA., 1, 58 p. ISBN 0-9624866-3-9.

Nahmias, Steven. (2013). Production and Operations Analysis. 6ha Revides edition. London: McGraw Hill Higher Education. 736 p. ISBN 0077159004.

Oztemel, E. (2010). Intelligent manufacturing systems. Editors Benyoucef L., Grabot B. Springer Series in Advanced Manufacturing. 1-41.

Paolucci, Massimo; Sacile, Roberto. (2005). Agent-Based Manufacturing and Control Systems: New Agile Manufacturing Solutions for Achieving Peak Performance. CRC Press, Boca Raton, FL, 270 p. ISBN. 1-57444-336-4.

Rosenzweig, Even; Easton, George. (2013). Tradeoffs in manufacturing? a meta analysis and critique of the literature. Production and Operations Management, 19(2), 127-141.

Tharumarajah, A.; Wells, A.J.; Nemes, L. (1996). Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing system concepts. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 9(3) p. 217-226.

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, 3, 1661-1666.

Van Brussel, Hendrik; Wyns, Jo; Valckenaers, Paul; Bongaerts, Luc; Peeters, Patrick. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. Computers in Industry, 37(3), 255-274.