

# Hacia la Integración de un Sistema Inteligente de Manufactura: Consideraciones y Experimentos

Luna-Vázquez Israel, López-Juárez Ismael,  
Corona Castuera Jorge, Ortiz Rivera Arquímedes, Peña Cabrera Mario

CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada  
Grupo de Investigación en Mecatrónica y Sistemas Inteligentes de Manufactura (GIMSIM).  
Parque Ind. B. Q., El Marques, Qro. CP 76246.  
email: (iluna, ilopez, jcorona, aortiz, mario.pena)@ciateq.mx

## Resumen

*Se presenta en este trabajo el diseño de un Sistema Inteligente de Manufactura (SIM), que incluye la integración de sensores que ofrecen adaptabilidad en condiciones cambiantes de producción: tolerancias, errores de posicionamiento, perturbaciones, etc. En primera instancia se muestra el diseño de la arquitectura que incluye un robot industrial con capacidad de sensado de Fuerza/Torque en la muñeca. Resultados obtenidos demuestran la viabilidad de incorporar "inteligencia" al robot industrial para aprender habilidades de ensamble de componentes en línea. El sistema a la fecha incorpora además la integración de percepción visual de objetos en 2D y la interacción con otras máquinas-herramienta como torno mecánico, centro de maquinado y banda transportadora. En este trabajo se presenta la metodología de diseño del SIM, consideraciones y experimentos realizados en términos de la fabricación de partes de ensamble y su integración en un producto prototipo terminado.*

**Palabras clave:** Sistema Inteligente de Manufactura, SIM, Ensamble Mecánico, Robótica Inteligente.

## 1. Introducción

El área más importante de aplicación de un Sistema Inteligente de Manufactura (SIM) es en la producción de lotes manufacturados. La importancia de este tipo de manufactura es alta. En los países industrializados alrededor del 30% del Producto Interno Bruto (PIB) proviene de las manufacturas, 40% de éstas se producen en lotes y solo el 15% en masa. De la fabricación en lotes, 75% son menores a 50 unidades [1]. Existe un amplio mercado en este sector, dada la fuerte dependencia tecnológica del

exterior que implica costos de asesoría y de uso de marcas y patentes. Datos de 1998, muestran que de 34,895 empresas altamente representativas de la economía mexicana, 77.1% emplea tecnología obsoleta, 19.5% cuenta con equipo moderno vulnerable, 2.9% tiene fuerza tecnológica pero carece de capacidad competitiva estratégica, y únicamente el 0.5% utiliza tecnología de punta [2]. Asimismo un sector atractivo es la automatización de los procesos de ensamble ya que estudios revelan que estos procesos representan un 20% de los costos unitarios de producción [3].

Considerando la importancia económica que representa para el país el desarrollo de SIM's, el CIATEQ A.C., decidió realizar investigación aplicada en integración de arquitecturas inteligentes robustas y capaces de interactuar en ambientes no estructurados donde se requiere gran adaptabilidad.

En primera instancia se introduce la noción de Sistema Inteligente de Manufactura (SIM), seguido por la descripción de los elementos de la arquitectura. Posteriormente se presentan las etapas de fabricación de componentes y su ensamble en un producto prototipo de manera autónoma. Se mencionan los avances al respecto y finalmente se presentan las conclusiones considerando el desarrollo futuro del SIM.

## 2. Sistemas Inteligentes de Manufactura

El diseño de Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) es una tarea compleja debida a la amplia variedad de alternativas de control y configuraciones disponibles para el diseñador. Básicamente, el diseño es un problema de seleccionar juegos de alternativas empleando múltiples criterios (costos, flexibilidad, calidad, riesgos financieros y técnicos, etc.). Los modelos establecidos para el

diseño de FMS se pueden categorizar de acuerdo a Son en: 1. Técnicas de medición de desempeño y métodos, 2. Estimación de costos y métodos y 3. Técnicas de análisis de decisión y métodos [4]. Para facilitar el diseño de FMS se han propuesto metodologías como la de Borenstein [5], que pretende utilizar los aspectos estratégicos, financieros y de operaciones de manera integral para facilitar el diseño.

Estudios de prospectiva tecnológica indican que los procesos de manufactura del futuro estarán fuertemente caracterizados por la necesidad de adaptarse a las demandas de manufactura ágil, incluyendo una rápida respuesta a los cambios en los requerimientos del cliente, diseño e ingeniería concurrente, bajos costos en volúmenes pequeños de producción, manufactura distribuida, entrega justo-a-tiempo, planeación y calendarización en tiempo-real, incremento en la demanda por precisión y calidad, disminución en tolerancia de errores y mediciones del proceso *in situ* [6].

Las demanda del mercado propiciara que los productos se fabriquen en el punto de consumo, que la manufactura sea completamente distribuida y orientada a sistemas *holonicos* [7]. Manufactura Holonica es parte del Programa de Sistemas Inteligentes de Manufactura que involucra a varios países desarrollados y que intenta resolver la fragilidad de los sistemas actuales de producción. Reemplazando sistemas rígidos e inflexibles por sistemas más adaptables al cambio, los holones ocupan el rol de intermediarios jerárquicos. Por lo tanto los holones son autónomos, unidades discretas y cooperativas capaces de lidiar con perturbaciones y aun proveer la funcionalidad de soportar el gran *todo* y por lo tanto incrementar la robustez del sistema.

Para el diseño del SIM motivo de discusión en este artículo, es importante mencionar que se ha empleado una metodología bottom-up. Se comenzó en primera instancia por desarrollar los elementos inteligentes de la celda (holons) de manera particular. Primeramente, se integró un robot inteligente capaz de realizar ensambles mecánicos simples de manera no supervisada. Posteriormente se han incorporado elementos de producción así como la integración de percepción sensorial de visión artificial y procesamiento de voz, que en su conjunto proveen al SIM de las capacidades necesarias para maquinari los componentes de un producto y realizar un ensamble autónomo, lo que se describe en los siguientes puntos.

### 3. Evolución de la Arquitectura Inteligente de Manufactura

La arquitectura consistió inicialmente de un sistema robótico básico, como se muestra en la Figura

1. Dicha celda estuvo constituida por un robot industrial y su controlador, computadora esclava, sensor de Fuerza/Torque y computadora maestra. El controlador del robot integra los elementos de control y potencia hacia los servomotores del robot. La computadora maestra se comunica con el controlador mediante dos puertos seriales: El primero en modo “supervisorio”, a través del cual se envían comandos de alto nivel hacia el controlador y el otro en modo “Alter” a través de la computadora esclava para movimientos incrementales finos.

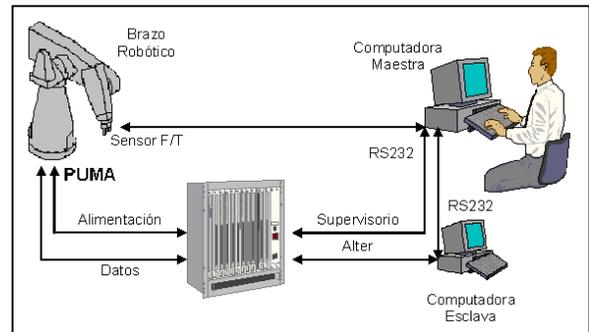


Fig. 1. Arquitectura inicial de ensamble inteligente.

Tomando como base esta arquitectura se integraron los elementos de percepción sensorial y producción que se ilustran en la Figura 2 y que se describen a continuación:

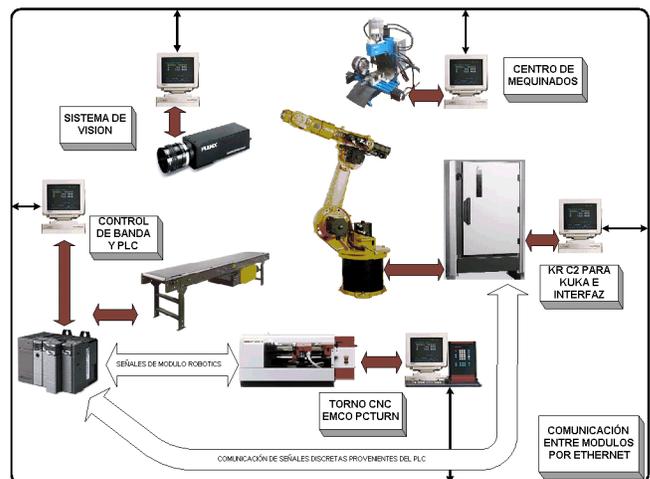


Fig. 2 Arquitectura del Sistema Inteligente de manufactura

- **Robot Industrial KUKA KR 15/2** de seis grados de libertad, carga útil de 15 Kg. La arquitectura de comunicación es similar a la de la figura 1, con la diferencia de que no existe una computadora esclava.

- **Sistema de Visión** implementado con una cámara monocromática de alta resolución progresiva, PULNIX TM-6710. La obtención de imágenes digitales se realiza a través de una PC donde reside el Frame grabber.
- **Sensado de Fuerza**  
El sensado de fuerzas de contacto durante operaciones de ensamble es realizado por el sensor de Fuerza/Torque Jr3 que se ha instalado en la muñeca del robot.
- **Procesamiento de Voz**  
El procesamiento de voz se realiza a través de un API comercial y cuyo control Active-X ha sido empotrado en el controlador inteligente del robot.
- **Torno automatizado** PC TURN 55 de EMCO, este cuenta con software dedicado y una PC la cual controla la interfaz de programación y comunicación. La puerta de acceso es automática y el contrapunto electromecánico.
- **Centro de maquinados** MAX NC-10 de 4 ejes que permite el maquinado de diversas piezas con tamaños de 8" en eje X, 5" en eje Y y 3" en eje Z. Esta maquina cuenta además con una herramienta digitalizadora para realizar prototipos de ingeniería inversa.
- **PLC** SLC 500 de AB cuenta con diversos módulos de E/S cuya finalidad es supervisar los eventos en el transportador, torno automatizado y robot industrial.
- **Transportador** Hytrol TA de carga media con cinturón de banda plástica, que se controla mediante un variador de velocidad SIEMENS que envía señales de eventos al PLC.

#### 4. Experimentos y Consideraciones

Como parte de la metodología de diseño y con el objeto de iniciar la fabricación de un lote prototipo, se establecen tres etapas una de producción, una donde se maquinan los componentes de ensamble, otra donde se efectúa el reconocimiento de objetos empleando visión computarizada y otra de ensamble donde se alimentan y/o se ensamblan propiamente los componentes para finalmente formar el prototipo.

Los componentes de ensamble se muestran en la figura 3a y 3b, donde se ilustra el componente macho y el componente hembra respectivamente. Para efectos de demostración, es pertinente

mencionar que solo se maquinó el componente macho en el SIM durante el proceso de fabricación.

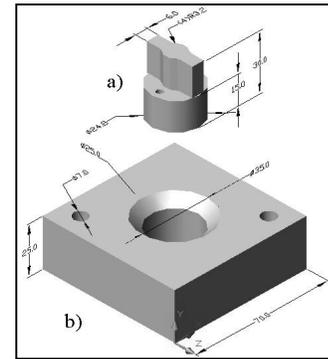


Fig. 3.

a) Componente macho, b) Componente hembra.

Para la operación se consideraron las siguientes etapas generales:

#### 4.1 Maquinado de componente macho

Esta etapa es la que consume mayor tiempo debido a los tiempos de maquinado. Es aquí precisamente donde se tiene la mayor interacción con los equipos: robot, banda, torno, y PLC. Es importante mencionar en este punto que para el centro de maquinado aún no se finaliza la carga/descarga automática de material, sino que se efectúa de manera manual. La fabricación del prototipo se lleva a cabo en el SIM empleando la configuración que se muestra en la figura 4.

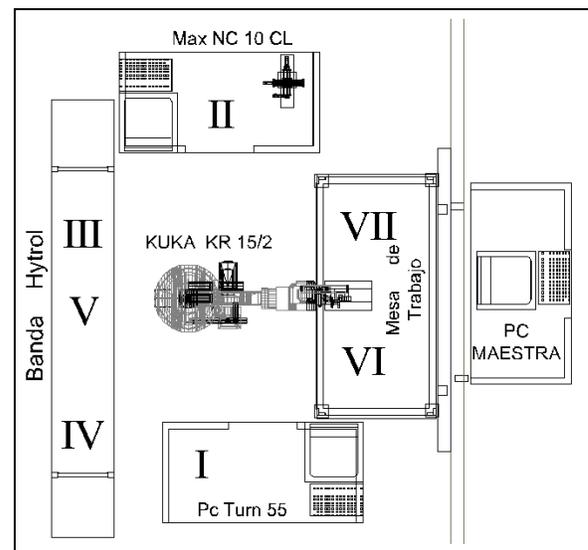
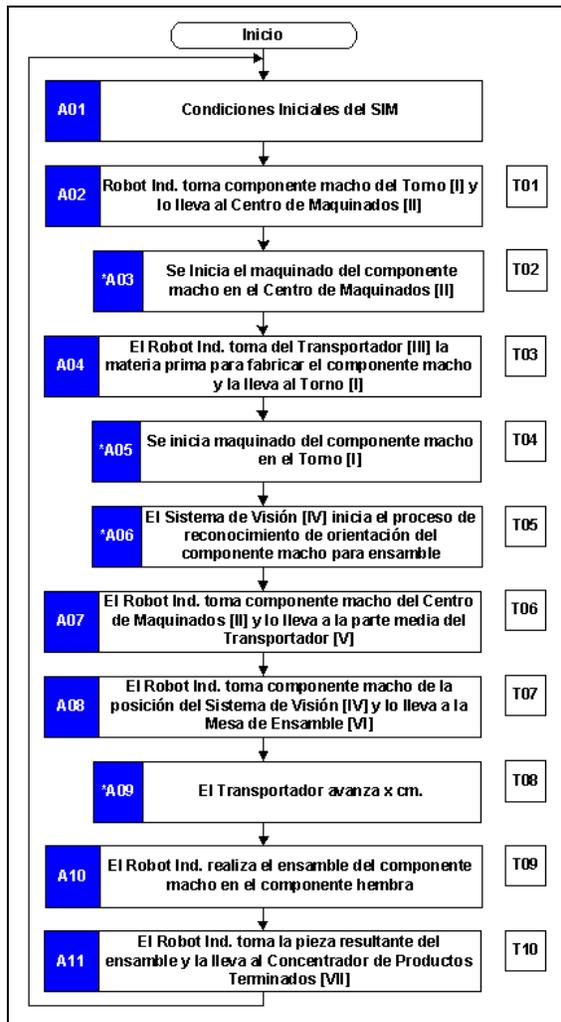


Fig. 4. Acomodo de los módulos en el SIM.

El diagrama de eventos de la figura 5 representa el desarrollo de un prototipo que se ensambla empleando los componentes macho y hembra.

Las actividades a manera general en la secuencia de operación que siguen la nomenclatura \*AXX denotan actividades que se desarrollan en manera paralela al movimiento del robot industrial. Asimismo se indican del lado derecho de la figura 5, la variable de tiempo que se tiene asociada para la actividad.



**Fig. 5**  
Secuencia de operación de la Celda Inteligente de Manufactura.

La tabla 1 muestra los tiempos expresados en segundos necesarios para realizar la actividad de movimiento de piezas entre los diferentes puntos de la celda. La razón por la cual se expresan diferentes tiempos para la misma actividad proviene del hecho de hacer evidente las diferentes capacidades de operación del robot industrial KR 15, el cual permite ajustar las velocidades de operación se considero que no era necesario operar el brazo robótico al 100 % de su velocidad ya que los tiempos obtenidos a una velocidad del 75% están extensamente sobrados en

comparación con los tiempos de maquinado del componente macho.

Actividad	tiempo (s)			
	% Vel. Nominal del Robot			
	10%	30%	50%	75%
A02	64.40	32.56	14.94	10.79
A04	61.12	21.70	13.81	10.32
A07	63.21	22.72	14.34	10.02
A08	61.55	22.08	14.31	9.74
A11	12.96	5.95	3.56	2.43

**Tabla 1**  
Actividades contra tiempo del robot

La tabla 2 muestra los tiempos mínimos constantes, requeridos para el proceso de producción del componente macho, reconocimiento y ensamble mecánico de los componentes hembra y macho.

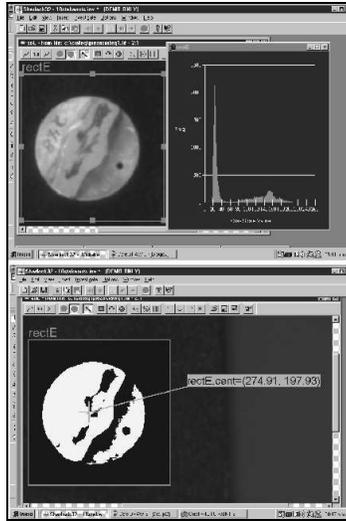
Actividad	tiempo (s)	
*A03	747.00	T02
*A05	300.00	T04
*A06	1.00	T05
*A09	2.50	T08
*A10	78.00	T09

**Tabla 2**  
Tiempos de procesos del SIM.

Tiempos tales como T02 y T04 que corresponden a los procesos en el centro de maquinados y torno resultaron ser los más largos, esto sugiere que estos intervalos pueden ser utilizados efectivamente en alguna otra actividad para el robot.

#### 4.2 Reconocimiento de componente macho

La imagen es procesada para obtener una imagen binaria sobre la cual se aplican algoritmos que permiten transformar la forma en una colección ordenada de pares numéricos. Esta información es analizada y utilizada para obtener información de las coordenadas del centroide y puntos importantes de tal forma que permiten el cálculo de la orientación del objeto para obtener el POSE [8] como se observa en la figura 6.



**Fig. 6**

Determinación de centroide y orientación

Una vez obtenida esta información y considerando que la coordenada Z del componente es conocida, el manipulador puede entonces tomar la pieza y llevarla al punto de ensamble en donde éste se completa de manera autónoma sin necesidad de conocer de manera precisa las posiciones de ambos componentes.

#### 4.3 Ensamble Inteligente

El proceso de ensamble inteligente (figura 7) esta basado en el empleo de un Controlador Neuronal el cual tiene la capacidad de aprender de manera incremental y de generalizar su conocimiento. Dicho de otra forma se tiene la capacidad de aprender a ensamblar una pieza que nunca antes se ha ensamblado y mejorar su destreza conforme el robot posee mayor experiencia. Asimismo es capaz también que una vez habiendo aprendido el ensamble de una pieza con geometría determinada, extrapolar este conocimiento y utilizarlo para ensamblar otra pieza con características diferentes (ver detalles en [9]).



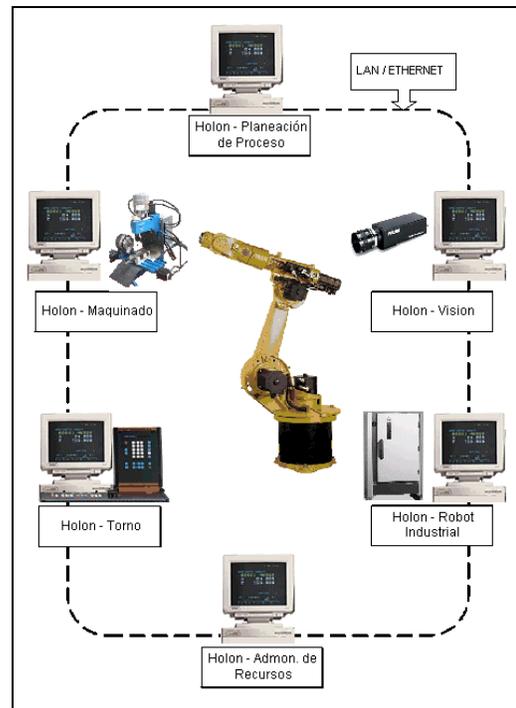
**Fig. 7**

Ensamble Inteligente

## 5. Conclusiones y Trabajo futuro

Se ha resaltado en este trabajo la importancia de los SIM, así como el enfoque integral que se ha tenido en la interrelación de todos los componentes del sistema, incluyendo un sistema inteligente de ensamble.

Se prevé como área de desarrollo futuro la integración de un sistema de control distribuido a través de la integración de las computadoras asociadas en una red local Ethernet y la utilización de interfaces dinámicas como CORBA[10]. Empleando estas interfaces cada maquina podrá compartir información del proceso, donde además los parámetros del proceso podrán ser monitoreados y modificados a través del cualquiera de los holones en un sistema holónico como se muestra en la figura 8. Se prevé como trabajo futuro tener cuatro holones de producción, uno de planeación de proceso y uno de administración de recursos.



**Fig. 8**

Sistema Holónico

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen al apoyo recibido por parte de la Agencia Alemana de Intercambio Académico (DAAD) y del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCyTEQ) para el desarrollo de la Celda Inteligente de Manufactura.

## 7. Referencias

- [1] Greenwood, Nigel.  
*Implementing Flexible Manufacturing Systems*. Macmillan Education. E.U.A., 1988.
- [2] <http://www.infosel.com.mx> (Estadísticas sobre el empleo de tecnologías en las empresas representativas de la economía mexicana)
- [3] L A Martin-Vega, H K Brown, W H Shaw, T J Sanders.  
*Industrial perspectives on research needs and opportunities in manufacturing assembly*. Journal of Manufacturing Systems, 14(1):45-58, 1995.
- [4] Son Y. K  
A decision framework for modern manufacturing economics, Int. Journal Prod. Res. 29 (1991) 2483-2499.
- [5] Denis Borenstein.  
*Intelligent decision support system for flexible manufacturing system design*, Annals of Operations Research, 77(1998), Pp. 129-156.
- [6] James S Albus  
*An Intelligent System Architecture for Manufacturing*. Proc of the Int. Conf. on Intelligent Systems: A semiotic perspective. Gaithersburg, MD, USA. Oct 20-23, 1996.
- [7] David Blanchard (editorial)  
*The shape of Manufacturing Things to come* Intelligent Manufacturing, Vol 1 No. 4, April, 1995.
- [8] M Peña, I Lopez-Juarez, R. Osorio  
*Reconocimiento invariante de objetos aplicado a un sistema de visión para robots*. XV Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA). Santiago de Chile, pags. 28-31 Octubre, 2002.
- [9] I Lopez-Juarez, M Howarth  
*Knowledge Acquisition and Learning in Unstructured Robotic Assembly Environments*. The International Journal of Information Sciences, Special Issue on Intelligent Learning and Control of robotics and Intelligent Machines in Unstructured Environments. Volume 145, Issue 1, August 2002, Pp 89-111.
- [10] CORBA  
*Common Object Request Broker Architecture*.  
<http://www.acl.lanl.gov/CORBA/>