

# Metodología de diseño mecatrónico de robots

Jaime Humberto Carvajal Rojas\*

## RESUMEN

Este artículo presenta una metodología de diseño mecatrónico de robots industriales basada en la Ingeniería Concurrente CE, los sistemas de Diseño Asistido por Computador CAD y la Ingeniería Asistida por Computador CAE. Se identifican y describen tres tareas fundamentales: (1) modelamiento matemático de la cinemática y de la dinámica del robot, y modelamiento gráfico computadorizado de la configuración, (2) simulación gráfica del funcionamiento y de la acción de control (3) e integración de las tecnologías que constituyen el nuevo producto mecatrónico.

**Palabras clave:** Robots industriales, mecatrónica, diseño, modelamiento, simulación, integración tecnológica.

## Methodology and electromechanical design of robots

### ABSTRACT

This article presents a methodology of electromechanical design of industrial robots based on the Concurrent Engineering CE, the Computerized Assisted Design program CAD, and the Computerized Assisted Engineering CAE. They are identified each other and three task are defined specifically: (1) mathematical modeling of the cinematic , the robot dynamic, and graphic modeling computerized of the configuration, (2) graphic simulation of the functioning and control action (3) integration of the technology which form the new mecha-tronic product.

**Key words:** Industrial Robots, Mecha-tronics, Design, Modeling, Simulation, technological integration

\* Decano Facultad de Ingeniería de Diseño y Automatización Electrónica. Ph. D. en Ingeniería Mecánica con Especialización en Ingeniería Mecatrónica y Robótica Industrial de La Universidad Estatal de Campinas UNICAMP, SP, Brasil. Magister en Sistemas Automáticos de Producción de la UTP, Colombia. Ingeniero Mecánico de la UFPS, Cúcuta, Colombia. Correo electrónico: jcarvajal@lasalle.edu.co

Fecha de recepción: 13 de abril de 2005

Fecha de aprobación: 10 de mayo de 2005

## INTRODUCCIÓN

La metodología de diseño mecatrónico de robots industriales integra tres tareas fundamentales: modelamiento, simulación e integración tecnológica. Estas tareas interactúan durante todo el proceso de diseño y de manufactura, se ayudan mutuamente y se intercambian datos para hacer ajustes y optimizaciones. Esta metodología está basada en la aplicación de la ingeniería concurrente CE, los sistemas CAD, y la ingeniería asistida por computador CAE.

## INGENIERÍA CONCURRENTE CE

En la última década del siglo XX, la CE emergió como una tendencia en el diseño y manufactura automatizados de nuevos productos en Sistemas Flexibles de Manufactura FMS y ha evolucionado a través de la investigación. Recién surgida, los investigadores propusieron diferentes definiciones, algunos la homologan a la ingeniería simultánea SE los diseñadores industriales como Evans (1990) afirmaban que era un método de diseño para la manufactura y ensamblaje; investigadores como Harley y Mortimer (1991) la definieron como la aplicación del análisis de diseño antes de la producción; Parsaei y Sullivan (1993) consideraron que su implementación debe apoyarse en el empleo del computador digital en el diseño y la manufactura; Ishii (1992) afirmó que la CE generalmente se ha reconocido como una práctica de diseño y manufactura, que considera varios valores de ciclos de vida para un producto desde su etapa de diseño y abarca otros aspectos como facilidad de manufactura, facilidad de ensamblaje y funcionalidad. Shina (1991) definió la CE como la integración más temprana posible de todos los conocimientos de la fábrica, en recursos, experiencia en el diseño, investigación, mercadeo, manufactura y ventas para la creación de un nuevo producto, con alta

calidad, y bajo costo para complacer las expectativas de los clientes. Yazdani (1996) propone una definición sintetizada de la CE, como la concurrencia o superposición del diseño y desarrollo de productos y sus procesos de manufactura.

Con base en los anteriores conceptos, puede considerarse la CE como sinónimo de un buen equipo de trabajo interdisciplinario y multidisciplinario, con buenas relaciones y comunicaciones entre las funciones en cada departamento o especialidad, cuyo objetivo es reducir los tiempos en el diseño y la manufactura por superposición de actividades.

Para crear un ambiente en donde la CE sea puesta en práctica es necesario considerar los siguientes atributos:

- 1) Disponer de un equipo de trabajo multidisciplinario.
- 2) Que el equipo multidisciplinario trabaje como equipo interdisciplinario.
- 3) Que el equipo de trabajo opere en red computarizada para el intercambio de información.
- 4) El equipo de trabajo debe tener el poder de tomar decisiones de acuerdo a su conocimiento y experiencia.
- 5) Lo anterior es solamente posible en una organización empresarial horizontal en donde la integración es posible, las comunicaciones son claras, y el personal está directamente involucrado en la ejecución del trabajo y los programas.

La filosofía de la CE se centra en el hecho que los grupos de expertos que se integran; manejan y toman decisiones en conjunto respecto al diseño del producto. Groover (1996) establece que la CE es posible por la adecuada información, coordinación y cooperación entre los grupos de especialistas que integran la organización de un proyecto. El

empleo eficiente de la CE en el proceso de diseño y manufactura, permite el logro de varios objetivos, entre los que se tienen:

- 1) Diseño para la manufactura y el ensamblaje.
- 2) Diseño para la calidad.
- 3) Diseño para un ciclo de vida predeterminado.
- 4) Diseño para minimizar costos.

En el diseño mecatrónico hay una integración sinérgica de los sistemas, mecánicos, sistemas eléctricos - electrónicos y sistemas computarizados como un todo, en donde los diseñadores de cada área intervienen en todas las etapas el diseño. Esta sinergia es generada por la combinación correcta de los parámetros, de tal manera que el diseño final del producto es tan bueno como la suma de las partes que lo componen. Los productos mecatrónicos muestran características de funcionamiento tan buenas, imposibles de lograr sin esta combinación sinérgica.

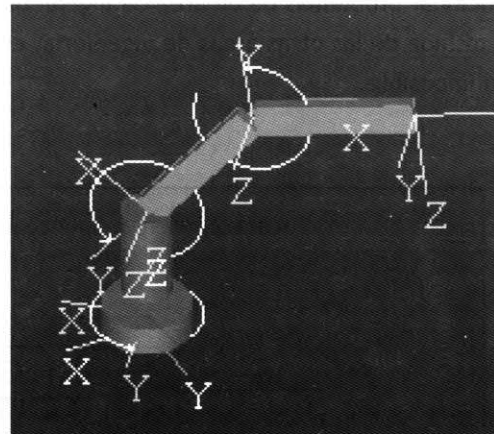
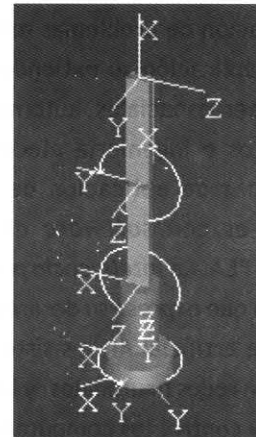
## SISTEMAS CAD

Los sistemas CAD son usados en el proyecto mecatrónico para el modelo gráfico y simulación del movimiento del robot en 3D, están constituidos por comandos y su flexibilidad le permite encontrar variantes para crear y editar los modelos geométricos. Tienen tres tipos de herramientas para los modelos: modelos en mallas, modelos en superficies y modelos en sólidos.

Los modelos con sólidos primitivos son los más empleados y las operaciones booleanas son el método para obtener sólidos compuestos. Con el comando UNION dos o más sólidos se unen para configurar uno solo, absorbiendo la parte común o superpuesta. Se pueden unir sólidos que no se cortan, es decir, sólidos separados y sin contacto. Con el comando SUBSTRACT se obtienen sólidos después de substraer un conjunto de sólidos a otro conjunto de sólidos. Con el comando INTERSECT se obtiene un nuevo sólido

configurado con la parte común o intersección de los sólidos interceptados. La Figura 1, muestra un modelo CAD de un robot proyectado con sus parámetros funcionales.

**FIGURA 1. MODELO CAD DE ROBOT DE CONFIGURACIÓN ANGULAR RRR DE 3 GDL.**



## INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR CAE

La CAE define una tecnología en donde el computador es herramienta fundamental para la solución

de tareas en ingeniería como análisis, diseño, producción y control. El diseño y la manufactura asistidos por computador CAD / CAM son tecnologías computarizadas que han permitido la automatización del dibujo, diseño y manufactura. La *computación gráfica* es otra tecnología basada en el computador digital que ha permitido a los investigadores la visualización y animación de modelos de productos en forma realística. La *mecánica computacional* es empleada en la investigación como el arte y la ciencia de simulación de problemas mecánicos en el computador; su aplicación se extiende a problemas de las industrias aeroespaciales, automotrices, termo fluido, biomédicos e ingeniería electromagnética. Una de las formas de aplicación de la mecánica computacional es con *software* de análisis de elementos finitos FEA. La *inteligencia por computador* es una tecnología que expresa su desarrollo por medio de la inteligencia artificial AI, los sistemas expertos ES, simulación con redes neuronales, y lógica fuzzy. En *automatización y control* los computadores digitales realizan una importante función de programación y control de sistemas mecatrónicos. Hoy en día, tratar de solucionar problemas de un área de ingeniería en forma aislada de las otras áreas de ingeniería, es en verdad imposible.

## METODOLOGÍA DE DISEÑO MECATRÓNICO DE ROBOTS

La tarea de *modelamiento* toma como base el modelo matemático de la cinemática y de la dinámica del robot, es decir, el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que representan el comportamiento del movimiento del robot. Estas ecuaciones diferenciales de orden son no lineales, por lo que hay que darles un tratamiento con base en las series de expansión de Taylor para linealizarlas, a continuación aplicar la transformada de Laplace y finalmente manipular la función de transferencia en forma de diagrama de bloques. En algunos casos se emplea la ecuación de estado. El *modelamiento* significa también la representación gráfica en sistema CAD de la configuración del robot.

La tarea de *simulación* analiza el comportamiento de la cinemática del robot y de las diferentes estrategias de control para seleccionar la de mejor comportamiento. La tarea de *integración* significa el acoplamiento de los sistemas mecánicos, eléctricos - electrónicos y computarizados para configurar un nuevo producto mecatrónico. El diagrama de la

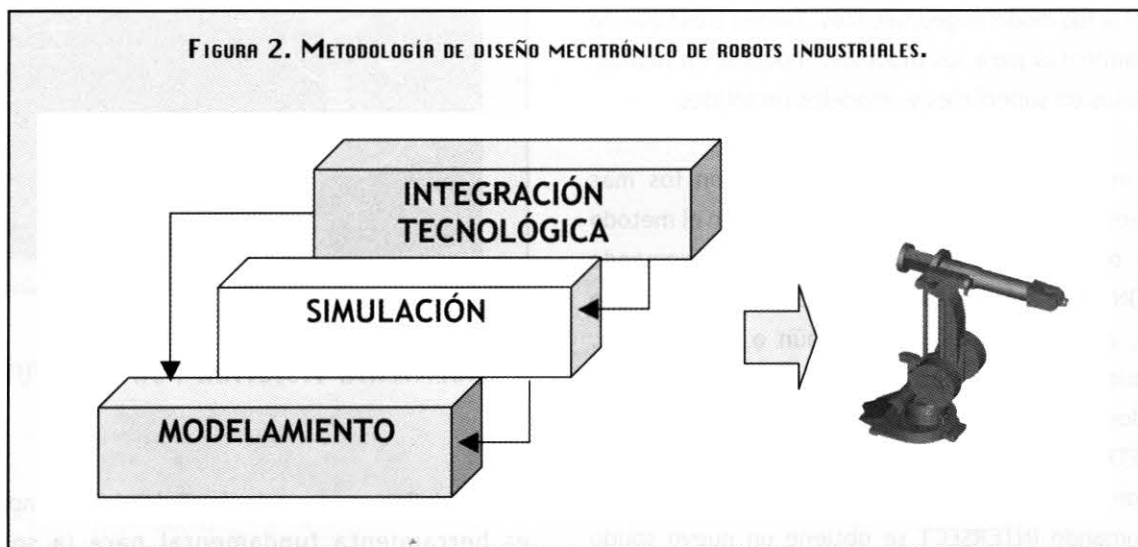


Figura 2, muestra en bloques la metodología de diseño mecatrónico de robots industriales para el desarrollo de estas tres tareas.



Antes de modelamiento en sistema CAD y el modelamiento matemático de la cinemática del robot, pueden considerarse tres tareas preliminares descritas: reconocimiento de una necesidad, diseño conceptual y especificaciones funcionales.

**Reconocimiento de una necesidad.** Los robots industriales tienen aplicación en los FMS y en los FAS, en donde se desempeñan fundamentalmente para el posicionamiento de piezas a ser mecanizadas en su respectiva máquina - herramienta CNC y para el posicionamiento sobre los sistemas de transporte. También se emplean en el posicionamiento de piezas a ser ensambladas. Estas son las áreas de mayor aplicación de robots en ambientes de manufactura. En menor escala los robots se emplean para efectuar funciones de manufactura como soldadura, pintura, etc. Entonces, inicialmente hay que definir el ambiente de manufactura o de ensamblaje del robot, considerar su estructura adecuada y calcular su volumen o espacio de trabajo.

**Diseño conceptual y especificaciones funcionales.** Definido el ambiente de manufactura o de ensamblaje del robot y su tarea, se especifican sus condiciones de funcionamiento, distancias entre puntos de posicionamiento, velocidad y aceleración en los movimientos, cargas a transferir, aproximación a la estructura definitiva, análisis de materiales para los elementos, análisis de la sección de los elementos, análisis de esfuerzos, ubicación de los motores y transmisiones, diseños de guías para articulaciones prismáticas, establecer rango de las variables en las articulaciones, planear tamaño del robot y cálculo del

espacio de trabajo. Con todos estos factores se llega a un bosquejo esquemático del robot requerido.

**Modelo matemático.** El modelo matemático, también llamado modelo de la dinámica del robot, es un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias con las cuales se puede predecir el comportamiento del robot. Implica, asignación de las coordenadas de las articulaciones, obtención de los parámetros de Denavit - Hartenberg, análisis de la cinemática directa, análisis de la cinemática inversa, cálculo del Jacobiano geométrico y análisis de la dinámica con la formulación de Lagrange - Euler o con la formulación de Newton - Euler.

**Modelo y diseño estructural con sistema CAD y CAE.** El diseño estructural significa definir la estructura básica del brazo robot, seleccionar los materiales de sus elementos, definir la sección de los elementos, definir el mecanismo en las articulaciones, diseñar la muñeca en donde se acopla la mano o herramienta del robot, analizar las cargas estáticas y dinámicas, analizar los momentos y las inercias. También, el diseño estructural implica configurar un modelo virtual mediante el sistema CAD y análisis con sistema CAE.

**Selección de motores, transmisiones, sensores y manos.** Conocido el modelo de la dinámica del robot, se pueden calcular los torques y fuerzas en las articulaciones. Con esta información se seleccionan los motores de catálogos comerciales y se diseña o seleccionan las transmisiones. Al llegar a este paso ya se tienen definidas las variables a controlar, por lo que se pueden seleccionar los sensores correspondientes. Conocidos los sensores puede obtenerse su modelo matemático para representarlo en diagrama de bloques y puedan integrarse al sistema de control. En el primer paso se ha definido la función del robot y ahora se procede a seleccionar o diseñar el mecanismo de la mano o a seleccionar la herramienta de trabajo.

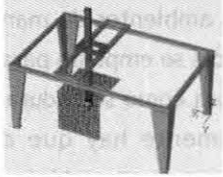
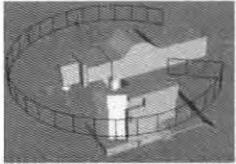
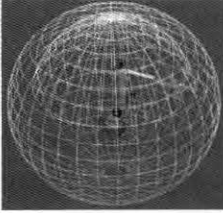
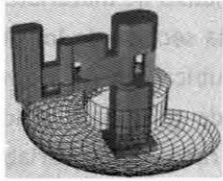
**Ampliación del modelo matemático.** Con los modelos matemáticos de los componentes calculados hasta ahora se puede organizar un solo modelo matemático de todo el sistema del robot; incluyendo el modelo matemático de los actuadores, transmisiones y sensores. También en este modelo matemático puede incluirse el efecto de las fricciones en las articulaciones y la influencia de perturbaciones en el sistema para obtener un modelo matemático total que sirve de base para estudiar la estrategia de control.

**Diseño del sistema de control.** El modelo matemático resultante se manipula empleando operadores diferenciales, transformadas de Laplace y Series de

Taylor. La función de transferencia obtenida, que representa el modelo, se simula mediante acciones básicas de control. A partir de este comportamiento inicial se establece la estrategia de control: control de torque, control de fuerza, control adaptativo, control robusto, control robusto - adaptivo y otros sistemas de control avanzado. Se busca la estrategia de control que satisfaga los requerimientos funcionales y resulte más económica.

**Optimización del diseño.** Se realizan las pruebas necesarias y se ajustan los parámetros y variables del robot para maximizarlos o minimizarlos.

**TABLA 1. CONFIGURACIONES FUNDAMENTALES DE ROBOTS COMERCIALES.**

Configuración	Cálculo de Volumen	Volumen de trabajo
Cartesiana	$L^3$ Cuando L es el desplazamiento de cada elemento	
Cilíndrica	$3\pi L^3$ Cuando L es el radio del cilindro	
Angular	$(32/3)\pi L^3$ Cuando L es la longitud de los elementos	
SCARA	$4\pi L^3$ Cuando L es la longitud de los elementos	

## SIMULACIÓN

El modelo del prototipo en sistema CAD y el modelo matemático de la cinemática son básicos para observar el comportamiento del robot antes de implantarse en la realidad y hacer los ajustes que correspondan.

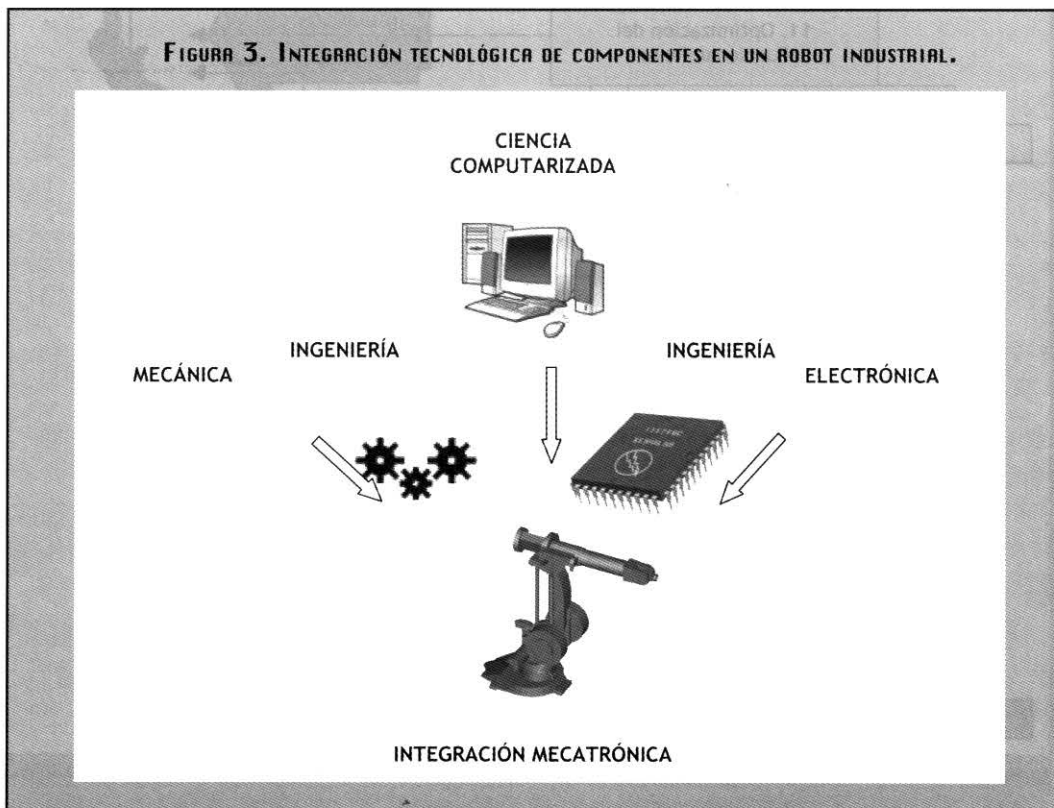
**Simulación gráfica.** Significa la visualización en una estación computadorizada de la animación del sistema de control del robot industrial para conocer su comportamiento ante diferentes acciones de control. Para el efecto se emplea software especializado de simulación de robots.

**Simulación real.** Es el empleo de un subsistema llamado *hardware-in-loop-simulation* ejecutado en tiempo real por medio de una tarjeta que reemplaza parte del modelo físico del robot que se interfaza con los motores y sensores. El modelo resultante es

parte matemático y parte real; es necesario que se encuentren sincronizadas. Este subsistema también se conoce como simulación con interface-en-tiempo-real.

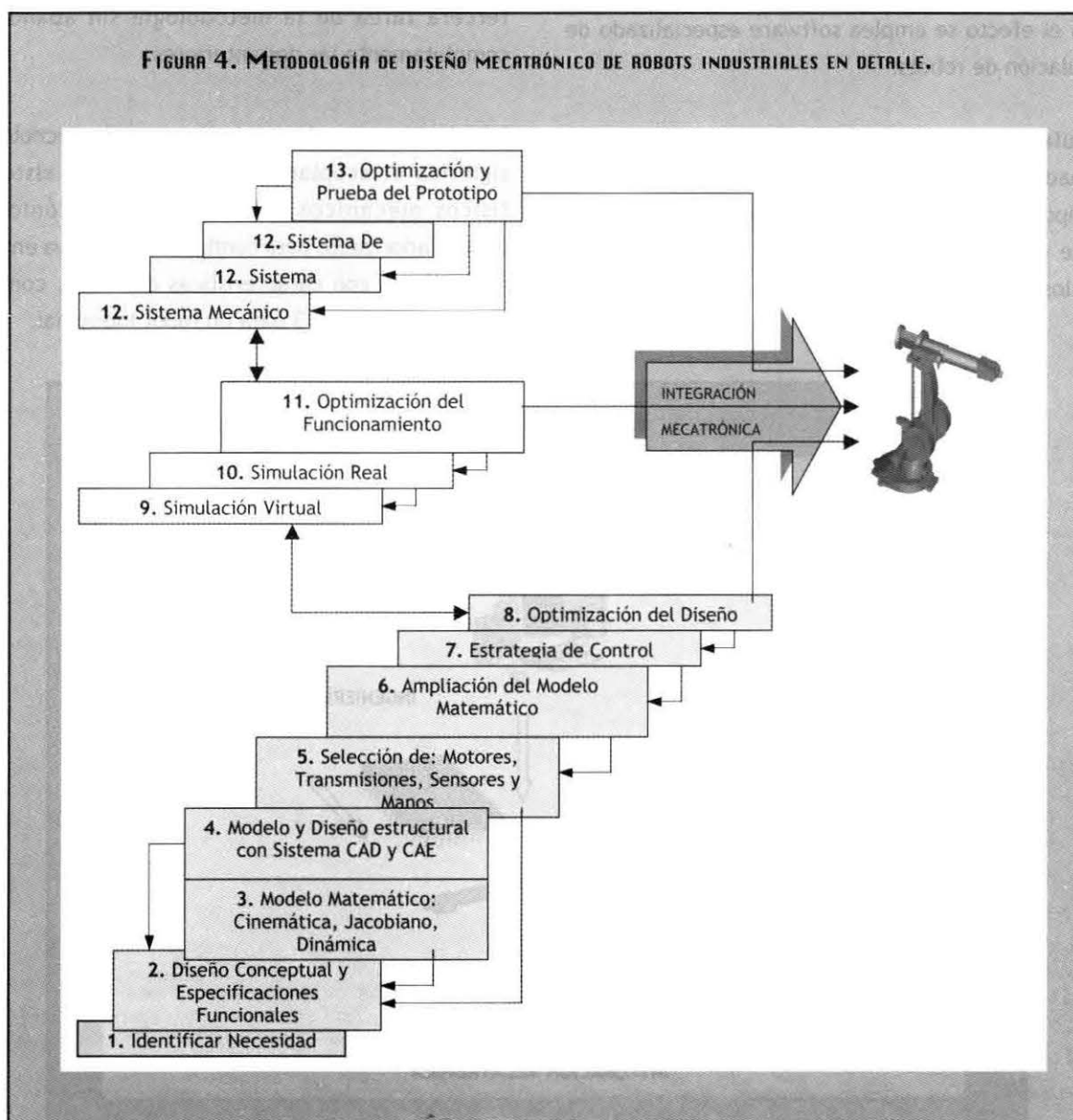
**Optimización del funcionamiento.** Con base en la simulación anterior se optimizan los parámetros del robot y de sus componentes. Si las pruebas arrojan resultados que predicen el buen comportamiento de los componentes y satisfacen los requerimientos funcionales, significa que puede desarrollarse la tercera tarea de la metodología sin abandonar completamente las dos anteriores.

**Integración tecnológica** La integración tecnológica significa el acoplamiento de todos los sistemas físicos mecánicos, eléctricos, electrónicos y computadorizados para configurar una nueva entidad mecatrónica con características definidas, como se ilustra en la Figura 3 para un robot industrial.



**Integración del sistema mecatrónico.** En esta tarea se integran el *hardware* del sistema mecánico + el *hardware* del sistema eléctrico / electrónico + el *hardware* del sistema de control y programación para obtener una nueva entidad física mecatrónica que cumpla con los requerimientos establecidos cuando se inicia el proyecto. El sistema de control depende del tamaño y sofisticación del sistema robotizado y puede seleccionarse un microcomputador, un PLC, un microcontrolador o un microprocesador, según el caso.

**Optimización y prueba del prototipo.** En este paso se ajusta y optimiza el *hardware* del sistema mecatrónico. Su ciclo de vida depende del ciclo de vida de sus componentes. La prueba del prototipo abarca el cálculo de la resolución de control CR, la precisión y la repetibilidad. Con esta prueba se determinan las características funcionales del prototipo.





## CONCLUSIÓN

El proyecto mecatrónico de robots industriales tiene dos opciones: diseño mecatrónico de un nuevo robot para una necesidad específica o selección del robot de una base de datos comercial. La primera opción significa aplicar la metodología de diseño mecatrónico descrita en este artículo y la segunda

opción significa seleccionar el modelo del robot de una base de datos de acuerdo a unos criterios mínimos funcionales. La metodología del diseño mecatrónico se basa en la ingeniería concurrente CE en lugar de secuencial, resultando una aproximación al diseño de productos más sinérgicos y en los sistemas CAD para el modelamiento de la configuración y simulación del movimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auslander, D.; Huang, A. y Lemkin, M. "A Design and Implementation Methodology for Real Time Control of Mechanical Systems". *Revista Mechatronics* 5. 7. (1995): 811-832.
- Carvajal, J. *Modelamiento, simulación y programación off line de robots y dispositivos mecatrónicos integrados en células flexibles de manufactura FMC*. Tesis de doctorado. UNICAMP, SP, Brasil, 2004.
- Evans, B. *Simultaneous Engineering, Integrating Manufacturing and Design*, SME, 1994.
- Groover, M. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- Harley, J. y Mortimer, J. *Simultaneous Engineering. The Management Guide to Successful Implementation*, Industrial Newsletters, 1991.
- Ishii, K. *Modeling of Concurrent Engineering Design, Concurrent Engineering*, Automation, Tools and Techniques, Wiley & Sons, 1992.
- Parsei, H. y Sullivan, W. *Concurrent Engineering. Contemporary Issues and Modern Design Tools*, Chapman and Hall, 1993.
- Shetty, D. y Kilk, R. *Mechatronics System Design*. Boston: PWS Publishing Company, 1997.
- Stadler, W. *Analytical Robotics and Mechatronics*. New York: McGrawHill, 1995.
- Van J. *Mechatronic Design. Mechatronics 2000*, The 7th. Mechatronic Forum International Conference, Atlanta, USA, Aug. (Plenary paper), 2000.
- Van Amerogen, J. *Modeling, Simulation, and Controller Design for Mechatronic Systems with 20-sim 3.0*. 1<sup>st</sup>. IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt, Germany, 2000.
- Yazdani, B. *Demystification of Concurrent Engineering*. CARS & FOF'96.