



Ciencia e Ingeniería Neogranadina  
ISSN: 0124-8170  
[revistaing@unimilitar.edu.co](mailto:revistaing@unimilitar.edu.co)  
Universidad Militar Nueva Granada  
Colombia

Olier Caparoso, Ivan  
Diseño del robot industrial UMNG-I  
Ciencia e Ingeniería Neogranadina, núm. 10, julio, 2001, pp. 9-18  
Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en [redalyc.org](http://redalyc.org)

# Diseño del Robot

## Industrial

UMNG

IVAN OLIER CAPARROSO \*

### Resumen

Este artículo resume el proceso empleado en el diseño del Robot Industrial UMNG-I del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada. Se presenta un conjunto de conceptos fundamentales relacionados con la robótica industrial así como un proceso organizado y secuencial de diseño. Finalmente se muestra los resultados parciales obtenidos para el Robot Industrial UMNG-I.

**Palabras Claves.** Robot Industrial. Análisis cinemático, Análisis dinámico, Sistema de Control, Simulación de Robots. Proceso de Diseño de Robots Industriales. Especificaciones de Diseño.

\*Ingeniero Mecánico, Jefe de Área de Computación y Robótica, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada.

## INTRODUCCIÓN

**L**a idea de diseñar y construir un Robot Industrial en la Universidad Militar lleva poco más de dos años, así desde un principio se consideró que éste debía de ser uno de los pilares fundamentales del programa de Ingeniería Mecatrónica.

Con este proyecto de investigación se busca el fortalecimiento de la línea de especialización en Robótica e Inteligencia Artificial recientemente creada, para el programa de Ingeniería Mecatrónica de esta Universidad.

Poco a poco se ha consolidado una fuerte metodología de diseño de robots basada en la experiencia en otras Universidades de reconocimiento mundial y de empresas fabricantes. Sin embargo, se es consciente de que el camino por recorrer es difícil y solo los años y la experiencia adquirida garantizarán un proceso sólido y una experiencia que sirva de modelo para trabajos futuros en la Universidad y en el resto del país.

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Existen varias definiciones formuladas por diversas asociaciones, lo cual ha creado una confusión en la limitación del término. Sin embargo en los últimos años la definición dada por el RIA (Robotics International Association) es la adoptada por la mayoría de los expertos en el tema: "Un robot es un manipulador reprogramable y multifuncional, diseñado para mover cargas, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según variadas trayectorias, programadas para realizar diferentes trabajos."

Esta definición excluye a los manipuladores manuales o secuenciales (considerados en el concepto japonés como robots) que si bien pueden efectuar distintas tareas, estas solo pueden ser cambiadas mediante alteraciones de su estructura mecánica, no teniendo la capacidad de programar movimientos según variadas trayectorias.

La idea más ampliamente reconocida como robot está asociada a la existencia de un dispositivo digital de control que, mediante la ejecución de un programa almacenado en una memoria, va dirigiendo los movimientos de un sistema mecánico. En él, el cambio de trabajo a realizar se ordena cambiando el correspondiente programa.

## CONFIGURACIÓN GENERAL

Un robot industrial está conformado, en general por un sistema mecánico denominado manipulador, un sistema de control y un sistema generador de tareas. La figura 1 muestra la configuración general de un robot industrial.

## ESPECIFICACIONES DEL MANIPULADOR

A partir de las especificaciones del manipulador se determinan las características del mismo, así como su configuración, grados de libertad entre otros. Las especificaciones del manipulador corresponden así, a todas las entradas al proceso de diseño del mismo.

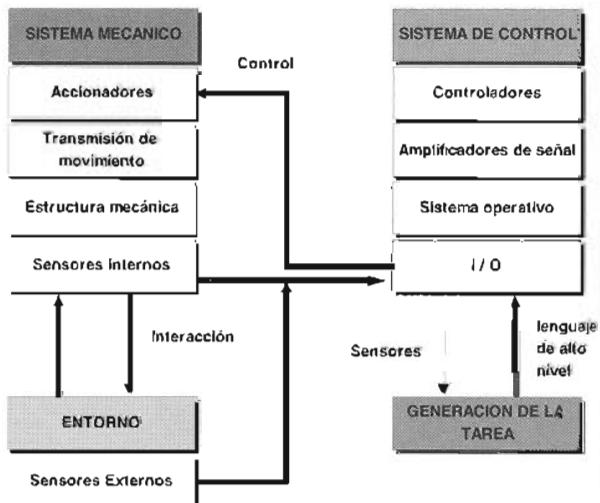


Figura 1 Configuración general de un robot industrial

de torque y fuerza) y otros (Lectores de Caracteres Ópticos, Lectores de Códigos de Barras, Térnicos, etc.).

Comunicación. Interfaces con operadores, con Computadoras y con Bases de Datos.

Problemas de Coordinación entre Articulaciones. Involucra el grado de control automático, los métodos a utilizar para la coordinación de movimientos, sistemas de coordenadas de trabajo (sistema cartesiano, de articulación, etc.)

Paralelismo. Implica que tantos procesos se realizan de forma simultánea.

Seguridad. Éste es un problema importante en robótica y factor decisivo para la sustitución de un proceso manual por uno robotizado. Adicionalmente, se debe tener en cuenta la seguridad de operarios que interactuarán con el robot.

## PROCESO DE DISEÑO

Teniendo en cuenta las especificaciones del robot, se requiere un proceso de diseño organizado con el fin de reducir las posibilidades de error en la fabricación. El siguiente diagrama de flujo resume un proceso de diseño estricto y sobre el cual se basa este proyecto.

## RESULTADOS

### DEFINICIÓN DE TAREAS

Teniendo en cuenta que el Robot UMNG-I será de propósito general, se esperan como tareas posibles a realizar las siguientes:

- Manipulación de partes
- Ensamble de Partes
- Inspección
- Manipulación de materiales livianos
- Otras

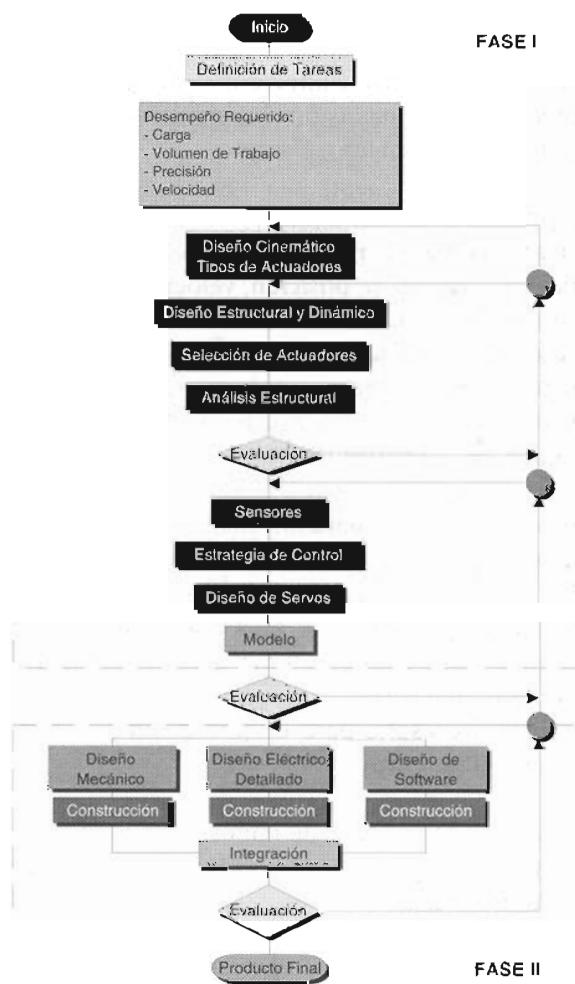


Figura 2. Proceso de Diseño

### DESEMPEÑO REQUERIDO

El desempeño que se consideró óptimo para el robot se resume en la siguiente tabla:

Carga Máxima	6 kg
Alcance	1.5 m
Velocidad Máxima	1 m/s
Precisión	±3 mm

Es importante resaltar que la precisión es ideal y solo se logrará luego de múltiples evaluaciones y correcciones al diseño propuesto, teniendo en cuenta que es el primer robot que se construirá en la Universidad Militar.

## DISEÑO CINEMÁTICO

### Grados de Libertad (DOF)

El número de grados de libertad propuesto para el Robot UMNG-I es de 6, permitiéndole así realizar las posibles tareas propuestas.

### Configuración Cinemática

La configuración cinemática propuesta para el Robot UMNG-I es del tipo Brazo Articulado, debido a que es la configuración de mayor flexibilidad de movimiento, permitiendo así, una mayor gama de tareas a cubrir.

### Representación Denavit - Hartenberg para el Robot UMNG - I

La figura 3 muestra el establecimiento de coordenadas para el Robot UMNG-I

La siguiente tabla indica los parámetros estructurales del robot que van de acuerdo con el alcance deseado del mismo y con la representación Denavit-Hartenberg de la figura anterior.

Articulación	$\theta$	$\alpha$	a	d	Rango
1	90°	-90°	150 mm	0	±170°
2	0	0	570 mm	0	+180° a -65°
3	90°	90°	-130 mm	0	+160° a -150°
4	0	-90°	0	860 mm	±180°
5	0	90°	0	0	±100°
6	0	0	0	100 mm	±360°

### Ecuaciones Cinemáticas

A partir de los parámetros estructurales del robot UMNG-I y teniendo como base la ecuación de transformación homogénea:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

se obtiene las ecuaciones cinemáticas del robot de la siguiente forma:

$$T_0^n = T_0^1 T_1^2 \dots T_{n-1}^n$$

Donde n es el número de grados de libertad, para nuestro caso n=6.

### TIPOS DE ACTUADORES

Teniendo en cuenta el análisis comparativo de los diferentes tipos de actuadores utilizados en robótica, se desechó debido al tipo de manipulador, los siguientes: cilindros hidráulicos y cilindros neumáticos. Así los tipos de actuadores serán eléctricos.

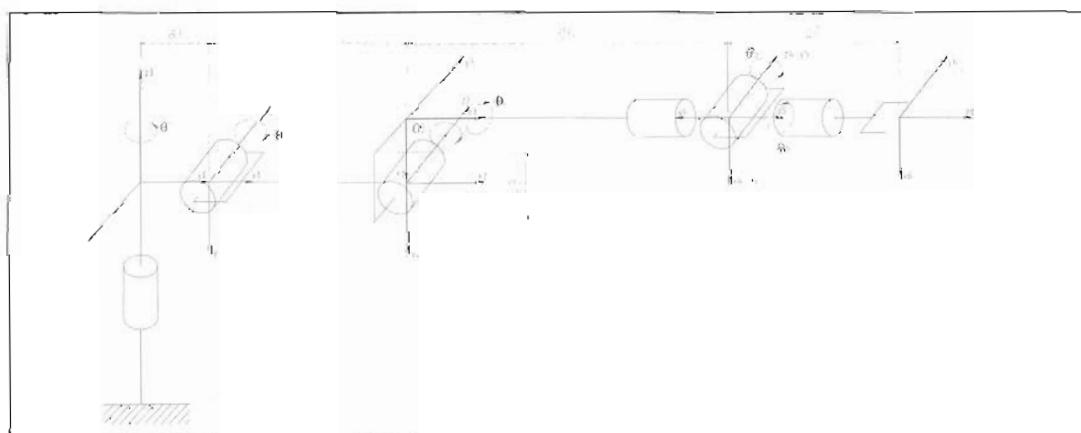


Figura 3. Sistemas Coordenados y Parámetros Estructurales para el Robot UMNG-I

De los actuadores eléctricos disponibles se tienen tres opciones: motores DC, motores paso a paso y motores DC brushless.

Los motores DC convencionales no son considerados como alternativa debido al rápido desgaste de los mismos, limitando la vida útil del robot.

Los motores paso a paso son útiles para bajas cargas pero a altas cargas se vuelven demasiado robustos lo cual no compensa la relación peso del motor con el torque suministrado. Se considera así, que al menos para las tres primeras articulaciones no serán utilizados. A su vez, tienen como gran ventaja su facilidad de control.

Los motores DC brushless son los más apropiados para las tres primeras articulaciones debido a su buena relación torque/peso y a su larga vida útil respecto de los otros tipos de motores. Dado que su control puede ser complicado, se considerarán para las tres primeras articulaciones, dejando las tres últimas con motores paso a paso.

## ANÁLISIS DINÁMICO Y ESTRUCTURAL

El análisis dinámico del robot parte de la ecuación fundamental de la física de Lagrange-Euler:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L(q, \dot{q}, t)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q}, t)}{\partial q_i} = \tau_i$$

La ecuación anterior se puede comprender fácilmente al interpretar cada uno de sus términos:

$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$  define la cantidad de movimiento  $P$  del sistema asociada a la coordenada generalizada  $q_i$ ,

$\frac{\partial L}{\partial q_i}$  define las fuerzas que provienen de un potencial y actúan en la dirección de la coordenada generalizada  $q_i$  y

$\tau_i$  representa aquellas fuerzas que no provienen de un potencial y que están asociadas a la coordenada generalizada  $q_i$ .

El desarrollo de la ecuación anterior conlleva a la siguiente expresión:

$$\sum_j d_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} C_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k(q) = \tau_i, \quad k = 1, \dots, n$$

En la ecuación anterior existen tres tipos de términos:

El primero envuelve la segunda derivada de las coordenadas generalizadas.

El segundo involucra términos cuadráticos de las primeras derivadas de  $q$ . Estos a su vez se clasifican en dos tipos, términos que envuelven un producto del tipo  $q_i^2$  (cuando  $i=j$ ) son llamados *Centrífugos*, mientras que aquellos términos que envuelven un producto del tipo  $q_i q_j$  donde  $i \neq j$  son los llamados términos de *Coriolis*.

El tercer tipo de términos son aquellos que envuelven solamente a  $q$  pero no a sus derivadas.

Como se puede observar, dada la complejidad de las ecuaciones dinámicas del robot se hace necesario la implementación en software con el fin de resolverlas para cualquier punto del espacio con posición, velocidad y aceleración definidas.

## SENSORES

Los sensores seleccionados para el Robot UMNG-I son los siguientes:

*Encoders*. Se utilizarán con el fin de realimentar la posición de los tres primeros actuadores.

*Inductivos*. Necesarios para controlar los finales de carrera de cada articulación y así garantizar *home* y evitar que el robot choque consigo mismo.

**De Torque.** Se implementará en la muñeca del robot con el fin de controlar operaciones de ensamble.

**Táctiles.** Se ensamblarán en el elemento final con el fin de controlar el agarre de piezas.

Así mismo, en un proyecto paralelo (aprobado recientemente por la Universidad Militar) se desarrollará el sistema de visión artificial del robot. Este sistema se acoplará posteriormente.

## ESTRATEGIA DE CONTROL

El sistema de control a implementar para cada articulación tiene el diagrama de bloques de la figura 4.

El sistema fue diseñado a partir de la teoría de control moderno y simulado en *MatLAB 5.3*.

### - Pruebas del Sistema Completo

Se asumirá el siguiente ejemplo para la simulación del sistema de control de movimiento general:

- Posición inicial de la articulación =  $0^\circ$
- Posición final de la articulación =  $20^\circ$
- tiempo inicial = 0 seg
- tiempo final = 1 seg

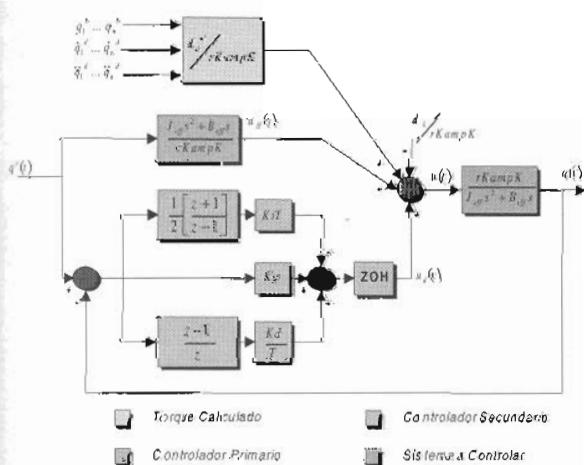


Figura 4. Sistema de Control Por Articulación para el Robot UMNG

Con estos datos de entrada se obtiene el gráfico siguiente, el cual es la entrada de referencia al sistema de control.

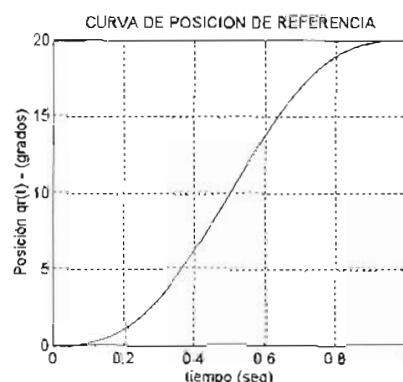


Figura 6. Curva de posición

En el gráfico siguiente se observa la salida del controlador primario. Este controlador está en lazo abierto, por lo tanto ni el controlador secundario ni las perturbaciones modificarán esta salida.

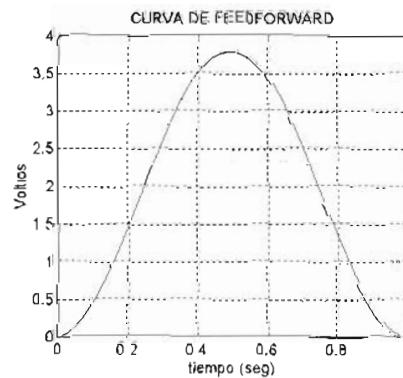


Figura 7. Curva de feedforward

Se observa algo muy importante en los gráficos siguientes, como se asume que no hay perturbaciones el controlador secundario tiene un trabajo disminuido, como era de esperarse.

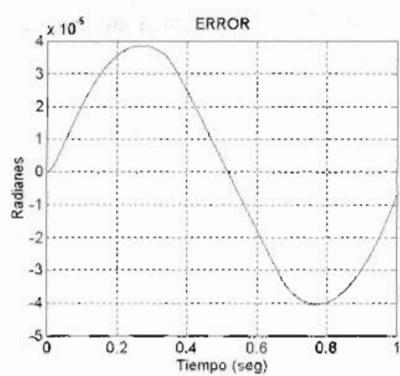


Figura 8. Error

Así, la salida del controlador de movimiento general está dominada por el controlador primario, como se observa en el siguiente gráfico:



Figura 9. Salida del controlador

Finalmente, el siguiente gráfico muestra la salida del sistema de control, la cual es muy parecida a la de referencia.

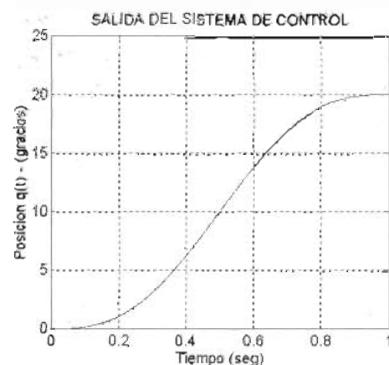


Figura 10. Salida del sistema de control Implementación

Dado que esta parte es crítica para el robot y considerando que el ideal es alcanzar un buen desempeño, se probaron dos tipos de implementaciones. Una basada en una tarjeta de adquisición de datos *National Instruments* y la otra basada en una tarjeta de control diseñada a partir de microcontroladores empleando una arquitectura jerarquizada.

#### MODELO

El siguiente es el modelo del robot propuesto:

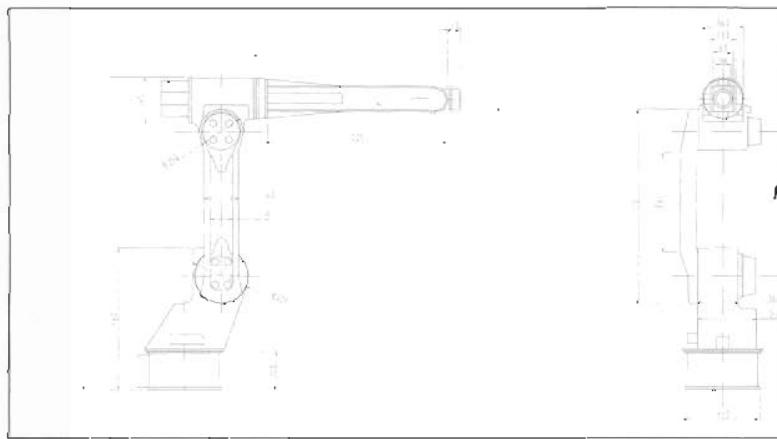


Figura 11. Modelo del Robot UMNG-I

## CONCLUSIONES

Se considera que este proyecto es de vital importancia para la Universidad Militar en particular y para el país en general debido a las necesidades claras de la industria civil y militar de automatizar sus procesos con el fin de alcanzar un nivel de competitividad comparable con países desarrollados.

Se es consciente de que los problemas de consideración aparecerán en la segunda fase del proyecto. Solo con la construcción del robot y la realización de pruebas de funcionamiento es que se podrán detectar fallas antes no consideradas, aumentando las probabilidades de rediseño del sistema.

Se procuró en todo momento mantener una metodología organizada de diseño del robot revisando continuamente el trabajo realizado con el fin de minimizar posibles errores que se vería reflejados en la segunda fase con implicaciones económicas que dificulten la construcción.

A este nivel de desarrollo del proyecto en conjunto se puede concluir que se inicia un proceso de liderazgo a nivel del país en el área de robótica por parte de la Universidad Militar Nueva Granada, dada la organización minuciosa, dedicación exhaustiva y compromiso constante de éste.

Como conclusión final, se propone la segunda fase del proyecto, dado que se encuentran las condiciones necesarias para el mismo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANGULO, José. Robótica, tecnología y aplicaciones. Barcelona: Paraninfo, 1995. p 53.
- ARMSTRONG, B., KHATIB O. "The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters Of The PUMA 560 Arm" en proc. 1986 IEEE Conf. On Robot And Automation, 1986. p. 510-518.
- ATKESON, C., AN, C. "Estimation Of Inertial Parameters Of Manipulators Loads And Links", en Robotics RCS, Vol. 5 No. 3, 1986, pp. 101-119.
- BYTE CRAFT LIMITED. MPC, Code Development System. Waterloo: Byte Craft Limited, 1996. p. 191.
- CONTI, Raul. Parámetros Para El Diseño de Manipuladores. Santa Fe de Bogotá. Tesis Magister en Materiales y Procesos de Manufactura. Universidad Nacional de Colombia. 1994.
- DENAVIT, J., HARTENBERG, R. "A Kinematic Notation For Lower Pair Mechanics Based On Matrices" en Applied Mechanics, 1955. pp. 215-221.
- FEYNMAN, Richard. Feynman Lectures On Physics, Vol. 2. Madrid: Fondo Educativo Interamericano, 1972, Capítulo 19.
- FU, K. Robótica: Control, Detección, Visión e Inteligencia. Mexico: McGraw Hill, 1989.
- GAUTIER, M., KHALIL, W. Direct Calculation Of Minimum Inertial Parameters Of Serial Robots. IEEE Transaction On Robotics and Automation, 1990, Vol. 6 No. 3, pp. 368-373.
- GAUTIER, M., KHALIL, W. A Direct Determination Of Minimum Inertial Parameters Of Serial Robots. Philadelphia, Abril 1998. pp. 1682-1687.
- GAUTIER, M. Optimal Motion Planning For Robots Inertial Parameters Identification. 1992, 31st IEEE Conf. On Decision and Control Proc., Tucson, USA, pp. 70-73.
- GOLDSTEIN, Herbert. Mecánica Clásica. Barcelona: Reverté, 1987, p. 793.

- GROOVER, Mikell. WEISS, Mitchell. NAGEL, Roger y ODREY, Nicholas. Robótica Industrial: Tecnología, Programación y Aplicaciones. México: McGraw Hill, 1990, p. 600.
- GUPTA, Kamal. POBIL, Angel. Practical Motion Planning In Robotics. John Wiley & Sons. 1998
- KOIVO, Antti. Fundamentals for Control Of Robotics Manipulators. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1989, p. 467.
- KOREN, Yoram. Robotics For Engineers. New York: McGraw Hill, 1985, p. 347.
- KUO, Benjamin. Automatic Control System. 7 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995, p. 897.
- MAYEDA, H., YOSHIDA K, and OUSAKA K. Base Parameters Of Manipulators Dynamics, Proc. IEEE conf. On Robotics and Automation. Philadelphia, abril 1998, pp.1367-1372.
- MERIAM, James. Dinámica, 2<sup>a</sup> Ed. Barcelona: Reverté, 1988, p. 629.
- MICROCHIP. Embedded Control Handbook. Chandler: Microchip Technology Inc. 1993, p. 756.
- MICROCHIP. PIC16C74, 40-Pin EPROM-Based 8-Bit CMOS Microcontroller. Chandler: Microchip Technology Inc. 1994, p. 136
- MICROCHIP. PIC16C84, 8-Bit CMOS EEPROM Microcontroller. Chandler: Microchip Technology Inc. 1994, p. 50.
- OGATA, Katsuhiko. Modern Control Engineering. New Jersey: Prentice Hall, 1997, p. 997.
- OLIER, Ivan. HERNANDEZ, Juan. Diseño e Implementación del Sistema de Control en un Robot Industrial. Proyecto de Grado (Mención Meritoria). Univ. Nacional. 1998
- PFEIFFER, Frederich. Parameters Identification Robots. Proc. IEEE Conf. On Robots and Automation, 1995, pp. 1469-1476.
- PHILLIPS, Charles, NAGLE, Troy. Digital Control System, Analysis and Design. New Jersey: Prentice Hall. 1995, p. 685.
- PHILLIPS, Charles, HARBOR, Royce. Feedback Control System. 3<sup>a</sup> Ed. New Jersey: Prentice Hall 1996, p. 683.
- PEÑA, Daniel. Estadística: Modelos y Métodos. Madrid: Alianza Editorial, 1988, p 658.
- PRESSE, C.. GAUTIER, M. New Criterial Of Exciting Trajectories For Robots Identification. IEEE Trans. On Robotics and Automation, 1993, pp. 907-912.
- RICHARD, Paul. Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. Cambridge: MIT Press. 1992, p. 279.
- SINGH, Nannua. Computer Integrated Design and Manufacturing. New York: John Wiley & Sons Inc. 1996, p. 643.
- SPONG, Mark, VIDYASAGAR, M. Robot Dyanmic and Control. New York: John Wiley & Sons Inc. 1989, pp. 50-56, 169.