



Conciencia Tecnológica

ISSN: 1405-5597

contec@mail.ita.mx

Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
México

Sánchez López, Carlos; Saucedo Zárate, Carlos Humberto  
Estructura Básica de un Simulador para la Síntesis y el Análisis Dinámico de Manipuladores  
Conciencia Tecnológica, núm. 27-30, 2005  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
Aguascalientes, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Estructura Básica de un Simulador para la Síntesis y el Análisis Dinámico de Manipuladores

Investigación Científica Tecnológica

Dr. Carlos Sánchez López, M.C. Carlos Humberto Saucedo Zárate  
Departamento de Ingeniería Metal Mecánica  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. A. López Mateos 1801 Ote. Fracc. Ojocaliente FOVISSSTE,  
Aguascalientes, Ags. Tel: 01 (449) 9105002 ext. 104; [carlossl@correo.ita.mx](mailto:carlossl@correo.ita.mx)

## Resumen

Se presentan los fundamentos teóricos que han de ser utilizados en el desarrollo de un Simulador para la Síntesis y el Análisis Dinámico de Manipuladores. El trabajo complementa los modelos matemáticos de las configuraciones cartesianas, cilíndrica, esférica y articulada, incluyéndose los correspondientes a la configuración SCARA. Se describe la estructura básica del simulador, su posible funcionamiento, sus alcances y limitaciones actuales, así como su desarrollo potencial.

## Abstract

This presents the theoretical foundations used in the development of a Simulator for the Synthesis and Dynamic Analysis of Manipulators. This work complements the mathematical models for cartesian, cylindrical, spherical, articulate including that of a SCARA configuration. It describes the basic structure of the simulator, how it possible works, its actual capacity and limitation, and its potential evolution.

**Palabras Clave:** Manipulador, Cinemática directa, Cinemática inversa, Simulador, Modelado matemático.

## Introducción

La robótica ha tomado gran importancia en todos los sectores de la sociedad, implicando que los futuros ingenieros obtengan un conocimiento más detallado respecto a su diseño, programación, control, uso e implantación. Actualmente se han desarrollado una gran variedad de robots y existen fundamentos teóricos comprobados que permiten proyectar cualquier tipo de estos. También se han desarrollado herramientas de cómputo que permiten simular modelos de robots y estudiar su comportamiento dentro de un determinado ambiente virtual de trabajo.

Considerando el enfoque que tienen las carreras de Ingeniería Mecánica en cuanto a los módulos de Diseño y de Manufactura, así como la carencia de

laboratorios de robótica en muchas instituciones, se ha estado trabajando en el desarrollo de un simulador para la síntesis y el análisis dinámico de manipuladores. El objetivo es proporcionar una herramienta que permita visualizar la conceptualización o el diseño de un robot a partir de su configuración geométrica, así como del tipo y número de grados de libertad. Con base en las aplicaciones de la robótica, se optó por enfocarnos únicamente en los considerados como manipuladores, debido a que son los más utilizados en la industria, sin embargo, los conceptos aquí presentados pueden aplicarse a cualquier tipo de robot.

## Metodología

El simulador se basa en la identificación de los principales tipos de manipuladores según la geometría ideal de su espacio de trabajo, concluyéndose que cualquier robot podrá ser del tipo cartesiano, cilíndrico, o esférico (polar), incluyendo el articulado y el Selective Compliant Assembly Robot Arm (SCARA) que son variantes de configuración esférica y cilíndrica respectivamente. El simulador se respalda en la teoría de la cinemática de cuerpos rígidos, aplicada a pares cinemáticos con uniones prismáticas y/o revolutas. Inicialmente, para la obtención de los modelos matemáticos que representen la cinemática de cada configuración se ha trabajado bajo la metodología propuesta por Denavit-Hartenberg [1], mediante el uso de representaciones matriciales, cuyos resultados se han validado mediante el uso de la trigonometría y a través del método gráfico. Se trabaja mediante representaciones esquemáticas de lo que podría ser el cuerpo del robot y actualmente solo se consideran los primeros tres pares cinemáticos (grados de libertad) a partir de su base. Por lo tanto se proyecta un simulador donde se pueda trabajar con cualquiera de estas cinco configuraciones (ver figuras 1, 2, 3, 4 y 5).

La teoría utilizada en el simulador, para cada configuración, se basa en modelos matemáticos dependientes de la longitud de los eslabones, su orientación con respecto a un sistema de coordenadas

cartesiano fijo, así como su orientación y posición en planos paralelos referidos a sistemas de coordenadas en las uniones con respecto al eslabón con el cual se forman los pares cinemáticos. Los modelos matemáticos obtenidos son representativos tanto de la cinemática directa como de la cinemática inversa para una determinada orientación inicial de los sistemas de coordenadas utilizados. Los resultados obtenidos para la configuración cartesiana pueden consultarse en [2, 3], lo correspondiente a la configuración cilíndrica se presenta en [4, 5], la configuración esférica se presentó en [5, 6], y la articulada en [3, 8].

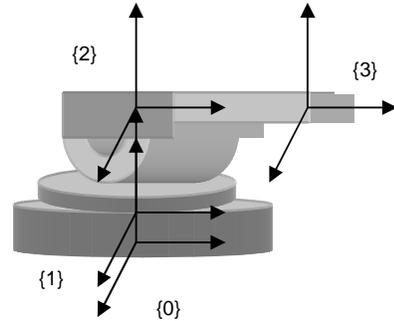


Fig. 3 Representación esquemática de un manipulador esférico de tres grados de libertad [6].

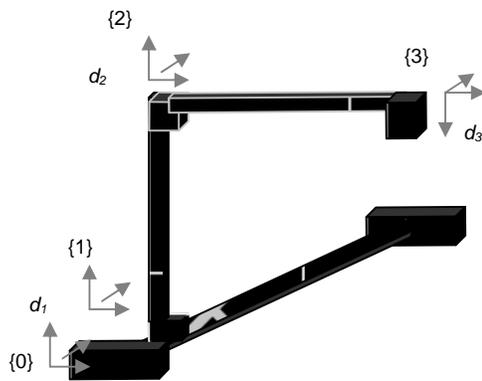


Fig. 1 Esquema utilizado para manipuladores cartesianos [2].

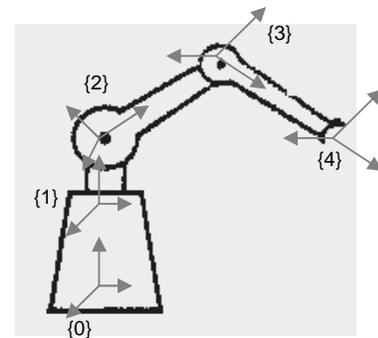


Fig. 4 Representación esquemática de un manipulador articulado de tres grados de libertad [8]. Modificado de [9].

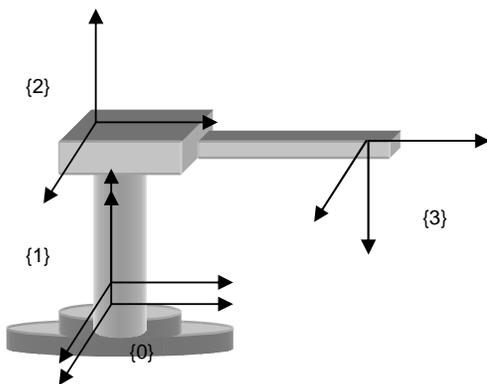


Fig. 2 Representación esquemática de un manipulador cilíndrico de tres grados de libertad [4].

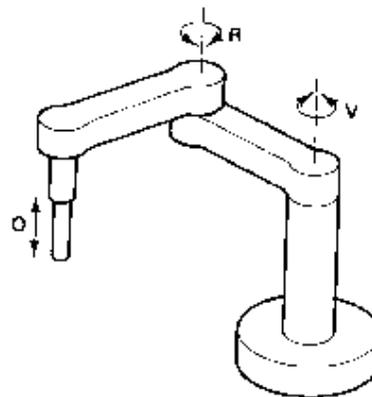


Fig. 5 Representación esquemática de un manipulador SCARA de tres grados de libertad.

### Configuración SCARA

Como complemento de los resultados obtenidos en las anteriores publicaciones [2, 3, 4, 5, 6, 8], en la presente se aborda lo correspondiente a los manipuladores de configuración SCARA

Para la cinemática directa de manipuladores SCARA se hace uso de la figura 6 donde se han representado los eslabones correspondientes a los tres primeros grados de libertad, así como los marcos de referencia donde se tendrían las uniones de los pares cinemáticos, donde.

{0} es el marco de referencia fijo.

{1} marco de referencia en la unión del eslabón fijo ( $d_0$ ) y el primer eslabón ( $l_1$ ).

{2} marco de referencia en la unión del eslabón uno ( $l_1$ ) y el eslabón dos ( $l_2$ ).

{3} marco de referencia en la unión entre el eslabón dos ( $l_2$ ) y el eslabón tres ( $l_3$ ).

{4} marco de referencia en el extremo libre del eslabón tres ( $d_3$ ).

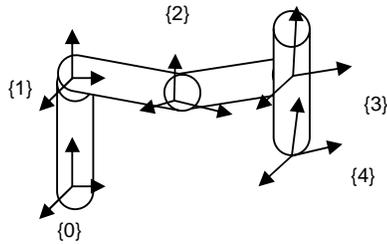


Fig. 6 Representación esquemática de un manipulador SCARA de tres grados de libertad.

En la figura 6 también se puede observar que los dos primeros grados de libertad en conjunto con la base constituyen dos grados de libertad con articulaciones tipo revoluta, cuyo desplazamiento se realizaría en el plano horizontal. Así mismo, esta configuración es similar a la obtenida con el segundo y tercer grado de libertad de la configuración articulada, con la diferencia de que los desplazamientos se realizan en el plano vertical. Por lo tanto, haciendo uso de la matriz de transformación homogénea y de los parámetros Denavit-Hartenberg del manipulador SCARA, las componentes horizontales de su cinemática directa se obtienen de manera similar a la del manipulador articulado [3, 8]. Para determinar la componente vertical se considera la diferencia entre la dimensión

de la base ( $d_0$ ) y el desplazamiento que realice el eslabón tres ( $d_3$ ). Como resultado de lo anterior se tiene la siguiente matriz de transformación donde la cuarta columna corresponde al modelo de la cinemática directa y sus tres primeros renglones representan las componentes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del marco de referencia fijo {0}.

$${}^0_4 T = \begin{pmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & d_0 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

En lo referente a la cinemática inversa y retomando el hecho de que la cinemática que puede obtenerse con el primero y segundo grado de libertad de una configuración SCARA es similar a la que se obtiene con el segundo y tercer grado de libertad en una configuración articulada, entonces la determinación de los desplazamientos de los eslabones uno y dos se obtienen mediante las ecuaciones (2 y (3). Para determinar el desplazamiento del eslabón tres simplemente se calcula la diferencia entre la dimensión del eslabón cuatro y la dimensión de la componente vertical resultando la ecuación (4).

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (2)$$

$$s_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2} \quad (3)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(s_2, c_2) \quad (4)$$

$$k_1 = l_1 + l_2 c_2 \quad (5)$$

$$k_2 = l_2 s_2 \quad (6)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}(Y, X) - \text{Atan2}(k_2, k_1) \quad (7)$$

$$d_3 = d_0 - Z \quad (8)$$

Además de considerar las configuraciones geométricas también se analizaron las uniones entre los eslabones utilizadas en manipuladores industriales, de laboratorio, de diversión e hipotéticos y se compararon con la clasificación de las uniones de pares cinemáticos (ver figuras 7, 8 y 9) identificándose la relación que existe entre el tipo de unión con el tipo de configuración de los manipuladores (ver tabla 1). Con base en lo anterior se procedió a establecer los

algoritmos necesarios para calcular la cinemática directa e inversa para las cinco configuraciones de la tabla 1, haciendo uso de la siguiente metodología.

- Seleccionar el tipo de manipulador a sintetizar.
- Establecer las dimensiones de los eslabones.
- Seleccionar el tipo de cinemática (directa o inversa).
- Para la cinemática directa, establecer los desplazamientos de los eslabones.
- Para la cinemática inversa, establecer las coordenadas de la localización del extremo libre del manipulador (extremo libre del tercer eslabón).
- Calcular la cinemática según corresponda.

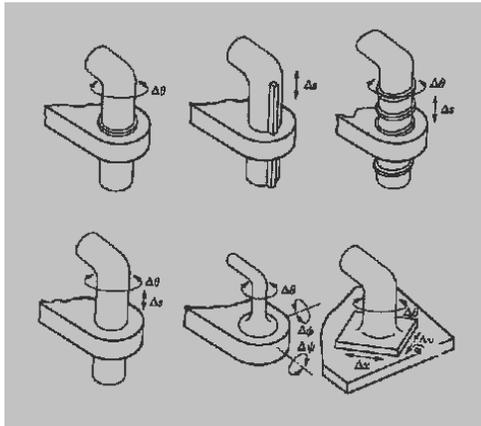


Fig. 7 Representación esquemática de uniones factibles de aplicarse en los manipuladores [1].

Tabla 1. Relación entre las configuraciones de los manipuladores y los tipos de uniones.

Configuración	Uniones
Cartesiana	3 prismáticas
Cilíndrica	1 revoluta y 2 prismáticas
Esférica	2 revoluta y 1 prismática
Articulada	3 revoluta
SCARA	2 revoluta y 1 prismática

Para la creación del simulador se puede recurrir al uso de algún lenguaje de programación visual, aprovechando sus utilerías en la obtención del entorno necesario para proyectar los resultados de las simulaciones que se realicen. Para los casos que se presentan, la estructura particular del simulador, deberá consistir al menos de los siguientes componentes.

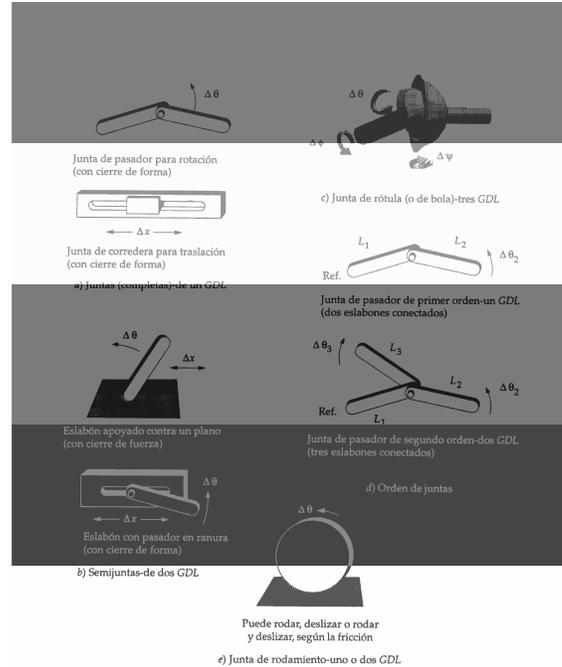


Fig. 8 Representación esquemática de los principales pares cinemáticos [10].

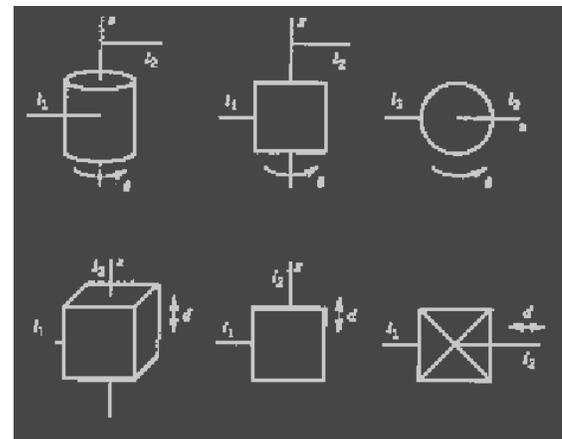


Fig. 9 Representaciones esquemáticas de uniones revoluta y prismáticas [1].

- Una *pantalla principal* con una barra de menús tipo cascada e iconos como alternativa para la ejecución rápida de los comandos e instrucciones.
- Menú síntesis*, a través del cual el usuario establece el número de grados de libertad del

manipulador a sintetizar, proporcionando la longitud de cada eslabón.

- *Menú cinemática*, podrá contar con al menos dos submenús para seleccionar entre la cinemática directa o la cinemática inversa.
- *Opción de simulación*, a través del cual se puede visualizar los desplazamientos que llevaría acabo el manipulador sintetizado. Esta alternativa se debe presentar tanto en la cinemática directa como en la inversa.

La secuencia que el usuario deberá seguir en una sesión de trabajo consiste en las siguientes etapas.

- a) Dentro del menú principal, el usuario primero deberá sintetizar el manipulador que vaya a proyectar o analizar. Para tal efecto se tiene que seleccionar el menú síntesis, y posteriormente elegir el tipo de configuración.
- b) Automáticamente se presenta un cambio de pantalla hacia una ventana donde se soliciten las dimensiones de los eslabones. Conforme se proporcionan se obtiene una representación esquemática de los eslabones que se utilizarán con la finalidad de poder verificar si corresponde al tipo de manipulador según la configuración seleccionada. Así mismo, se debe tener la posibilidad de modificar las dimensiones de los eslabones o regresar al menú principal.
- c) Suponiendo que las dimensiones se han proporcionado correctamente, en el menú principal se elegiría el menú cinemática donde se pueda seleccionar la configuración del manipulador bajo estudio. Para cada configuración se debe tener la posibilidad de trabajar la cinemática directa o la inversa.
- d) Si se opta por la cinemática directa debe proporcionarse los desplazamientos de cada uno de los eslabones. Cuando se dispone de dichos datos se obtendría una representación esquemática del manipulador así como la longitud de cada eslabón, su desplazamiento y la localización del efector final o extremo libre del tercer eslabón.
- e) Suponiendo que los datos proporcionados son correctos entonces se oprimiría la opción de ver la simulación. En esta etapa se podrá visualizar los desplazamientos de cada eslabón y la localización del efector final a través de las vistas frontal, derecha, superior y tridimensional. Así mismo, se tendría la posibilidad de modificar la longitud de

los eslabones, observar los desplazamientos e identificar los efectos correspondientes. También se proporcionaría la posibilidad de modificar las magnitudes de los desplazamientos. Esto permite analizar la cinemática directa de diferentes alternativas dimensionales, de desplazamiento, o ambas para una misma configuración, con lo cual se tendría varias alternativas de solución.

- f) Para la opción de la cinemática inversa se podrá trabajar con las coordenadas de las posiciones donde se requiera tener el efector final o mediante una trayectoria específica. Para el primer caso se proporcionan las coordenadas (x, y, z) donde deberá llegar el extremo libre del tercer eslabón, así como la orientación del efector final. Nuevamente se obtiene la representación esquemática del manipulador, las dimensiones de sus eslabones, la coordenada proporcionada, los desplazamientos que deberán realizar cada uno de los eslabones, y la orientación del efector final. De manera similar a la cinemática inversa, se pueden visualizar los desplazamientos de los eslabones hasta llegar a la posición especificada y posteriormente hacer modificaciones a las dimensiones de los eslabones, a la coordenada que se pretende llegar, a la orientación del efector final, o a combinaciones de estos posibles cambios. Se pretende que en la opción de trayectorias, el usuario proporcione la trayectoria o seleccione alguna predefinida.

## Resultados

Lo desarrollado a la fecha ha permitido obtener modelos matemáticos representativos de la cinemática directa e inversa de configuraciones esquemáticas de manipuladores cartesianos, cilíndricos, esféricos, articulados, y SCARA. Los algoritmos correspondientes a la cinemática y a su visualización se han programado empleando el lenguaje Visual Basic mediante lo cual se logró desarrollar el prototipo de un *SIMULADOR PARA LA SÍNTESIS Y EL ANÁLISIS DINÁMICO DE MANIPULADORES*. Los resultados de la investigación se han validado a través del dibujo asistido por computadora (CAD), modelos físicos a escala y mediante programas de matemáticas.

## Conclusiones

A la fecha aún se tienen muchas limitaciones en lo que respecta a la programación del simulador en cuanto a la visualización de las alternativas de síntesis y análisis, pero, en general los resultados obtenidos se consideran aceptables y como una plataforma para desarrollos futuros inmediatos.

### Reconocimientos

El desarrollo del proyecto se inició en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí y actualmente se continúa en el Departamento de Ingeniería Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

### Referencias

- [1] Denavit J. and Hartenberg R. S. (1955), *Journal of Applied Mechanics*, p. 215-221.
- [2] Sánchez L. C. (1999), “Simulador para el Análisis Cinemático y/o Dinámico de Manipuladores”, Reporte de avance No. 1, División de Estudios de Postgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.
- [3] Sánchez L. C., Saucedo Z. C. H., Valdez D. C. (2000), *Conciencia Tecnológica*, Nos. 20 y 21, p. 51-56.
- [4] Sánchez L. C. (1999), “Simulador para el análisis cinemático y/o dinámico de manipuladores”, Reporte de avance No. 2, División de Estudios de Postgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.
- [5] Sánchez L. C., Saucedo Z. C. H., Valdez D. C. (2000), “Marco Teórico de un Simulador de la Cinemática de Manipuladores Cilíndricos y/o Esféricos”, Instituto Tecnológico de Veracruz (Ed.), *Memoria del Coloquio Internacional y Reunión de la Academia Nacional de Ingeniería Mecánica*, (Veracruz, Ver. noviembre del 2000).
- [6] Sánchez L. C. (2000), “Simulador para el Análisis Cinemático y/o Dinámico de Manipuladores”, Reporte de avance No. 3, División de Estudios de Postgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.
- [7] Spong Mark W. and Vidyasagar M. (1989), *Robot Dynamics & Control*, John Wiley & Sons, Inc. (USA).
- [8] Sánchez L. C. (2000), “Simulador para el Análisis Cinemático y/o Dinámico de Manipuladores”, Reporte de avance No. 4, División de Estudios de Postgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.
- [9] Craig John J. (1989), *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing Company, second edition.
- [10] Calero P. Roque, Carta G. José Antonio (1999), *Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros*, Mcgraw-Hill.