

# Práctica 1

## Introducción

---

La aparición de la robótica en la industria ha supuesto en los últimos 40 años una importante revolución industrial, que sin embargo no ha tenido el crecimiento exponencial que los pioneros de la robótica habían supuesto. Una de las razones para este no tan rápido crecimiento ha sido la complejidad de los cálculos dinámicos de los mecanismos robotizados. Las elegantes formulaciones matemáticas realizadas por los padres de la dinámica requieren un gran número de cálculos que obligaba a realizar un gran número de simplificaciones. Históricamente, el análisis, simulación y diseño de robots ha supuesto una gran inversión de tiempo y capital, reservado para centros de investigación y grandes fabricantes.

Sin embargo, la revolución del PC, está permitiendo la implantación de herramientas sencillas de análisis y simulación de robots. Los programas de propósito general para el modelado y la simulación de los sistemas mecánicos de múltiples cuerpos han llamado poderosamente la atención durante esta última década. Un programa CAD para la dinámica de los sistemas multicuerpos minimiza la posibilidad del error humano en el manejo de modelos complejos, pero en la mayoría de ocasiones, paquetes de software como IMP [Sheth-1972], ADAMS [Orlandea-1977], DISCOS [Bodley-1978], DADS [Nikraves-1985], MEDYNA [Jaschinsky-1986] ofrecen unas prestaciones mayores de las requeridas por el usuario. Además, utilizando paquetes de análisis matemático general como MatLab® se pueden implementar los algoritmos clásicos de la dinámica computacional, y obtener una serie de herramientas que permitan al usuario del PC realizar un diseño y análisis de su propio mecanismo.

En este sentido, este libro quiere presentar una serie de herramientas sencillas de modelado computacional y simulación de robots, enfocadas a ser utilizadas en el diseño paramétrico de robots y mecanismos tanto planares como espaciales en computadoras personales. En contraste con los libros clásicos de robótica, en los cuales la teoría ocupa un espacio predominante y es posible encontrar toda la base de las herramientas que aquí se utilizan, este libro pretende tener un enfoque eminentemente práctico, aportando varias referencias para aquellos lectores que quieran ampliar las bases teóricas.

## 1.1.- Clasificación de robots. Morfología.

La palabra robot proviene del eslavo *robota* y fue utilizada por primera vez por el escritor checo Karel Capek en 1917 para referirse en su obra *Rossum's Universal Robot R.U.R.* a máquinas con forma humanoide, pero fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov el que dotó de popularidad a esta palabra. En octubre de 1945 publicó en la revista *Galaxy Science Fiction* una historia en la que se enuncian por primera vez sus tres leyes de la robótica;

1. Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

Sin pretender ser exhaustivos con la historia y el desarrollo de la robótica se puede citar que la primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C.W. Kenward, si bien la primera patente de un *dispositivo de transferencia de artículos programada* que se asemeja más al concepto de robot industrial que hoy conocemos fue presentada por el ingeniero americano George D. Devol en 1961. En ella se dice:

*"The present invention makes available for the first time a more or less general purpose machine that has universal application to a vast diversity of applications where cyclic control is desired."*

Se pueden distinguir cuatro fechas puntuales en el desarrollo de la robótica industrial:

- En 1948 R.C. Goertz diseñan en el Argonne National Laboratory el primer sistema telemanipulador para manejar materiales radioactivos.
- Joseph F. Engelberger y G.C. Devol fundan en 1958 la primera empresa dedicada a la fabricación de robots industriales; Unimation, e instalan su primera máquina. En 1967 instalaron un conjunto de robots en la factoría de General Motors y tres años después se inicia la implantación de los robots en Europa, especialmente en el sector automovilístico.
- En 1970 la Universidad de Stanford y el MIT empiezan un proyecto destinado a controlar un robot mediante computadora.
- A partir de 1975, la revolución de la microelectrónica y la aparición del microprocesador relanza el sector de la robótica.

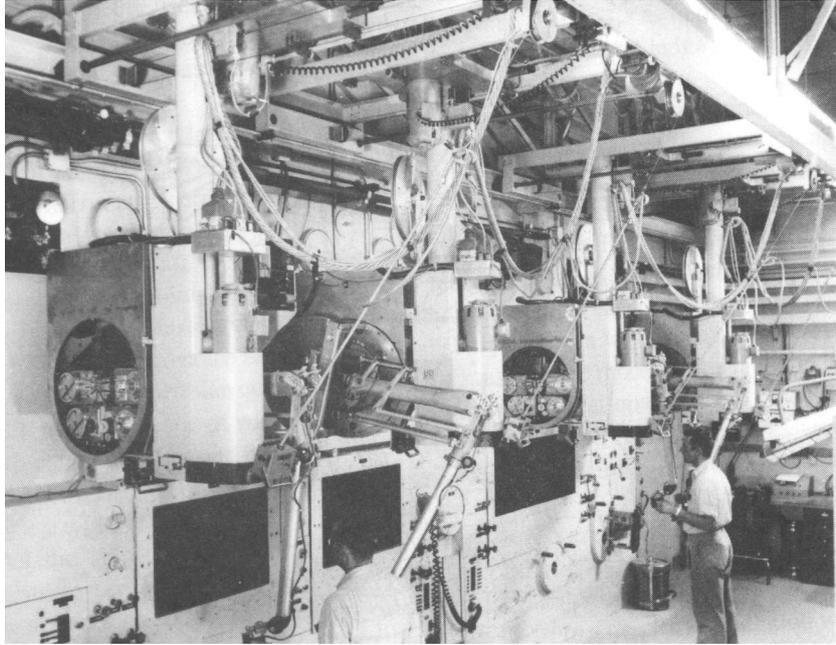


Figura 1.1.- Primer sistema de teleoperación maestro-esclavo con servoaccionamientos eléctricos.  
(desarrollado en el Argonne National Laboratory)

A la hora de definir el concepto de robot de distinguir entre el **robot industrial** o robot de producción y los robots especiales o también denominados **robots de servicio**.

La definición más comúnmente aceptada de robot industrial es la de la *Asociación de Industrial Robóticas (RIA)*, según la cual:

Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.



Figura 1.2.- Robot Industrial UNIMATE de la serie 5000

Mientras que los robots de servicio se definen como:

Dispositivos electromecánicos, móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa de ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio [Nostrand 90]

Para el estudio de la morfología de un robot se debe tener en cuenta que un robot está formado por los siguientes elementos; estructura mecánica, transmisiones, actuadores, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales.

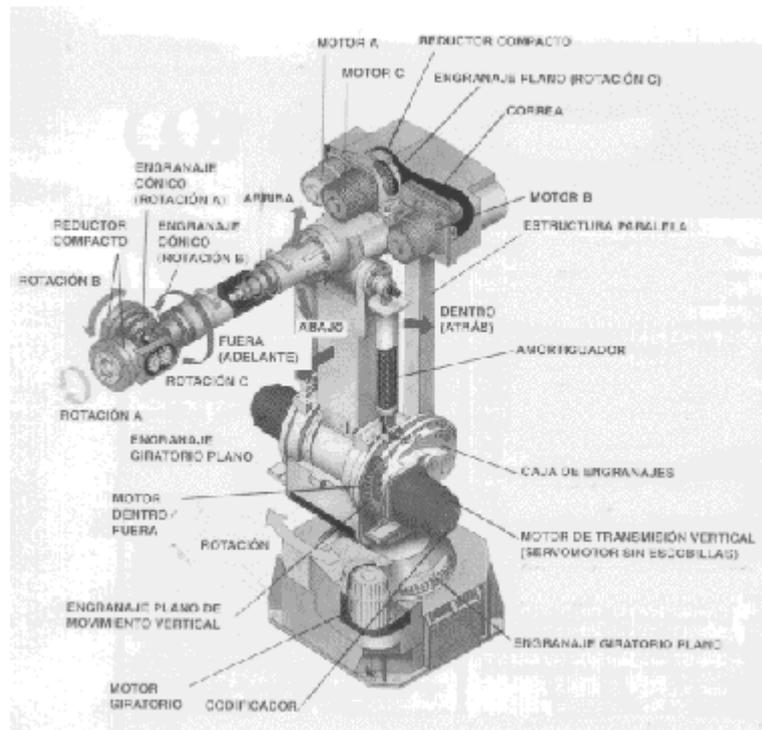


Figura 1.3.- Elementos constitutivos de un robot industrial clásico

### Estructura mecánica

Un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. La constitución física de la mayor parte de los robots industriales está inspirada en la anatomía del brazo y la mano humana.

Se definen como **grados de libertad** como los posibles movimientos básicos (giros y desplazamientos) independientes. La figura 1.4 muestra diferentes tipos de articulaciones y los grados de libertad que aportan cada una de ellas.

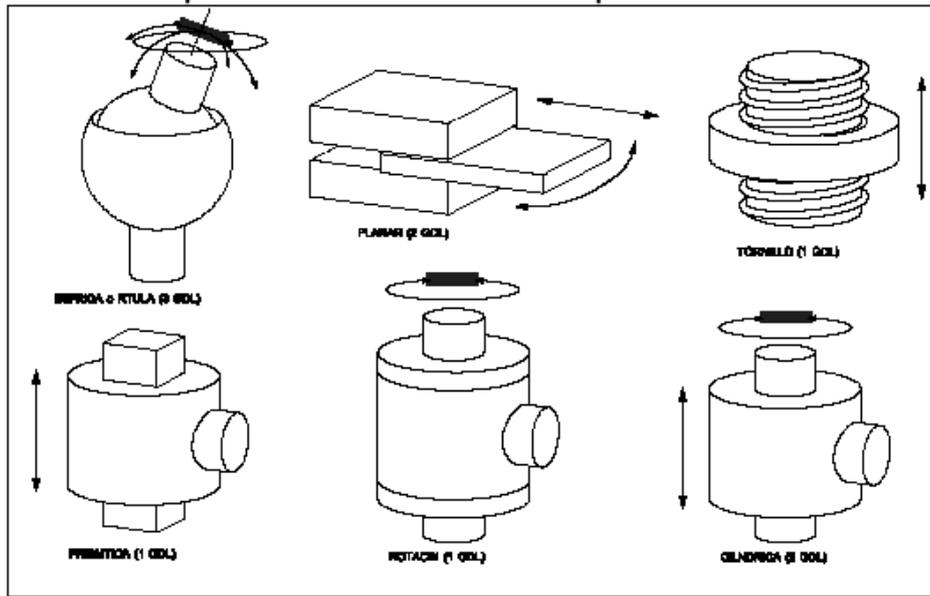


Figura 1.4.- Diferentes articulaciones utilizadas en robótica

Las diferentes combinaciones de estas articulaciones dan lugar a distintas configuraciones o arquitecturas mecánicas, cada una de ellas con características que la hacen más o menos recomendable para la realización de una determinante tarea. Las siguientes figuras muestran las configuraciones más típicas utilizadas en robots industriales, y en ellas se distinguen los eslabones y los grados de libertad de cada configuración.

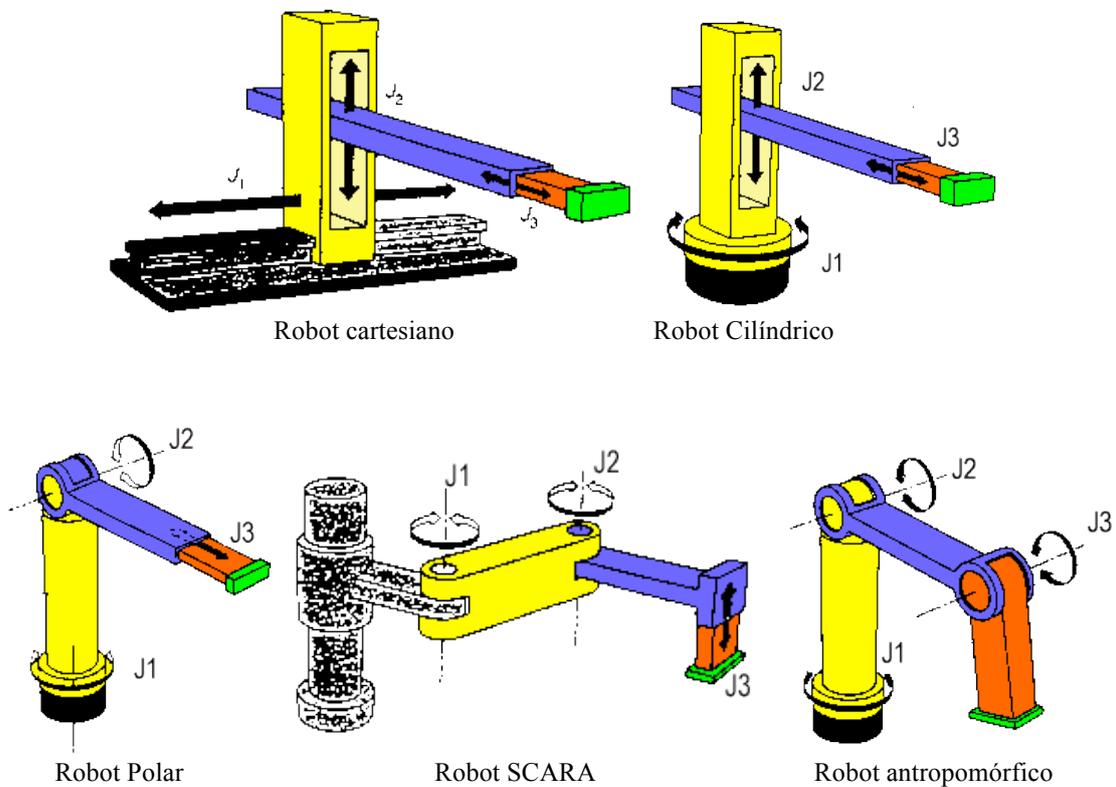


Figura 1.5.- Diferentes arquitecturas mecánicas

Es también muy común usar en robótica terminología inspirada en la anatomía del brazo humano, así en la mayoría de arquitecturas mecánicas de robots industriales, las tres últimas articulaciones, que normalmente se utilizan para proporcionar orientación al elemento terminal (se estudiará esto más profundamente en el capítulo siguiente), forman lo que se conoce como **muñeca** del robot (figura 1.6).

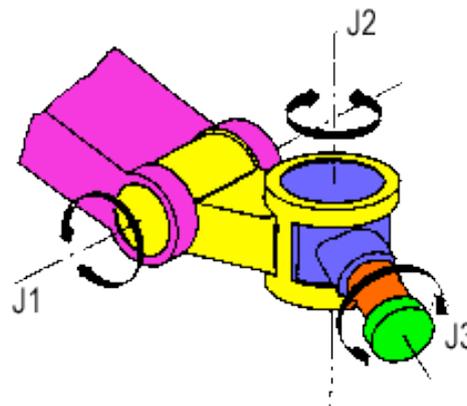


Figura 1.6.- Muñeca del Robot

Otro concepto importante que debe tenerse en cuenta en la descripción de un robot son las dimensiones del robot y el **espacio de trabajo** que define el movimiento de las diferentes articulaciones. El espacio de trabajo de un robot se subdivide en áreas diferenciadas entre sí por la accesibilidad del elemento terminal en cada una de ellas. Por ejemplo, es diferente la zona en la que el elemento terminal solo puede orientarse horizontalmente o aquella en la que también puede orientarse verticalmente. La figura siguiente muestra un robot de la casa STAÜBLI y su espacio de trabajo.

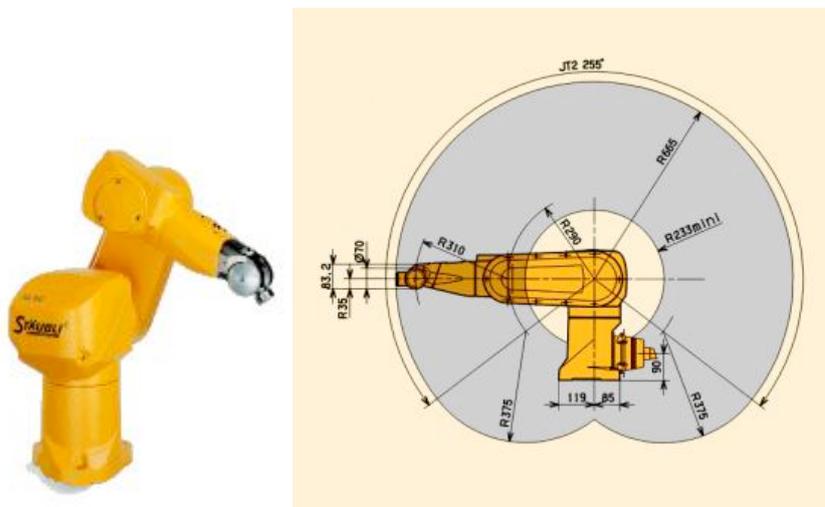


Figura 1.7.- Dimensiones y espacio de trabajo del Robot Industrial STAÜBLI PUMA RX-60

La **capacidad de carga** que puede transportar la garra del robot, la precisión en la **repetibilidad** y la **velocidad** de las articulaciones son también características muy importantes del robot que deben ser citadas en la descripción de un robot.

*Transmisiones y reductores*

Las transmisiones son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Los reductores se incluyen con las transmisiones y son los encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

Normalmente los actuadores se intentan situar lo más cerca de la base del robot, con el fin de reducir al máximo el peso estático y la inercia de los eslabones finales, que deben moverse con aceleraciones altas. Para ello es necesario utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones. La siguiente tabla, extraída de [1] resume los sistemas de transmisión para robots. El lector que quiera profundizar en el tema puede utilizar las referencias [1],[2] y [3] para obtener más información.

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	---
	Cadena	Distancia grande	ruido
	Paralelogramo	---	giro limitado
	Cable	---	deformabilidad
Circular-lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal- Circular	Paral. Articulado	---	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Tabla 1.1.- Sistemas de transmisión para robots

Los reductores utilizados en robótica pueden tener diferentes morfologías y estar basados en distintas tecnologías, y en muchas ocasiones vienen incorporados con el actuador.

*Actuadores*

Para el estudio de los actuadores y sus modelos matemáticos se ha dedicado la práctica cuatro de este libro. Sin embargo el lector debe conocer que los elementos motrices que generan el movimiento de las articulaciones pueden ser, según la energía que consuman, de tipo hidráulico, neumático, eléctrico o basado en las propiedades de las aleaciones con memoria de forma (SMA).

Elementos terminales

A la muñeca del manipulador se acopla una garra o una herramienta, que será la encargada de materializar el trabajo previsto. El elemento terminal debe ser capaz de agarrar la carga máxima del robot, a la vez que debe ser de dimensiones y peso reducido. Esto obliga en muchas ocasiones a soluciones de compromiso en que el elemento terminal se diseña para una aplicación concreta. Normalmente se opta por garras neumáticas. Algunas garras de sujeción son las mostradas en las figuras siguientes.



Figura 1.8.- Morfología de distintas garras neumáticas

La siguiente figura muestra diferentes formas de sujetar la carga. La fricción entre la carga y los dedos de la pinza es un factor determinante a la hora de elegir o diseñar una pinza. En la literatura especializada y en los catálogos de los fabricantes suelen aparecer tablas que permiten seleccionar la pinza adecuada para cada aplicación.

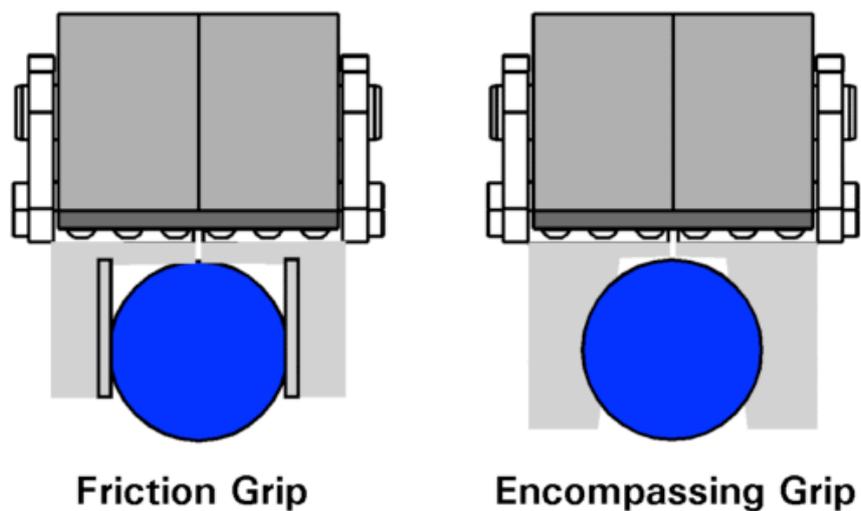


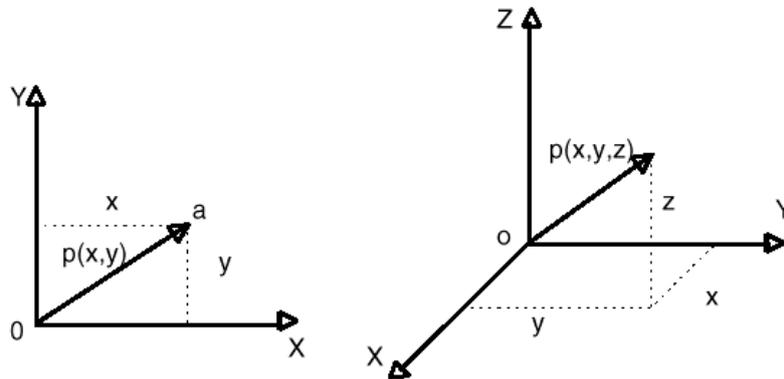
Figura 1.9.- Sujeción de una pieza por distintas pinzas neumáticas

## 1.2.- Sistemas de representación utilizados en robótica.

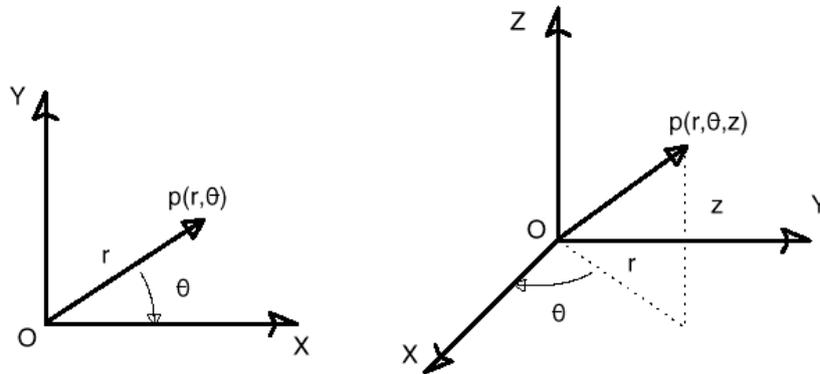
Tal y como se vio en el epígrafe anterior, las diferentes arquitecturas mecánicas de robots aconsejan el uso de distintos sistemas de representación de acuerdo con la morfología de cada robot.

### Representación de la posición

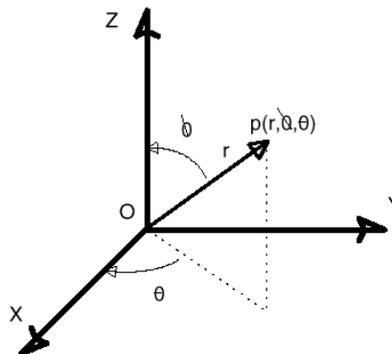
Es común en robótica el uso de coordenadas cartesianas para localizar un cuerpo en el espacio, sin embargo es igualmente válido y el lector encontrará varios autores que hacen uso de las coordenadas polares o esféricas en sus desarrollos matemáticos.



Coordenadas cartesianas en 2 y 3 dimensiones



Coordenadas polares en 2 y 3 dimensiones



Coordenadas esféricas

Figura 1.10.- Sistemas de representación de posición utilizados en Robótica

### Representación de la orientación

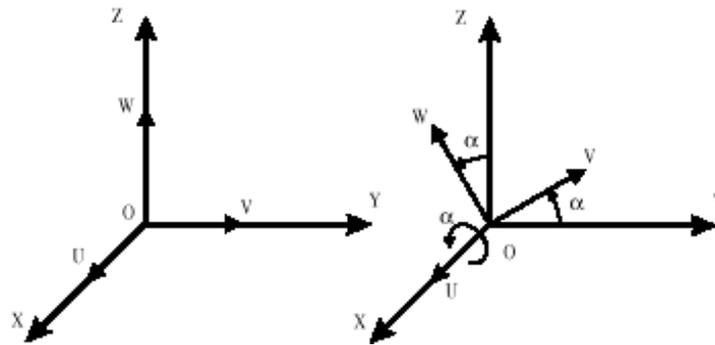
La orientación de un sólido en el espacio se puede especificar utilizando varios sistemas de referencia. La orientación en el espacio tridimensional viene definida por tres grados de libertad, luego será necesario un mínimo de tres parámetros linealmente independientes.

En robótica es común el uso de **matrices de rotación**, debido a la comodidad que proporciona el uso del álgebra matricial. La matriz de rotación es una matriz 3x3 ortogonal de cosenos directores que define la orientación del sistema OUVW móvil respecto al sistema OXYZ fijo, y que tiene la forma siguiente:

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix}$$

donde  $[i_x \ j_y \ k_z]$  son los vectores unitarios del sistema OXYZ y  $[i_u \ j_v \ k_w]$  los vectores unitarios del sistema OUVW.

El ejemplo siguiente muestra la matriz de rotación del sistema OUVW que ha girado un ángulo  $\alpha$  respecto a OXYZ.



$$R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \\ 0 & \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

Figura 1.11.- Rotación del sistema OUVW respecto al eje OX

Las matrices ortonormales de rotación pueden componerse para expresar la aplicación continua de varias rotaciones (Recuerde el lector que el orden en que se realizan las rotaciones es importante, pues el producto de matrices no es conmutativo).

También es común en robótica el uso de cuaternios, pero debido a que no se utilizan en los desarrollos de las prácticas de este libro, no van a ser estudiados aquí.

### 1.3.- Herramientas para la Simulación de Sistemas Robotizados. Ámbito de aplicación.

Como ya se comentó en la introducción, la simulación de sistemas robotizados ha estado íntimamente ligada a la potencia computacional de los procesadores de cálculo. El gran avance producido con los microprocesadores actuales ha permitido obtener paquetes de simulación dinámica como ADAMS de MDI (<http://www.adams.com>) capaces de simular el comportamiento dinámico de casi cualquier mecanismo multicuerpo. Estos paquetes incorporan amplias librerías de articulaciones y fuerzas que permiten al usuario construir su modelo en un tiempo relativamente corto. Estos paquetes son utilizados en los centros de investigación y en las empresas de tecnología para el diseño de prototipos mecánicos. Sin embargo las altas prestaciones de este tipo de paquetes hacen que su coste económico sea alto para una primera aproximación al mundo de la robótica.

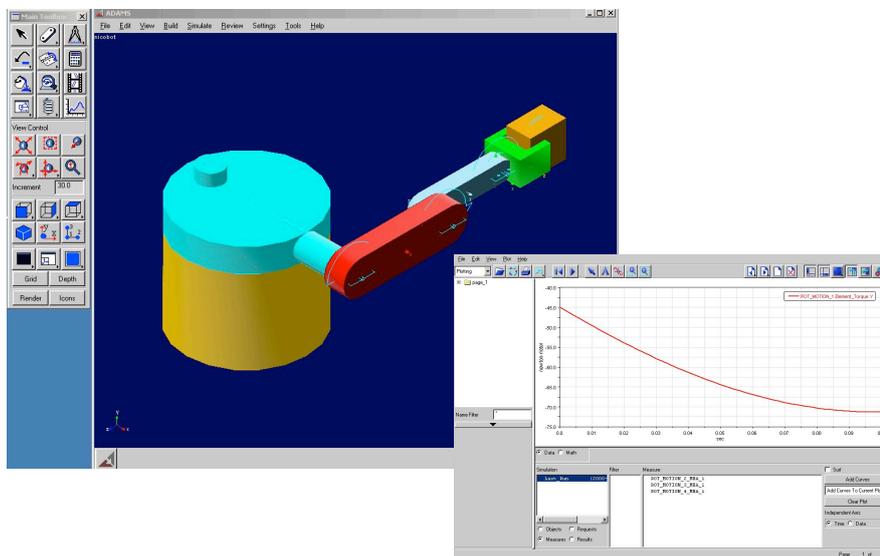


Figura 1.12.- Paquete de simulación dinámica ADAMS

Asimismo, en la red pueden encontrarse multitud de paquetes gratuitos o de demostración de software especializado en la simulación de robots clásicos. La mayoría de este software incorpora una interfaz gráfica de simulación avanzada, dando lugar a resultados muy vistosos. Sin embargo, ya se ha comentado que estos paquetes suelen ser cerrados desde el punto de vista del código fuente, y por lo tanto están limitados a las capacidades que el programador haya incorporado antes de su publicación. El comportamiento dinámico de los mecanismos no suele estar implementado en estos simuladores, o bien lo está de una manera oscura y sin especificar las simplificaciones que se han realizado en él. Estos paquetes están destinados normalmente a la educación, y a la realización de prácticas por parte de los alumnos. La siguiente tabla muestra una lista de algunos de estos simuladores que los autores han encontrado en la red.

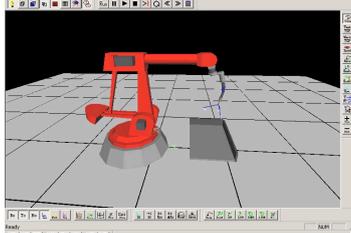
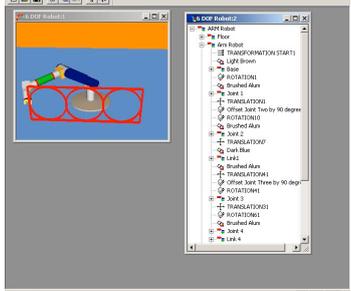
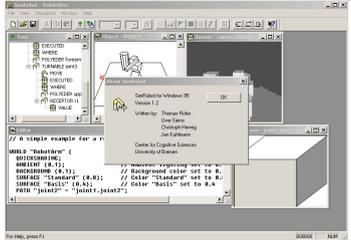
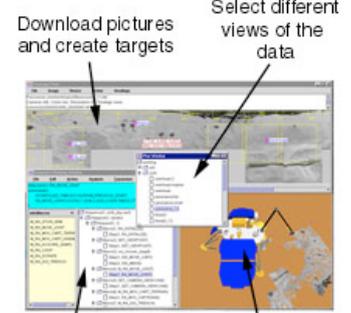
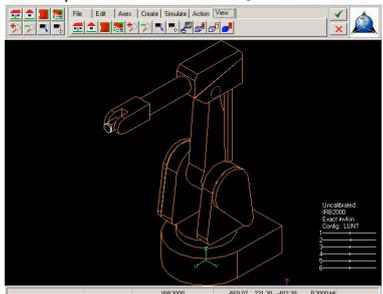
Simulador	Dirección web	Imágenes
Easy Robot	<a href="http://www.easy-rob.de/">http://www.easy-rob.de/</a>	
Roboworks	<a href="http://www.newtonium.com">http://www.newtonium.com</a>	
Simrobot	University of Bremen	
Wits	<a href="http://mars.graham.com/mplwits/">http://mars.graham.com/mplwits/</a>	 <p>Download pictures and create targets</p> <p>Select different views of the data</p> <p>Build your own lander command sequences</p> <p>Simulate your sequences, and control your lander!</p>
Workspace	<a href="http://www.rosl.com">http://www.rosl.com</a>	

Tabla 1.2.- Algunos simuladores de robots disponibles

En otro nivel se sitúan aquellas herramientas diseñadas para el análisis de sistemas robotizados que se presentan con el código fuente accesible al usuario. La

filosofía del código abierto pretende ampliar continuamente las capacidades de ese código, permitiendo que los lectores y programadores añadan su contribución a este código. A los autores nos ha parecido interesante este enfoque, pues este libro pretende servir como un primer paso para la formación de expertos en robótica que conozcan el cómo funcionan las cosas. La magnífica Robotics Toolbox de Matlab® de Peter I. Corke y el código desarrollado por los autores en este libro pertenecen a esta clasificación.

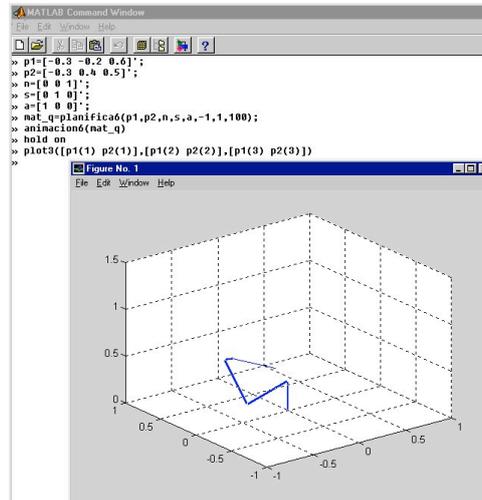


Figura 1.13.- Herramienta de simulación desarrollada en el libro

## 1.4.- Presentación de los dos robots ficticios.

Finalmente en esta práctica se presentan los dos robots ficticios que se utilizan a lo largo del libro para la realización de las prácticas, ejemplos y ejercicios recomendados. Se trata de dos robots industriales ficticios, con cadenas cinemáticas distintas de 4 y 6 grados de libertad respectivamente.

El robot de 4 grados de libertad tiene una configuración de robot cilíndrico en el que las articulaciones 2 y 3 son prismáticas, mientras que las articulaciones 1 y 4 son rotacionales. Las dimensiones del robot son las indicadas en la figura siguiente (en metros) en la que  $d_2$  y  $d_3$  corresponden a coordenadas articulares, y por tanto son variables del robot, al igual que  $\theta_1$  y  $\theta_4$ .

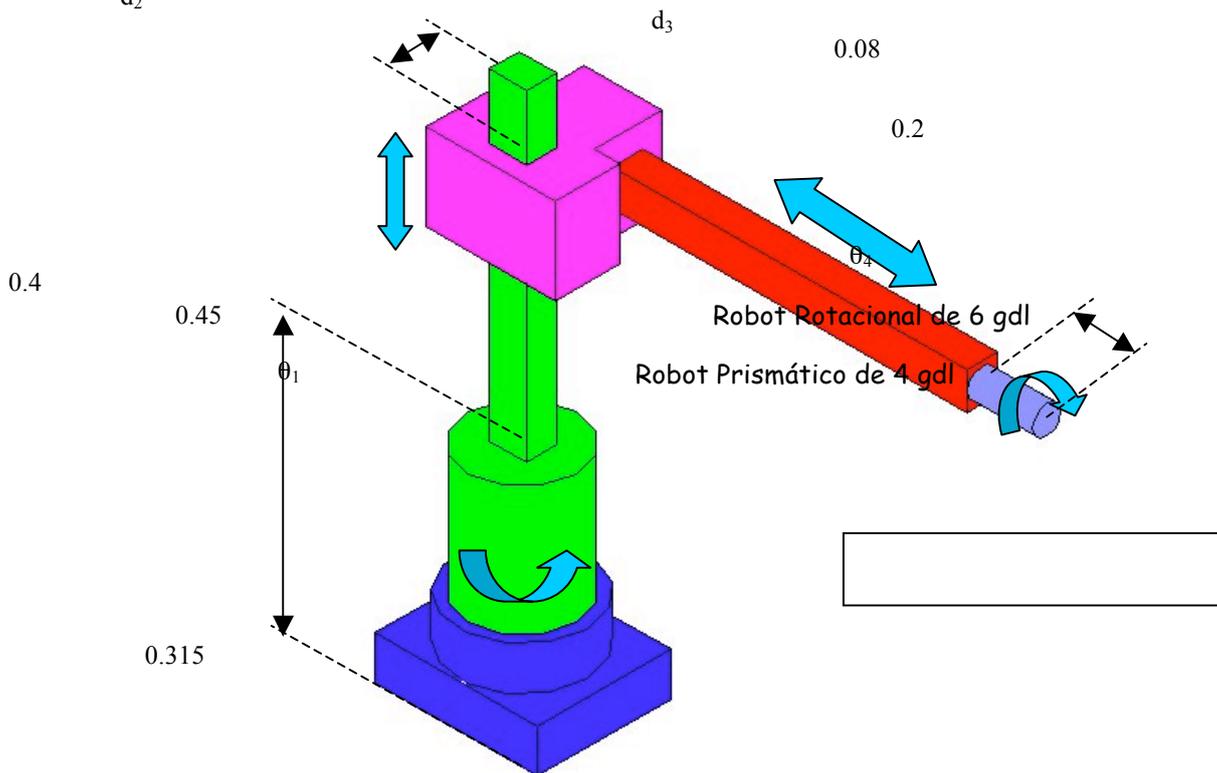


Figura 1.14.- Robot prismático de 4 gdl

El robot de 6 grados de libertad tiene una configuración antropomórfica o angular con todas las articulaciones rotacionales. Las dimensiones en metros están indicadas en la figura 1.15.

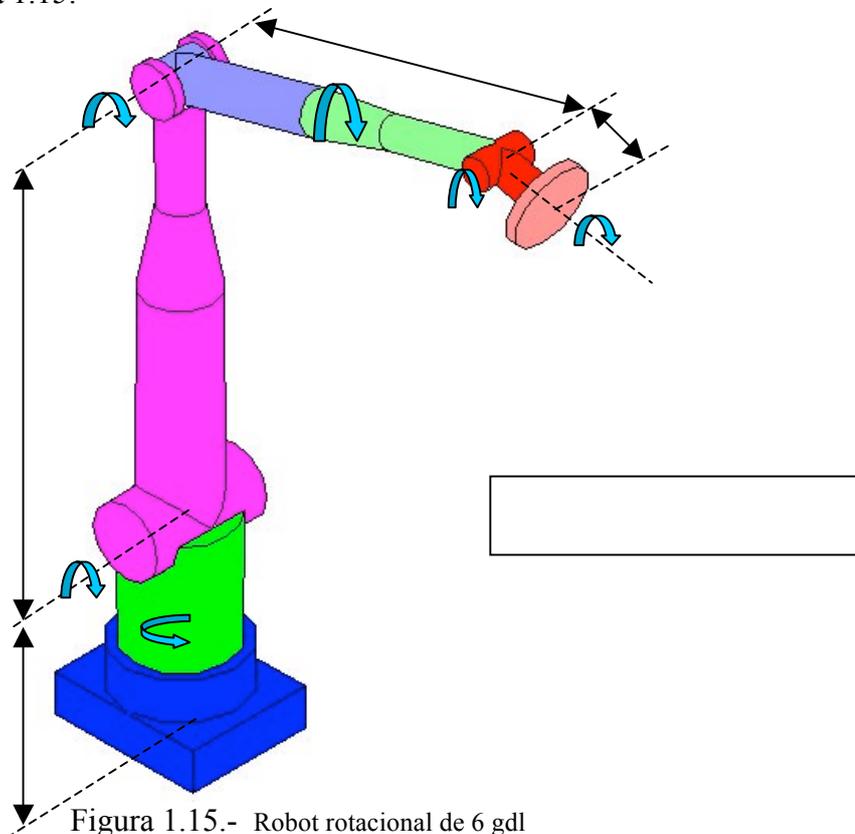


Figura 1.15.- Robot rotacional de 6 gdl

## 1.5.-PRÁCTICA.Presentación de la Robotics Toolbox de Matlab®

Se trata de una toolbox de Matlab® que proporciona varias funciones que son útiles en robótica. Su conocimiento va a permitir disponer de una serie de herramientas para la verificación de los resultados obtenidos.

La Robotics Toolbox fue desarrollada por Peter I. Corke en 1996 y puede obtenerse libremente desde *MathWorks* en la siguiente dirección:

<ftp.mathworks.com>

en el directorio */pub/contrib/misc/robot*.

Una vez instalada la toolbox se ejecutará en primer lugar el comando *rtdemo* que ofrece una demo de algunas de las funciones implementadas en la toolbox. Al ejecutar la demo aparece un menu (fig. 1.16) a partir del cual se ejecutan varios comandos de la toolbox.

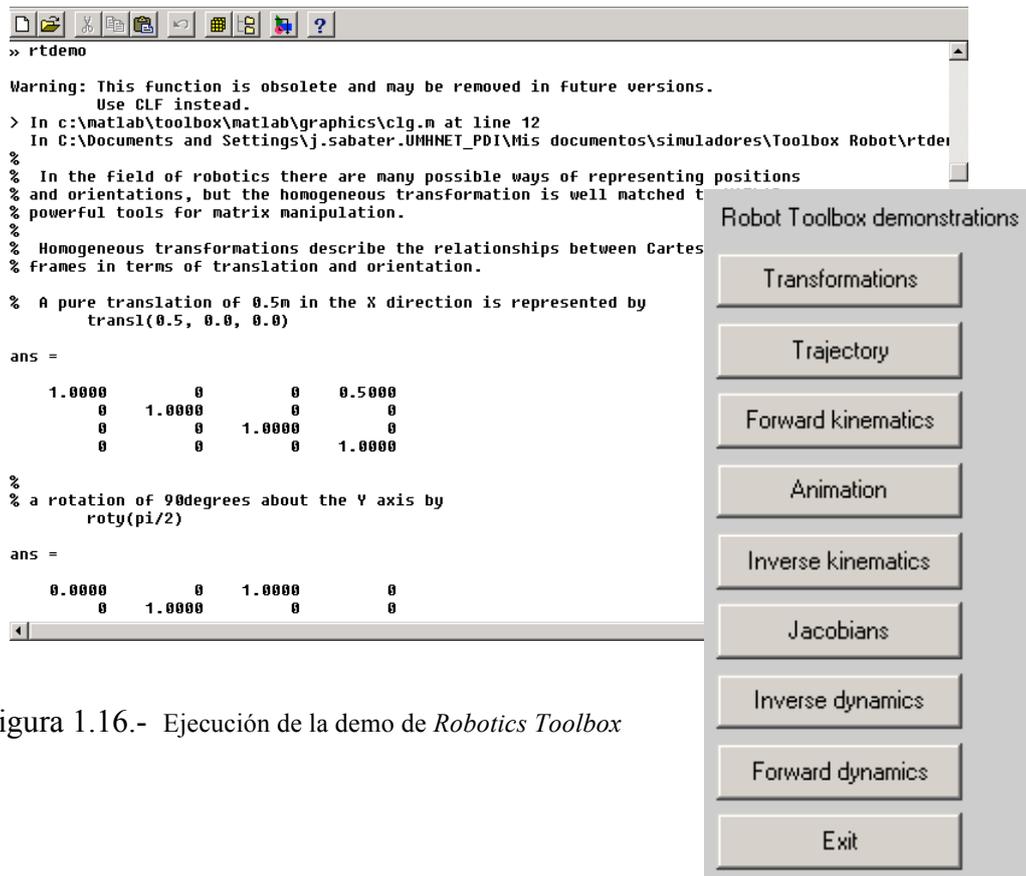


Figura 1.16.- Ejecución de la demo de *Robotics Toolbox*

Como todos los comandos de Matlab® la Robotics Toolbox nos ofrece ayuda en línea en la que se puede conocer el uso de cada una de las funciones:

```
» help jtraj

JTRAJ    Compute a joint space trajectory between two points

          [Q QD QDD] = JTRAJ(Q0, Q1, N)
          [Q QD QDD] = JTRAJ(Q0, Q1, N, QD0, QD1)
          [Q QD QDD] = JTRAJ(Q0, Q1, T)
          [Q QD QDD] = JTRAJ(Q0, Q1, T, QD0, QD1)

Returns a joint space trajectory Q from state Q0 to Q1. The number
of points is N or the length of the given time vector T. A 7th
order polynomial is used with default zero boundary conditions for
velocity and acceleration. Non-zero boundary velocities can be
optionally specified as QD0 and QD1.

The function can optionally return a velocity and acceleration
trajectories as QD and QDD.

Each trajectory is an mxn matrix, with one row per time step, and
one column per joint parameter.

»
```

La demo de Matlab® incluye gráficas de planificación de trayectorias y animación alámbrica de robots donde se pueden visualizar los trayectorias calculadas.

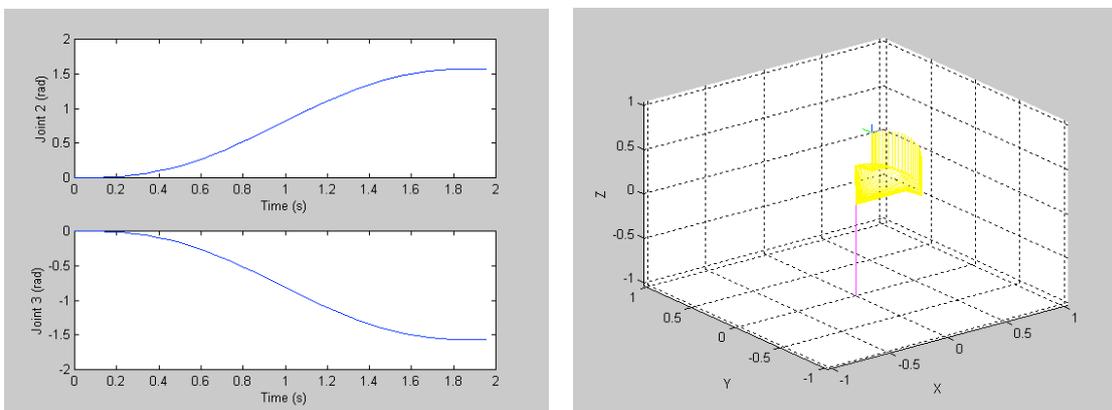


Figura 1.17.- Ejecución de la demo de *Robotics Toolbox*

## EJERCICIOS PROPUESTOS

---

Utilizando las funciones de la Toolbox de Matlab®:

- dar la matriz de transformación de una translación de 6 unidades en el eje X, -3 unidades en el eje Y y 8 unidades en el eje Z.
- dar la matriz de transformación de una rotación de  $0^\circ$  en X,  $0^\circ$  en Y y  $-90^\circ$  en Z.
- dar la matriz de transformación de un sistema que se ha desplazado 6 unidades en X, ha rotado  $45^\circ$  en Y y  $-90^\circ$  en Z