



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ROBOT MANIPULADOR CON 5 GRADOS DE  
LIBERTAD

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Mecatrónico**

PRESENTA:

**Eduardo Alanis Vázquez**  
**Jorge Adrian Benítez Hernández**

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Juan Mauricio Ángeles Cervantes



México, D.F., 2018



*A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad, por la formación que me han dado.*

*Es gracias a ustedes que es posible el presente trabajo.*

*Eduardo Alanis.*

*A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad, por la formación que me han dado.*

*Es gracias a ustedes que es posible el presente trabajo.*

*Jorge Benítez*



## Reconocimientos

---

También quisiera reconocer a...



# Declaración de autenticidad

---

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Eduardo Alanis Vázquez  
Jorge Adrian Benítez Hernández. México, D.F., 2018



## Resumen

---

Esta tesis está dedicada al diseño, manufactura y puesta en marcha de un robot manipulador de 5 grados de libertad. La metodología de diseño propuesta busca simplificar los procesos de manufactura para la creación de robots articulados, economizar su construcción y exponer de manera educativa los principales componentes de los robots manipuladores industriales.



# Índice general

---

Índice de figuras	xii
Índice de tablas	xiii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Presentación . . . . .	1
1.1.1. Objetivo . . . . .	2
1.1.2. Motivación . . . . .	2
1.1.3. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.1.4. Metodología . . . . .	3
1.1.5. Contribuciones . . . . .	3
1.1.6. Estructura de la tesis . . . . .	3
1.2. Marco teórico . . . . .	3
<b>2. Descripción de un robot de 5 grados de libertad</b>	<b>9</b>
2.1. Articulaciones y pares cinemáticos . . . . .	9
2.2. Cinemática directa . . . . .	11
2.2.1. Posición . . . . .	11
2.2.2. Orientación . . . . .	11
2.3. Cinemática inversa . . . . .	11
2.4. Modelado . . . . .	11
<b>3. Control</b>	<b>13</b>
3.1. Conceptos de control . . . . .	13
3.1.1. Familiarización con el sistema físico a controlarse . . . . .	14
3.1.2. Modelado dinámico . . . . .	16
3.1.3. Especificaciones de control . . . . .	16
3.2. Esquemas de control . . . . .	16
3.2.1. PID . . . . .	16
3.3. Control por par calculado . . . . .	16
3.4. Parámetros de diseño . . . . .	16

---

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>4. Diseño Mecánico</b>	<b>17</b>
4.1. Elementos físicos . . . . .	17
4.2. Barras, rodamientos, contrapesos . . . . .	17
4.3. Métodos de unión . . . . .	17
<b>5. Manufactura e instrumentación</b>	<b>19</b>
5.1. Ensamble de componentes . . . . .	19
5.2. Sensores y actuadores . . . . .	19
5.2.1. Motores . . . . .	19
5.2.2. Decodificador óptico . . . . .	19
5.3. Microcontrolador . . . . .	19
<b>6. Implementación</b>	<b>21</b>
6.1. Programación . . . . .	21
6.2. Puesta en marcha . . . . .	21
6.3. Pruebas mecánicas . . . . .	21
<b>A. Resultados</b>	<b>23</b>
<b>B. Referencias</b>	<b>25</b>
<b>C. Conclusiones/Trabajo a futuro</b>	<b>27</b>

# Índice de figuras

---

1.1.	Manipulador robótico y su analogía con un brazo del cuerpo humano . . . . .	2
1.2.	(a) La patente de G. Devol marcó el comienzo del trabajo conjunto con J. Engelberger para crear la primera compañía de robótica del mundo (b) El primer robot instalado en una planta de <i>General Motors</i> . . . . .	4
1.3.	<i>The Stanford Arm.</i> La configuración no es antropomórfica, cuenta con 6 pares cinemáticos (5 rotacionales, 1 prismático). . . . .	5
1.4.	(a) El robot T3 inició con actuadores hidráulicos, para luego ser reemplazados por motores eléctricos (b) El robot PUMA se convierte en una referencia para la investigación en robótica . . . . .	6
1.5.	Sistema de control robótico DX100. . . . .	7
2.1.	Pares cinemáticos superiores e inferiores . . . . .	10
3.1.	Representación de un sistema como un bloque con sus entradas y salidas	14
3.2.	Robot en movimiento libre . . . . .	14
3.3.	Robot en interacción con el medio ambiente . . . . .	15
5.1.	Órgano Terminal . . . . .	20



## Índice de tablas

---

3.1. Tabla 1 . . . . .	16
------------------------	----



---

## Capítulo 1

# Introducción

---

### 1.1. Presentación

La primera concepción de la palabra robot proviene de la obra *Rossum's Universal Robots* del novelista checo Karel Čapek [1]. En la lengua checa *robo* significa trabajo. El diccionario de la Real Academia Española [2] define a un robot como: *Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas solo a las personas.*

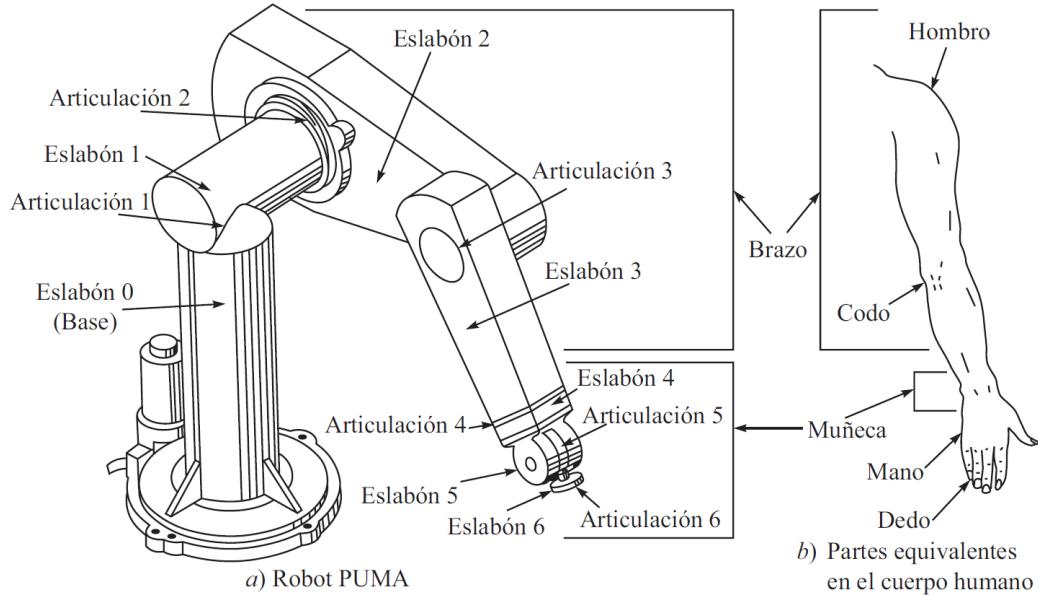
En la industria, los robots más utilizados son conocidos como robots manipuladores, cuya estructura se asemeja a los brazos humanos, Fig. 1.1 [3]. Su estructura está formada por eslabones unidos mediante articulaciones para brindar libertad de movimiento en el entorno de trabajo, donde uno de los extremos del manipulador permanece fijo mientras que el otro extremo cuenta con una herramienta que le permite realizar una tarea para la que fue programado. Los robots manipuladores son utilizados en gran parte de tareas como seleccionar y distribuir objetos, o para realizar modificaciones en su entorno como pintar o ensamblar, entre muchas otras; reduciendo los tiempos de operación y minimizando la necesidad de supervisión.

Un robot manipulador se constituye de cuatro sistemas fundamentales. El primero es un sistema mecánico que le da forma al cuerpo del robot y está constituido principalmente por eslabones y articulaciones que permiten el movimiento en su espacio de trabajo, aunque también forman parte del sistema mecánico elementos de transmisión de potencia, como engranes, cadenas y poleas; elementos que otorgan estabilidad al robot, como los sistemas de contrapesos, ya sean fijos o móviles; y elementos de unión, como soldadura y tornillos. El segundo es un sistema eléctrico-electrónico que otorga energía para el movimiento de los motores, para la activación de sensores y la distribución de señales. El tercer sistema pertenece a la programación, que constituye la comunicación entre el usuario y la máquina. El cuarto sistema es de control, que describe a través de algoritmos matemáticos al robot, y como resultados de sus soluciones se obtienen

## 1. INTRODUCCIÓN

---

las acciones necesarias a ejecutar de los tres primeros, para la realización de una tarea asignada.



**Figura 1.1:** Manipulador robótico y su analogía con un brazo del cuerpo humano

### 1.1.1. Objetivo

Diseño y manufactura de un robot manipulador con 5 grados de libertad capaz de realizar seguimiento de trayectorias.

### 1.1.2. Motivación

Los robots manipuladores tienen un amplio uso en la industria y en áreas donde se pretende replicar el trabajo que realiza una persona, ya sea porque es demasiado complejo o se trata de procesos donde se requiera una gran precisión, por encontrarse en ambientes peligrosos o tóxicos, etc. Sin embargo, los robots manipuladores también pueden ser de gran utilidad en el ámbito educativo. Los estudiantes de robótica suelen tener acceso nulo o restringido a manipuladores, principalmente por la falta de infraestructura en las instituciones de educación y en el caso que éstas tengan aquella, se restringe su uso por su delicadeza o por la intención de no dañar al robot debido a los elevados costos de reparación. La creación de un manipulador con 5 grados de libertad a un bajo costo pondrá al alcance de los estudiantes una herramienta práctica en el área de la robótica industrial.

### **1.1.3. Planteamiento del problema**

El diseño de robots manipuladores es una temática ampliamente abarcada en los trabajos escolares de nivel licenciatura, aunque la mayor parte de esa literatura tiene por objetivo demostrar conceptualmente las capacidades de los robots manipuladores. La construcción del prototipo funcional es un elemento que no se suele llevar a término.

### **1.1.4. Metodología**

El proceso de construcción del manipulador comienza con el diseño, para ello se plantean los requerimientos y se traducen a especificaciones del robot. Posteriormente se elabora un diseño asistido por computadora donde se obtiene la geometría y espacio de trabajo del manipulador. Se realiza la descripción analítica del movimiento mediante la cinemática directa e inversa, y se termina con la construcción de las piezas y el ensamblaje del prototipo.

### **1.1.5. Contribuciones**

La principal contribución de este trabajo es la simplificación del proceso de construcción para un robot manipulador con 5 grados de libertad, con los elementos necesarios para ser replicado en posteriores trabajos y reduciendo los costos asociados a la fabricación.

### **1.1.6. Estructura de la tesis**

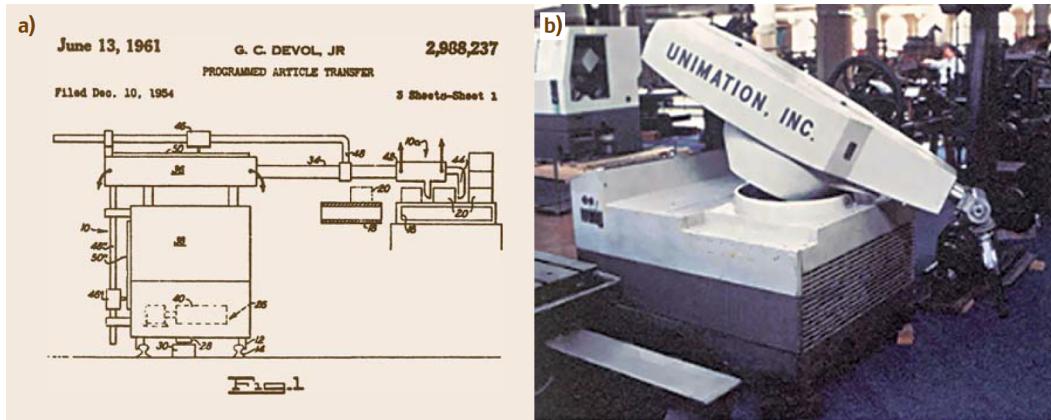
En este capítulo se hace una breve descripción del trabajo a desarrollar, el objetivo y algunas ideas generales de robots manipuladores, en el siguiente capítulo se encuentran los fundamentos teóricos que sirven para entender las generalidades de los manipuladores, su composición y la forma de operarlos. En el tercer capítulo se aborda el diseño mecánico junto con un análisis de los elementos que conforman al manipulador, las geometrías y los espacios de trabajo que definirán la movilidad. En el capítulo cuatro se lleva a cabo la construcción del prototipo y la puesta en marcha. En el quinto se analizan los resultados obtenidos donde se observa la capacidad real del robot manipulador construido y en el último capítulo se tratan las conclusiones y el posible trabajo a futuro del proyecto.

## **1.2. Marco teórico**

Los robots actuales tienen sus orígenes en máquinas controladas remotamente por un operador (teleoperadores) y por máquinas-herramienta controladas numéricamente

## 1. INTRODUCCIÓN

---



**Figura 1.2:** (a) La patente de G. Devol marcó el comienzo del trabajo conjunto con J. Engelberger para crear la primera compañía de robótica del mundo (b) El primer robot instalado en una planta de *General Motors*.

(máquinas CNC)\*. A pesar de que el primer teleoperador fue desarrollado en 1947, no fue hasta la década de los 60's cuando estos robots manipuladores se incrustaron con éxito en la industria, debido a su alta confiabilidad, repetibilidad y capacidad de adaptación a numerosas actividades. Debajo se encuentra una lista con acontecimientos importantes en el desarrollo de robots manipuladores desde sus inicios al presente.

1947 - Desarrollo del primer teleoperador servoeléctrico. El esclavo era servo-controlado para seguir la trayectoria del maestro, sin realimentación.

1948 - Introducción de un sistema de realimentación en el que la fuerza ejercida por el esclavo era transmitida de vuelta al operador.

1949 - La Fuerza Aérea de los Estados Unidos patrocinó investigaciones en el desarrollo de herramientas controladas numéricamente. La investigación se realizó para combinar la experiencia en servo-sistemas sofisticados con las recién desarrolladas técnicas de computación digital.

1954 - George Devol registra una patente en transferencia programada de artículos, Fig 1.2.

1961 - Desarrollo del primer brazo teleoperado equipado con sensores de contacto para dar realimentación de fuerza al operador.

---

\*El concepto de robot industrial combina los enlaces mecánicos del teleoperador con la precisión, programabilidad y autonomía de las máquinas CNC [4].



**Figura 1.3:** *The Stanford Arm.* La configuración no es antropomórfica, cuenta con 6 pares cinemáticos (5 rotacionales, 1 prismático).

1963 - Lawrence G. Roberts demuestra la factibilidad de integrar sistemas de visión en los robots.

1969 - Victor Scheinman diseña *The Stanford Arm*, uno de los primeros manipuladores en ser concebidos exclusivamente para control por computadora. Fig 1.3

1973 - Creación del primer lenguaje de programación para robots *WAVE* en la Universidad de Stanford.

1974 - La compañía Cincinnati Milacron introduce el robot T3 con control por computadora integrado. Fig 1.4 (a).

1978 - Unimation introduce el robot PUMA, cuya destreza se asemeja a la de un brazo humano. Fig 1.4 (b).

1978 - El diseño de bajo costo del robot SCARA de 4 ejes marca innovación en la industria al permitir ensamblajes de partes pequeñas a gran velocidad.

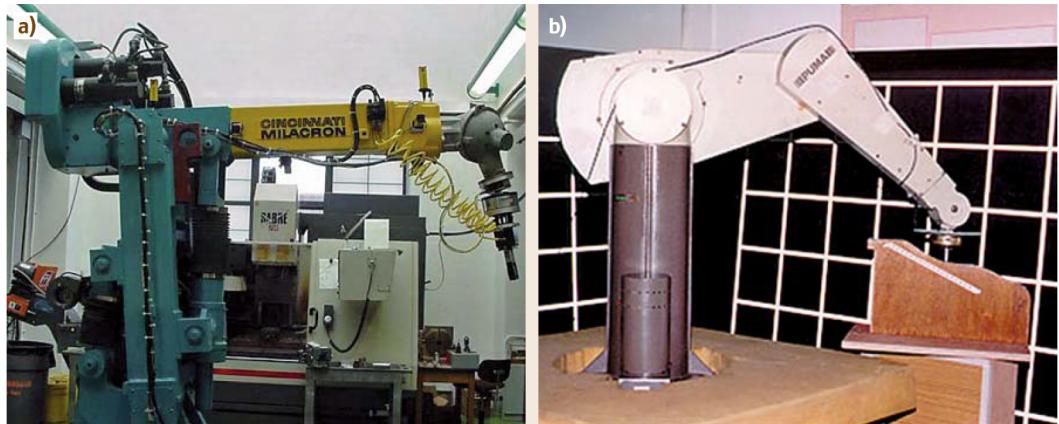
1981 - La Universidad Carnegie Mellon desarrolla el primer robot que utiliza manejo directo.

1986 - Exploración de los restos de la embarcación *Titanic* con el robot submarino Jason.

1988 - Creación de la *IEEE RAS* (Sociedad de Robótica y Automatización del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, por sus siglas en inglés).

## 1. INTRODUCCIÓN

---



**Figura 1.4:** (a) El robot T3 inició con actuadores hidráulicos, para luego ser reemplazados por motores eléctricos (b) El robot PUMA se convierte en una referencia para la investigación en robótica

1993 - El robot experimental ROTEX de la Agencia Aeroespacial Alemana vuela a bordo del transbordador espacial *Columbia* para la realización de varias tareas en dos modos: teleoperado (en línea) y con programación basada en sensores (fuera de línea).

1996 - Honda releva su robot humanoide, proyecto que comenzó en secreto en 1986.

2001 - Realización de la primera telecirugía para remoción de una vesícula biliar de una mujer en Francia, con cirujanos de Nueva York.

2005 - La manipulación sincronizada de dos brazos robóticos se logra con MOTO-MAN, simulando la destreza humana de trabajo con dos manos.

2006 - Presentación del primer robot de peso ligero desarrollado por KUKA en asociación con DLR. Con un peso de 16 kg y una capacidad de carga de 7 kg se convierte en el robot con la mejor relación peso/carga.

2007 - Reis Robotics se convierte en un líder de líneas de producción de módulos fotovoltaicos. Desde 2006 el campo de fotovoltaico se convirtió en un mercado importante para el uso de robots.

2008 - En Japón, FANUC lanza un nuevo robot de trabajo pesado con una capacidad de carga de casi 1200 kg, rompiendo el record impuesto por KUKA en 2007 de 1 tonelada.

2009 - Yaskawa Motoman introduce un sistema de control robótico mejorado que proporciona sincronización completa de ocho robots, con un máximo de 72 ejes. Zonas de



**Figura 1.5:** Sistema de control robótico DX100.

interferencia dinámicas proveen una evasión de colisiones avanzada. Fig 1.5.

2011 - Lanzamiento del Robonauta RB2 hacia la Estación Espacial Internacional. Es el primer robot humanoide en el espacio, diseñado por investigadores del Centro Espacial Johnson de la NASA en colaboración con General Motors y Oceaneering.

2016 - El robot FANUC M-2000iA/2300 se convierte en el manipulador con más capacidad de carga en el mundo, levantando y posicionando objetos de hasta 2300 kg.



# Descripción de un robot de 5 grados de libertad

---

## 2.1. Articulaciones y pares cinemáticos

La movilidad de un sistema puede expresarse en función de los parámetros independientes mínimos que se necesitan para describir de manera única su posición y orientación en un instante de tiempo [6]. Estos parámetros reciben por nombre **grados de libertad** (GDL). El número de GDL también depende de las dimensiones del espacio en el que se trabaje. Para exemplificar el caso del movimiento en un espacio plano de dos dimensiones se puede tomar un cuadrado de papel y colocarlo sobre un escritorio, el papel puede moverse de manera vertical (primer GDL), horizontal (segundo GDL) o girar sobre un eje perpendicular al plano (tercer GDL). Dichos movimientos también pueden limitarse. Si ahora se toma un alfiler y se clava el cuadrado de papel sobre el escritorio se han restringido los movimientos horizontales y verticales, quedando únicamente la rotación alrededor del alfiler (solamente un GDL).

En el caso del movimiento plano, los cuerpos rígidos sin restricción cuentan con tres GDL, dos que indican posición y uno que indica orientación. Si se considera ahora el espacio tridimensional, los cuerpos rígidos cuentan con seis GDL, se necesitan tres para definir la posición y otros tres que definen la orientación.

Los eslabones que componen a un robot manipulador están conectados de tal manera que se permita cierto tipo de movimiento. Existen dos movimientos a partir de los cuales se derivan cualquier movimiento complejo conocido: la traslación pura y la rotación pura. Estas conexiones entre eslabones reciben el nombre de articulaciones o pares cinemáticos [7], Fig 2.1.

## 2. DESCRIPCIÓN DE UN ROBOT DE 5 GRADOS DE LIBERTAD

---

Clase del par	Condiciones de enlace	Grados de Libertad	Nombre	Dibujo	Representación Esquemática
I	1	5	Esférica - plano		
II	2	4	Esférica - cilindro		
III	3	3	Esférica o rótula		
III	3	3	Plana		
IV	4	2	Cilíndrica		
IV	4	2	Rótula con pasador		
V	5	1	Prismático		
V	5	1	Rotación		
V	5	1	Helicoidal		

**Figura 2.1:** Pares cinemáticos superiores e inferiores

## 2.2. Cinemática directa

Los robots rígidos guardan una relación entre la posición individual de cada articulación y la ubicación espacial de la herramienta o efecto final. Una gran parte de la cinemática de los robots se encarga de establecer sistemas de coordenadas para cada eslabón rígido, indicando la posición y orientación respecto a un sistema de referencia inercial, que se relacionan entre sí mediante matrices de transformación. Las operaciones básicas entre sistemas de coordenadas son la traslación y la rotación, que pueden combinarse para obtener matrices de transformaciones homogéneas, como se describirá más adelante.

### 2.2.1. Posición

### 2.2.2. Orientación

## 2.3. Cinemática inversa

## 2.4. Modelado

```
% Declaracion de las variables simbolicas
```



---

## Capítulo 3

# Control

---

A pesar de la existencia de robots comerciales de tipo industrial, diseñar controladores para robots sigue siendo un área compleja y constantemente estudiada por parte de los constructores de robots, así como por centros de investigación en control y robótica alrededor del mundo. Podría argumentarse que los robots industriales actuales son capaces de realizar correctamente una gran variedad de tareas, por lo que pareciera innecesario el desarrollo de investigaciones sobre el tema de control de robots. Sin embargo, este último tema, además de interesante, tiene muchos retos que ofrecer en el marco teórico, y más importante aún, su estudio es indispensable en aplicaciones específicas que no pueden ser llevadas a cabo mediante los robots comerciales actuales.

### 3.1. Conceptos de control

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, ha tomado un papel importante e integral en los sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, posición, velocidad, etc.

La metodología de diseño de los sistemas de control puede resumirse en los siguientes pasos:

- Familiarización con el sistema físico a controlarse.
- Modelado matemático.
- Especificaciones de control.
- Diseño del controlador.

### 3. CONTROL

---

#### 3.1.1. Familiarización con el sistema físico a controlarse

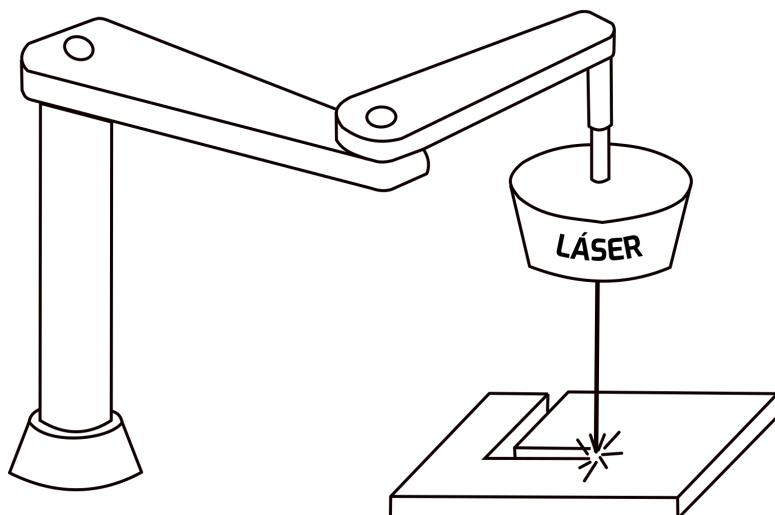
En esta primera etapa deben identificarse las *salidas del sistema*, que son todas aquellas variables físicas que se desea gobernar, tales como velocidad, desplazamiento, temperatura, etc. Además, deben identificarse claramente aquellas variables físicas del sistema que se encuentran disponibles y que influyen en el comportamiento del mismo, y en particular afectan a las salidas del sistema. Estas variables llamadas *entradas del sistema* pueden ser, por ejemplo, corriente eléctrica, par o fuerza, tensión, etc.

En el caso de los robots manipuladores, la variable de salida (denotada momentáneamente por  $y$ ) cuya conducta se desea modificar, ofrece un amplio espectro de elecciones tal como podemos ver a continuación.



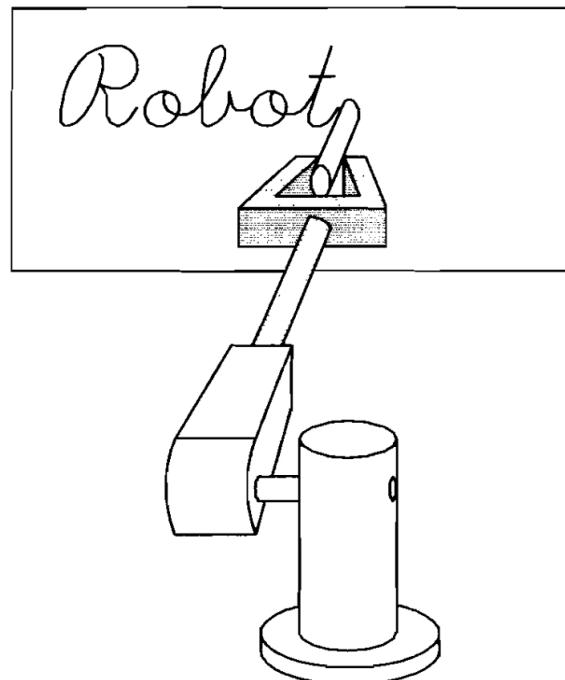
**Figura 3.1:** Representación de un sistema como un bloque con sus entradas y salidas

En el caso de robots que se desplazan libremente por un espacio de trabajo, tales como los destinados a tareas de pintado, traslado de objetos de un punto a otro, corte por rayo láser, etc, la salida del sistema  $y$  puede corresponder simplemente a las posiciones y velocidades articulares, denotadas comúnmente con la letra  $q$  y  $\dot{q}$ , respectivamente, o también la posición y orientación del efecto final o herramienta.



**Figura 3.2:** Robot en movimiento libre

Para robots manipuladores como el mostrado esquemáticamente en la Figura 3.3 que involucra su interacción con el medio ambiente por contacto físico para lograr tareas como pulido de superficies, desbastado de materiales, ensamblaje de alta precisión, etc., la salida **y** puede incluir los pares y fuerzas **f** ejercidos por el efecto final del robot sobre su medio ambiente.



**Figura 3.3:** Robot en interacción con el medio ambiente

### 3. CONTROL

---

#### 3.1.2. Modelado dinámico

#### 3.1.3. Especificaciones de control

### 3.2. Esquemas de control

#### 3.2.1. PID

### 3.3. Control por par calculado

### 3.4. Parámetros de diseño

Antes de comenzar, se definen en la tabla 3.1 los parámetros y variables utilizadas

Nombre Parámetro/Variable	Símbolo
Masa del péndulo	$m$
Masa del carro	$M$
Distancia del eje de giro al centro de masa	$l$
Aceleración gravitatoria	$g$
Momento de inercia péndulo respecto del eje de giro	$J$
Ángulo del péndulo respecto del eje vertical	$\theta$
Velocidad angular del péndulo	$\dot{\theta}, \omega$
Distancia del carro respecto al centro del riel	$x$
Velocidad del carro	$\dot{x}, v$

**Tabla 3.1: Parámetros dinámicos del carro-péndulo** - Estos son los valores de parámetros utilizados en el diseño y las simulaciones, corresponden a los valores reales.

---

Capítulo 4

## Diseño Mecánico

---

**4.1. Elementos físicos**

**4.2. Barras, rodamientos, contrapesos**

**4.3. Métodos de unión**



## Manufactura e instrumentación

---

La figura (5.1) ilustra la geometría del efecto final

### 5.1. Ensamble de componentes

### 5.2. Sensores y actuadores

#### 5.2.1. Motores

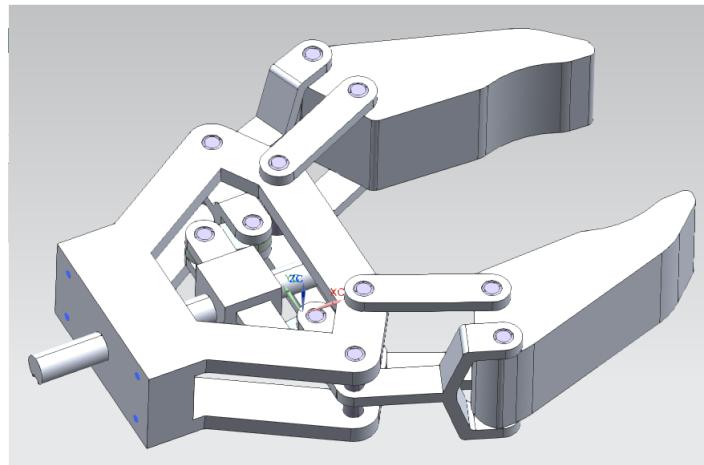
#### 5.2.2. Decodificador óptico

Para obtener datos que representen la posición y orientación de los eslabones se utiliza un deco

### 5.3. Microcontrolador

## 5. MANUFACTURA E INSTRUMENTACIÓN

---



**Figura 5.1:** Órgano Terminal

---

Capítulo 6

## Implementación

---

**6.1. Programación**

**6.2. Puesta en marcha**

**6.3. Pruebas mecánicas**



---

Apéndice A

---

## Resultados

---



---

Apéndice B

---

## Referencias

---

- [1] Karel Capek. (1920). R. U. R.(Rossum's Universal Robots).
- [2] Real Academia Española. (2017). Diccionario de la lengua española (23.a ed.). Consultado en <http://www.rae.es/rae.html>
- [3] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar. (2004). Robot Dynamics and Control. Lugar de publicación. Editorial.



---

Apéndice C

## Conclusiones/Trabajo a futuro

---

Apéndice