



Universidad Veracruzana

Universidad Veracruzana

Facultad de Ingeniería de la construcción y el habitat

TESIS:

**Diseño y construcción de un brazo robótico  
colaborativo para sistemas de manufactura  
flexible**

Presenta Ángel Ernesto Trujillo Elizondo, para obtener el  
grado de Maestría en Ingeniería Aplicada

---

Asesor:

José Alejandro Vasquez Santacruz

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>5</b>
<b>Resumen</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Objetivos . . . . .	8
1.2. Justificación . . . . .	8
1.3. Hipótesis . . . . .	9
<b>2. Marco teórico</b>	<b>10</b>
2.1. Brazos robóticos . . . . .	10
2.2. Robótica colaborativa . . . . .	10
2.3. Sistemas de manufactura flexible . . . . .	10
2.4. Ingeniería de sistemas basado en modelos . . . . .	10
<b>3. MBSE</b>	<b>11</b>
3.1. Diagrama de requerimientos . . . . .	11
<b>4. Modelo matemático</b>	<b>13</b>
4.1. Cinemática directa e inversa . . . . .	14
4.1.1. Cinemática directa . . . . .	14
4.1.1.1. Matriz de transformación homogénea . . . . .	14
4.1.1.2. Convención de Denavit-Hartenberg . . . . .	16
4.1.2. Cinemática inversa . . . . .	16
4.2. Cinemática de la velocidad . . . . .	16
4.3. Modelo dinámico . . . . .	16
4.3.1. Formulación Lagrangiana . . . . .	16

4.3.2. Formulación Newton-Euler . . . . .	16
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>
<b>Anexos</b>	<b>18</b>
Anexo 1. Matriz de transformación homogénea . . . . .	18

# Índice de figuras

3.1. Diagrama de requerimientos . . . . .	12
4.1. Boceto del brazo robótico propuesto . . . . .	14
4.2. Cadena cinemática . . . . .	15

# Índice de cuadros

4.1. Parámetros Denavit Hartenberg . . . . .	16
--	----

# Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico recibido durante la realización de este posgrado.

Agradezco profundamente a mi asesor, el Dr. José Alejandro Vásquez Santacruz por su apoyo y paciencia durante la realización de esta investigación.

# Resumen

Aquí va un resumen, pero cuando acabe.

# Abstract

Here goes an abstract, but i'll do it when I finish.



# Capítulo 1

## Introducción

Aquí empieza el viaje

### 1.1. Objetivos

El objetivo general de esta investigación consiste en diseñar y construir un brazo robótico de seis grados de libertad para sistemas de manufactura flexible.

Los objetivos específicos se mencionan a continuación:

- Desarrollar el modelo matemático cinemático y dinámico de un brazo robótico de seis grados de libertad.
- Construir un brazo robótico de coste accesible y fácil fabricación, así como compartir su diseño y componentes con una licencia de código abierto.
- Optimizar el modelado de piezas para su correcta manufactura con máquinas de manufactura aditiva.
- Desarrollar ¿utilizar? una metodología apegada a la ingeniería de sistemas basadas en modelos.

### 1.2. Justificación

El desarrollo de un brazo robótico de seis grados de libertad para sistemas de manufactura flexible que se pretende realizar es relevante en diversos

ámbitos del conocimiento.

Por último, al estar pensado como un desarrollo de código abierto, contribuirá al acervo tecnológico de la humanidad y podrá ser copiado, modificado y mejorado alrededor del mundo.

### **1.3. Hipótesis**

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Brazos robóticos

De acuerdo con Spong et al. [1, p. 1], la mayoría de las aplicaciones en el campo de la robótica se centran en brazos robóticos industriales que operan en fabricas con entornos estructurados, es por esto su gran importancia.

Un brazo robótico está compuesto de eslabones conectados por articulaciones para formar una cadena cinemática.

### 2.2. Robótica colaborativa

### 2.3. Sistemas de manufactura flexible

### 2.4. Ingeniería de sistemas basado en modelos

# Capítulo 3

## MBSE

### 3.1. Diagrama de requerimientos

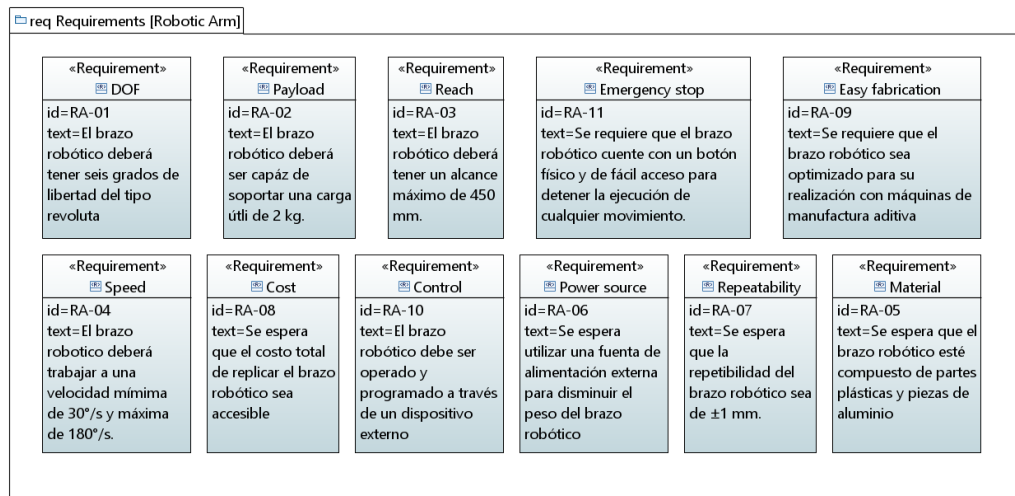


Figura 3.1: Diagrama de requerimientos

# Capítulo 4

## Modelo matemático

De acuerdo con [2, p. 14], el diseño y control de robots requiere diversos modelos matemáticos, tales como:

- Cinemática directa e inversa, es decir, encontrar la posición del efector final en términos de las coordenadas de las articulaciones y viceversa.
- Cinemática de la velocidad, encontrar la velocidad del efector final en términos de la velocidad de las articulaciones y viceversa.
- Modelo dinámico, el cual establece la relación entre los torques o fuerzas que ejercen los actuadores y las posiciones, velocidades y aceleraciones de las articulaciones.

En este capítulo se desarrollarán estos modelos matemáticos, los cuales son necesarios para simular y predecir el comportamiento del mismo.

Para realizar estos modelos, es necesario contar con los parámetros físicos y geométricos del robot, los cuales, para una primera aproximación se mencionarán a continuación.

Otros requerimientos necesarios para el desarrollo del modelo matemático es el alcance total del brazo, el cual deberá ser de mínimo 500 mm, la velocidad, la cuál deberá estar en un rango entre 5 RPM y 30 RPM, y por último, la carga útil deberá ser de 2 kg.

En la figura 4.1 podemos ver un boceto del brazo robótico que se planea implementar.

Con estos datos claros, es posible empezar la realización de los modelos matemáticos.

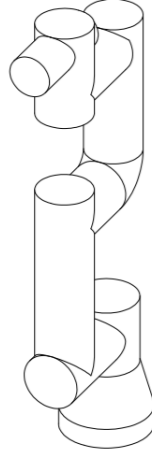


Figura 4.1: Boceto del brazo robótico propuesto

## 4.1. Cinemática directa e inversa

### 4.1.1. Cinemática directa

La cinemática directa de un robot se refiere al cálculo de la posición y orientación del marco de referencia del efector final desde sus coordenadas  $\theta$ . [3]

#### 4.1.1.1. Matriz de transformación homogénea

Según [3], existen tres usos principales para una matriz de transformación homogénea:

1. Para representar la configuración (posición y orientación) de un cuerpo rígido.
2. Para cambiar el marco de referencia en el cuál está representado un vector o un *frame*.
3. Para desplazar un vector o un *frame*.

Para el caso que nos ocupa, necesitamos la matriz de transformación homogénea desde la base fija del robot hasta su efector final, descrita con la ecuación siguiente:

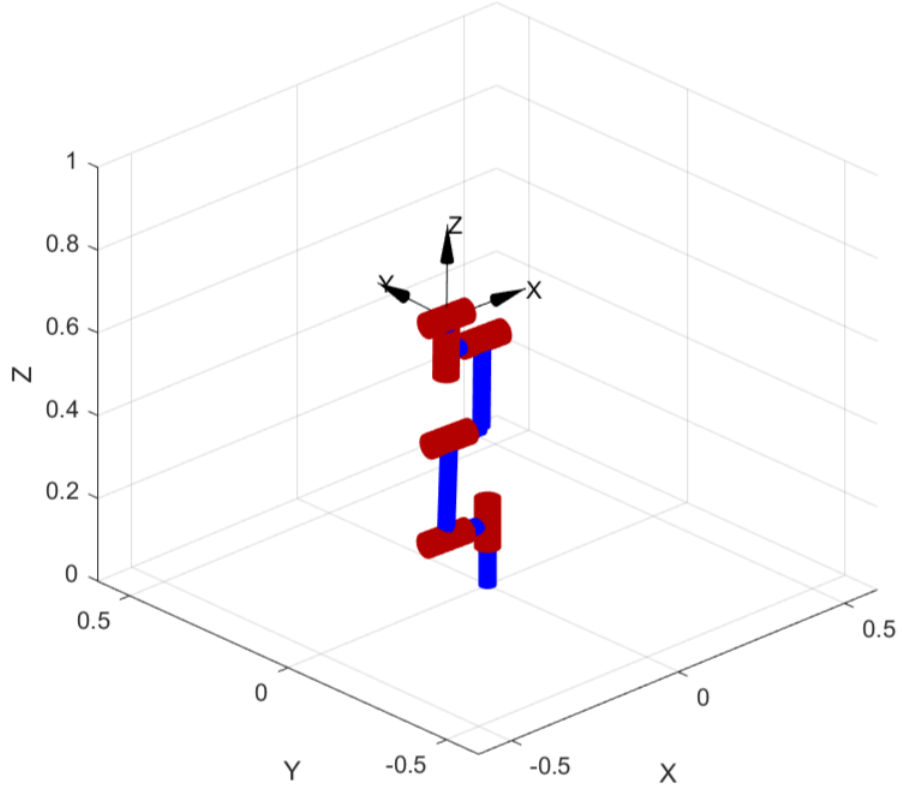


Figura 4.2: Cadena cinemática

$${}^7_0T = \mathcal{I}_z(a_1) \oplus \mathcal{R}_z(\theta_1) \oplus \mathcal{I}_x(b_1) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_2) \oplus \mathcal{I}_z(c_1) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_3) \oplus \mathcal{I}_z(d_1) \oplus \mathcal{I}_x(d_2) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_4) \oplus \mathcal{I}_x(e_1) \oplus \mathcal{R}_z(\theta_5) \oplus \mathcal{I}_z(f_1) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_6) \quad (4.1)$$

En la imagen 4.2 podemos observar la cadena cinemática de nuestro brazo robótico, fue creada con un algoritmo en MATLAB con ayuda de la herramienta Robotic Toolbox, desarrollada por Peter Corke [4], dicho código puede consultarse en el Anexo 1.



Cuadro 4.1: Parámetros Denavit Hartenberg

	$\theta$ [rad]	a [m]	d [m]	$\alpha$ [rad]
Articulación 1	0	0	0.1519	$\frac{\pi}{2}$
Articulación 2	0	-0.24365	0	0
Articulación 3	0	-0.21325	0	0
Articulación 4	0	0	0.11235	$\frac{\pi}{2}$
Articulación 5	0	0	0.08535	$-\frac{\pi}{2}$
Articulación 6	0	0	0.0819	0

#### 4.1.1.2. Convención de Denavit-Hartenberg

#### 4.1.2. Cinemática inversa

No estoy seguro para que me servirá, si lo hará el software. MoveIt o MATLAB.

### 4.2. Cinemática de la velocidad

### 4.3. Modelo dinámico

#### 4.3.1. Formulación Lagrangiana

#### 4.3.2. Formulación Newton-Euler

# Bibliografía

- [1] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. WILEY, 2005.
- [2] W. K. Etienne Dombre, *Robot Manipulators: Modeling, Performance Analysis and Control (Control Systems, Robotics, and Manufacturing series)*. Wiley-ISTE, 2007.
- [3] K. M. N. University, I. Lynch, and F. C. S. N. U. Park, *Modern Robotics*. Cambridge University Press, 2017.
- [4] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*. Springer International Publishing, 2017.

# Anexos

## Anexo 1. Matriz de transformación homogénea

```
clear;
clc;
import ETS3.*
% Vector de posicion de articulaciones en grados
q = [0,90,0,0,90,0]
% Distancias del robot
a1=0.152;
b1=-0.120;
c1=0.244;
d1=0.093;
d2=0.213;
e1=-0.104;
f1=0.083;
% Matriz de transformacion homogenea
E = Tz(a1)*Rz('q1')*Tx(b1)*Rx('q2')*Tz(c1)*Rx('q3')*
    Tx(d1)*Tz(d2)*Rx('q4')*Tx(e1)*Rz('q5')*Tz(f1)*Rx(
    'q6');
% Cinematica directa
E.fkine(q)
```