



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>4</b>  |
| <b>Resumen</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>6</b>  |
| <b>1. Introducción</b>                                  | <b>7</b>  |
| 1.1. Objetivos . . . . .                                | 7         |
| 1.2. Justificación . . . . .                            | 7         |
| 1.3. Hipótesis . . . . .                                | 8         |
| <b>2. Marco teórico</b>                                 | <b>9</b>  |
| 2.1. Brazos robóticos . . . . .                         | 9         |
| 2.2. Robótica colaborativa . . . . .                    | 9         |
| 2.3. Sistemas de manufactura flexible . . . . .         | 9         |
| 2.4. Ingeniería de sistemas basado en modelos . . . . . | 9         |
| <b>3. MBSE</b>  | <b>10</b> |
| 3.1. Diagrama de requerimientos . . . . .               | 10        |
| <b>4. Modelo matemático</b>                             | <b>12</b> |
| 4.1. Modelo cinemático . . . . .                        | 12        |
| 4.1.1. Matriz de transformación homogénea . . . . .     | 12        |
| 4.1.2. Convención de Denavit Hartenberg . . . . .       | 14        |
| <b>Bibliografía</b>                                     | <b>15</b> |
| <b>Anexos</b>   | <b>16</b> |
| Anexo 1. Código MATLAB . . . . .                        | 16        |

# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Diagrama de requerimientos . . . . .            | 11 |
| 4.1. Cadena cinemática ¿free body diagram? . . . . . | 13 |

# Índice de cuadros

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Parámetros Denavit Hartenberg . . . . . | 14 |
|--|----|

# 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

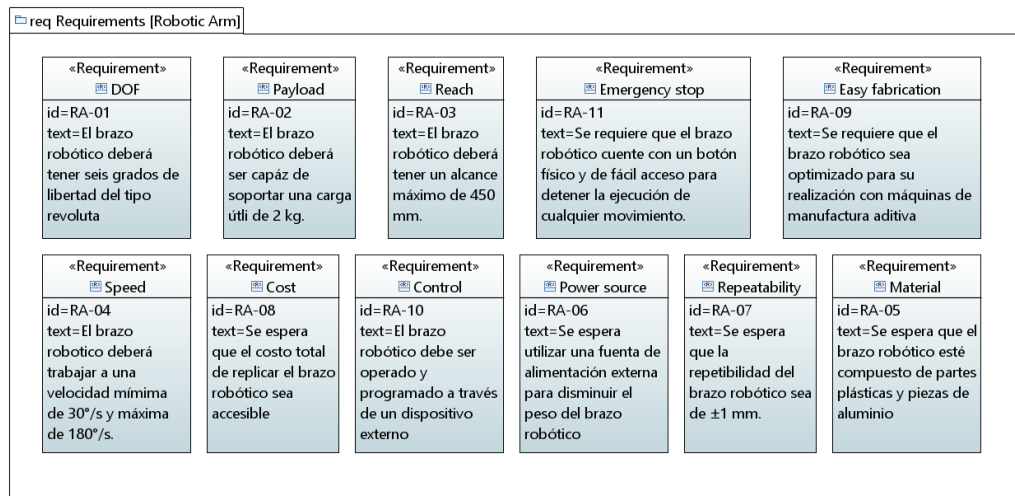


Figura 3.1: Diagrama de requerimientos

# Capítulo 4

## Modelo matemático

### 4.1. Modelo cinemático

#### 4.1.1. Matriz de transformación homogénea

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & a_y \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b_x \\ 0 & 1 & 0 & b_y \\ 0 & 0 & 1 & b_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c_x \\ 0 & 1 & 0 & c_y \\ 0 & 0 & 1 & c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ -\sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

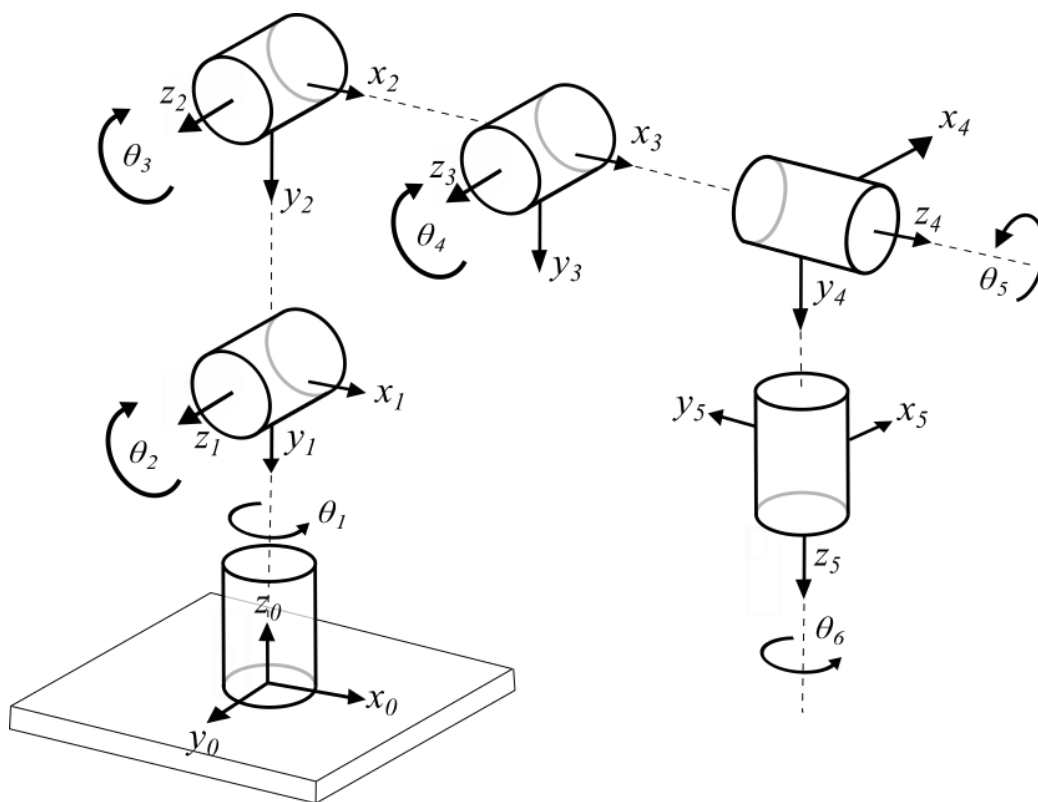


Figura 4.1: Cadena cinemática ¿free body diagram?

$${}^5_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e_x \\ 0 & \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & e_y \\ 0 & \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & e_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_0T = {}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T {}^4_3T {}^5_4T$$

#### 4.1.2. Convención de Denavit Hartenberg

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                |

# Bibliografía

- [1] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. WILEY, 2005.
- [2] H. Shivanand, *Flexible Manufacturing System*. New Age International Publisher, 2006.



# Anexos

## Anexo 1. Un anexo bien chido