



DESARROLLO DE UN MANIPULADOR Y SISTEMA DE CONTROL CINEMÁTICO CON HMI DE CONTROL EMBEBIDA CON FINES ACADÉMICOS PARA TECNOACADEMIA CÚCUTA

BRAYAN SNEIDER DURÁN BAUTISTA

AUTOR

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
VILLA DEL ROSARIO
2022**



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



**DESARROLLO DE UN MANIPULADOR Y SISTEMA DE CONTROL
CINEMÁTICO CON HMI DE CONTROL EMBEBIDA CON FINES ACADÉMICOS
PARA TECNOACADEMIA CÚCUTA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

DIRECTOR:

MS. ING. OSCAR MANUEL DUQUE SUAREZ

INGENIERO EN MECATRÓNICA

MAGISTER EN CONTROLES INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

VILLA DEL ROSARIO

2022



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mi familia, que con tanto esfuerzo me ha dado la oportunidad de formarme como profesional.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



RESUMEN

En este trabajo se plasma el desarrollo de un manipulador industrial, desde sus etapas de diseño hasta su creación física, además del desarrollo del sistema de control cinemático HMI embebido, como su implementación y la selección de dispositivos electrónicos adecuados para su posible desarrollo. Este proyecto fue creado para *Tecnoacademia seccional Cúcuta*, para fines académicos. En primera instancia, se describió los conceptos básicos a tener en cuenta para la comprensión del trabajo que se desarrolló, conceptos propios a la temática de robótica y problemática abordada sobre el proyecto.

Entrado al desarrollo del dispositivo, se aborda el diseño físico el manipulador, planteando los modelos cinemático, diferencial y dinámico, así como su estructura, forma de ensamble, selección de elementos, entre otros. posteriormente se desarrolló el sistema de control cinemático con sistema de auto ajuste, estableciendo las condiciones iniciales para el cumplimiento de trayectorias con la interfaz de control. una vez finalizado el diseño físico como el diseño del control cinemático, se procede a definir una estrategia para concatenar trayectorias, una vez finalizado este paso, se sigue con el diseño del sistema de control hmi embebido y las guías de aprendizaje y operación de control cinemático del manipulador, dando paso a implementar el control cinemático del manipulador didáctico como banco de trabajo de célula de trabajo robotizado a escala, finalizando con la validación del sistema de control cinemático del manipulador.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



ABSTRACT

This work reflects the development of an industrial manipulator, from its design stages to its physical creation, in addition to the development of the embedded HMI kinematic control system, such as its implementation and the selection of appropriate electronic devices for possible development. this project was created for Tecnoacademia sectional Cucuta, for academic purposes. In the first instance, the basic concepts to be taken into account for understanding the work that was developed, concepts specific to the robotics theme and problem addressed on the project were described.

Entering the development of the device, the physical design of the manipulator is addressed, proposing the kinematic, differential and dynamic models, as well as its structure, assembly form, selection of elements, among others. subsequently, the kinematic control system with an auto-adjustment system is developed, establishing the initial conditions for the fulfillment of trajectories with control HMI. once the physical design and the kinematic control design have been completed, a strategy to concatenate trajectories is defined, once this step is completed, the design of the embedded hmi control system and the kinematic control learning and operation guides continue. Of the manipulator, giving way to implement the kinematic control of the didactic manipulator as a robotized scale work cell workbench, to finish with the validation of the kinematic control system of the manipulator.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
LISTA DE ILUSTRACIONES	10
LISTA DE GRAFICAS.....	15
LISTAS DE TABLAS	17
1. CAPITULO 1: INTRODUCCION E INFORMACION GENERAL.....	19
1.1. Problemática.....	19
1.2. Justificación	20
1.3. Objetivo General.....	20
1.4. Objetivos Específicos	20
1.5. Limitaciones.....	20
1.5.1. Alcances	21
1.6. Estado del Arte	21
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Manipulador Industrial:.....	23
2.1.1. Definición	23
2.1.2. Grados de Libertad.....	24
2.1.3. Morfología:	24
2.1.4. Clasificación de los Robots	26
2.1.5. Actuadores eléctricos:	26
2.2. Modelos Matemáticos del Robot:.....	27
2.2.1. modelo cinemático:	27
2.2.2. Modelo dinámico:	28
2.3. Control Cinemático:	28
2.3.1. Funciones del control cinemático	28
2.3.2. Interpoladores:	29
2.4. Trayectorias:.....	30
2.4.1. Trayectoria eje a eje:.....	30
2.4.2. Trayectoria simultanea:	31
2.4.3. Trayectoria coordinada:.....	31
2.4.4. Trayectoria analítica o continua:.....	32
2.5. Normativa	32
3. CAPÍTULO 2: DISEÑO MECÁNICO DEL MANIPULADOR.....	33
3.1. referencia de manipuladores.....	33
3.1.1. manipuladores comerciales.....	33
3.1.2. Estado del arte	37
3.2. Lineamientos del Diseño Mecánico	38
3.2.1. Alcances	38
3.2.2. Limitaciones	38



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



3.3.	Criterios	38
3.4.	diseño	40
3.4.1.	morfología	40
3.4.2.	Diseño de la cadena cinemática	40
3.4.3.	diseño básico	43
3.4.4.	Herramienta de Trabajo:	47
3.4.5.	Limitaciones físicas	47
3.5.	Modelo Cinemático	49
3.5.1.	Modelo cinemático directo: método analítico	49
3.5.2.	Modelo cinemático inverso: método analítico	51
3.6.	Modelo Diferencial	54
3.6.1.	Análisis:	56
3.7.	Modelo Dinámico:	56
3.8.	Desarrollo:	60
3.8.1.	Identificación de las piezas más débiles	60
3.8.2.	selección de materiales	62
3.8.3.	especificaciones de fabricación	66
3.9.	Torques	68
3.10.	Futuras Actualizaciones	69
4.	CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CINEMÁTICO	70
4.1.	Criterios	70
4.2.	Alcances	71
4.2.1.	Acotaciones	71
4.2.2.	Alcances	71
4.3.	Sistema de Control de Actuadores	72
4.3.1.	Selección de actuadores	72
4.3.2.	Selección de dispositivos adicionales	77
4.4.	Control Cinemático	85
4.4.1.	Selección del Lenguaje de Programación.	86
4.4.2.	interpolador trapezoidal	87
4.4.3.	Interpolador cubico	90
4.4.4.	Concatenación de trayectorias	92
4.5.	Condiciones Para el Control Cinemático	94
4.5.1.	Condiciones para iniciar el sistema de control	94
4.5.2.	autoajuste	94
4.6.	Validación del Control Cinemático	95
4.6.1.	Prueba 1:	96
4.6.2.	Prueba 2:	96
4.6.3.	Prueba 3:	97
4.6.4.	Prueba 4:	97
4.6.5.	Prueba 5	98
4.6.6.	Análisis de los resultados	99
4.7.	Futuras Actualizaciones	100



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



5. capítulo 4: DISEÑO DE LA INTERFAZ DEL SISTEMA DE CONTROL	101
5.1. diseño básico para la interfaz	101
5.1.1. normativa	101
5.1.2. Criterios para el desarrollo de la interfaz:	102
5.1.3. Diseño básico de la Interfaz	103
5.2. Prototipo de la HMI y sus Funcionalidades	104
5.3. Implementación de la Interfaz	112
5.4. Diseño De Estructura Para Acople De Los Monitores	113
5.4.1. Diseño	113
5.5. Validación de la Interfaz.....	114
6. CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN EL CONTROL CINEMÁTICO DEL MANIPULADOR DIDÁCTICO COMO BANCO DE TRABAJO DE CÉLULA DE TRABAJO ROBOTIZADO A ESCALA	119
6.1. Ensamble del Brazo.....	119
6.2. Estructura del Volumen de Trabajo.....	121
6.3. Acople del Manipulador a su Volumen de Trabajo	122
6.4. Terminación.....	123
6.5. Sistema de Protección para la generación trayectorias y acabados del diseño	124
6.6. Implementación Detallada del Manipulador.	124
6.6.1. Creación del Manipulador.....	124
6.7. Interruptores de Emergencia:.....	125
7. capítulo 6: VALIDACIÓN Y RUTA DE GUÍA PARA APRENDIZAJE A TRAVÉS DEL BANCO DE TRABAJO ROBOTIZADO	128
7.1. Validación De Todo El Sistema De Control.....	128
7.1.1. metodología para le evaluación.....	128
7.1.2. Pruebas.....	130
7.1.3. consideraciones:	142
7.2. Guías y Ruta de Aprendizaje	142
7.2.1. Metodología:	142
8. CONCLUSIONES.....	146
9. RECOMENDACIONES	148
10. BIBLIOGRAFÍA.....	149
ANEXOS	152



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1: tipos de articulaciones de los robots. Fuente: Barrientos, 2007	25
<i>Ilustración 2.2: tipo de morfología de los manipuladores. Fuente: Barrientos, 2007</i>	25
ilustración 2.3: diagrama de relación entre la cinemática directa e inversa. Fuente: Autor.....	27
Ilustración 2.4: Diagrama esquemático del control cinemático. Fuente: Barrientos, 2007	29
Ilustración 2.5: Movimiento eje a eje de un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007	31
Ilustración 2.6: Movimiento simultaneo de ejes de un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007	31
Ilustración 2.7: Movimiento de trayectorias coordinadas un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007	31
Ilustración 2.8: Movimiento continuo rectilíneo de un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007	32
Ilustración 3.1: Semejanzas del manipulador con el brazo humano. Fuente: blog: “la robótica educativa” [15]	40
Ilustración 3.2: Cadena cinemática del manipulador de 4gdl. Fuente: Autor	41
Ilustración 3.3: Prototipo mecánico del manipulador de 4gdl. Fuente: Autor	42
Ilustración 3.4: Cadena cinemática del manipulador con 6 gdl. Fuente: Autor	42
Ilustración 3.5: Secciones en semejanzas del diseño con el brazo humano. Fuente: Autor.....	43
Ilustración 3.6: Identificación de las piezas que componen el brazo. Fuente: Autor	44
Ilustración 3.7: Dimensiones y medidas en mm del brazo. Fuente: Autor	45
Ilustración 3.8: Dimensiones en mm del Volumen de trabajo desde diferentes vistas. Fuente: Autor.....	45



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Ilustración 3.9: Sistemas de guiado lineal para las articulaciones 1 y 2. Fuente: Autor	46
Ilustración 3.10: Imágenes de renderizado del manipulador. Fuente: Autor	46
Ilustración 3.11: Imagen de la herramienta del manipulador. Fuente: Mercadolibre.com	47
Ilustración 3.12: Cadena cinemática del manipulador con origen referenciado. Fuente: Autor	49
Ilustración 3.13: Representación de los sistemas en el manipulador. Fuente: Autor.	50
Ilustración 3.14: Diagrama de flujo del proceso para hallar la matriz Jacobiana. Fuente: Autor	55
Ilustración 3.15: Emulación de esfuerzos en el ensamble básico i. Fuente: Autor.	60
<i>Ilustración 3.16: Emulación de esfuerzos en el ensamble básico ii. Fuente: Autor.</i>	<i>60</i>
Ilustración 3.17: Vistas de las piezas más críticas del ensamble. Fuente: Autor. ...	62
Ilustración 4.1: Dimensiones del motor paso a paso Nema 23. Fuente: Changzhou Songyang Machinery & Electronics	73
Ilustración 4.2: Dimensiones del servo XYZRobot a1-16. Fuente: Pololu Robotics & Electronics.	76
Ilustración 4.3: imagen y partes del servo XYZRobot a1-16. Fuente: Autor.	76
Ilustración 4.4: Imagen del driver de paso tb6600. Fuente: MercadoLlibre.com....	79
Ilustración 4.5: Imagen del Arduino uno. Fuente: Arduino	81
Ilustración 4.6: Tiempos de demora en la ejecución del código de procesado de las articulaciones 3, 4, 5 y 6. Fuente: Autor	82
Ilustración 4.7: Tarjeta de desarrollo Raspberry pi 4 modelo b. Fuente: Raspberry	84
Ilustración 4.8: Diagrama de flujo de la implementación del interpolador trapezoidal. Fuente: Autor	90
Ilustración 4.9: Diagrama de flujo de la implementación del interpolador cubico. Fuente: Autor	92



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Ilustración 4.10: Ubicación de los finales de carrera para el reinicio de las articulaciones 1 y 2. Fuente: Autor.....	95
ilustración 5.1: Estructura básica para el diseño de la interfaz. Fuente: Autor.....	104
ilustración 5.2: panel principal de la interfaz. fuente: autor.....	105
ilustración 5.3: dinámica de los elementos del panel principal de la interfaz. fuente: autor	105
Ilustración 5.4: Ubicación de las ventanas en la página de control de la interfaz. Fuente: Autor.....	106
Ilustración 5.5: Atajo para el acceso al teclado en la página de control de la interfaz. Fuente: Autor.....	107
Ilustración 5.6: Atajo para visualizar las gráficas de trayectorias de las articulaciones en la página de control. Fuente: Autor	108
Ilustración 5.7: primer plano de la gráfica de trayectoria de la articulación 1 en la interfaz. Fuente: Autor.	108
Ilustración 5.8: Atajos para la visualización de los puntos para la creación de las trayectorias. Fuente: Autor.....	109
Ilustración 5.9: Ubicación de las ventanas en la página de configuración de la interfaz. Fuente: Autor.	110
ilustración 5.10: atajos para la descripción de condiciones de usos generales. fuente: autor	110
Ilustración 5.11: Atajos para el enlace en tiempo real de las articulaciones. Fuente: Autor.....	111
Ilustración 5.12: Imagen de la implementación de la interfaz. Fuente: Autor.....	112
Ilustración 5.13: Imagen de navegación por la interfaz. Fuente: Autor.	112
Ilustración 5.14: Renderizado de la estructura para la pantalla. Fuente: Autor....	114
Ilustración 5.15: Diagrama de pasos para la validación de la interfaz de control. Fuente: Autor.....	118
Ilustración 6.1: Ensamble 1. Fuente: Autor	120
Ilustración 6.2: Ensamble 2. Fuente: Autor	120



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Ilustración 6.3: Imágenes del ensamble del manipulador. Fuente: Autor	120
Ilustración 6.4: Imagen del volumen de trabajo. Fuente. Autor.	121
Ilustración 6.5: Imagen del sistema de ejes y guías de las articulaciones 1 y 2. Fuente. Autor.	121
ilustración 6.6: paso para el ensamble del manipulador al volumen de trabajo. fuente: autor	122
ilustración 6.7: ensamble del manipulador al volumen de trabajo. fuente: autor..	122
Ilustración 6.8: Imágenes del manipulador en su volumen de trabajo. Fuente: Autor	123
ilustración 6.9: renderizado del diseño final del manipulador. fuente: autor	124
Ilustración 6.10: Estructura de la implementación del manipulador: Fuente: Autor.	125
ilustración 7.1: metodología para la validación del sistema de control. fuente: autor	129
ilustración 7.2: diagrama de flujo del control cinemático. fuente: autor	130
ilustración 7.3: ubicación del extremo del manipulador en el volumen de trabajo de acuerdo a los puntos a, b, c y d. fuente: autor	131
ilustración 7.4: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto inicial de la prueba 1. fuente: autor	132
ilustración 7.5: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto final de la prueba 1. fuente: autor	133
<i>ilustración 7.6: cinemática directa del punto inicial y del punto final respectivamente de la prueba 1. fuente: autor</i>	<i>133</i>
ilustración 7.7: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto inicial de la prueba 2. fuente: autor	135
ilustración 7.8: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto final de la prueba 2. fuente: autor	136
<i>ilustración 7.9: cinemática directa de la prueba 2, del punto inicial y del punto final respectivamente. fuente: autor</i>	<i>136</i>



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



ilustración 7.10: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto inicial de la prueba 3. fuente: autor	139
ilustración 7.11: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto final de la prueba 3. fuente: autor	139
<i>ilustración 7.12: cinemática directa del punto inicial y del punto final respectivamente de la prueba 3. fuente: autor</i>	<i>140</i>
ilustración 7.13: diagrama de flujo de la metodología de aprendizaje con el banco de trabajo robotizado. fuente: autor	143
ilustración 7.14: partes del banco de trabajo robotizado. fuente: autor	144
ilustración 7.15: suposición de ubicación de puntos dentro del volumen de trabajo. fuente: autor	145



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 3.1: Comparación de Materiales según su resistencia a la tracción vs densidad. Fuente: Autor.....	63
Gráfica 3.2: Curvas de esfuerzo de deformación del ABS, PLA y PLA/MLO 5phr, al 40% de densidad. Fuente: Pacheco, G. 2019.....	67
Gráfica 3.3: Curvas de esfuerzo de deformación del PLA a diferentes densidades de relleno. fuente: Pérez et al. 2018 [13]	68
Gráfica 4.1: Porcentaje de búsquedas de lenguajes en Google. Fuente: Udacity [24]	86
Grafica 4.2: Posición, velocidad y aceleración de una trayectoria lineal con un interpolador a tramos. Fuente: Trajectory Planning For Automatic Machines And Robots.	89
Grafica 4.3: Posición, velocidad y aceleración de un interpolador a tramos con una secuencia de puntos, (a) con velocidades nulas, (b) sin velocidades nulas. Fuente: Trajectory Planning For Automatic Machines And Robots.	93
Grafica 4.4: Resultado de los valores articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria eje a eje sin tiempo deseado. Fuente: Autor	96
Grafica 4.5: Resultado de las velocidades articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria eje a eje sin tiempo deseado. Fuente: Autor	96
Grafica 4.6: Resultado de los valores articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria coordinada con tiempo deseado de 6 seg. Fuente: Autor.....	97
Grafica 4.7: Resultado de las velocidades articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria coordinada con tiempo deseado de 6 seg. Fuente: Autor.	97
Gráfica 4.8: Resultado de los valores articulares del interpolador cubico con trayectoria simultanea con tiempo deseado de 12 seg. Fuente: Autor	98
Grafica 4.9: Resultado de las velocidades articulares del interpolador cubico con trayectoria simultanea con tiempo deseado de 12 seg. Fuente: Autor	98
Grafica 4.10: Resultado de los valores articulares del interpolador cubico con trayectoria coordinada sin tiempo deseado. Fuente: Autor	98
Grafica 4.11: Resultado de las velocidades articulares del interpolador cubico con trayectoria coordinada sin tiempo deseado. Fuente: Autor	98



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Grafica 4.12: Resultado de los valores articulares del interpolador cubico con trayectoria analítica sin tiempo deseado. Fuente: Autor.....99

Grafica 4.13: Resultado de las velocidades articulares del interpolador cubico con trayectoria analítica sin tiempo deseado. Fuente: Autor.....99

grafica 7.1: trayectoria cartesiana generada por el interpolador cubico en una trayectoria analítica en la prueba 1. fuente: autor134

grafica 7.2: trayectorias articulares generada por el interpolador cubico en una trayectoria analítica en la prueba 1. fuente: autor134

grafica 7.3: trayectoria cartesiana generada por el interpolador trapezoidal en una trayectoria simultánea en la prueba 2. fuente: autor137

grafica 7.4: trayectorias articulares generada por el interpolador trapezoidal en una trayectoria simultánea en la prueba 2. fuente: autor138

Grafica 7.5: trayectoria cartesiana generada por el interpolador cubico por una trayectoria analítica en la prueba 3. fuente: autor141

Grafica 7.6: trayectorias articulares generada por el interpolador cubico por una trayectoria analítica en la prueba 3. fuente: autor141



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



LISTAS DE TABLAS

Tabla 3.1: Características de manipuladores comerciales. Fuente: Autor	33
Tabla 3.2: Características del estado del arte. Fuente: Autor	37
Tabla 3.3: Tabla de criterios para el diseño mecánico. Fuente: Autor	39
Tabla 3.4: Tabla de limitaciones articulares. Fuente: Autor	48
tabla 3.5: Tabla de parámetros Denavit-Hartenberg. Fuente: Autor	50
Tabla 3.6: Tabla de resultado del análisis de carga de los ensambles. Fuente: Autor	61
Tabla 3.7: Tabla paramétrica para la selección de materiales. Fuente: Autor	62
Tabla 3.8: Tabla de puntuación para la selección del material. Fuente: Autor	64
Tabla 3.9: Rango de puntuación de los materiales convenientes. Fuente: Autor	64
Tabla 3.10: Características del PLA en comparación de otros plásticos. Fuente: Meneses, G., & Calle, S. A. 2020 [11].....	66
Tabla 3.11: Estimación del torque máximo sobre la articulación 4. Fuente: Autor	68
Tabla 4.1: Criterios de selección para el capítulo II. Fuente: Autor	70
Tabla 4.2: Tabla de puntuación para la selección de los actuadores de las articulaciones 1 y 2. Fuente: Autor.....	73
Tabla 4.3: Características del Nema 23. Fuente: Autor.....	74
Tabla 4.4: Tabla de puntuación para la selección de los actuadores de las articulaciones 3, 4, 5 y 6. Fuente: Autor	75
Tabla 4.5: Características relevantes del servo XYZRobot a1-16. Fuente: Autor	77
Tabla 4.6: Tabla de puntuación para la selección del driver de paso para los motores Nema 23. Fuente: Autor.....	78
Tabla 4.7: Características del driver de paso tb6600. Fuente: Autor	79
Tabla 4.8: Tabla de puntuación para la selección de controladores esclavos para el control de los actuadores. Fuente: Autor	80
Tabla 4.9: Características del Arduino uno. Fuente: Autor	81



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Tabla 4.10: Tabla de puntuación para la selección del controlador maestro. Fuente: Autor	83
Tabla 4.11: Tabla de datos de la Raspberry pi 4 modelo b. Fuente: Autor.	85
Tabla 4.12: Tabla de selección del lenguaje de programación. Fuente: Autor	87
Tabla 5.1: Piezas del soporte de la pantalla. Fuente: Autor.	113
Tabla 5.2: Resultados de la validación de la interfaz de control. Fuente: Autor...	115
tabla 7.1: posiciones articulares del punto inicial de la prueba 1. fuente: autor ...	132
tabla 7.2: posiciones articulares del punto final de la prueba 1. fuente: autor	132
tabla 7.3: porcentaje de error de la ubicación del extremo del manipulador en sus puntos deseados por la prueba 1. Fuente: Autor.	133
tabla 7.4: posiciones articulares del punto inicial de la prueba 2. Fuente: Autor..	135
tabla 7.5: posiciones articulares del punto final de la prueba 2. Fuente: Autor.	136
tabla 7.6: porcentaje de error de la ubicación del extremo del manipulador en sus puntos deseados de la prueba 2. Fuente: Autor	137
tabla 7.7: posiciones articulares del punto inicial de la prueba 3. Fuente: Autor..	138
tabla 7.8: posiciones articulares del punto final de la prueba 3. Fuente: Autor	139
tabla 7.9: porcentaje de error de la ubicación del extremo del manipulador en sus puntos deseados de la prueba 3. Fuente: Autor	140
Tabla 0.1: Diseño de piezas del manipulador. Fuente: Autor	153



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



1. CAPITULO 1: INTRODUCCION E INFORMACION GENERAL

1.1. Problemática

El servicio nacional de aprendizaje (SENA) es una entidad pública del orden nacional con autonomía administrativa, adscrita al ministerio de trabajo en Colombia. este establecimiento está encargado de ofrecer una formación para el campo laboral a millones de colombianos en programas técnicos, tecnólogos y cursos complementarios, enfocados al desarrollo del país. Esta entidad cuenta con un programa o sección llamada Tecnoacademia, con múltiples sedes a lo largo de Colombia, se encarga del fortalecimiento en competencias orientadas al uso, aplicación y desarrollo de tecnologías avanzadas, en donde los niños y jóvenes pueden acceder al aprendizaje de ramas de la ciencia como biotecnología, nanotecnología, ciencias básicas, robótica, tic, electrónica e ingeniería. [18]

Tecnoacademia, cuenta con dos modalidades de operación, en la primera, llamada *Tecnoacademia fija*, los estudiantes deben de dirigirse a las instalaciones físicas de la sede de la institución para recibir la formación de los cursos, usando las tecnologías disponibles en ambientes que están bien dotados para la formación, como bancos de trabajos de gran volumen con índole industrial e instructores que capacitan a los estudiantes por medio de las múltiples herramientas disponibles.

La otra modalidad de Tecnoacademia, llamada *Tecnoacademia itinerante*, trata reducir las brechas existentes en la educación entre la zona rural y urbana, con iniciativas que buscan impulsar la innovación, el emprendimiento y el desarrollo de nuevas tecnologías. en esta última modalidad, los facilitadores son los que viajan a las zonas rurales del departamento de norte de Santander, transportando todo el material necesario como insumos, instrumentos y equipos, para poder capacitar a los estudiantes. [19]

Este es uno de los principales problemas, aunque se pueda enseñar algunos temas con profundidad como la electrónica, por la facilidad de transportar los elementos electrónicos ya que son de pequeñas dimensiones, en cursos como de robótica, no es posible dar una formación de manera profunda, puesto que llevar todos los materiales necesarios, implica trasladar equipos de gran tamaño, como bancos de trabajos de células robotizadas, donde se vean reflejado conceptos como modelos de manipuladores, morfología de los manipuladores, además de poder explicar con gran facilidad las estrategias de control para la generación de trayectorias de los robots. esto conlleva a que la formación de robótica en Tecnoacademia itinerante, no sea muy fuerte, siendo una formación sencilla, conceptualizando los temas solo desde el punto de vista teórico, haciendo que esta formación sea muy desigual, existiendo una brecha de aprendizaje a comparación de la formación dada por la modalidad de Tecnoacademia fija a nivel practico.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Tecnoacademia Cúcuta también realiza la participación en eventos de socialización de sus proyectos y actividades, por medio de exhibiciones, contando con dispositivos, proyectos o bancos de trabajos portátiles para ser transportados o trasladados con facilidad a los eventos, ferias, ruedas de talento, ruedas de negocios, etc. estas demostraciones las realiza con el fin de poder captar el mercado o personas que harán parte de los nuevos cursos de formación académica.

1.2. Justificación

Dentro de las líneas de Tecnoacademia seccional Cúcuta existe el desarrollo y aprendizaje en áreas de robótica, esta rama de aprendizaje cuenta con múltiples dispositivos para el fortalecimiento de las bases de aprendizaje de los jóvenes participantes en este curso. Dentro de los dispositivos que posee la entidad no existe un dispositivo que sea de fácil y transporte, reduciendo las posibilidades de que estos sean transportados o sean usados bajo la modalidad de Tecnoacademia itinerante, por lo cual, al poseer un banco de robótica portátil, el cual está diseñado para su fácil transporte sin la necesidad de ser armado o desarmado para su funcionamiento, se mejoraran las bases de enseñanza de los jóvenes de zonas rurales y alejadas del casco urbano, población objetivo de la modalidad itinerante, mejorando así las capacidades de formación de los instructores hacia los estudiantes.

1.3. Objetivo General

Desarrollar un manipulador y sistema de control cinemático con HMI de control embebida con fines académicos para Tecnoacademia Cúcuta.

1.4. Objetivos Específicos

1. Diseñar el manipulador, el modelo cinemático, diferencial y dinámico.
2. Diseñar el sistema de control cinemático con sistema de auto ajuste, para el cumplimiento de trayectorias con hmi de control y diseñar una estrategia para trayectorias concatenadas
3. Diseñar el sistema de control hmi embebido.
4. Implementar el control cinemático del manipulador didáctico como banco de trabajo de célula de trabajo robotizado a escala.
5. Validar el sistema de control cinemático al manipulador y desarrollar las guías de aprendizaje y operación de control cinemático del manipulador.

1.5. Limitaciones

- La estrategia de control cinemático solo se podrá usar por medio de la hmi embebida, es decir se busca que los modelos y estrategia de control cinemático para la generación de trayectorias operen sin estar conectadas a un computador.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- Debido que el proyecto no es totalmente financiado por la entidad, los criterios económicos tienen un mayor peso con los dispositivos la entidad no cuenta.
- Solo se desarrolló un sistema de control cinemático, sin tener en cuenta una estrategia de control dinámico.

1.5.1. Alcances

- Se desarrolló el manipulador y el control cinemático del manipulador.
- Creación de la hmi interactiva para el uso del brazo robótico.
- Desarrollo de las guías de aprendizaje sobre el manipulador industrial.

1.6. Estado del Arte

El control cinemático tiene gran importancia en el Desarrollo de la industria 4.0, ya que son la base para el control de diversos sistemas ciber-físicos, como lo son los manipuladores industriales, siendo la base para el control dinámico.

Las aplicaciones son diversas, desde el seguimiento o imitación de la trayectoria generada por el movimiento de un brazo humano, en donde el manipulador imitará y grabará los movimientos que el humano genera, a través de una serie de muestreos de puntos intermedios de la trayectoria, uniéndolos por medio de interpoladores [25], hasta el control de múltiples unidades robotizadas, como por ejemplo múltiples brazos en una unidad de trabajo, ya sean fijos, o en bases móviles [26].

Otras áreas del control cinemático, son, por ejemplo, la implementación en vehículos aéreos no tripulados (UAV) generando las trayectorias a recorrer [33], o en la implementación de optimización de sistemas como robots de 2 llantas [34].

Existen diversos proyectos con alcances similares a desarrollar en este trabajo, incluso algunos de estos, en su gran mayoría, son realizados en la misma ciudad, como el proyecto llamado **“Desarrollo de un banco de control dinámico para el manipulador Zebra 360 del ambiente Tecnoacademia Cúcuta”**, realizado por el autor **Santiago Barragán León**, en el 2020, en donde su mayor aporte para el desarrollo de este proyecto, es una base fundamental en la implementación del control cinemático, por medio de un detallado diagrama de flujo. En este, se trabajó el control cinemático y dinámico de un manipulador, obteniendo buenos resultados documentados a nivel general. [6]

Otro proyecto similar, el cual aporta en gran medida al diseño del control cinemático, ya que plantea metodologías para el desarrollo del control con sólidas bases de investigación para abordar tanto el control cinemático como el control dinámico, aportando en la metodología para el desarrollo, este es el artículo llamado **“Propuesta de una metodología formal para el diseño de sistemas de control cinemático”**



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



y dinámico en manipuladores industriales seriales”, realizado por los autores **C. Duque S., Diana M. Rodríguez R., Sergio I. Quintero A., Oscar M. Duque S.,** realizado en la ciudad de Cúcuta en el año 2015.

Algunos de los proyectos en donde se abordan diferentes ítems relacionados al diseño electrónico y mecánico de manipuladores industriales, basándose en diferentes documentos, brindando nuevas ideas para el desarrollo del sistema electrónico y de control. Uno de estos proyectos es el llamado **“Diseño y elaboración de circuito, controlador e interfaz de usuario para el control de robots manipuladores a escala enfocados a la robótica educativa”,** realizado por **Jorge Arturo medina Villarreal** en la ciudad de Bogotá.

Otro de estos proyectos es el titulado **“Diseño, montaje y programación del control cinemático de un brazo robot manipulador de 5gdl”,** por el autor **Diego Jarque Pérez,** este está enfocado a la simulación del control de un manipulador industrial, por medio del programa como SolidWorks, planteando ideas generales para la optimización de diseño mecánico, así como el desarrollo y una metodología para realizar el control cinemático, mejorando diversos aspectos.

Como último proyecto analizado, el cual, su mayor aporte está en la implementación del sistema de control y en el desarrollo electrónico por medio de sistemas de hardware libre, por medio del uso de tarjetas de desarrollo tipo Arduino, así como el desarrollo de una interfaz para el uso del controlador del manipulador, es documento llamado **“Control cinemático de robots serie con Arduino”,** realizado por **Noelia Tejedor García.**

Realizado el análisis, se concluye que existen relativamente múltiples proyectos relacionados a nivel nacional e internacional, debido a que es un tema de gran interés y desarrollo tecnológico en la actualidad, por su impacto positivo en el sector industrial.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Manipulador Industrial:

2.1.1. Definición

Por definición de un manipulador industrial, adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO, en sus siglas en ingles) que define al robot industrial como:

- Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar diversas tareas. [1]

Por otro lado, ampliando la definición anterior, precisamos el termino manipulador como:

- Un manipulador en general, planteado por D'Addario, 2016, es un dispositivo mecánico capaz de crear movimientos semejantes a los movimientos que realiza un humano para la manipulación de objetos. se refiere a los elementos mecánicos de un robot para producir adecuadamente el posicionamiento y la operación. [3]

Otras definiciones sobre robots manipuladores las podemos obtener de la asociación japonesa de robots, y de la asociación británica de robots respectivamente: [22]

- Un sistema mecánico que tiene funciones de movimiento flexibles análogas a las de los organismos vivos o una combinación de dichas funciones de movimiento con funciones intelectuales que pueden implicar reconocimiento, adaptación, aprendizaje o juicio o cualquier combinación de los mismos
- Un dispositivo reprogramable diseñado tanto para manipular como para transportar piezas, herramientas o implementos de fabricación especializados a través de movimientos programados variables para la realización de tareas específicas de fabricación

Como ultima definición, se plantea la descrita por la Federación Internacional de Robótica (IFR, por sus siglas en Ingles), quienes definen el termino de robot industrial de manipulación:

- Se entiende por robot industrial de manipulación una máquina de manipulación multifuncional automática y reprogramable, fija o móvil, con mínimo 3 ejes para poder posicionar y orientar materiales, piezas,



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



herramientas o dispositivos para el desarrollo de diversos trabajos en las etapas de producción industrial. [1]

2.1.2. Grados de Libertad

Los grados de libertad de un robot generalmente se refieren a la cantidad de articulaciones móviles de un robot. Un robot con tres articulaciones móviles tendrá tres ejes y tres grados de libertad, un robot de cuatro ejes tendrá cuatro articulaciones móviles y cuatro ejes, y así sucesivamente. Para definir completamente la ubicación de un objeto en el espacio, se deben definir al menos seis grados de libertad; sus coordenadas cartesianas, o ubicación x, y, z, y su orientación, o balanceo, cabeceo y guiñada. [23]

Según Barrientos, 2007, define los grados de libertad como movimientos independientes entre cada articulación, y el número de grados de libertad de un robot, viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. [1]

Otro concepto encontrado acerca de los grados de libertad, planteado por D'Addario, 2016, especifica que los grados de libertad hacen referencia al número de movimientos realizados por el robot de manera independiente, el cual se puede catalogar en dos tipos, un movimiento a lo largo de un eje, llamado movimiento lineal y otro que, rota alrededor de un eje, llamado movimiento rotacional. [3]

2.1.3. Morfología:

Barrientos define que la morfología de un robot, hace referencia a los elementos constructivos de sí mismo, definiendo su forma, estructura, funcionamiento y prestaciones, normalmente dado los siguientes componentes: estructura mecánica, transmisiones, sistemas de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales, aunque algunos no posean exactamente dichos elementos, tratan de seguir la misma premisa. [1]

2.1.3.1. Tipos de articulaciones:

Para definir los tipos de morfologías, primero se debe tener claro los tipos de articulaciones que se manejan en robótica, al requerir controlar cada articulación de manera independiente, se garantiza que, al realizarle el control de cada una de las articulaciones, se obtiene una ubicación en el espacio cartesiano, por ello, se usan articulaciones de un solo grado de libertad, por su sencillez a la hora de realizar el control del manipulador.

Esto lleva a trabajar solo con dos tipos de articulaciones, aunque existan diversos tipos como se puede observar en la Ilustración 2.1, la primera clase son las articulaciones prismáticas, que generan un movimiento relativo rectilíneo de traslación a lo largo de un solo eje; el otro tipo de articulación es la articulación



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

rotacional, como su nombre lo indica, genera un movimiento relativo rotacional alrededor de un eje.

Básicamente, con estas dos clases de articulaciones, se construyen distintos tipos de configuraciones de robots, que dependen del diseño, la construcción y la aplicación del mismo, esto lo podemos comprobar al hacer una pequeña búsqueda de los diferentes tipos de robots existentes en el mercado.

2.1.3.2. Tipos de morfologías:

Aunque el autor (Barrientos, 2007) propone que para posicionar y orientar de cualquier manera en el espacio un cuerpo, se es necesario de poseer un manipulador de 6 grados de libertad, lo cual, en realidad el número de grados de libertad va depender de la aplicación de manipulador, también aclarado el mismo autor. Es por ello, que los tipos de manipuladores se pueden catalogar dependiendo de las tareas a realizar, y se pueden clasificar en alguno de los tipos de manipuladores de la Ilustración 2.2. [1]

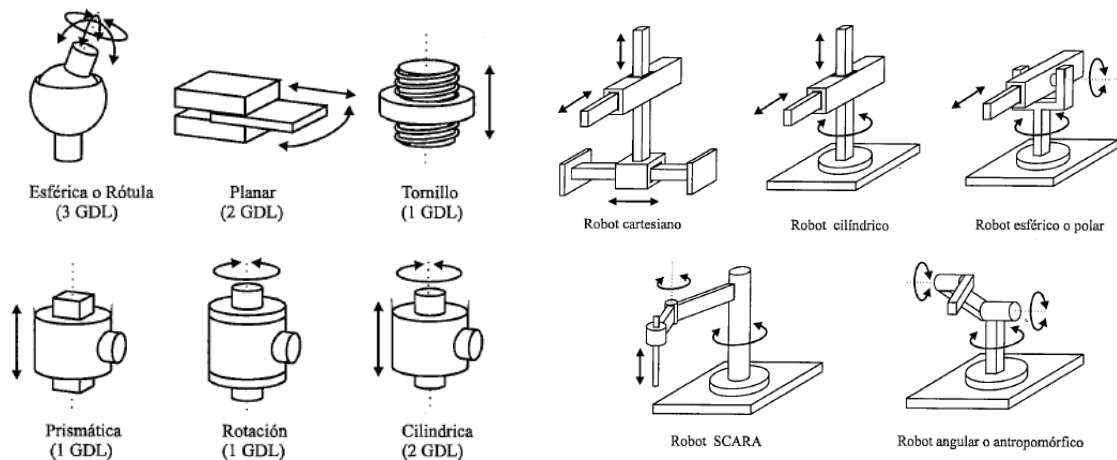


Ilustración 2.1: tipos de articulaciones de los robots. Fuente: Barrientos, 2007

Ilustración 2.2: tipo de morfología de los manipuladores. Fuente: Barrientos, 2007

Aunque básicamente cada diseño de cada manipulador varié uno con respecto a otro, se tratará de clasificar dentro de una estructura por sus similitudes morfológicas, así cuenten con más grados de libertad para obtener una mejor posición y orientación del extremo del manipulador. [1]

Cabe resaltar que existen combinaciones de los distintos tipos de morfologías, creando así, morfologías híbridas o mixtas, estos diseños se hacen dependiendo de las tareas en específico que ejecutará el manipulador.



2.1.4. Clasificación de los Robots

En esta sección se describe las diversas clasificaciones de robots en la industria, en referencia a su estructura. En contraste, tres instituciones, la *association française de robotique* (AFR), el *Robotics Institute Of America* (RIA), y la asociación de robótica industrial de Japón, clasifican conjuntamente 6 módulos variados que se dan a continuación: [22]

- I. robot controlado numéricamente
- II. robots de reproducción
- III. robot de secuencia estática
- IV. componentes manipulados manualmente
- V. robot inteligente
- VI. robot de secuencia variable

Además de los componentes de clasificación mencionados, otras identidades proponen categorizarlos según el grado de libertad, el mecanismo, el espacio de trabajo, la actuación, el regulador, la dinámica y sus diversas aplicaciones.

2.1.5. Actuadores eléctricos:

Según Barrientos, 2007, los motores de corriente continua (DC), son los actuadores más usados por su simplicidad de control, están conformados por 2 devanados internos, inductor e inducido, donde en el inductor está situado en el estator y crea un campo magnético fijo, mientras que el inducido, está ubicado en el rotor, haciendo girar el mismo devanado expresados por las fuerzas de Lorentz. [1]

El principio de funcionamiento del motor DC según la empresa Festo, se basa en un conductor ubicado dentro del motor, que genera un campo magnético, haciendo las veces de rotor, este campo magnético es creado mediante la excitación de una bobina. En el caso de los motores pequeños, el campo magnético puede ser creado por un imán permanente, en caso de motores de alta potencia, el campo magnético es creado por electroimanes (bobina de excitación). Lo cual genera que “al girar el rotor en el campo magnético se induce una tensión en el devanado del rotor que se opone a la tensión de la red” [4], produciendo así, que la corriente de arranque no sea la misma que la corriente nominal, influyendo en el torque del motor dado por la ecuación 2.1. [5]

$$\tau = k_t \phi i_i(t), \quad (2.1)$$

Donde k_t es la constante de par del motor, ϕ es el flujo de corriente (sentido) y $i_i(t)$ corriente del inducido, por lo cual, al arrancar esta corriente es elevada, generando un par elevado, pero a medida que toma velocidad el rotor, se incrementa la tensión por la fuerza contraelectromotriz, la cual es la que se opone a la tensión de la red, expresado por la ecuación 2.2. [5]



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



$$V_e = k_m \omega(t), \quad (2.2)$$

Donde k_m es la constante de tensión y $\omega(t)$ es la velocidad angular del rotor.

2.2. Modelos Matemáticos del Robot:

La descripción del movimiento del manipulador se puede expresar por medio herramientas matemáticas, dando origen a dos modelos, el primero, llamado *modelo cinemático* que describe el movimiento sin considerar las fuerzas que lo ocasionan, el segundo, llamado *modelo dinámico*, describe los movimientos teniendo en cuenta las fuerzas que inciden en él. estos dos modelos son la base para aplicar los sistemas de control sobre sus movimientos.

2.2.1. modelo cinemático:

El modelo cinemático estudia el movimiento del manipulador respecto a un punto de referencia, describiendo el movimiento espacial del robot en función del tiempo, en una forma analítica, además, describe la relación entre la posición y orientación del extremo del manipulador con los valores articulares que estos pueden tomar.

Este modelo *no* considera las fuerzas dentro del sistema que generan los movimientos del manipulador, y existen dos formas de determinar la relación entre la posición y la orientación del extremo con los valores de cada articulación descritos por la ilustración 2.3.

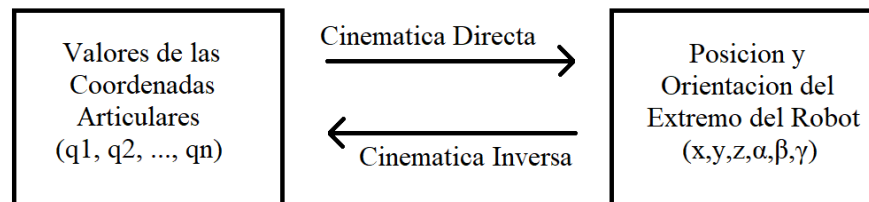


ilustración 2.3: diagrama de relación entre la cinemática directa e inversa. Fuente: Autor.

2.2.1.1. Cinemática directa:

la cinemática directa trata de resolver el problema cinemático directo, es decir, representar y describir la posición y orientación del extremo del manipulador a un punto de referencia, en función de los valores de sus coordenadas articulares, el cual, puede ser resuelto por un método sistemático independientemente de la morfología del manipulador, planteado por Denavit-Hartenberg, y ser simplificado a una matriz de transformación homogénea.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



2.2.1.2. Cinemática inversa:

La cinemática inversa trata de determinar los valores articulares que deben de adoptar cada articulación, para que la posición y orientación del extremo del manipulador sea una localización determinada, dando así solución al problema de la cinemática inversa. cabe resaltar, que no existe un método sistemático que nos ayude a resolver este problema, y su complejidad dependerá de su morfología.

2.2.2. Modelo dinámico:

El modelo dinámico describe las fuerzas que actúan sobre el manipulador, en base al equilibrio de fuerzas, planteado por la segunda ley de Newton, describiendo la relación entre las fuerzas que actúan sobre este y el movimiento que estas generan. estas ecuaciones resultantes que describen las relaciones, pueden llegar a ser enormemente complicadas, dependiendo del número de grados, donde 1 o 2 grados, se obtendrán ecuaciones no excesivamente complejas.

2.3. Control Cinemático:

El control cinemático es una estrategia de control a lazo abierto, en donde solo se varia y se envía el Setpoint a cada articulación correspondiente, generadas por medio del interpolador que muestreará los puntos intermedios de la función creada. este control establece las trayectorias que deben seguir las articulaciones en función del tiempo, con el fin de cumplir los objetivos planteados por el usuario, como los puntos en el espacio por los que debe pasar el extremo del manipulador, los tipos de trayectorias, tiempos que demora de un punto a otro, etc. [1]

Las aplicaciones del control cinemático son diversas, desde el seguimiento o imitación de la trayectoria generada por el movimiento de un brazo humano, en donde el manipulador imitará y grabará los movimientos que el humano genera, a través de una serie de muestreos de puntos intermedios de la trayectoria, uniéndolos por medio de interpoladores [25], hasta el control de múltiples unidades robotizadas, como por ejemplo múltiples brazos en una unidad de trabajo, ya sean fijos, o en bases móviles. [26]

Una manera de visualizar las etapas que se deben seguir para poder realizar el control cinemático, está dada por el esquema de la Ilustración 2.4.

2.3.1. Funciones del control cinemático

Las funciones del control cinemático están apoyadas por el modelo cinemático del robot, para poder establecer las trayectorias de cada articulación, generalizando los siguientes pasos:[1]

1. Convertir las especificaciones o los datos introducidos al programa en una trayectoria analítica en el espacio cartesiano.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co

2. Muestrear puntos intermedios de la trayectoria cartesiana, obteniendo un número finito de puntos de dicha trayectoria.
3. Obtener en cada uno de los puntos las coordenadas articulares por medio de la matriz de transformación homogénea, con la cinemática inversa, teniendo en cuenta las posibles soluciones.
4. Interpolación de los puntos articulares anteriormente obtenidos, obteniendo una ecuación polinomial para cada articulación expresada en $q(t)$, siendo una trayectoria realizable por los actuadores, para crear la trayectoria cartesiana.
5. Muestreo de la trayectoria articular para generar referencias al control dinámico.

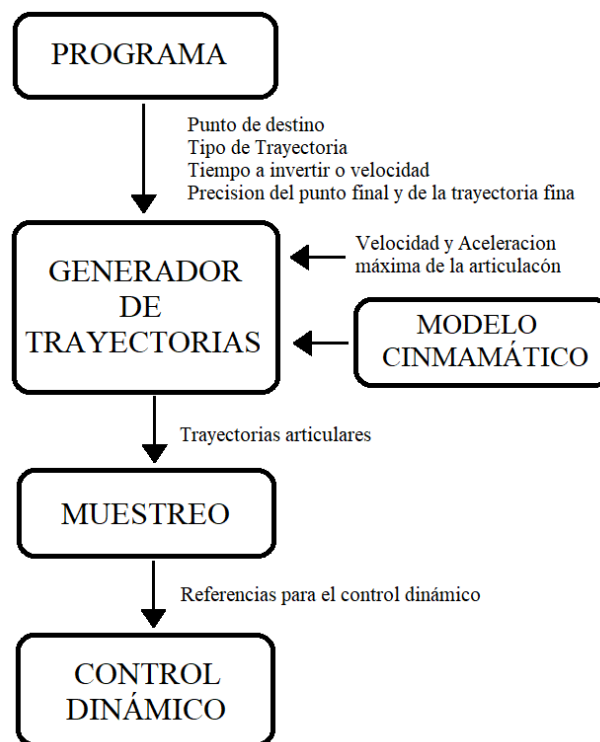


Ilustración 2.4: Diagrama esquemático del control cinemático. Fuente: Barrientos, 2007

2.3.2. Interpoladores:

Una función del control cinemático es la de crear trayectorias que deben de pasar por una serie de puntos o valores articulares en un determinado instante, con una posición y orientación deseada, con curvas suaves sin superar los límites de las velocidades y aceleraciones de los actuadores. Aquí es donde entran en juego los interpoladores, los interpoladores cumplen la tarea de crear funciones polinomiales,



que garantizan las restricciones de las velocidades y aceleraciones, haciendo posible implementar la trayectoria final.

Existen diversos tipos de interpoladores, comúnmente los más usados son los interpoladores lineales, interpoladores a tramos y los interpoladores cúbicos, de los cuales se implementarán estos dos últimos. [1]

2.3.2.1. Interpoladores trapezoidales:

El interpolador trapezoidal o a tramos, se encarga de unir puntos por medio de la creación perfiles de velocidades con forma trapezoidal, garantizando una continuidad en su en su trayectoria, ya que se asegura un tiempo para su arranque y para su frenado.

2.3.2.2. Interpoladores cúbicos

El interpolador cubico, une una secuencia de puntos a través de un polinomio de 3 grados, otorgándole a la ecuación 4 parámetros para cumplir las restricciones planteadas, de las cuales 2 son de posición y 2 de velocidad, creando un polinomio entre cada punto. [1]

2.3.2.3. Concatenación de trayectorias

La concatenación de trayectorias hace referencia a la unión de varios puntos tanto en el plano cartesiano como en los valores articulares, con el fin de que la trayectoria no presente velocidades nulas en los puntos dados, garantizando una trayectoria suave, continua y con un menor tiempo de ejecución. [2]

2.4. Trayectorias:

Para poder realizar una tarea determinada, el manipulador debe de moverse de un punto a otro establecido previamente por el usuario. existen múltiples maneras de llegar de un punto al otro, y aquí es donde se desglosan los diferentes tipos de trayectorias. [1]

2.4.1. Trayectoria eje a eje:

Se mueve una articulación a la vez, comenzando por la primera, una vez acabada esta, se mueve la siguiente articulación, y así, hasta que todas las articulaciones lleguen a su posición final, como se observa en la Ilustración 2.5. [1]



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

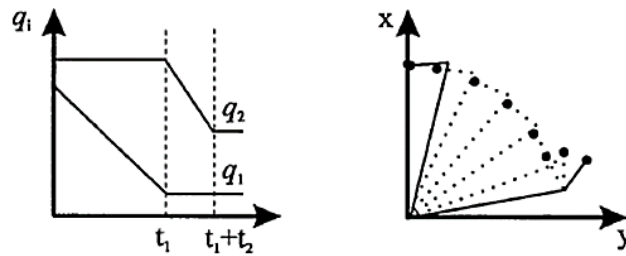


Ilustración 2.5: Movimiento eje a eje de un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007

2.4.2. Trayectoria simultanea:

En este tipo de trayectoria, todas las articulaciones comienzan a moverse a la misma vez, como se observa en la Ilustración 2.6, con sus velocidades límites, haciendo que las articulaciones acaben en instantes diferentes, ya que los recorridos y las velocidades medias pueden ser diferentes. [1]

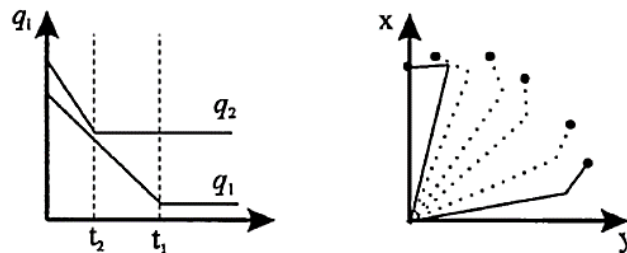


Ilustración 2.6: Movimiento simultaneo de ejes de un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007

2.4.3. Trayectoria coordinada:

Todas las articulaciones inician y acaban al mismo tiempo, haciendo que el tiempo para las articulaciones sea el tiempo de la articulación que demora más haciendo la trayectoria articular, como se percibe en la Ilustración 2.7, regulando así, la velocidad de las demás articulaciones para sus movimientos se ejecute en los mismos tiempos. [1]

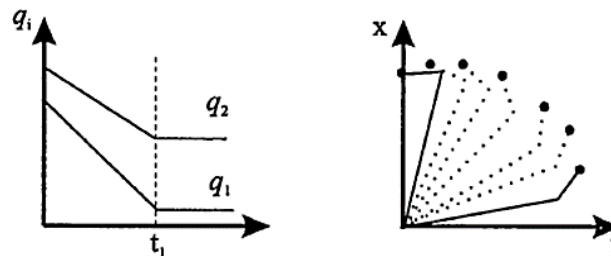


Ilustración 2.7: Movimiento de trayectorias coordinadas un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007

2.4.4. Trayectoria analítica o continua:

Cuando el movimiento del extremo del manipulador, estipulado por el usuario, debe seguir una trayectoria conocida en el espacio cartesiano, es preciso calcular de manera continua las trayectorias de cada articulación, aunque estas parezcan caóticas, variando posiblemente las posiciones y velocidades, en conjunto forman un movimiento uniforme del extremo del manipulador, observado en la Ilustración 2.8 [1]

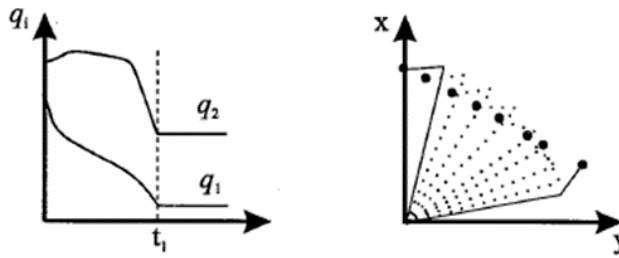


Ilustración 2.8: Movimiento continuo rectilíneo de un robot de 2 gdl. Fuente: Barrientos, 2007

2.5. Normativa



3. CAPÍTULO 2: DISEÑO MECÁNICO DEL MANIPULADOR

En este capítulo se aborda el diseño y desarrollo del manipulador robótico, para ello primero se tuvo en cuenta algunas referencias tanto del estado del arte como comerciales, con el fin de plantear unos alcances y criterios para crear un prototipo similar a los existentes en el mercado, otorgándole características “*propias*” de un manipulador industrial, imitando los en gran parte.

Para el diseño básico, se tuvo en cuenta conceptos cómo la morfología del brazo humano y sus grados de libertad, así como su volumen de trabajo, su posición de operación, limitaciones físicas, junto con otros conceptos. Como primer paso para su diseño, se crea un prototipo donde se analizan sus movimientos articulares, observando la facilidad de ubicar y posicionar el extremo del manipulador. Una vez establecido el diseño básico, se analiza su cinemática, determinando la dificultad de posicionar el manipulador en un punto en específico.

Ya con un prototipo del manipulador se procede a su diseño en detalle dónde se diseña cada parte o sección detallando cada una de las piezas del manipulador para su creación, así como su ensamble final, y materiales necesarios. una vez diseñado el manipulador se procede a su creación, para esto, se identificaron las piezas más débiles, seleccionando el material adecuado, así como el proceso de manufactura y sus especificaciones para la creación.

3.1. referencia de manipuladores

3.1.1. manipuladores comerciales

Con el fin de poder determinar las características más importantes de los manipuladores comerciales existentes en el mercado, se hizo la recopilación de al menos 5 robots con diferentes morfologías registrados en la Tabla 3.1, teniendo en cuenta así, las posibles características a mejorar.

Tabla 3.1: Características de manipuladores comerciales. Fuente: Autor

1	COOL ZERO ROBOT		
página web: https://n9.cl/6fp3t	Referencia: unice-200		Costo: 6000 – 8000 us\$
	Especificaciones técnicas:		
	Modelo		Unice – 200 - 30
	Carrera		200 mm
	Carga Util		1.25 Kg
	Dimensiones		400*140*260 mm
	Voltaje de Funcionamiento		DC 24V
	Peso		8 Kg



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Continuación de la Tabla 3.1

		<table><tr><td rowspan="3">Rango de Movimiento</td><td>Ultimo Eslabon</td><td>200°</td></tr><tr><td>Segundo Eslabon</td><td>240°</td></tr><tr><td>Primer Eslabon</td><td>30 mm</td></tr><tr><td rowspan="2">Distancias</td><td>Ultimo Eslabon</td><td>150 mm</td></tr><tr><td>Segundo Eslabon</td><td>120 mm</td></tr><tr><td rowspan="3">Velocidades</td><td>Ultimo Eslabon</td><td>150 rpm</td></tr><tr><td>Segundo Eslabon</td><td>150 rpm</td></tr><tr><td>Primer Eslabon</td><td>30 mm/s</td></tr></table>		Rango de Movimiento	Ultimo Eslabon	200°	Segundo Eslabon	240°	Primer Eslabon	30 mm	Distancias	Ultimo Eslabon	150 mm	Segundo Eslabon	120 mm	Velocidades	Ultimo Eslabon	150 rpm	Segundo Eslabon	150 rpm	Primer Eslabon	30 mm/s																											
Rango de Movimiento	Ultimo Eslabon	200°																																															
	Segundo Eslabon	240°																																															
	Primer Eslabon	30 mm																																															
Distancias	Ultimo Eslabon	150 mm																																															
	Segundo Eslabon	120 mm																																															
Velocidades	Ultimo Eslabon	150 rpm																																															
	Segundo Eslabon	150 rpm																																															
	Primer Eslabon	30 mm/s																																															
2	SZGH-BRAZO DE ROBOT INDUSTRIAL																																																
link: https://n9.cl/m16jp 		Modelo: SZGH-T750-B-6	Costo: ~ 4.000,00 us\$																																														
		Especificaciones técnicas:																																															
		<table><tr><td colspan="2">Carga Util</td><td>6 Kg</td></tr><tr><td colspan="2">Numero de Ejes</td><td>6</td></tr><tr><td colspan="2">Repetibilidad</td><td>0.05</td></tr><tr><td colspan="2">Proteccion</td><td>IP65</td></tr><tr><td colspan="2">Maximo Radio</td><td>750 mm</td></tr><tr><td colspan="2">Peso</td><td>125 Kg</td></tr><tr><td colspan="2">Tipo de Estructura</td><td>Articulada</td></tr><tr><td rowspan="6">Rango de Movimiento de sus ejes</td><td>J1</td><td>±165°</td></tr><tr><td>J2</td><td>±120°</td></tr><tr><td>J3</td><td>±87°</td></tr><tr><td>J4</td><td>±360°</td></tr><tr><td>J5</td><td>±115°</td></tr><tr><td>J6</td><td>±450°</td></tr><tr><td rowspan="6">Velocidades de sus ejes</td><td>J1</td><td>148°/seg</td></tr><tr><td>J2</td><td>148°/seg</td></tr><tr><td>J3</td><td>222°/seg</td></tr><tr><td>J4</td><td>222°/seg</td></tr><tr><td>J5</td><td>222°/seg</td></tr><tr><td>J6</td><td>360°/seg</td></tr></table>	Carga Util		6 Kg	Numero de Ejes		6	Repetibilidad		0.05	Proteccion		IP65	Maximo Radio		750 mm	Peso		125 Kg	Tipo de Estructura		Articulada	Rango de Movimiento de sus ejes	J1	±165°	J2	±120°	J3	±87°	J4	±360°	J5	±115°	J6	±450°	Velocidades de sus ejes	J1	148°/seg	J2	148°/seg	J3	222°/seg	J4	222°/seg	J5	222°/seg	J6	360°/seg
Carga Util		6 Kg																																															
Numero de Ejes		6																																															
Repetibilidad		0.05																																															
Proteccion		IP65																																															
Maximo Radio		750 mm																																															
Peso		125 Kg																																															
Tipo de Estructura		Articulada																																															
Rango de Movimiento de sus ejes	J1	±165°																																															
	J2	±120°																																															
	J3	±87°																																															
	J4	±360°																																															
	J5	±115°																																															
	J6	±450°																																															
Velocidades de sus ejes	J1	148°/seg																																															
	J2	148°/seg																																															
	J3	222°/seg																																															
	J4	222°/seg																																															
	J5	222°/seg																																															
	J6	360°/seg																																															
3	HANS ROBOTS ELFIN 5																																																
página web: https://n9.cl/2fd1t		Referencia: ELFIN 5	Costo: 17.500,00 us\$ - 35.000,00 us\$																																														
		Especificaciones técnicas:																																															

Continuación de la Tabla 3.1

	<table><tr><td>Peso</td><td>23 Kg</td></tr><tr><td>Carga Util</td><td>5 Kg</td></tr><tr><td>Maximo Radio de Trabajo</td><td>800 mm</td></tr><tr><td>Rango de Articulaciones</td><td>±360°</td></tr><tr><td>Velocidades de articulaciones</td><td>J1 – J4: 180°/seg J5 – J6: 200°/seg</td></tr><tr><td>Funcionamiento</td><td>24V – 2A</td></tr><tr><td>Potencia de Entrada</td><td>200-240VAC 50-60Hz</td></tr><tr><td>Consumo Energetico</td><td>180 W</td></tr><tr><td>Proteccion</td><td>IP54</td></tr><tr><td>Material</td><td>Aluminio</td></tr></table>	Peso	23 Kg	Carga Util	5 Kg	Maximo Radio de Trabajo	800 mm	Rango de Articulaciones	±360°	Velocidades de articulaciones	J1 – J4: 180°/seg J5 – J6: 200°/seg	Funcionamiento	24V – 2A	Potencia de Entrada	200-240VAC 50-60Hz	Consumo Energetico	180 W	Proteccion	IP54	Material	Aluminio
Peso	23 Kg																				
Carga Util	5 Kg																				
Maximo Radio de Trabajo	800 mm																				
Rango de Articulaciones	±360°																				
Velocidades de articulaciones	J1 – J4: 180°/seg J5 – J6: 200°/seg																				
Funcionamiento	24V – 2A																				
Potencia de Entrada	200-240VAC 50-60Hz																				
Consumo Energetico	180 W																				
Proteccion	IP54																				
Material	Aluminio																				
4	LIUJIANG SCARA ROBOT																				
página web: https://n9.cl/hiu39 	Referencia: LIUJIANG	costo: \$ 6000 us																			
	Especificaciones técnicas:																				
	Alcance máximo del brazo del eje X	350 mm / ±125°																			
	Alcance máximo del brazo del eje Y	237 mm / ±140°																			
	Carrera Efectiva del Eje Z	400 mm																			
	Alcance del extremo del Manipulador	± 360 °																			
	Máxima Velocidad del Eje X/Y	3 m/s																			
	Máxima velocidad del Eje z	1.7 m/s																			
	Máxima Velocidad del Extremo del Manipulador	540°/seg																			
	Precisión de Posicionamiento del Eje X	± 0.05mm																			
	Precisión de Posicionamiento del Eje Y	± 0.05mm																			
	Precisión del Extremo del Manipulador	± 0.02mm																			
	Máxima Carga	3 Kg																			
	Peso	20 Kg																			

Continuación de la Tabla 3.1

5	MINIROBOT INDUSTRIAL (GENERIC)		
link: https://n9.cl/dlupl  	Modelo: q602-a		Precio: 5.200,00 us\$
	Especificaciones técnicas:		

Como se observa en la *Tabla 3.1*, la carga útil de los manipuladores está en promedio alrededor los 3kg. En consideración que su cuerpo es metálico, el peso corporal es muy elevado, alrededor de los 10 a 30 kg, ya que se quiere diseñar un banco de trabajo portátil, de bajo peso, no se puede tender a la misma relación Carga/Peso, ya que se usarán materiales más livianos para su construcción.

En cuanto a otras características, se observa que estos poseen un gran rango de operación de cada articulación, en su mayoría sobre los 180°, el cual se considerará tratando de mejorarlo para tener un mayor rango posible de operación.

3.1.2. Estado del arte

Tabla 3.2: Características del estado del arte. Fuente: Autor

1	Diseño y simulación de un robot manipulador industrial tipo puma capaz de levantar pesos de hasta 20 kg. [17]		
	Quito	2012	
	características físicas		
	Material: acero ASTRM a36 Dimensiones: 1200 mm (máx.) Morfología: antropomórfico Carga: 20 kg Costos: (No especifica)		
2	Desarrollo de un banco de control dinámico para el manipulador Zebra 360 del ambiente Tecnoacademia Cúcuta [6]		
	Cúcuta	2020	
	características físicas		
	Material: ABS Dimensiones: 500 mm (máx.) Morfología: antropomórfico (rotacional) Carga: sin carga Costos: (No especifica)		
3	diseño de un manipulador industrial para aplicaciones de limpieza en subestaciones eléctricas. [16]		
	-	-	
	características físicas		
	Material: aluminio, fibra de vidrio Dimensiones: (No especifica) Morfología: esférico Carga: sin carga Costos: (No especifica)		



Con la finalidad de realizar una comparación entre las características propias de los proyectos del estado del arte, solo se tomaron algunos proyectos para su muestra, plasmados en el Tabla 3.2, en general, cada proyecto posee distintas características en dependencia de su funcionalidad o finalidad, como por ejemplo el proyecto número 2 de la misma tabla, no está hecho para una carga útil, y es solo con fines académicos [16], o el proyecto número 1 de la misma tabla, en donde al ser enfocado a lo industrial, si posee una carga útil. Estas características propias del diseño se abordarán en los siguientes títulos, planteando análisis y criterios para el desarrollo del proyecto.

3.2. Lineamientos del Diseño Mecánico

3.2.1. Alcances

- Se busca desarrollar la estructura mecánica del manipulador industrial, cumpliendo con los criterios a establecer, realizando un prototipo moderno¹
- Determinar los materiales adecuados para la creación del manipulador, así como su herramienta de trabajo

3.2.2. Limitaciones

- Para la selección de los materiales, se contará con un criterio llamado “accesibilidad”, el cual hace referencia a la facilidad de adquirir los materiales (costo - tiempo)
- Solo se realizará análisis de materiales al manipulador, ya que su banco de trabajo será realizado con materiales en base a la experiencia de trabajar con materiales en acero.

3.3. Criterios

Analizando la recopilación de información de la Tabla 3.1 y Tabla 3.2., se trazan los criterios para el desarrollo del apartado mecánico del manipulador, reflejados en la Tabla 3.3., básicamente se plantea 3 componentes fundamentales llamadas *Mecánica*, *Diseño* y *Ergonomía*, las cuales se tomarán en cuenta para el diseño y desarrollo de cualquier elemento físico del manipulador. En el primer componente, se plantean las propiedades físicas generalizadas, en función de la finalidad del proyecto. En el apartado de *Diseño*, se trazan ideas centrales que ayudarán a facilitar el desarrollo del manipulador. Por último, el componente de *Ergonomía*, se centra en las restricciones e idealización de algunos aspectos

¹ Contrapuesto a lo antiguo o a lo clásico y establecido: Tomado de la REA

Tabla 3.3: Tabla de criterios para el diseño mecánico. Fuente: Autor

CRITERIOS MECÁNICOS		
Componente	Concepto	Detalles
Mecánica	carga útil	Carga útil del manipulador alrededor de los 200 grm
	Velocidad	Velocidades bajas alrededor de 20 - 100 rpm, con el fin de que sea evidente las trayectorias a generar
	Factor de seguridad	Factor de seguridad por encima de 5, a cargas de 5 kg, evitando posibles fracturas por errores o por perturbaciones
	Temperatura de Trabajo	Mantener controlada la temperatura de trabajo, inferior a las de operación de los actuadores, evitando sobrecalentamientos
Diseño	Morfología	Hacer que el manipulador cuente con una morfología antropomórfica, con un diseño orgánico, imitando la extremidad superior del humano, obteniendo las ventajas de esta.
	Estandarizado	Usar elementos consumibles y herramientas estandarizadas, con el fin de optimizar recursos y tiempo
	Costos - Beneficio	Priorizar costos de los elementos a usar como materiales, consumibles, actuadores, etc.... en función de las características que aportan
	Seguridad	Dotar al manipulador de un ambiente seguro, con el fin de que no sea fácil acceder a este en funcionamiento, evitando posibles accidentes
	Mejoras	Dar la posibilidad o base de mejorar algunas condiciones como velocidad, carga útil, cambio de herramientas, entre otras, solo actualizando algunos elementos aparte de lo estructural
Ergonomía	Peso	Restringir el peso máximo, al peso máximo que por ley puede cargar una persona (artículo 211-h del código del trabajo) [14], 20 kg, aunque se considerará cargar este por dos personas, aumentando a un peso máximo de 30 kg.
	Volumen	No superior a un cubo de 600 mm de lado
	Manipulabilidad	contar con agarraderas, para que sea fácilmente manipulado por dos personas
	visibilidad	sea fácilmente visible las actividades que el usuario desee realizar con el manipulador

3.4. diseño

3.4.1. morfología

La naturaleza a través de los años ha perfeccionado la adaptación de cada especie y el ser humano no es la excepción, ha evolucionado para adquirir habilidades y destrezas por medio de sus brazos, sus herramientas principales. [20]

Por ello, por medio de este diseño, se trata de imitar los movimientos del brazo del humano plasmándolo en el diseño de un manipulador, como se ejemplifica en la Ilustración 3.1, mejorando algunos aspectos como las limitaciones de las rotaciones.

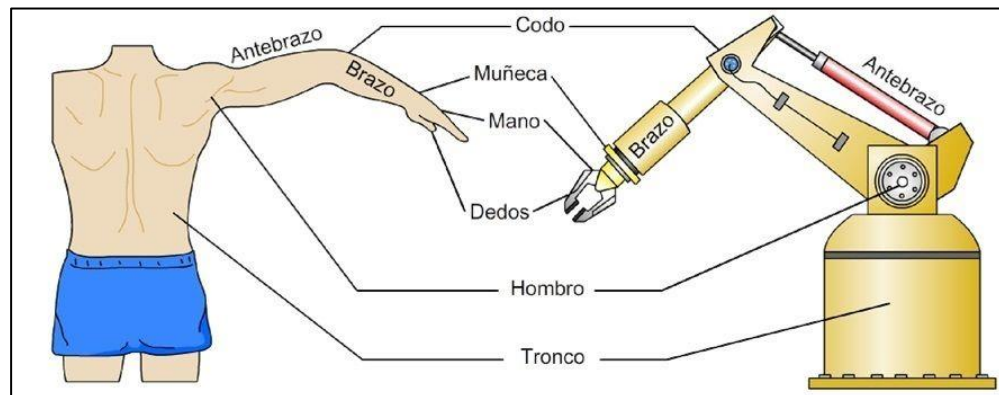


Ilustración 3.1: Semejanzas del manipulador con el brazo humano. Fuente: blog: “la robótica educativa” [15]

3.4.2. Diseño de la cadena cinemática

Para dar cumplimiento a los criterios establecidos, se plantea un bosquejo de la cadena cinemática del manipulador, mostrado en la Ilustración 3.2, un diseño desde lo más básico, con 4 grados de libertad. Con este simple esquema, nos garantizar ubicar el extremo del manipulador en cualquier punto.

Debido a que el manipulador debe de ser portátil, se debe se minimizar la intervención en su máximo, de una persona para la instalación, por ello, al crear un ambiente de trabajo cerrado en el que no se haya la necesidad de armar o desarmar piezas para poder trasladar el manipulador. Además, al crear un ambiente cerrado en el cual no existe la posibilidad de perturbaciones al realizar trayectorias articulares, las trayectorias realizadas serán más fieles a las trayectorias generadas.

Un concepto a considerar es la posición del manipulador, al posicionarlo de manera vertical, como se observa en la Ilustración 3.2, aprovecharemos el volumen de trabajo cerrado, haciendo posible posicionar el extremo justo debajo de la base, como lo consta Barrientos, 2007. [1]

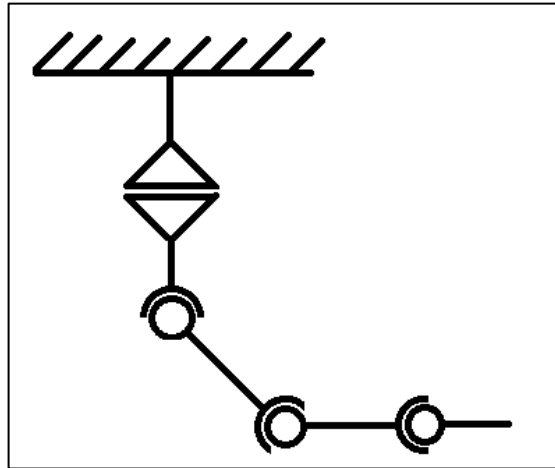


Ilustración 3.2: Cadena cinemática del manipulador de 4gdl. Fuente: Autor

3.4.2.1. análisis de los movimientos

Realizando el análisis de los movimientos, en base a un prototipo realizado en el programa Fusion 360, el cual sigue la cadena cinemática planteada por la Ilustración 3.2. Se observa que, a través de tan solo 4 gdl, podemos posicionar con una única orientación el extremo del manipulador.

Aunque algunos autores como Bader, A. M., & Maciejewski, A. A, proponen que los robots cinemáticamente redundantes pueden completar una tarea específica incluso después de que haya ocurrido una falla, esto debido a los grados de libertad adicionales, que se suman al mínimo requerido para realizar una tarea específica. Esta ventaja es importante para los robots que se emplean en aplicaciones en las que no es posible realizar el mantenimiento o la reparación de rutina, por ejemplo, en entornos peligrosos y remotos, el cual este no es el caso. [21]

Al ubicar la base del manipulador sobre ejes o correderas de movimientos prismáticos, le otorgaríamos 2 gdl adicionales, estos dos últimos con el fin de hacer más cómodo el posicionamiento, se tendría mejor orientación en el extremo del manipulador, cayendo en una redundancia.

Aunque esta técnica de diseño es viable, implica tener un costo de computación mayor, debido a que, se deben de ejecutar múltiples combinaciones en los parámetros DH “óptimos”. [21]

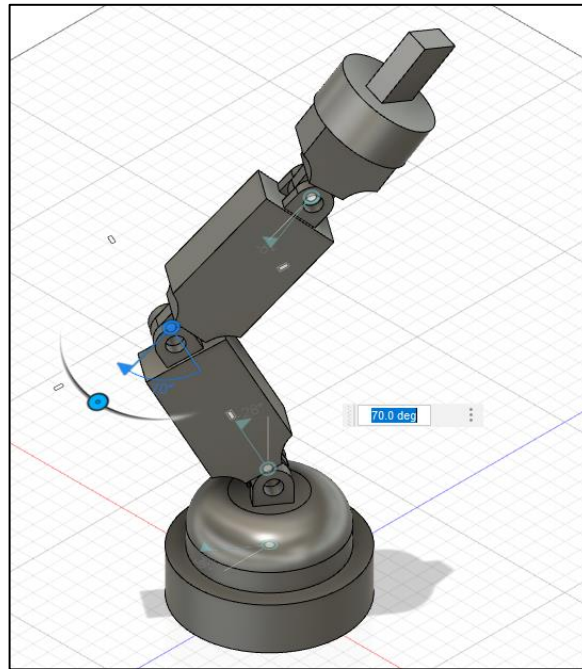


Ilustración 3.3: Prototipo mecánico del manipulador de 4gdl. Fuente: Autor

Al otorgarle 2 grados de libertad adicional a la cadena cinemática del manipulador expresada por la Ilustración 3.2, la nueva cadena cinemática de 6 grados de libertad queda expresada en la Ilustración 3.4, en donde se puede realizar un posicionamiento con más posibilidades de orientación.

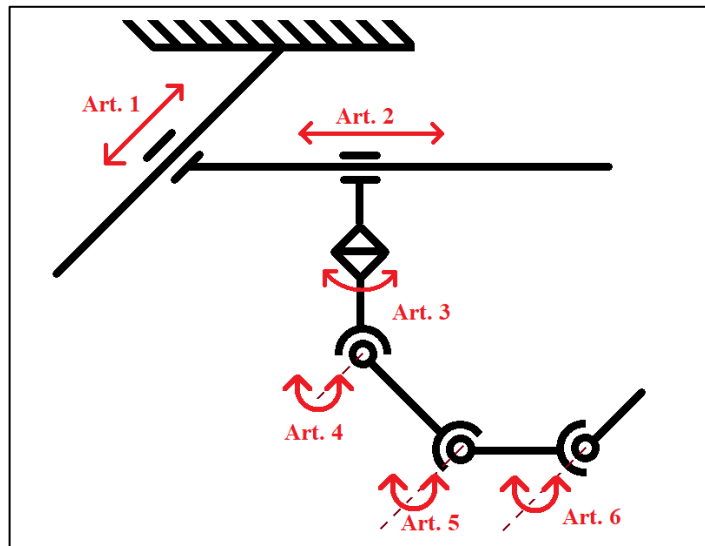


Ilustración 3.4: Cadena cinemática del manipulador con 6 gdl. Fuente: Autor

3.4.3. diseño básico

Al detallar el prototipo de la ilustración 3.3, se desarrolla en lo posible un diseño antropomórfico, en similitud a las secciones del brazo humano, detallado en la ilustración 3.5. Este prototipo se diseñó en múltiples piezas para su fácil fabricación y manipulación, así como posteriores remplazos o adaptaciones completas o pequeñas para algunas piezas en específico, siendo más sencillo para el usuario.

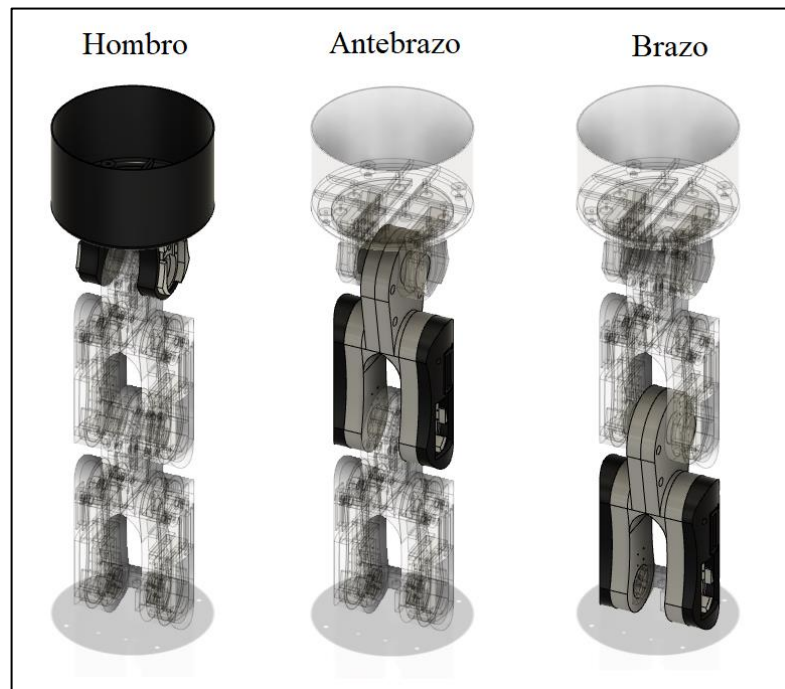


Ilustración 3.5: Secciones en semejanzas del diseño con el brazo humano. Fuente: Autor.

En la Ilustración 3.6, se puede identificar cada una de las piezas que conforman el manipulador, cada una de estas cumplen una función en específico, sus dimensiones están estandarizadas para consumibles tales como tornillos, arandelas, tuercas y demás, catalogados M2 y M4. Los tornillos y elementos M2, por su diámetro de 2 mm, son ideales para unir piezas en las que no se requiera mayor fuerza, conservando una buena estética, por otro lado, los tornillos M4, de diámetro de 4 mm, son los encargados de unir las piezas que involucren una mayor fuerza, así como los de sostener el peso del brazo y sus cargas.

Nota: se puede navegar por la identificación de las piezas de la Ilustración 3.6, redirigiéndose a las especificaciones de las piezas en los anexos, para ello, solo debe seleccionar la pieza a detallar.

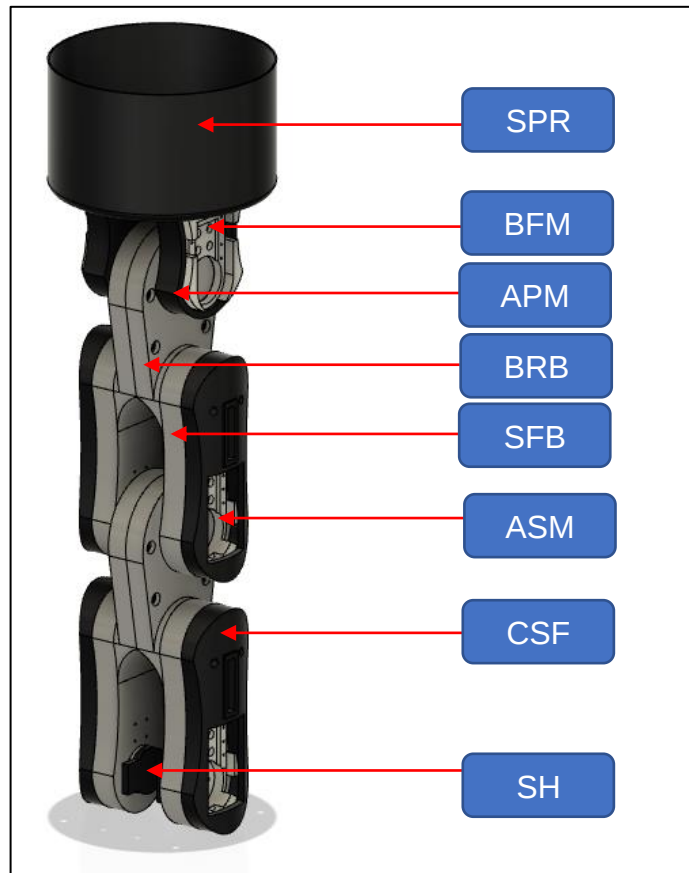


Ilustración 3.6: Identificación de las piezas que componen el brazo. Fuente: Autor

3.4.3.1. diseño del ambiente de trabajo

Como se había especificado en los criterios y en el título anterior, para la protección del manipulador y así como para la generación de trayectorias más fiables, el prototipo debe de estar dentro de un banco de trabajo.

Para crear la estructura del volumen de trabajo cerrado, se analizó las dimensiones del manipulador dadas en la Ilustración 3.7, para ello, se debe de contar con un espacio suficiente en donde se pueda interactuar con diferentes elementos dentro de este volumen de trabajo, como su extensión máxima a los lados es de aproximadamente de 360 mm, por ende, al contar con un área de 600x600 mm, da espacio idóneo entre un volumen de trabajo grande pero no excesivamente, obsérvese la Ilustración 3.8.

Esta estructura del volumen de trabajo, será el soporte para anclar del manipulador de forma vertical en su cara superior, por medio de los ejes móviles. Estos ejes móviles son en realidad sistemas de guiado lineal, y la selección de estos depende de diversos factores como lo constata la guía de *Sistemas de Guiado Lineal*, de NBS, el cual es un catálogo técnico en donde establecen criterios para la selección

de diversos perfiles para las guías, como redondos, cuadrados, rectangulares, perfiles en C, en I, entre otros, en función de las direcciones de las fuerzas, las velocidades, la repetibilidad, el ambiente de trabajo y demás características planteadas. [29]

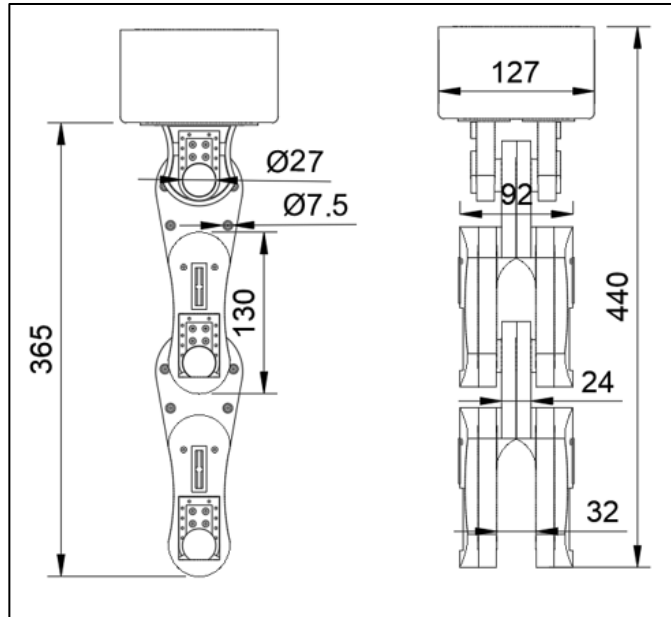


Ilustración 3.7: Dimensiones y medidas en mm del brazo. Fuente: Autor

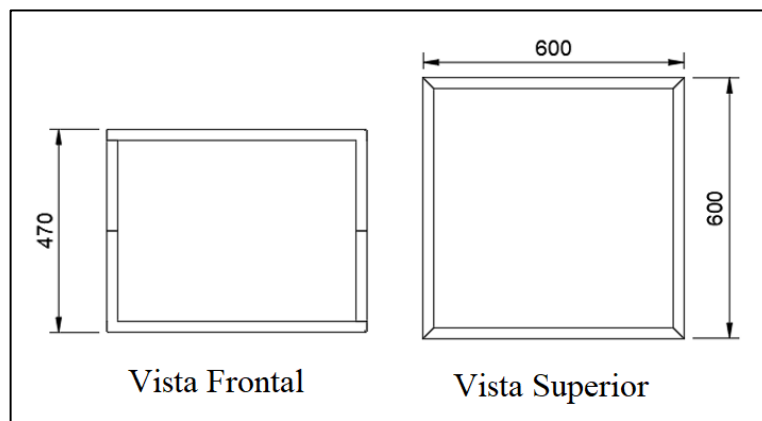


Ilustración 3.8: Dimensiones en mm del Volumen de trabajo desde diferentes vistas. Fuente: Autor.

Para la creación de los sistemas guiados lineales, que al final representaran las articulaciones 1 y 2 del manipulador, se tuvo en cuenta solamente 2 factores, al no ser un banco de trabajo enfocado a la industria, en donde su ambiente de trabajo no está expuesto a diversos factores, solamente se tomó en cuenta el factor de disponibilidad y costos-beneficios.

El sistema seleccionado fue el de perfil redondo. Ya que es un sistema muy usado en proyectos similares como en impresoras 3D o en CNC, por lo cual se pueden conseguir de una manera más económica en el mercado, cumpliendo las funciones necesarias. Este sistema funciona por medio de un sistema de engranajes-cadena, se transmite el movimiento del motor a un tornillo sin fin, que este a su vez mueve una chumacera o guía, del tornillo como se observa en la ilustración 3.9, haciendo que la base del manipulador se mueva.

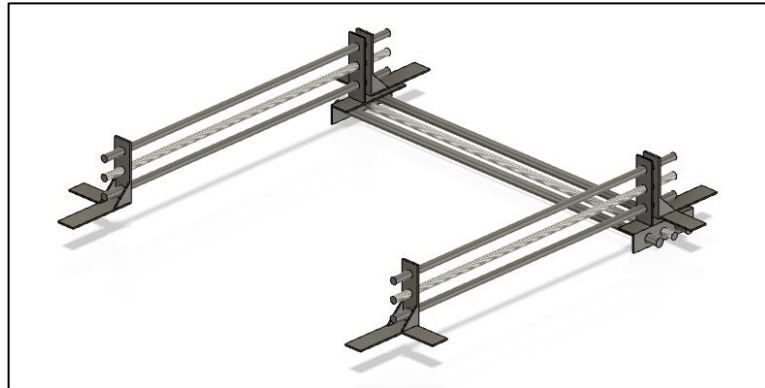


Ilustración 3.9: Sistemas de guiado lineal para las articulaciones 1 y 2. Fuente: Autor

Para el proceso final del diseño, ubicamos el ensamble del brazo en su ambiente de trabajo, observado en la Ilustración 3.10, en donde se comparan los contrastes de las dimensiones y el espacio existente del brazo para su volumen de trabajo.

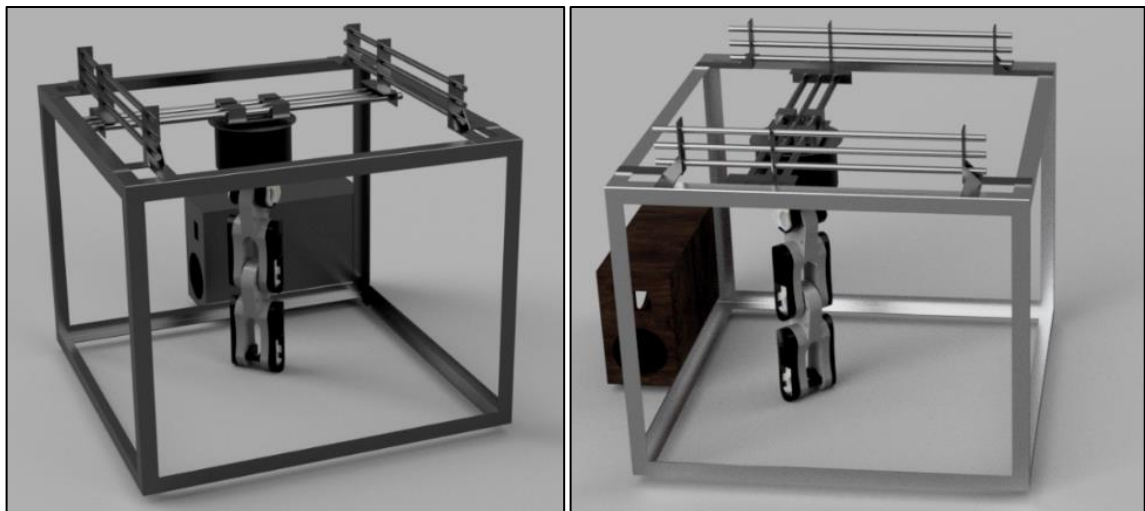


Ilustración 3.10: Imágenes de renderizado del manipulador. Fuente: Autor.

3.4.4. Herramienta de Trabajo:

Como herramienta, comúnmente se observa en el mercado, dispositivos robóticos de la misma naturaleza (con énfasis educacional) que, en su mayoría optan en su diseño por incluir unas pinzas o garras, como las que se observan en la Ilustración 3.11, uno de estos dispositivos es el brazo robótico de 6 gdl de la marca LewanSoul, que incluyen una pinza como herramientas, o el brazo robótico para educación de la empresa RobotLab, Esto se espera, ya que esta clase de herramienta ofrecen una versatilidad a la hora de implementar el brazo robótico en distintas tareas.



Ilustración 3.11: Imagen de la herramienta del manipulador. Fuente: Mercadolibre.com

Por lo cual, para este proyecto, se usarán unas pinzas como herramienta, ubicada en el extremo del manipulador, para sujetar objetos y así, el usuario pueda interactuar con distintos elementos en su implementación.

3.4.5. Limitaciones físicas

Una vez conocida la estructura del manipulador, se procede a definir las limitaciones del mismo, con el fin de que el lector pueda dimensionar los alcances dentro del volumen del manipulador, cabe resaltar, que el extremo del manipulador puede ubicarse en cualquier punto dentro de su banco de trabajo, por ende, se omite el volumen de trabajo que tuviese el brazo fuera de este banco.

Para determinar las limitaciones de cada articulación, se determina el desplazamiento máximo y mínimo de cada una de estas, dejando la posición media como su punto cero, para ello, por medio del CAD realizado, se desplazó cada articulación de manera ensamblada, obteniendo las limitaciones de la Tabla 3.4.

3.4.5.1. límites articulares

Tabla 3.4: Tabla de limitaciones articulares. Fuente: Autor.

articulación 1: 0 – 30 cm	articulación 2: 0 – 28 cm
articulación 3: $\pm 150^\circ$	articulación 4: $\pm 90^\circ$
articulación 5: $\pm 125^\circ$	articulación 6: -100 a +110 $^\circ$

3.4.5.2. límites de sumatorias de articulaciones

Existen otros tipos de limitaciones, exactamente en la combinación de sus ángulos, y es que no se puede permitir que el extremo del manipulador pase por sí mismo, así como que se pueda ubicar en un punto por fuera del volumen, o que alguna de sus partes esté por fuera de este. Por lo cual se establecieron los límites en la sumatoria de sus articulaciones, dados por el mismo análisis anterior, que se detallan a continuación:

- la sumatoria de las articulaciones no deben de salir del volumen de trabajo, incluyendo cualquier parte de la extremidad.
- la sumatoria de las articulaciones, no pueden ubicar la extremidad sobre sí mismo.

- al no tener ningún ángulo las articulaciones 4 y 5, la articulación 6 no puede ser inferior a 90° ni superior a -90° .

3.5. Modelo Cinemático

Para hallar el modelo cinemático directo se puede hacer por 2 métodos, el método geométrico y el método analítico, este primero basa su análisis a través de las proyecciones el extremo del manipulador en sus ejes, así como las posibles rotaciones que existan en toda su cadena cinemática, por otro lado, el método analítico se basa en unas series de reglas planteadas por la convención Denavit-Hartenberg. Estos métodos para hallar el modelo cinemático, dan como resultado una representación por medio de matrices de transformación homogénea que llamaremos MTH.

3.5.1. Modelo cinemático directo: método analítico

En este caso, por practicidad, se realiza el modelo cinemático por medio de la convención Denavit-Hartenberg, ya que este modelo a diferencia del otro, permite ir localizando los puntos de cada articulación, dando la posibilidad de evaluar si están o no dentro del volumen de trabajo.

Al aplicar las reglas del metodo analítico obtenemos los parametros Denavit-Hartenberg, una tabla, dada en la tabla 3.5, que relaciona articulación por articulación en la secuencia de su cadena cinemática visualizada en la Ilustración 3.12, que, de manera análoga, estos puntos son representados en la Ilustración 3.13.

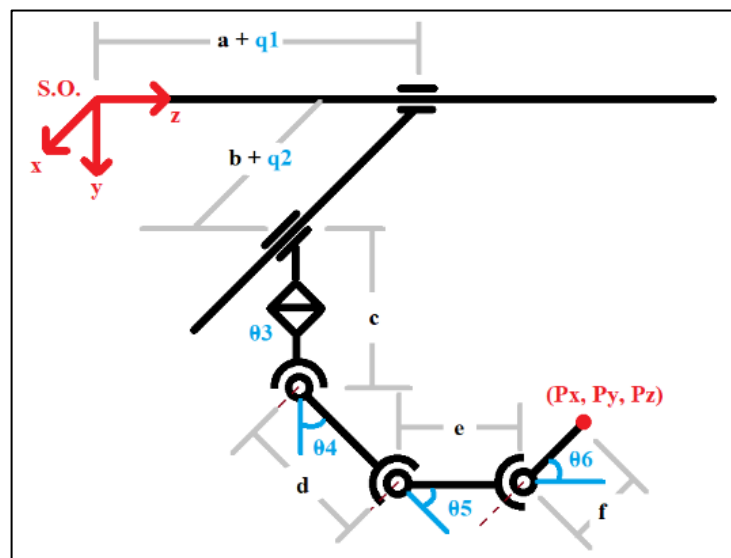


Ilustración 3.12: Cadena cinemática del manipulador con origen referenciado.
Fuente: Autor.

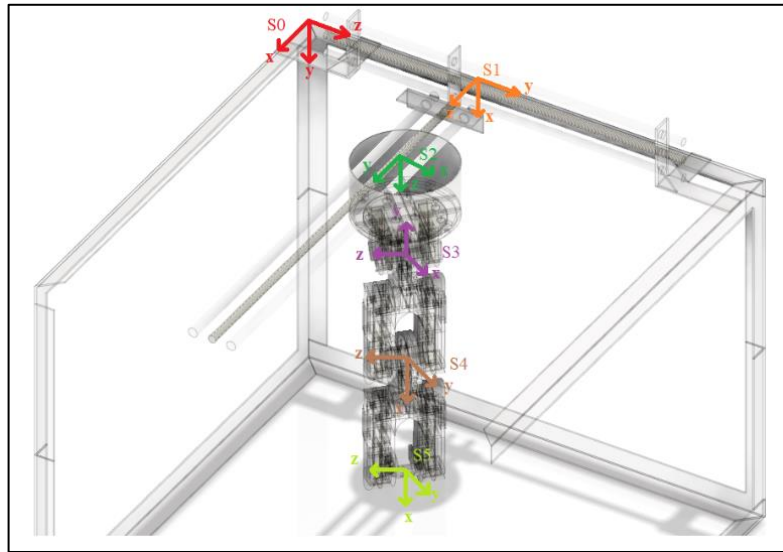


Ilustración 3.13: Representación de los sistemas en el manipulador. Fuente: Autor.

tabla 3.5: Tabla de parámetros Denavit-Hartenberg. Fuente: Autor.

articulacion	angulo	d	a	alfa
art. 1	90	$a+q_1$	0	90
art. 2	90	$b+q_2$	0	90
art. 3	q_3	c	0	-90
art. 4	q_4-90	0	d	0
art. 5	q_5	0	e	0
art. 6	q_6	0	f	0

Al aplicar las reglas Denavit-Hartenberg, obtenemos cada una de las secuencias de las articulaciones, por medio de matrices de transformación homogénea (MTH), que relaciona su base con la articulación i.

$$MTH_0^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_1 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MTH_0^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & q_2 + b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & q_1 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 MTH_0^3 &= \begin{bmatrix} \sin(Q3) & 0 & \cos(Q3) & q2 + b \\ 0 & -1 & 0 & c \\ \cos(Q3) & 0 & -\sin(Q3) & q1 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 MTH_0^4 &= \begin{bmatrix} S_3S_4 & S_3C_4 & C_3 & q2 + b + dS_3S_4 \\ C_4 & -S_4 & 0 & c + dC_4 \\ C_3S_4 & C_3C_4 & -S_3 & q1 + a + dC_3S_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 MTH_0^5 &= \begin{bmatrix} S_3S_{45} & S_3C_{45} & C_3 & q2 + b + dS_3S_4 + eS_3S_{45} \\ C_{45} & -S_{45} & 0 & c + dC_4 + eC_{45} \\ C_3S_{45} & C_3C_{45} & -S_3 & q1 + a + dC_3S_4 + eC_3S_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 MTH_0^6 &= \begin{bmatrix} S_3S_{456} & S_3C_{456} & C_3 & q2 + b + dS_3S_4 + eS_3S_{45} + fS_3S_{456} \\ C_{456} & -S_{456} & 0 & c + dC_4 + eC_{45} + fC_{456} \\ C_3S_{456} & C_3C_{456} & -S_3 & q1 + a + dC_3S_4 + eC_3S_{45} + fC_3S_{456} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.1
 \end{aligned}$$

Al desglosar la última matriz de transformación homogénea, dada en la ecuación 3.1, la cual es la de mayor interés, en su parte rotacional y de posición, obtengo que el extremo del manipulador está determinado por una rotación expresado por la ecuación 3.2, y su ubicación p_x , p_y y p_z , están dados por las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5, respectivamente.

$$Rot = \begin{bmatrix} S_3S_{456} & S_3C_{456} & C_3 \\ C_{456} & -S_{456} & 0 \\ C_3S_{456} & C_3C_{456} & -S_3 \end{bmatrix} \quad 3.2$$

$$P_x = q2 + b + dS_3S_4 + eS_3S_{45} + fS_3S_{456} \quad 3.3$$

$$P_y = c + dC_4 + eC_{45} + fC_{456} \quad 3.4$$

$$P_z = q1 + a + dC_3S_4 + eC_3S_{45} + fC_3S_{456} \quad 3.5$$

3.5.2. Modelo cinemático inverso: método analítico

En el caso del modelo cinemático inverso, existe la posibilidad de hallarlo de manera analítica y geométrica, también es posible la combinación de los dos métodos, creando un método mixto. Para este caso, se puede hallar la cinemática inversa



solo por el método analítico, usando las fórmulas obtenidas de la matriz de transformación homogénea de la ecuación 3.1.

Para poder definir cada una de sus componentes dentro de la matriz de transformación homogénea (MTH), definimos una abreviación a cada termino, que servirá para la identificación de la ubicación del elemento dentro de la MTH final. Se debe resaltar, por temas de simplicidad, que se omiten todos los pasos hasta llegar a las ecuaciones resultante.

$$MTH_f = \begin{bmatrix} Nx & Ox & Ax & Px \\ Ny & Oy & Ay & Py \\ Nz & Oz & Az & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Desglosando la mth final en sus componentes se obtiene los siguientes datos:

$$Nx = S_3 S_{456}$$

$$Ox = S_3 C_{456}$$

$$Ax = C_3$$

$$Px = q_2 + b + dS_3 S_4 + eS_3 S_{45} + fS_3 S_{456}$$

$$Ny = C_{456}$$

$$Oy = -S_{456}$$

$$Ay = 0$$

$$Py = c + dC_4 + eC_{45} + fC_{456}$$

$$Nz = C_3 S_{456}$$

$$Oz = C_3 C_{456}$$

$$Az = -S_3$$

$$Pz = q_1 + a + dC_3 S_4 + eC_3 S_{45} + fC_3 S_{456}$$

$$\text{Con } h = dS_4 + eS_{45} + fS_{456}$$



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



3.5.2.1. hallamos q_3

Para hallar el valor de la articulación 3, basta con tomar y simplificar los términos A_z y A_x , para obtener la ecuación 3.6.

$$\theta_3 = \text{ArcTan}\left(-\frac{A_z}{A_x}\right) \quad 3.6$$

3.5.2.2. hallamos q_1 y q_2

En este caso, al ser un sistema redúndate, la articulación 1 y articulación 2 quedan dependiendo una de la otra, por lo cual, se debe de estimar una de las dos para poder hallar la otra y así, el resto de los valores articulares. Para realizar esto, se toman los valores P_x y P_z , simplificándolos hasta llegar a la ecuación 3.7

$$q_2 = (P_x - b) - (P_z - a)t_3 + q_1t_3 \quad 3.7$$

consideraciones:

- $\theta_3 \neq 0, \pi$
- q_2 queda dependiendo de q_1

Para hallar los siguientes términos, se basan en una serie de procesos en base a los valores P_y y de h , hasta llegar a la simplificación de la ecuación 3.8 como solución al valor de la articulación 4 y la ecuación 3.9 como solución al valor de la articulación 5.

3.5.2.3. hallamos q_4

$$\theta_4 = \text{Arctan}\left(\frac{x}{y}\right) \pm \text{Arctan}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 - z^2}}{z}\right) \quad 3.8$$

donde:

$$x = Py - c - fNy, \quad y = h + fCy, \quad z = \frac{x^2 + y^2 + d^2 - e^2}{2d}$$

3.5.2.4. hallamos q_5

$$\theta_5 = \theta_4 \pm \text{Arctan}\left(\frac{x}{y}\right) \pm \text{Arctan}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 - z^2}}{z}\right) \quad 3.9$$



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
 www.unipamplona.edu.co

donde:

$$x = Py - c - fNy, \quad y = h + fCy, \quad z = \frac{x^2 + y^2 + e^2 - d^2}{2e}$$

3.5.2.5. hallamos q6

Para determinar el valor de la articulación 6, basta con tomar los valores de Oy y de Ny , hasta su simplificación en la ecuación 3.10.

$$\theta_6 = \text{Arctan}\left(\frac{-Oy}{Ny}\right) - \theta_4 - \theta_5 \quad 3.10$$

3.6. Modelo Diferencial

Para determinar el modelo diferencial, se realizó un pequeño código en base a las ecuaciones proporcionadas por el libro de Barrientos 2007 y el libro de Craig, John J, 2006. En donde el primero establece que las velocidades lineales y rotaciones les del extremo del manipulador pueden ser determinadas a partir de las velocidades articulares y viceversa:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_y}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

Para obtener la matriz de la jacobiana, se realizó por el método planteado de Craig, expuesto por el diagrama de flujo de la Ilustración 3.14, donde básicamente, para obtener las velocidades $\dot{x}, \dot{y}$ & $\dot{z}$, se hallan las derivadas parciales de las componentes P_x, P_y & P_z , en función de sus articulaciones, por último, se toma la parte rotacional de la MTH final, que, por medio de unos procedimientos, determinamos las velocidades angulares del extremo del manipulador, obteniendo así la matriz "J" [30], por filas dadas por las ecuaciones 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16, en su orden descendiente.

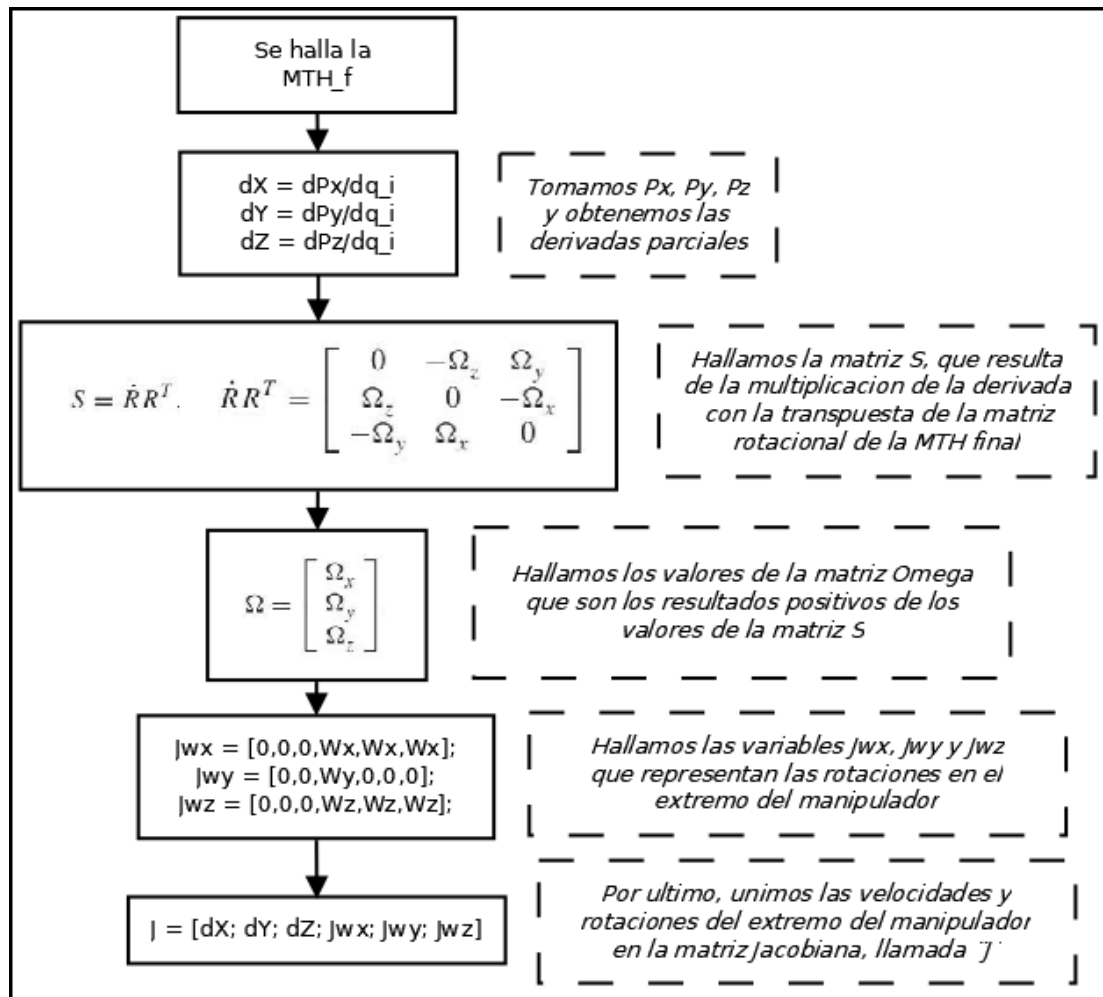


Ilustración 3.14: Diagrama de flujo del proceso para hallar la matriz Jacobiana.
Fuente: Autor

$$[0, 1, \cos(Q3) * (e * \sin(Q4 + Q5) + d * \sin(Q4) + f * \sin(Q4 + Q5 + Q6)), \sin(Q3) * (e * \cos(Q4 + Q5) + d * \cos(Q4) + f * \cos(Q4 + Q5 + Q6)), \sin(Q3) * (e * \cos(Q4 + Q5) + f * \cos(Q4 + Q5 + Q6)), f * \cos(Q4 + Q5 + Q6) * \sin(Q3)] \quad 3.11$$

$$[0, 0, 0, -e * \sin(Q4 + Q5) - d * \sin(Q4) - f * \sin(Q4 + Q5 + Q6), -e * \sin(Q4 + Q5) - f * \sin(Q4 + Q5 + Q6), -f * \sin(Q4 + Q5 + Q6)] \quad 3.12$$



$$[1, 0, -\sin(Q3) * (e * \sin(Q4 + Q5) + d * \sin(Q4) + f * \sin(Q4 + Q5 + Q6)), \cos(Q3) * (e * \cos(Q4 + Q5) + d * \cos(Q4) + f * \cos(Q4 + Q5 + Q6)), \cos(Q3) * (e * \cos(Q4 + Q5) + f * \cos(Q4 + Q5 + Q6)), f * \cos(Q3) * \cos(Q4 + Q5 + Q6)] \quad 3.13$$

$$[0, 0, 0, \cos(Q3), \cos(Q3), \cos(Q3)] \quad 3.14$$

$$[0, 0, 1, 0, 0, 0] \quad 3.15$$

$$[0, 0, 0, -\sin(Q3), -\sin(Q3), -\sin(Q3)] \quad 3.16$$

3.6.1. Análisis:

Al observar los resultados, se puede ver de qué manera influye la velocidad de cada articulación en la velocidad del extremo del manipulador, por ejemplo, al observar la ecuación 3.11, la única articulación que influye directamente en la velocidad en el eje x, es la articulación 2, la articulación 1 no aporta velocidad y todas las demás aportan una componente a esta, en dependencia de la articulación 3.

Estos análisis ayudan a interpretar mejor el modelo diferencial (velocidades del extremo en función de las velocidades articulares o viceversa), cuando se requiere unas condiciones de operación en específico, modificando el diseño del manipulador, hasta obtener las características deseadas. En este caso, no es requerida ninguna especificación.

3.7. Modelo Dinámico:

Como ya se había mencionado anteriormente, el modelo dinámico crece de manera exponencial a medida que el sistema se vuelve más complejo², por lo cual, este se anexará en un documento aparte (Anexo 2), y solo se especificará la metodología para su obtención, reduciendo en gran medida el número de páginas.

Para la obtención de este modelo, se pueden aplicar diversos métodos sistemáticos reduciendo la complejidad del desarrollo del mismo. Uno de estos métodos es el método Lagrange-Euler, en el cual se obtiene un modelo dinámico del manipulador bien estructurado, pero por su complejidad de coste computacional no es el modelo más óptimo para su desarrollo por sistemas de baja potencia computacional. Por lo cual, se aplicó otro método llamado Newton-Euler, una serie de ecuaciones

² Al dotarlo de más grados de libertad, en específico rotacionales [1].



SC-CER96940



recursivas para obtener la posición, velocidad y aceleración de cada eslabón. Este método es planteado por el autor Barrientos, 2007. [1]

Primero se hallan las matrices de rotación de cada eslabón referido al siguiente R_i^{i-1} (rr), y sus inversas R_i^{i-1T} (ri):

Art. 1	Art. 2	Art. 3	Art. 6
RR = [0, 0, 1] [1, 0, 0] [0, 1, 0] RI = [0, 1, 0] [0, 0, 1] [1, 0, 0]	RR = [0, 0, 1] [1, 0, 0] [0, 1, 0] RI = [0, 1, 0] [0, 0, 1] [1, 0, 0]	RR = [cos((pi*q3)/180), 0, -sin((pi*q3)/180)] [sin((pi*q3)/180), 0, cos((pi*q3)/180)] [0, -1, 0] RI = [cos((pi*q3)/180), sin((pi*q3)/180), 0] [0, 0, -1] [-sin((pi*q3)/180), cos((pi*q3)/180), 0]	RR = [cos((pi*q6)/180), -sin((pi*q6)/180), 0] [sin((pi*q6)/180), cos((pi*q6)/180), 0] [0, 0, 1] RI = [cos((pi*q6)/180), sin((pi*q6)/180), 0] [-sin((pi*q6)/180), cos((pi*q6)/180), 0] [0, 0, 1]
Art. 4		Art. 5	
RR = [cos((pi*(q4 - 90))/180), -sin((pi*(q4 - 90))/180), 0] [sin((pi*(q4 - 90))/180), cos((pi*(q4 - 90))/180), 0] [0, 0, 1] RI = [cos((pi*(q4 - 90))/180), sin((pi*(q4 - 90))/180), 0] [-sin((pi*(q4 - 90))/180), cos((pi*(q4 - 90))/180), 0] [0, 0, 1]		RR = [cos((pi*q5)/180), -sin((pi*q5)/180), 0] [sin((pi*q5)/180), cos((pi*q5)/180), 0] [0, 0, 1] RI = [cos((pi*q5)/180), sin((pi*q5)/180), 0] [-sin((pi*q5)/180), cos((pi*q5)/180), 0] [0, 0, 1]	

Se procede a establecer las condiciones iniciales, donde:

$$\omega_o = \text{velocidad angular} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\dot{\omega}_o = \text{aceleracion angular} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$v_o = \text{velocidad lineal} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\dot{v}_o = \text{aceleracion lineal} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$z_o = [0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$p_i = \text{Coordenadas del origen del sistema } (S_i) \text{ respecto a } (S_{i-1}) = [a_i \quad d_i S_i \quad d_i C_i]^T$$

Art. 1 PII = 0 0 q1 + 0.12	Art. 2 PII = 0 0 q2 + 0.14	Art. 3 PII = 0 0 0.2	Art. 4 PII = 0.145*sin(0.017453*q4) -0.145*cos(0.017453*q4) 0
Art. 5 PII = 0.145*cos(0.017453*q5) 0.145*sin(0.017453*q5) 0			Art. 6 PII = 0.13*cos(0.017453*q6) 0.13*sin(0.017453*q6) 0

$s_i =$ Coodenadas del centro de masas del eslabon i respecto al sistema $\{S_i\}$

Art. 1	Art. 2	Art. 3	Art. 4	Art. 5	Art. 6
0,	0,	0,	0,	f/2,	0
0,	0,	0,	-d/2,	0,	0
0,	0,	c/2,	0,	0,	0

I_i
= Matriz de inercia del eslabon i respecto a su centro de masa expresado en $\{S_i\}$

Art. 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Art. 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Art. 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Art. 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Art. 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Art. 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0

En este caso, por simplificaciones, y debido a que no se ejercerán fuerzas en el extremo del manipulador, se sugiere que las masas de los eslabones estarán ubicadas justo en sus centros de masa.

El siguiente paso es obtener las velocidades angulares del sistema, dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\omega_i = \begin{cases} R_{i-1}^i(\omega_{i-1} + z_0 \dot{q}_i) & \text{Si el eslabon } i \text{ es rotacional} \\ R_{i-1}^i(\omega_{i-1}) & \text{Si el eslabon } i \text{ es prismático} \end{cases}$$

Art. 1	Art. 2	Art. 3	Art. 5
0	0	0	$Q3 \cos(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5)$
0	0	$-1.0 \cdot Q3$	$-1.0 \cdot Q3 \sin(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5)$
0	0	0	$Q4 + Q5$
Art. 6			Art. 4
$Q3 \cos(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5 + 0.017453 \cdot q6)$			$Q3 \cos(0.017453 \cdot q4)$
$-1.0 \cdot Q3 \sin(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5 + 0.017453 \cdot q6)$			$-1.0 \cdot Q3 \sin(0.017453 \cdot q4)$
$Q4 + 2.0 \cdot Q5$			$Q4$

El siguiente paso es obtener las aceleraciones angulares, dadas por:

$$\dot{\omega}_i = \begin{cases} R_{i-1}^i (\dot{\omega}_{i-1} + z_0 \ddot{q}_i) + \omega_{i-1} \times z_0 \dot{q}_i & \text{Si el eslabon } i \text{ es rotacional} \\ R_{i-1}^i (\dot{\omega}_{i-1}) & \text{Si el eslabon } i \text{ es prismático} \end{cases}$$

Art. 1 =	Art. 2 =	Art. 3 =	Art. 4 =
0	0	0	$dQ3 \cos(0.017453 \cdot q4) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q4$
0	0	$-1.0 \cdot dQ3$	$-1.0 \cdot dQ3 \sin(0.017453 \cdot q4)$
0	0	0	$dQ4$
Art. 5 =			
$dQ3 \cos(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q4 \cos(0.017453 \cdot q5) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q5 \sin(0.017453 \cdot q4)$			
$Q3 \cdot Q4 \sin(0.017453 \cdot q5) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q5 \cos(0.017453 \cdot q4) - 1.0 \cdot dQ3 \sin(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5)$			
$dQ4 + dQ5$			
Art. 6 =			
$dQ3 \cos(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5 + 0.017453 \cdot q6) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q5 \sin(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5) - \dots$			
$Q3 \cdot Q4 \sin(0.017453 \cdot q5 + 0.017453 \cdot q6) - 1.0 \cdot dQ3 \sin(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5 + 0.017453 \cdot q6) - \dots$			
$\dots 1.0 \cdot Q3 \cdot Q5 \sin(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q6) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q4 \cos(0.017453 \cdot q5 + 0.017453 \cdot q6)$			
$\dots 1.0 \cdot Q3 \cdot Q5 \cos(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q5) - 1.0 \cdot Q3 \cdot Q5 \cos(0.017453 \cdot q4 + 0.017453 \cdot q6)$			
$\dots dQ4 + 2.0 \cdot dQ5$			

De este punto en adelante, solo se nombrarán los pasos, ya que los resultados son muy extensos. El siguiente paso es hallar las aceleraciones cada eslabón (por cada articulación), obteniendo las aceleraciones lineales de los centros de gravedad, dados por la siguiente ecuación:

$$a_i = \dot{\omega}_i \times S_i + \omega_i \times (\omega_i \times S_i) + \ddot{v}_i$$

En los siguientes pasos, se desarrollan de la última articulación a la primera, obteniendo las fuerzas y los pares ejercido en cada articulación, dado por:

$$f_i = R_{i+1}^i f_{i+1} + m_i a_i, \quad \text{Fuerza}$$

$$n_i = R_{i+1}^i [n_{i+1} + (R_{i+1}^{i+1} p_i) \times f_{i+1}] + (p_i + s_i) \times m_i a_i + I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i)$$

Por ultimo, se hallan los pares o las fuerzas que se ejerce en cada eslabon.

$$\tau_i = \begin{cases} n_i^T R_{i-1}^i z_0 & \text{Si el eslabon } i \text{ es rotacional} \\ f_i^T R_{i-1}^i z_0 & \text{Si el eslabon } i \text{ es prismatico} \end{cases}$$

3.8. Desarrollo:

3.8.1. Identificación de las piezas más débiles

El brazo básicamente se compone de dos ensambles, el ensamble básico 1 y el ensamble básico 2, representados por la Ilustración 3.15 e Ilustración 3.16 respectivamente, el cual el segundo se repite para una nueva extensión, para el antebrazo y el brazo, formando así en su totalidad el manipulador.

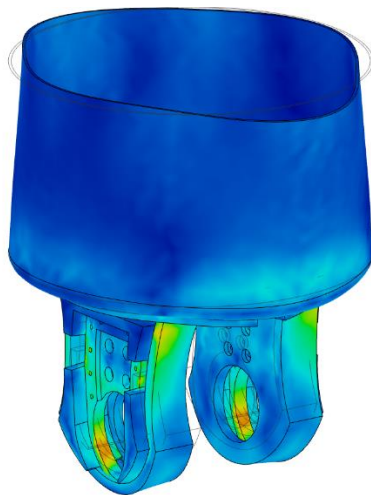


Ilustración 3.15: Emulación de esfuerzos en el ensamble básico i.
Fuente: Autor.

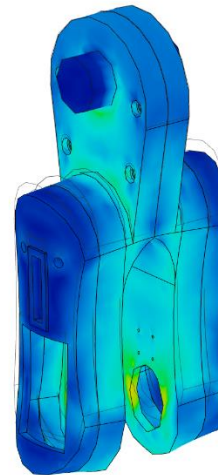


Ilustración 3.16: Emulación de esfuerzos en el ensamble básico ii.
Fuente: Autor.

Para el análisis estático es necesario especificar el material y las fuerzas con las que se ejecutará, por lo cual, para realizar el análisis, se especificó los materiales usados en los antecedentes y los más comunes de accesibilidad en la región, como lo es el plástico ABS, identificando las piezas que soportarán mayores esfuerzos. Para la carga, como desde un principio se especificó en los criterios que deben de soportar una carga alrededor de los 5kg, por lo cual para hacer más evidentes los puntos de fractura y los esfuerzos de las piezas, se decidió en aumentar la carga a 10kg.

Tabla 3.6: Tabla de resultado del análisis de carga de los ensambles. Fuente: Autor

Nombre	Ensamble Básico I		Ensamble Básico II	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Tensión				
Von Mises	0.001158 Mpa	1.141 Mpa	3.963e-04 Mpa	0.7656 Mpa
Primera Principal	-0.377 Mpa	1.836 Mpa	-0.1302 Mpa	1.466 Mpa
Tercera Principal	-1.148 Mpa	0.6566 Mpa	-0.5176 Mpa	0.6542 Mpa
Desplazamiento				
Total	0 Mm	0.04189 Mm	0 Mm	0.01919 Mm
X	-0.02909 Mm	0.02899 Mm	-0.004355 Mm	0.003588 Mm
Y	-0.03732 Mm	0.005398 Mm	-0.01914 Mm	5.473e-05 Mm
Z	-0.02908 Mm	0.02918 Mm	-0.002986 Mm	0.002803 Mm
Fuerza De Reacción				
Total	0 N	1.986 N	0 N	9.661 N
X	-0.835 N	0.8547 N	-0.8323 N	1.031 N
Y	-0.5364 N	1.873 N	-1.977 N	9.606 N
Z	-0.7673 N	1.128 N	-1.477 N	0.9599 N
Deformación				
Equivalente	8.06e-07	8.875e-04	2.41e-07	4.357e-04
Primera Principal	-1.965e-07	9.242e-04	5.817e-08	4.924e-04
Tercera Principal	-5.941e-04	6.816e-06	-2.822e-04	-1.136e-07
Presión De Contacto				
Total	0 Mpa	0.7684 Mpa	0 Mpa	0.5621 Mpa
X	-0.5177 Mpa	0.5223 Mpa	-0.4743 Mpa	0.5596 Mpa
Y	-0.2664 Mpa	0.4011 Mpa	-0.1458 Mpa	0.1244 Mpa
Z	-0.5583 Mpa	0.6335 Mpa	-0.1525 Mpa	0.1144 Mpa

Al hacer los análisis de los resultados de cargas de las piezas, resultados plasmados en la Tabla 3.6, se determina que, el ensamble básico 1, que podemos detallar en la Ilustración 3.17, tiene mayores fuerzas de tensión y una mayor

deformación, haciendo más crítica esta pieza, por lo cual para hacer el análisis correcto de la selección del material se tomará en cuenta dicho ensamble.

3.8.2. selección de materiales

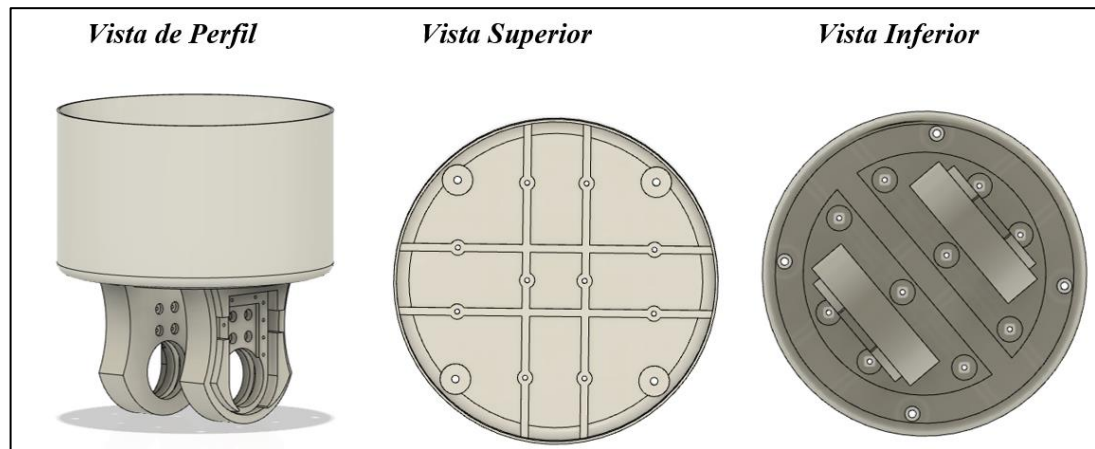


Ilustración 3.17: Vistas de las piezas más críticas del ensamble. Fuente: Autor.

3.8.2.1. Requisitos de diseño: restricciones, objetivos y variables libres:

Con el fin de dar cumplimiento a los criterios establecidos, son tomados en cuenta nuevamente, así como, en base al análisis anterior, se establecen algunas restricciones perfilando hacia materiales normalmente usados para la impresión, en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Tabla paramétrica para la selección de materiales. Fuente: Autor.

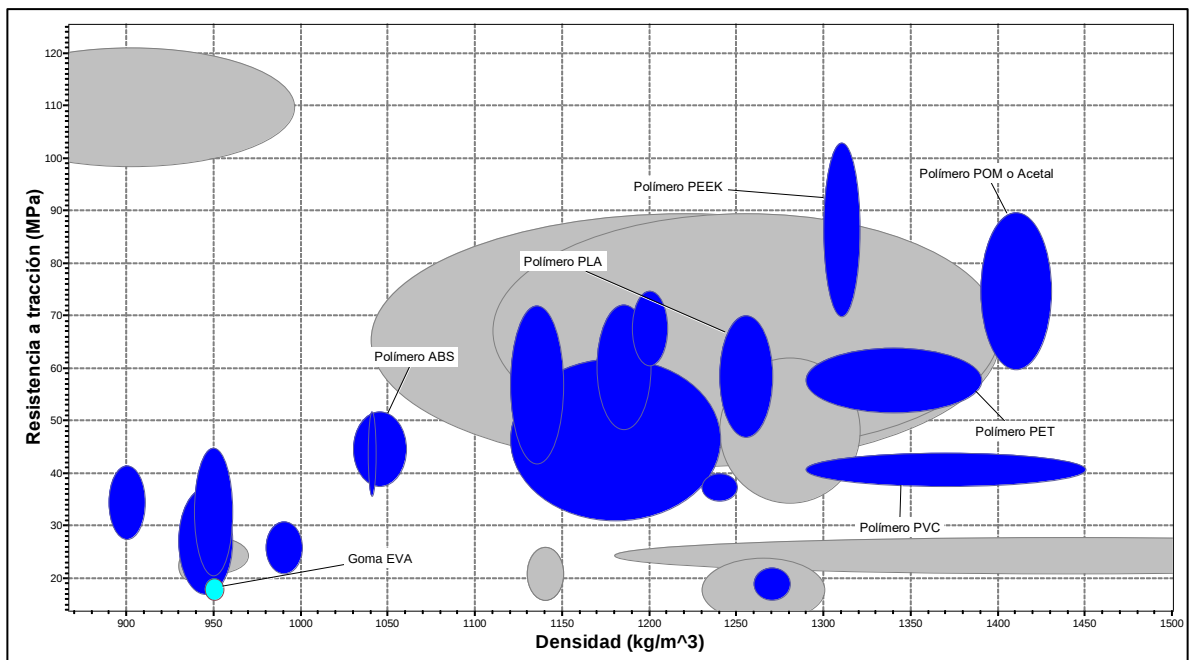
Restricciones	• Relación de dimensiones: se debe respetar las dimensiones según modelo CAD • Densidad del material $< 1500 \text{ kg/m}^3$ • Resistencia a la tracción $> 14 \text{ MPa}$ • Fuerza máxima 100n • Limite elástico (l.e. $> 10 \text{ MPa}$)
Objetivo y Criterios	• Se requiere de un material ligero con el fin de no diseñar un manipulador excesivamente pesado y sea fácilmente transportado. • El material debe de tener una alta resistencia a la tracción, ya que estas serán las cargas que en su defecto soportará. • Se requiere un alto coeficiente de seguridad entre las piezas para que no se vayan a partir con facilidad sometidas bajo cargas.

- Este material debe de ser fácilmente de adquirir (accesibilidad), con disponibilidad en ciudades cercanas, para reducir tiempos y con una facilidad de procesabilidad para costos en su producción.
- Preferiblemente que el material sea de bajo costo para su fácil adquisición.

3.8.2.2. Preselección de materiales:

Con la ayuda del programa Ces EduPack, el cual es un programa que recopila la información relacionada acerca de cada uno de los materiales más utilizados en ingeniería, alojados en sus bases de datos, estos materiales se pueden comprar por medio de múltiples cartas de materiales bajo unos criterios, facilitando la selección adecuada del material.

Al aplicar las restricciones, así como al aplicar algunos objetivos de manera cuantitativo a valores estimados, se procede a comparar en la primera carta de selección, mostrada en la *Gráfica 3.1*, la resistencia a la tracción de los materiales junto con sus densidades, con el fin de seleccionar un material con menor peso y mayor resistencia.



Gráfica 3.1: Comparación de Materiales según su resistencia a la tracción vs densidad. Fuente: Autor.

En la comparación de la *Gráfica 3.1*, se observan materiales tales como algunos derivados del caucho y en su gran mayoría polímeros, que son materiales referentes usados en proyectos similares.

3.8.2.3. Matriz de ponderación (lista de materiales que cumplen con las restricciones)

Por medio de una tabla, Tabla 3.8, se procede a comprar los materiales que cumplen con las condiciones anteriormente descritas, con el fin de determinar el material mas conveniente.

Tabla 3.8: Tabla de puntuación para la selección del material. Fuente: Autor

Material	Objetivo: (D Kg/M3)		Criterio R.T. (Mpa)		Criterio L.E. (Mpa)		Criterio Precio (Kg)		Criterio Accesible (Facilidad)		Total
PLA	1240	4	47	2	55.2	4	75k	6	fácil	6	22
PET	1290	3	51.8	3	47.2	3	73k	6	fácil	6	21
ABS	1030	6	37.8	1	34.5	1	79k	5	fácil	6	19
PEEK	1750	1	119	5	70	5	>300k	2	medio	3	11
PVC	1290	3	37.7	1	37.6	3	180k	3	difícil	1	11
Poliéster	1040	6	41.4	2	33	1	-	-	medio	3	12

Escala de 1 a 6. (donde 1 el menos considerable y el 6 el más conveniente)

3.8.2.4. lista de materiales que cumplen con las restricciones según puntuación de la matriz ponderada:

Al observar la tabla 3.8, se determinan 3 materiales, dados en la tabla 3.9, que por su puntuación están equilibrados, por lo cual, se debe de realizar un análisis más profundo con el fin de determinar verdaderamente el material más optimo.

Tabla 3.9: Rango de puntuación de los materiales convenientes. Fuente: Autor.

1	Acido poli láctico (PLA)
2	Tereftalato de polietileno (PET)
3	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)



3.8.2.5. Elección final del material:

Acido poli láctico (PLA)

Al realizar el análisis se determina que:

El material acido poli láctico o PLA se encuentra en el mercado de una manera muy accesible, siendo de bajo costo, con presentaciones desde 200g hasta 1500g, con características físicas apropiadas para la elaboración de piezas complejas por medio de distintos procesos de fabricación, como lo es la fabricación aditiva, uno de los procesos más conocidos.

Este bioplástico según (Meneses, g. & Aguilar, s. 2022) es uno de los principalmente usados como materia prima para las impresiones en 3D, este material se encuentra en forma de filamentos o gránulos para los procesos de fabricación por inyección.

Al seguir investigando acerca de este material, se encontró nuevas comparativas en el ámbito industrial, observada en la Tabla 3.10, en donde nuevamente se evidencia que, aunque existan algunas diferencias en las tablas comparativas, el plástico PLA, sigue teniendo mejores propiedades mecánicas frente a otros plásticos comúnmente usados en la industria.

Cabe resaltar que este material es muy mal conductor de calor, según el estudio realizado por K. Arunprasath. et al. 2022, la disipación de energía en forma de calor para el plástico ABS comienza a partir de los 110 °C, esta es una de las buenas señales de la técnica de fabricación y la calidad de construcción del ABS. Pero al analizar los resultados del PLA, solo se encuentra a 58 °C, lo que muestra la pobre capacidad de disipación de energía del polímero en condiciones de carga dinámica. [28]

Ahora, si bien el uso del plástico en la actualidad es un problema a nivel mundial, no se debe hacer partícipes contribuyendo de manera negativa al medio ambiente, y es aquí, donde entra otro concepto o propiedad de este plástico, al ser un bioplástico, en presencia de otros aditivos, su degradación es posible, y al cabo de 120 días, se obtiene una pasta inerte del plástico PLA, que no contribuye de manera negativa al medio ambiente [11]



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co

	PLA	PS	i-PP	PET
Densidad relativa	1.24	1.04-1.06	0.91	1.37
Claridad	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente
PROPIEDADES MECÁNICAS				
Resistencia a la tracción (MPa)	48-110	34-36	21-37	47
Módulo de tracción (GPa)	3.5-3.8	2.9-3.5	1.1-1.5	3.1
Elongación (%)	2.5-100	3-4	20-800	50-300
Impacto Izod 23 °C (J/m)	13		72	79
PROPIEDADES TÉRMICAS				
Temperatura de transición vítrea (°C)	60	95	0	75
Temperatura de fusión (°C)	153		163	250
Temperatura de Vicat (°C)	55-60	84-106	80-140	74-200
Temperatura de procesamiento (°C)	210	230	225	255

Tabla 3.10: Características del PLA en comparación de otros plásticos. Fuente: Meneses, G., & Calle, S. A. 2020 [11]

3.8.3. especificaciones de fabricación

Para la creación del prototipo, se realizará por medio de la fabricación aditiva, esta es una tendencia reciente en los procesos productivos debido a sus múltiples ventajas. Se puede definir como el proceso de producción de piezas mediante la deposición de material capa por capa. Ha sido un tema de intenso estudio y revisión por parte de muchos investigadores. [27]

Unos de los ítems más importantes para la creación de las piezas por la fabricación aditiva, son los parámetros con lo que la maquina diseñará la pieza, tales como velocidad del cabezal, diámetro del filamento, diámetro de la boquilla, densidad de relleno, temperatura del extrusor, temperatura de la superficie de trabajo, altura de capas, entre otras variables.

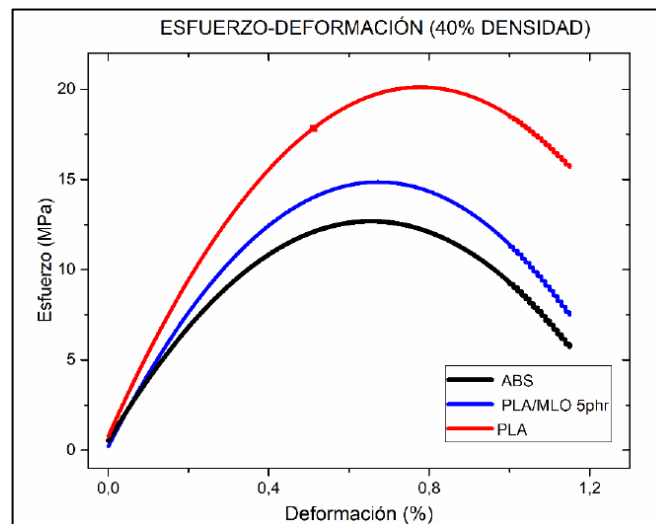
Aunque, sin duda, el parámetro más importante, ya que influye directamente en la resistencia, es la densidad de relleno, ya que no se cuenta con un simulador donde se pueda variar las densidades de las piezas, para obtener el parámetro adecuado o ideal, se cayó en la necesidad de analizar otros documentos y pruebas realizados por otros autores, con el fin de reducir tiempos en realizar ensayos destructivos buscando las condiciones más optimas.

Al hacer el nuevo análisis de cargas estáticas a la pieza bajo las propiedades del material seleccionado, no se llega a obtener una gran diferencia, o una diferencia notoria con los resultados de la Tabla 3.6, del informe agregados en los anexos.

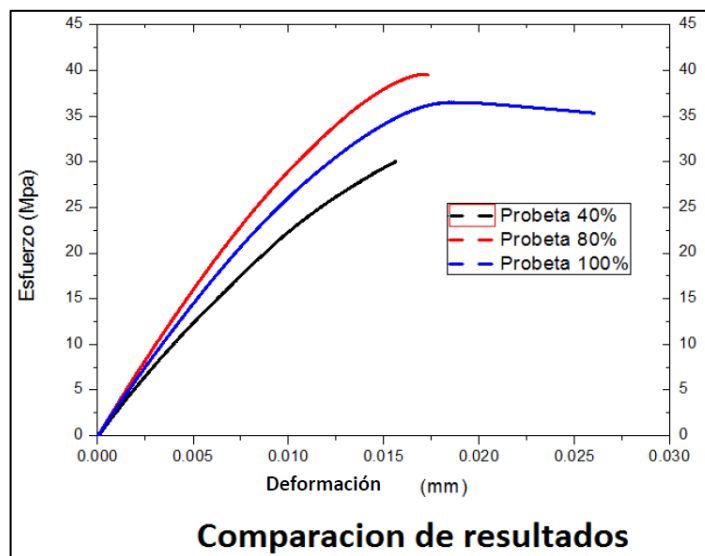
En estos estudios de tensión estática, con cargas de 10 kg, se obtuvo un coeficiente de seguridad alrededor de 15, (ver informes en los anexos, Anexo 3). Por ende, se puede bajar la densidad de relleno de las piezas a la hora de su impresión, según el estudio de (Pacheco, g. 2019) [12], en su estudio de tracción, es evidente una reducción en la resistencia del material PLA, proporcional a la densidad de relleno con el que este fue creado, al cual a una densidad del 40% se obtienen los resultados de la Gráfica 3.2.

Al analizar otros resultados de estudios similares como (Pérez et al. 2018), de la gráfica 3.3, se obtuvieron valores muy similares a la misma densidad de relleno del 40%, así mismo los autores propone que a una mayor densidad de relleno, por encima del 80%, la resistencia del material comienza a descender, y proponen una densidad del 50% al 60% para la impresión.

En base a estos resultados y análisis, se puede optar por una densidad de relleno del 40%, ya que, aun así, con dicha resistencia al esfuerzo de tracción, tomando la menor del promedio, el material lograría soportar las cargas de 10kg, aunque desconociendo el verdadero factor de seguridad, por lo cual estos estudios se sobredimensionaron, ya que el criterio principal es que la estructura pueda aguantar cargas alrededor de 5kg, expuestos en la Tabla 3.3.



Gráfica 3.2: Curvas de esfuerzo de deformación del ABS, PLA y PLA/MLO 5phr, al 40% de densidad. Fuente: Pacheco, G. 2019



Gráfica 3.3: Curvas de esfuerzo de deformación del PLA a diferentes densidades de relleno. fuente: Pérez et al. 2018 [13]

3.9. Torques

Con el fin de hallar el torque necesario, se procede a realizar una tabla con los pesos ponderados de los eslabones (peso de sus cuerpos y demás elementos), dada por la Tabla 3.11, para identificar el mayor torque que ejerce una articulación, para este caso, la articulación 4 es la que requiere un mayor torque.

Tabla 3.11: Estimación del torque máximo sobre la articulación 4. Fuente: Autor

Art.	Relación De Pesos (Ítems)	Peso Ponderado (Carga De La Articulación) (Gms)	Distancia Al Centro De Masa Desde La Art. (Cm)	Torque Necesario (Kg*Cm)	Torque Total (Kg*Cm)
4	Carga	200	42	8,4	36,525
	Herramienta	120	38	4,56	
	Motor De Cierre	60	35	2,1	
	Acople Para Herramienta	30	30	0,9	
	Motor De Giro De Herramienta	60	30	1,8	



	Motor De Giro De Articulación 6	60	30	1,8	
	Cuerpo De La Articulación 5	450	23,5	10,575	
	Motor De Giro De Articulación 5	120	14,5	1,74	
	Cuerpo De La Articulación 4	450	9	4,05	
	Peso Distribuido A Levantar	1570			

Con el fin de poder alzar una mayor carga con esta articulación, se dispone una configuración de doble motor, sobredimensionando la capacidad necesaria. otro punto a tener en cuenta, es el peso de los motores de giro de las articulaciones, el cual al no tener seleccionado uno en específico, se le dio un valor típico de los existentes en el mercado.

Se debe sobredimensionar las capacidades de carga, para no caer en la necesidad de implementar el modelo dinámico para la selección de los actuadores por su complejidad, garantizando que el sistema no se fuerce al realizar las trayectorias.

3.10. Futuras Actualizaciones

Con el fin de mejorar diferentes aspectos o adaptar el manipulador en otros entornos, el manipulador está ensamblado por múltiples piezas, cada una de estas cumple una tarea en específico, es por esto que se da la posibilidad de jugar con algunas pocas piezas para obtener mejoras.

La actualización más pertinente a consideración, es la posibilidad de adaptar diferentes motores, con diferentes características como torques, velocidades y dimensiones, afectando los límites en que cada articulación se pueda desplazar, bajando o subiendo los costos de la implementación, solo con cambiar las dimensiones o reestructurando las piezas ASM y APM, identificadas en la Ilustración 3.6.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



4. CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CINEMÁTICO

En el siguiente capítulo se plasma todo el desarrollo llevado a cabo desde la conceptualización del diseño hasta la validación del control cinemático, tratando de enfocar en los puntos más importantes a consideración del autor.

Este capítulo aborda el sistema de control cinemático, por medio de las ecuaciones planteadas por algunos autores como (I. Biagiotti & c. Melchiorri. 2008), o (a. Barrientos, 2007), la selección de los dispositivos acorde a las necesidades mecánicas establecidas anteriormente, así como la creación del sistema de auto ajuste para las etapas previas al control del manipulador. esto con el fin de dar cumplimiento al control cinemático

4.1. Criterios

Con base en algunas características vistas en los antecedentes, se plantean unos criterios de manera general para este capítulo, que podemos detallar en la Tabla 4.1, esto con el fin de desarrollar un sistema de control cinemático más fiable.

Tabla 4.1: Criterios de selección para el capítulo II. Fuente: Autor.

Criterios Del Sistema De Control		
Componente	Concepto	Detalles
Criterios Eléctricos Y Electrónicos	Estandarización de voltajes	Seleccionar dispositivos con rangos de voltajes estandarizados, tales como 3.3, 5, 12 y 24 v, con el fin de adquirir fuentes de poder de fácil accesibilidad
	Dispositivos de conmutación rápida	Los elementos deben de tener frecuencias de trabaja altas, para un mayor procesado de información en tiempo real
	Bajo consumo energético	Se requieren dispositivos con bajo consumo energético y una baja disipación de energía, evitando así, la necesidad de tener grandes fuentes de poder
Criterios De Control	Exactitud	Garantizar que la información transmitida y recibida de ambas partes sea la correcta
	Adaptabilidad y compatibilidad tecnológica	Los elementos a considerar deben de ser compatibles entre sí, y garantizar que futuras actualizaciones no impliquen su cambio
	Controlabilidad y fiabilidad	



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Continuación de la Tabla 4.1

Criterios De Gestión De Proyecto	Dispositivos de bajo costos	de	Comprar dispositivos para obtener una referencia entre calidad vs precio.
	Curva de aprendizaje	de	Seleccionar los elementos que requieran una menor curva de aprendizaje

4.2. Alcances

4.2.1. Acotaciones

- El desarrollo del control cinemático, así como su puesta en marcha, quedará restringida al volumen de trabajo, que en su efecto será el volumen de su caja de protección.
- No se aceptarán valores de las articulaciones donde se pueda ver afectado el manipulador por trabajos fuera de su volumen especificado, dejando como límite permisible de cualquier punto a un área del cubo de mínimo 5 cm
- Los tiempos de ejecución de las trayectorias quedarán limitadas a las velocidades máximas establecidas de los actuadores, siendo un 90% de las velocidades máximas de estos.
- No se superará en un 80% la carga de los actuadores, con el fin de evitar que estos se fatiguen o se calienten por usos al limite
- Los tiempos de espera ingresados por el usuario deberán de ser en unidades de segundos
- El sistema de concatenación de puntos quedará limitado a un máximo de puntos, que se especificarán dependiendo de la respuesta del controlador
- Para la selección de materiales, dispositivos y otros elementos, se considerará el criterio de 'accesibilidad' haciendo referencia a la disponibilidad que tiene la entidad en proporcionar dicho elemento

4.2.2. Alcances

- Poder visualizar detalladamente las gráficas de cada actuador, así como las de todo el sistema por trayectorias
- Realizar el sistema de auto ajuste con el fin de no realizar ninguna maniobra o proceso previo al control del manipulador
- Ejecutar trayectorias con múltiples puntos en el plano, concatenando toda la trayectoria



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



4.3. Sistema de Control de Actuadores

Como ya se había expresado anteriormente, se sabe que tipos de actuadores son los más acordes para usar en cada articulación, sus limitaciones y sus cargas, ahora seleccionaremos los actuadores según los criterios sugeridos teniendo en cuenta las restricciones del título anterior para la selección de cada actuador.

4.3.1. Selección de actuadores

4.3.1.1. Selección para la Articulación 1 y 2:

Para este tipo de movimientos, es muy usual ver actuadores tales como motores paso a paso, se observa comúnmente aplicado en los sistemas donde existe la necesidad de realizar movimientos prismáticos con un alto torque y precisión, usando desde un simple juego de engranes con poleas, hasta sistemas de rieles dependiendo de sus dimensiones. Algunos ejemplos simples se pueden observar en el sistema de las impresoras, impresoras 3D y algunas CNC.

Al analizar de las referencias más usadas para este fin, se encontró que destacan 3 tipos de motores paso a paso, estos se caracterizan por cumplir la norma Nema, por su alto torque, su bajo deslizamiento alrededor del 5%, por la facilidad de bloquear el par del rotor y por su alta resolución de pasos:

1. Nema 17:
2. Nema 23:
3. Nema 34:

4.3.1.2. Selección de actuadores para la articulación 1 y 2:

Para realizar la selección de los actuadores correspondientes a las articulaciones 1 y 2, se tomaron en cuenta los 3 tipos de motores paso a paso anteriormente mencionados. Para poder compararlos, se dispone de la Tabla 4.2, en donde se le asigna un valor a cada característica que se tomó como criterio de selección.

Para establecer los criterios de selección, interesa un actuador con un alto par, con el fin de sobredimensionar el torque necesario para realizar los movimientos de las guías, que estos cuenten con un bajo peso corporal, reduciendo el peso del banco de trabajo, así como sus rangos de funcionamiento para obtener una mejor resolución, además de un contraste entre precios, disponibilidad y costos complementarios.

Nota:

- Cada uno de estos motores necesitan de controladores para su uso, por lo cual se necesitará saber de ante mano los costos adicionales para ser usados.
- En la tabla de selección se especificarán los criterios para su puntuación



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Tabla 4.2: Tabla de puntuación para la selección de los actuadores de las articulaciones 1 y 2³. Fuente: Autor.

Ref.:	Torque		Amp. A.		Ang. De Paso		Accesib. Local		Dimens. (mm)		Peso (Kg)		Precio		Costo Driver		Tot
nema 17 	0.59	1	2	4	1.8 ±5%	5	Media	3	42 x 42 x 48	4	0.4	5	Bajo	5	Med	3	30
nema 23 	1.9	4	2.8	3	1.8 ±5%	5	Alta	5	56 x 56 x 76	3	1.05	3	Bajo	5	Med	3	31
nema 34 	3	5	4.2	2	1.8 ±5%	5	Media	3	56 x 56 x 112	2	1.5	1	Medio	3	Alto	1	22

Como se puede observar en la tabla 4.2, el motor con más puntuación respondiendo a los criterios establecidos fue el **Nema 23**, por lo cual, se tomará como actuador para las articulaciones 1 y 2. Sus dimensiones se especifican en la Ilustración 4.1, tenidas en cuenta para el acople al volumen de trabajo, así como la Tabla 4.3, que contiene las características más relevantes a tener en cuenta en su implementación.

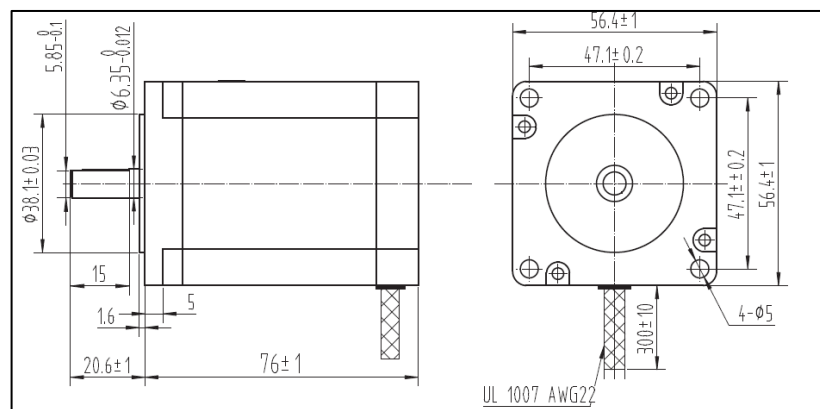


Ilustración 4.1: Dimensiones del motor paso a paso Nema 23. Fuente: Changzhou Songyang Machinery & Electronics

³ La medición se realiza en una variable calificativa de 1 a 5, que tiene relación con las cifras en las hojas de datos de cada Motor



Tabla 4.3: Características del Nema 23. Fuente: Autor.

Ítem	Unidades	Valor
Ángulo De Paso	°	1.8
Precisión De Posición	%	-
Numero De Fases		2
Temperatura Máxima	°C	80
Inercia De Rotor	gcm ²	-
Temperatura De Trabajo (Ambiente)	°C	-10 ~ 50
Clase De Aislamiento		b
Peso	Kg	1.05
Par De Sostenimiento	Nm	1.9
Amperaje	A	2.8
Resistencia De Fase	Ohms	1.13
Voltaje/Fase	V	3.2

4.3.1.3. Selección de Actuadores para la articulación 3, 4, 5 y 6.

En este tipo de articulación, tipo rotacional, se observa que en su gran mayoría se usan actuadores tales como servos motores, por su exactitud y facilidad de control en un determinado rango. Para ello, se usarán dos pares de motores como actuadores de la articulación 4 y 5, ya que, al hacer los análisis de cargas, estas son las articulaciones en las se ejerce un mayor torque.

En La Tabla 4.4, se plasman los criterios tenidos en cuenta para la selección, estos se tomaron de acuerdo a las especificaciones de las hojas de datos que proporcionaban en su mayoría los fabricantes, además de un criterio adicional llamado accesibilidad, comentado anteriormente.

Nota:

- Para la selección se considerarán motores de dimensiones pequeñas, como máximas dimensiones, que logre encajar dentro de la pieza **SFB** (Ilustración 3.6) por medio de un acople diseñado a la medida.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
 www.unipamplona.edu.co

Tabla 4.4: Tabla de puntuación para la selección de los actuadores de las articulaciones 3, 4, 5 y 6. Fuente: Autor

Ref.	Par (Kg* C° m)		Volt. (V)		Amp. De Bloq. (A)		Peso (Gms)		Tamaño (X, Y, Z) (Mm)		Ang. De Contr. ($^{\circ}$)		Protocolo De Comunic.		Feed- Back		Accesib.		Vel. De Comun. (Baud.)		Total
a1-16 	25	3	12	9	0.5	9	60	8	50, 32, 40.5	7	0 - 330	9	UART	5	si	9	alto	9	9.6k - 115k	7	68
ax-12 	15.3	1	12	9	1.5	5	53	9	32, 50, 40	7	0 - 300	8	UART	5	si	9	med	5	7.8k - 1m	9	66
ds3230 	30	3	6.5	3	3.8	2	58	8	40, 20, 40.5	9	0 - 270	5	n/d pulsos	8	no	2	bajo	2	50 - 330 (hz)	4	42
mg996r 	11	1	6	5	2.5	3	55	8	40.7, 19.7, 42.9	8	0 - 180	3	n/d pulsos	8	no	2	bajo	2	50 (hz)	4	44
td-8120 	22	3	7.2	2	2.7	3	56	8	40, 20, 40	9	0 - 270	5	n/d pulsos	8	no	2	bajo	2	50 (hz)	4	46
spt543 5lv 	35	4	6	5	3.5	2	70	7	40.5, 20, 40.5	9	0 - 180	3	n/d pulsos	8	no	2	med	2	50 (hz)	4	46
ds5160 	70	9	8.4	1	6.2	1	158	1	65, 30, 48	0	0 - 280	6	n/d pulsos	8	no	2	bajo	2	50 - 330 (hz)	4	33

Al hacer la valoración de la Tabla 4.4 para la selección de los actuadores de la articulación 4, 5 y 6, el servo con la referencia completa XYZRobot a1-16, es el motor con mayor puntuación. Aunque se presenten otros servos con mejores características y muy a la par en puntuación al seleccionado, no cumplen con ciertos criterios, siendo actuadores inservibles, ya que se debe rediseñar el prototipo para aptarlos.

En la ilustración 4.2 e ilustración 4.3, se pueden observar las dimensiones y partes que conforman este servomotor. Además, en la tabla 4.5, se pueden observar las características más relevantes del servomotor seleccionado.

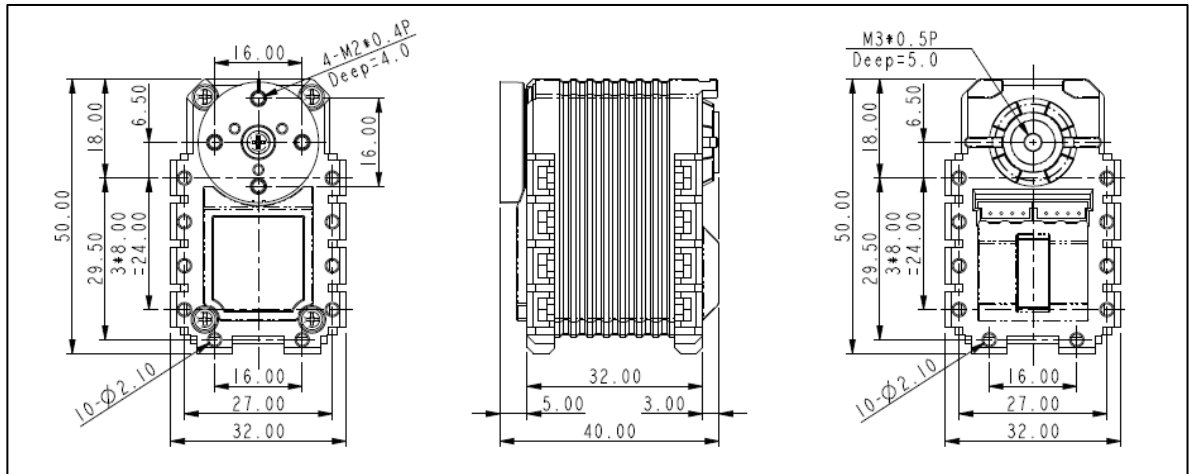


Ilustración 4.2: Dimensiones del servo XYZRobot a1-16. Fuente: Pololu Robotics & Electronics.

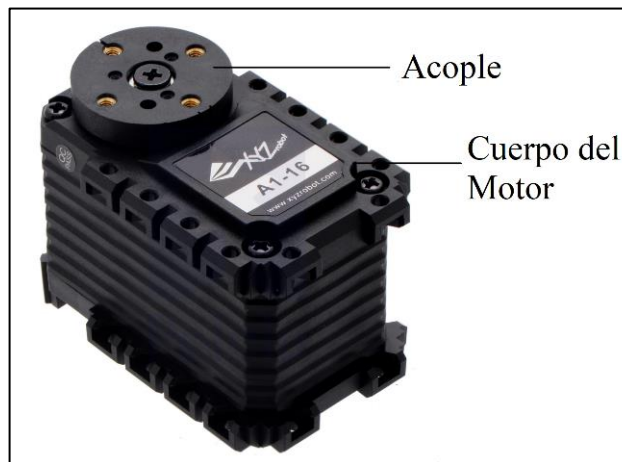


Ilustración 4.3: imagen y partes del servo XYZRobot a1-16. Fuente: Autor.

Tabla 4.5: Características relevantes del servo XYZRobot a1-16. Fuente: Autor.

Ítem	Unidades	Valor
Voltaje De Operación	v	12
Velocidad Máxima	rpm	70±10
Torque De Sostenimiento	kg.cm	25
Rango De Control Efectivo	°	0 - 330
Tipo De Protocolo	Comunicación Serial (8, n, 1)	Dúplex UART 5v TTL
Velocidad De Comunicación	baudios	9600, 19200, 57600, 115200
Información De Feedback	-	Posición, Temperatura, Corriente, Voltaje, etc.
Dimensiones	mm	50 x 32 x 40.5
Peso	gramos	60 ± 2
Corriente De Sostenimiento	A	0.5
Temperatura De Trabajo	°C	-10 - 60

4.3.2. Selección de dispositivos adicionales

4.3.2.1. Formas de control de los dispositivos seleccionados

Nema 23: De acuerdo con la anterior sección, es necesario disponer de controladores (Driver de paso), para los motores paso a paso, que dependerán de la corriente de estos motores. Pero solo los drivers no harán funcionar los motores, ya que solo hace girar motor un paso por cada pulso que le llega a este, aquí es donde entra en juego el controlador, que se encargará de enviar la cantidad de pulsos para realizar las vueltas requeridas. Estos pulsos viajan en una sola cadena, formando un tren de pulsos, que el controlador enviará por un enlace al driver. El controlador normalmente son tarjetas de desarrollo, en donde se programa las especificaciones del tren de pulsos.

XYZRobot A1-16: Para estos motores solo es necesario de disponer de un controlador, ya que esos motores poseen microcontroladores internamente, que se encargan de posicionar adecuadamente el motor en los ángulos deseados. El controlador solo se encarga de enviarle el valor de la posición requerida, siempre y

cuando su escritura de datos cumpla el protocolo UART establecido por defecto para su comunicación.

4.3.2.2. selección de driver de paso

Los criterios de selección planteados, corresponden a las características y especificaciones, a consideración relevantes, en función de la información facilitada en las hojas de datos, estos criterios se establecen en la Tabla 4.6, para la puntuación de cada dispositivo.

Criterios como la Frecuencia y la Resolución de Paso, facilita dimensionar aproximadamente las velocidades máxima de giro, así como su corriente máxima y rangos de voltaje de alimentación del motor, perfilan hacia algunos tipos de motores.

Tabla 4.6: Tabla de puntuación para la selección del driver de paso para los motores Nema 23. Fuente: Autor.

Ref.		Frec. (Hz)		Amp. Máxima (A)		Rango s De Volt. (V)		Volt. De Entra da (V)		Costo (Cop\$)		Acces.		Res. De Pasos		Total
Tb65 60		20 k	4	3	3	10 - 35	9	5	9	45k	9	Bajo	2	1, 1/2, 1/8, 1/16	7	43
Tb66 00 Driver		20 k	4	4.5	9	10 - 50	9	5	9	50k	8	Med	5	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16	9	53
Tb65 60 Md43 0		10 0k	9	3	3	12 - 34	9	5	9	65k	5	Bajo	2	1, 1/4, 1/16	3	46
Tb66 00 4a		20 k	4	4	6	9 - 42	9	5	9	65k	5	Med	5	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16	9	51
Isd04		12 k	1	4	6	12 - 36	9	-	-	120 k	2	Bajo	2	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16	9	29

Al observar la Tabla 4.6, se concluye, que el controlador de pasos con mejores características según los criterios planteados, es el driver de paso Modulo Tb6600, que se muestra en la Ilustración 4.4, así como alguna de sus especificaciones que serán tenidas en cuenta para el diseño en la Tabla 4.7.

características:

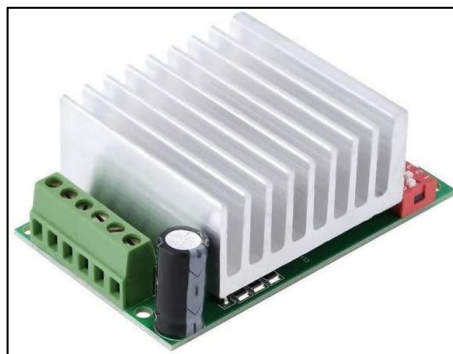


Ilustración 4.4: Imagen del driver de paso tb6600. Fuente: MercadoLibre.com

Tabla 4.7: Características del driver de paso tb6600. Fuente: Autor.

Ítem	Unidades	Valor
Volate De Carga	v	10 - 50
Voltaje De Alimentación	v	5
Corriente Pico (<100ms)	a	5
Corriente Nominal	a	4.5
Frecuencia Máxima De Paso	khz	20
Tecnología		forward y control de rotación inversa circuito de apagado térmico detección de sobrecargas de corriente función stand-by
Resolución De Angulo De Paso	°	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Resistencia De Funcionamiento (Ron)	ω	0.4
Resistencia Pull-Down	ω	100 kw

4.3.2.3. Selección de controladores esclavos

Para la selección de los controladores, se debe de trabajar con tarjetas de desarrollo, donde se programará las señales necesarias para la comunicación con los dispositivos por medio de un código.

En la tabla 4.8, se realiza la comparación de las características de los dispositivos para la selección de los controladores esclavos, en donde se criterios tales como: la frecuencia de procesamiento, el porcentaje relativo de la comunidad y librerías disponibles, así como las características de procesamiento entre otros parámetros.

Consideraciones:

- Entre las placas de desarrollo más usadas para este fin en los antecedentes, son los Arduino uno y Arduino mega, por su facilidad de adquisición y su bajo costo. Cabe aclarar que existen algunas tarjetas con mejores características y más ideales para estas funciones, pero por su baja accesibilidad y una curva de aprendizaje media, impactarían negativamente en los tiempos de ejecución del proyecto, por lo cual no se consideraron para su selección, tales como ESP32, Raspberry Pico, W806, entre otras.
- La comunicación entre el driver del motor y la tarjeta de desarrollo solo se hace a través de una conexión de punto a punto por medio de dos enlaces: para los servomotores A1-16 dispone de un enlace para Tx y otro para Rx, para los drivers tb6600 solo dispone de un enlace para "step" y otro para "dir".

Tabla 4.8: Tabla de puntuación para la selección de controladores esclavos para el control de los actuadores. Fuente: Autor

Ref.	Frec. (Hz)		Comun. / Librerías		Memoria		Curva De Aprendiz.		Voltaje (V)		C		Acces. ib.		Total
Arduino Uno 	16m	2	Alta	9	SRam: 2kb EEProm: 1kb	2	Baja	9	5 - 12	9	45k	9	Alt o	9	49
Arduino Mega 	16m	2	Alta	9	SRam: 8kb EEProm: 4kb	5	Baja	9	5 - 12	9	100k	5	Alt o	9	48

Continuación de la Tabla 4.8

Raspberry Pi4	1.5g	9	Alta	9	Ram: 4gb Rom: 256mb (Exp)	9	Medi a	5	5	5	730k	1	Alt o	9	47
---------------	------	---	------	---	------------------------------	---	-----------	---	---	---	------	---	----------	---	----

Al observar la tabla 4.8, los dispositivos comparados tienen a tener buenas características, obteniendo puntuaciones cercanas, pero el dispositivo con mayor puntuación es el Arduino Uno, que se muestra en la Ilustración 4.5, por lo cual, se procede a detallar alguna de sus características para su implementación en la Tabla 4.9.



Ilustración 4.5: Imagen del Arduino uno. Fuente: Arduino

Tabla 4.9: Características del Arduino uno. Fuente: Autor

microcontrolador	atmega168
voltaje de operación	5 v
voltaje de entrada (recomendados)	7 – 12 v
voltaje de entrada (limites)	6 – 20 v
pinos analogos	6
pinos digitales	14
corriente por pinos de i/o	40 ma
memoria flash	32 kb

sram	2 kb
eeprom	1 kb
velocidad de reloj	16 mhz

Consideraciones para la Implementación:

Debido a que el control maestro enviara los valores articulares al controlador esclavo y estos a su vez reciben estos datos que transforman a un valor entre 0 a 1024 en hexadecimal, conversión necesaria para la implementación de los servos, haciendo que está conversión, además de la posición o la conversión análoga entre grados y su valor de posición requiera, demore aproximadamente un intervalo de 100 ms (milisegundos) por los 6 actuadores en total que tendrá el brazo, para el movimiento rotacional de las últimas cuatro articulaciones. Los tiempos de demora se pueden observar en la Ilustración 4.6, en donde se le envía al programa, en el cual se ejecuta el código anexado (remitirse al Anexo 4), los valores articulares 135, 89, 97 y 120, correspondientes a las articulaciones 3, 4, 5 y 6, en repetidas ocasiones, obteniendo el tiempo de demora de ejecución.

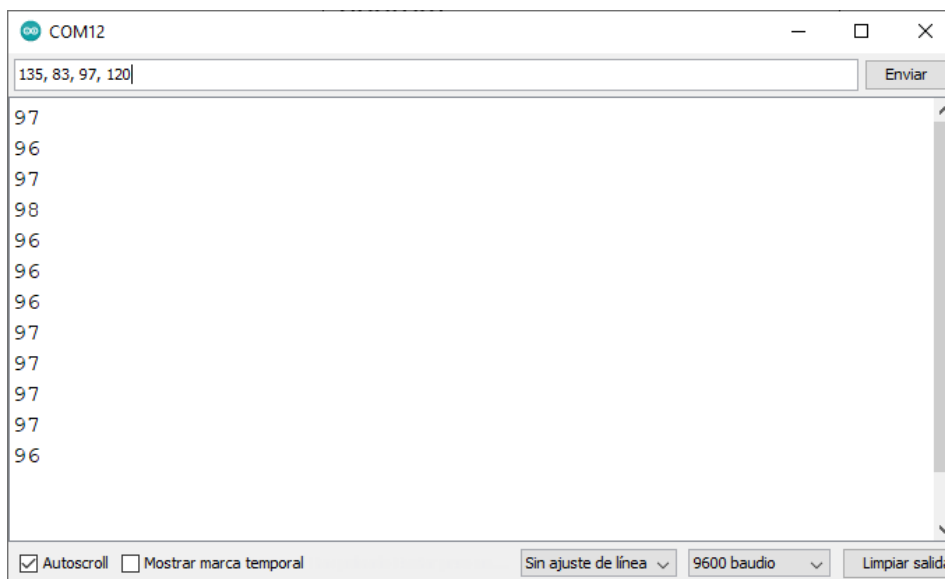


Ilustración 4.6: Tiempos de demora en la ejecución del código de procesado de las articulaciones 3, 4, 5 y 6. Fuente: Autor

Por otro lado para las dos primeras articulaciones es necesario tener un contador de paso para el valor de cada articulación, haciendo necesario una conversión o múltiples conversiones para obtener un aproximado del punto actual o el valor articular actual de cada una de las articulaciones iniciales (1 y 2), necesitando aproximadamente un tiempo de ejecución de 150 ms (milisegundos), por lo cual, si se dejan los dos códigos en un solo dispositivo, es necesario un proceso de lectura



mayor extendiendo el tiempo de ejecución alrededor de los 300 ms (milisegundos), los cuales se verán reflejados en un salto muy brusco en las trayectorias desviando el extremo el manipulador de la trayectoria deseada, obteniendo posiblemente un mayor error.

Por esto, se decidió separar en un valor aproximado de tiempo, las ejecuciones de cada articulación, un primer dispositivo controlador desarrollará el control de las dos articulaciones primeras y las cuatro últimas articulaciones serán desarrolladas por otro controlador, haciendo que los tiempos de ejecución puedan disminuir y que la resolución de la trayectoria sea más fina. Esto solo implica tener dos controladores esclavos.

4.3.2.4. selección de controlador maestro

Al tener dos tarjetas como son los Arduino Uno, es necesario de disponer un controlador maestro quien ejecutará las ecuaciones del control cinemático para obtener los valores articulares con respecto al tiempo, que serán enviado a cada controlador esclavo. Los dispositivos evaluados, en la Tabla 4.10, corresponden a tarjetas de desarrollo enfocadas a funciones similares observadas en algunos proyectos del estado del arte, con características relativamente buenas para el procesamiento de la información y de fácil accesibilidad en el mercado.

Estas tarjetas de desarrollo básicamente asimilan una computadora de escritorio, pero con algunas características inferiores que debemos tener en cuenta, ya que para la ejecución de algunos tipos de trayectorias es necesario de disponer de algunos recursos considerados, como lo es su reloj base, caché, números de núcleos, frecuencias, entre otros.

Consideraciones:

- Al ser un sistema de control embebido su aplicación se plantea en tarjetas de desarrollo
- El controlador maestro dará la base para la selección del lenguaje a programar
- La tarjeta de desarrollo debe contar con entradas necesarias para la conexión de los controladores esclavos, que dependerá del tipo de transmisión de datos.

Tabla 4.10: Tabla de puntuación para la selección del controlador maestro. Fuente: Autor



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co

Ref.	Procesador	Memoria Ram	Puertos	Curva De Aprend.	Acces.	Adapta b.	Costo (\$Cop)	Total
Raspbe rry Pi 4b 	Quadcor e 64bit @1.5ghz	5 4gb Lpddr 4 - 3200	5 2 × Usb 3.0 2 × Usb 2.0 2 × Micro- Hdmi	9 Me d 5	Me d 5	Alt a 9	73 0k 5	43
Orange Pi 3 Lts 	Quadcor e 64bit @ 1.8ghz	7 2gb Lpddr 3 - 2666	2 2× Usb 3.0 1 × Hdmi	5 Alt a 2	Baj a 2	Alt a 9	23 0k 9	36
Rock Pi 4b 	Hexacor e 64bit @ 2x2.0gh z 4x1.5gh z	9 4gb Lpddr 4 - 3200	5 2× Usb 3.0 2 × Usb 2.0 1 × Hdmi	9 Alt a 2	Baj a 2	Alt a 9	76 0k 4	40
Khadas Vid3 Pro 	Quadcor e 64-Bit @ 1.8ghz	7 8gb Lpddr 4 - 3200	9 1× Usb 3.0 1 × Usb 2.0 1 × Hdmi	4 Alt a 2	Baj a 2	Alt a 9	70 0k 5	38

Según la puntuación obtenida por la tarjeta de desarrollo Raspberry pi 4 modelo b, en la Tabla 4.10, mostrada en la Ilustración 4.7, quedando como el dispositivo con mayor puntuación, por lo cual, esta tarjeta será la computadora principal que ejecutará los códigos para el control cinemático, en donde sus características son destacadas en la Tabla 4.11.



Ilustración 4.7: Tarjeta de desarrollo Raspberry pi 4 modelo b. Fuente: Raspberry

Tabla 4.11: Tabla de datos de la Raspberry pi 4 modelo b. Fuente: Autor.

Característica	Datos	Característica	Datos
Procesador:	Quad Core 64-Bit Arm-Cortex A72 Running At 1.5ghz	RAM:	4 Gigabyte Lpddr4 Ram
Interfaz Gráfica:	H.265 (Hevc) Hardware Decode (Up To 4kp60)	Video:	Supports Dual Hdmi Display Output Up To 4kp60
Almacen.:	1x Sd Card	Conectividad:	2x Micro-Hdmi 2x Usb2 Ports 2x Usb3 Ports 1x Gigabit Ethernet 1x Raspberry Pi Camera Port (2- Lane Mipi Csi) 1x Raspberry Pi Display Port (2-Lane Mipi Dsi)
Voltaje:	5v Input Voltage	Temperatura De Funcionamiento:	0 A 50 °C

Una gran ventaja no tenida en cuenta para su selección, que ofrece esta tarjeta, es que se cuenta con una gran comunidad, en parte orientada a la academia, así como un numero considerado de usuarios que han usado esta tarjeta para el desarrollo de diversos proyectos similares, incidiendo positivamente en los posibles problemas que se presenten en el desarrollo del proyecto, así como la disponibilidad de algunas librerías, que al sumar dichos factores, reducirá el tiempo de desarrollo del control cinemático.

Una característica de suma importancia, que el mismo fabricante resalta, es la temperatura de funcionamiento, el cual, al superar la temperatura de operación dada en el Tabla 4.11, la tarjeta baja el rendimiento automáticamente, y al acercarse alrededor de los 85 °C, el rendimiento se verá afectado de tal manera que la temperatura de su procesador no supere dicho valor limite.

4.4. Control Cinemático

Retomando nuevamente los conceptos, definimos que existen 4 tipos de trayectorias posibles en el espacio cartesiano:

1. Trayectorias eje a eje: En el cual, el desplazamiento del manipulador se va efectuando por articulación.

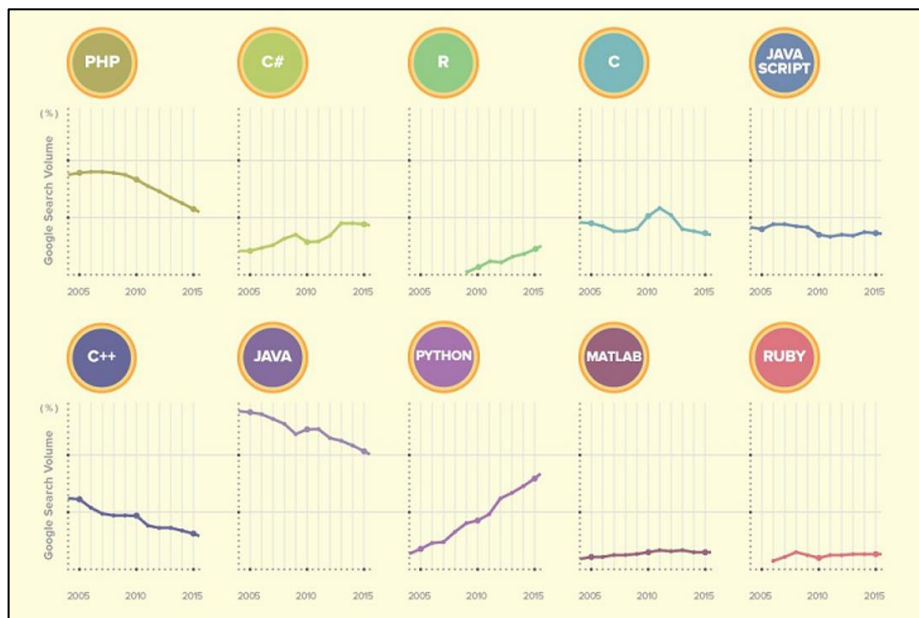
2. Trayectorias simultaneas: Todos los movimientos de las articulaciones inician en el mismo instante.
3. Trayectorias coordinadas: Los movimientos articulares se ejecutan en los mismos instantes de tiempo.
4. Trayectorias analíticas: Los movimientos articulares se ejecutan de tal manera que, en el extremo del manipulador, se crea una trayectoria en línea recta.

Estas trayectorias se crean como el resultado de evaluar un conjunto de ecuaciones matemáticas con determinados tiempos, llamados interpoladores, que se encargan de unir sucesiones de puntos del espacio articular, en los cuales se restringirá conceptos como velocidades y aceleraciones máximas de las articulaciones y límites de los valores articulares. [1]

Según el libro *fundamentos de robótica*, los dos interpoladores más usados son los interpoladores a tramos o trapezoidales, y los interpoladores cúbicos, ya que es posible de crear perfiles de velocidad y de aceleración más idealizados, sin variaciones súbitas, los cuales se tomarán como base para el desarrollo del control cinemático del manipulador, según las ecuaciones y teoremas planteados por cada autor alrededor de este tema.

4.4.1. Selección del Lenguaje de Programación.

Como primer criterio de restricción para la selección del lenguaje, es que los lenguajes de programación a considerar sean compatibles con la tarjeta de desarrollo seleccionada como maestro, que en este caso es la Raspberry pi 4b.



Gráfica 4.1: Porcentaje de búsquedas de lenguajes en Google. Fuente: Udacity [24]



Para establecer los criterios de selección del lenguaje correcto, se basarán en el estudio del sitio web Udacity, del 2015, donde recopiló información de múltiples fuentes, con el fin de crear 4 criterios para la selección ideal de un lenguaje dependiendo de su finalidad. [24]

Los criterios planteados en la Tabla 4.12, para la selección del lenguaje comienzan por la curva de aprendizaje, el traduce, el tiempo necesario para adquirir nuevas habilidades y resolución de problemas posiblemente presentados en el desarrollo, los siguientes criterios son la tendencia y el uso científico de cada lenguaje, tomados del estudio, garantizando múltiples herramientas para el procesamiento de datos con tendencia científica, los últimos criterios, se establecen como el soporte o la comunidad existente de dicho lenguaje de programación, así como la tendencia de estos lenguajes para su implementación en sistemas embebidos.

Tabla 4.12: Tabla de selección del lenguaje de programación. Fuente: Autor

ref.	curva de aprendizaje		tendencia ⁴		uso científico ⁴		soporte de comunidad		sistemas embebidos ⁴		total
java script	media	3	media	3	bajo	1	alto	5	bajo	1	13
python	baja	5	alta	5	alto	5	alto	5	alto	5	25
java	media	3	baja	1	bajo	1	medio	3	bajo	1	9

Al obtener la puntuación de cada lenguaje de programación en la tabla de selección Tabla 4.12, el ganador indiscutible por su finalidad, al ser un proyecto académico y al hacer uso de sistemas embebidos, es el lenguaje Python, que como lo constata la Gráfica 4.1 de la investigación de Udacity, es uno de los lenguajes en mayor crecimiento.

4.4.2. interpolador trapezoidal

Con el interpolador trapezoidal se ejecutará 3 tipos de trayectorias, ya que, por su naturaleza, no es viable crear trayectorias de línea recta [1][3], por lo cual, solo desarrollará trayectorias eje a eje, simultaneas y coordinadas, cuya diferencia radica en los tiempos de ejecución de cada uno, el resultado de este interpolador se puede

⁴ Criterios para la selección de un lenguaje de programación basado en el estudio “4 Ways to Pick Your First Programming Language”. Udacity, 2015.

representar por la Grafica 4.2. este tipo de interpolador se rige por el sistema de ecuaciones 4.1.

$$q(t) = \begin{cases} q^0 + s \frac{a}{2} t^2 & t \leq \tau \\ q^0 - s \frac{v^2}{2a} + svt & \tau < t \leq T - \tau \\ q^1 + s \left(-a \frac{T^2}{2} + aTt - \frac{a}{2} t^2 \right) & T - \tau < t \leq T \end{cases} \quad 4.1$$

donde:

$$\tau = \frac{v}{a}; \text{tiemp de arranque}, \quad s = \text{signo de } q^f - q^i$$

$$T = s \frac{q^f - q^i}{t^f - t^i} + \tau; \text{tiemp minimo}$$

v = velocidad maxima de la articulacion,

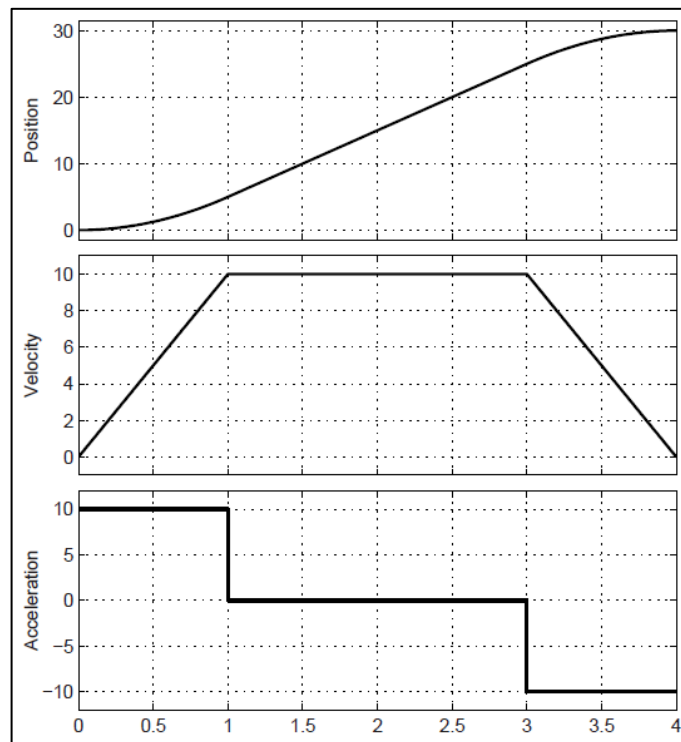
a = aceleracion maxima de la articulacion

Este interpolador une dos puntos creando trayectorias con un perfil de velocidad trapezoidal, por el cual se deriva su nombre. Los perfiles de posicion, velocidad y aceleracion, se pueden visualizar en la Grafica 4.2, donde se ejemplifica a la union de dos puntos de 0 a 30, por medio de un interpolador trapexoidal, en el transcurso de 4 seg, se muestran los 3 perfiles creados, el de posicion, velocidad y aceleracion.

Plasmando la implementación tanto del procedimiento, como de las ecuaciones implementadas, se puede resumir en una representación por un diagrama de flujo mostrado en la Ilustración 4.8.

Al llamar la función del interpolador trapezoidal llamada “*inter_trapezoidal*” se deben de enviar los parámetros tales como la posición de inicio o inicial, la posición final, las velocidades y aceleraciones de las articulaciones, el tiempo deseado y el tipo de interpolador, con la siguiente estructura, devolviendo los valores articulares de posición, velocidades y tiempos de ejecucion.

```
# hallamos de la funcion del interpolador trapezoidal
[q_est, v_est, t_est] = inter_trapezoidal(posia, posib, vel, ace, tf, tip_inter)
```



Grafica 4.2: Posición, velocidad y aceleración de una trayectoria lineal con un interpolador a tramos. Fuente: Trajectory Planning For Automatic Machines And Robots.

4.4.2.1. Implementación del Interpolador Trapezoidal

Con al llamar la función “*inter trapezoidal*” agregando los parámetros necesarios, se ejecutarán las acciones del diagrama de flujo de la Ilustración 4.8, en donde lo primero a realizar es calcular el tiempo mínimo para realizar el movimiento, una vez obtenido este tiempo, es comparado con el tiempo del usuario, solo si este digitó un tiempo en específico, diferente de cero, si el tiempo deseado por el usuario es inferior al tiempo mínimo hallado, se le enviará un vector vacío, con el fin de que la estructura de la programación no cambie, y así, este se alerte de que el tiempo mínimo es mayor al deseado.

Una vez los tiempos concuerden, el siguiente paso es distribuir los tiempos correctamente, calculando cuanto es el tiempo requerido para la ejecución de cada articulación, seguido de identificar la existencia o no, de las 3 etapas expuestas en la Grafica 4.2, o si solo existe arranque y frenado. Una vez se identifique correctamente que etapas evaluar, se procede a estimar los vectores de cada articulación, evaluando las funciones de las ecuaciones (4.1), que posteriormente, serán retornados al llamado de la función.

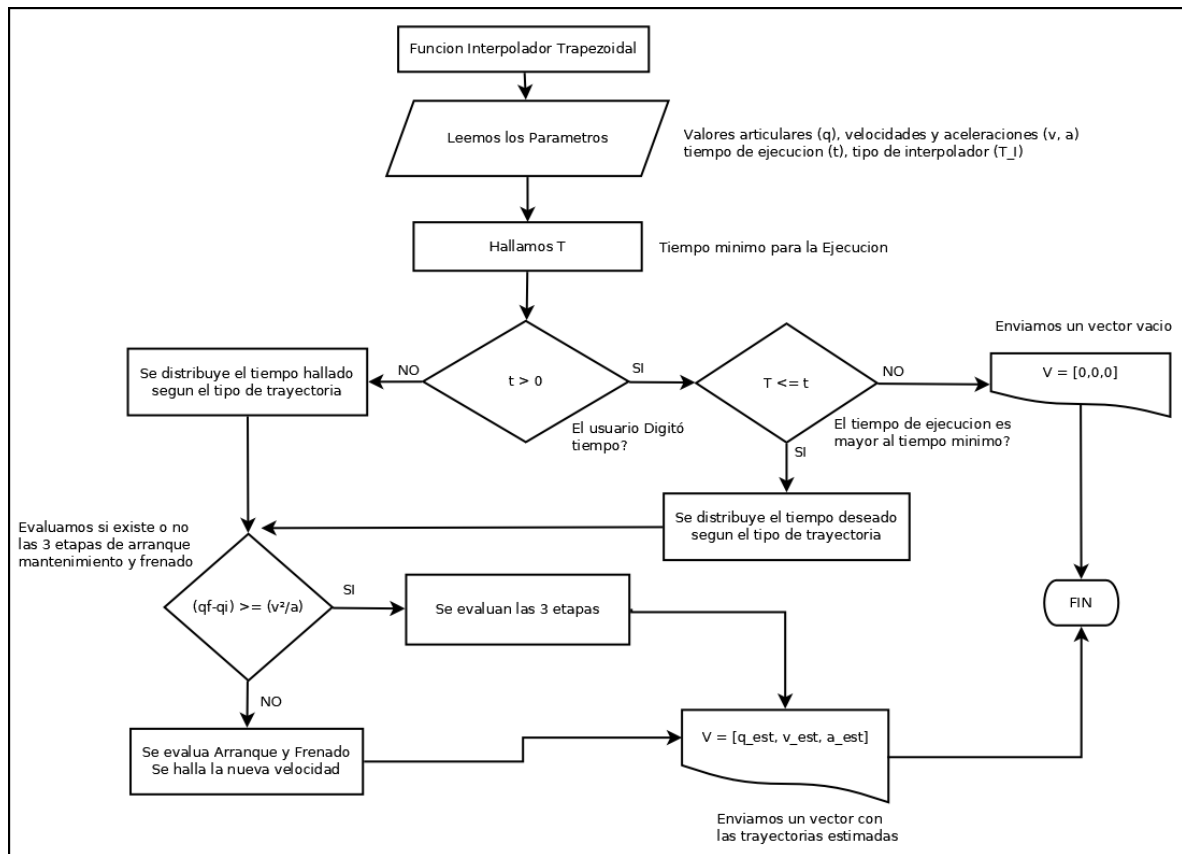


Ilustración 4.8: Diagrama de flujo de la implementación del interpolador trapezoidal. Fuente: Autor.

4.4.3. Interpolador cubico

Con este tipo de interpolador podemos ejecutar los 4 tipos de trayectorias, se basa en un polinomio de 3er grado expresado en la ecuación 4.2. [1][3].

$$q(t) = a + b(t - t^{i-1}) + c(t - t^{i-1})^2 + d(t - t^{i-1})^3 \quad 4.2$$

Donde los parámetros del polinomio son:

$$a = q^{i-1}, \quad b = \dot{q}^{i-1}, \quad c = \frac{3}{T^2}(q^i - q^{i-1}) - \frac{2}{T^2}\dot{q}^{i-1} - \frac{1}{T^2}\ddot{q}^i$$

$$d = -\frac{2}{T^2}(q^i - q^{i-1}) + \frac{1}{T^2}(\dot{q}^i - \dot{q}^{i-1}), \quad t = t^i - t^{i-1}$$



4.4.3.1. Implementacion del Interpolador Cubico

El proceso inicial de este interpolador cubico, es un tanto similar al proceso del interpolador trapezoidal, igualmente, la metodologia del funcionamiento se plasma en Ilustración 4.9. Para su ejecucion, primero se debe llamar al interpolador cubico, el cual lee los parametros del punto inicial, el punto final, el tiempo estimado, el tipo de interpolador y las velocidades articulares. Al igual que el anterior interpolado su llamado nos devuelve un vector con las trayectorias articulares de posicion, velocidad y tiempo de ejecucio, muestreadas en intervalos de 100 ms, expresado por la siguiente linea de codigo:

```
# Llamado de la funcion del interpolador cubico  
[q_est, v_est, t_est] = inter_cubico_validar(puntoa, puntob, tf, tip_inter, vel)
```

El siguiente paso es hallar el tiempo minimo, pero para hacerlo en este interpolador no se tiene una formula como tal para poderlo hallar como en el interpolador anterior, por lo cual se debe de muestrear intervalos de tiempo para cada valor articular, comparando las velocidades obtenidas al derivar el polinomio con las velocidades maximas de la articulacion, hasta encontrar un valor igual o menor al limite real de velocidad.

Una vez hallado el tiempo minimo para ejecutar las trayectorias con el interpolador cubico, es comparar los tiempos minimos y el tiempo deseado, con el fin de determinar si es posible o no realizar las trayectorias en los tiempos deseados. una vez determinado y distribuido los tiempos, se muestrean los puntos intermedios para el tipo de trayectoria analitica, asi como la solucion que implique un minimo movimiento entre las multiples respuestas.

Ya seleccionado los valores articulares de los puntos intermedios, asi como la distribucion del tiempo, se procede a hallar los parametros del polinomio cubico, que posteriormente será evaluado para hallar los vectores de las trayectorias articulares para ser devueltos al llamado de la funcion.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

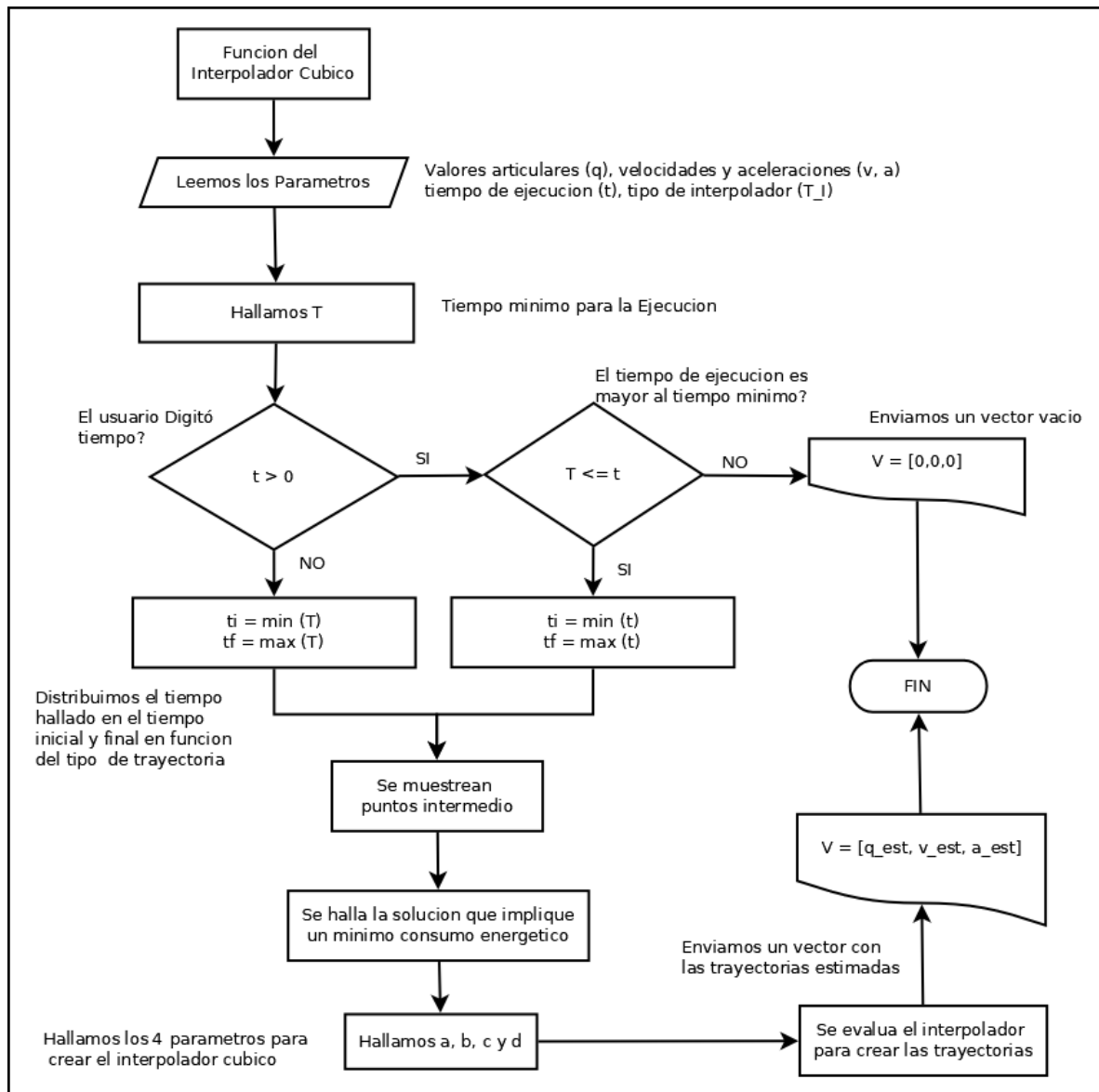


Ilustración 4.9: Diagrama de flujo de la implementación del interpolador cubico.
Fuente: Autor.

4.4.4. Concatenación de trayectorias

Cuando se habla de concatenación de trayectorias, es poder unir múltiples trayectorias en una sola, sin que esta implique una velocidad nula en el extremo del manipulador sobre el paso de los puntos deseados, haciendo que la velocidad sobre toda su trayectoria sea continua, reduciendo tiempos de ejecución. [1][2]

Un punto a considerar en este caso, es la proximidad o exactitud con la que el extremo del manipulador pasará por uno de los puntos deseados, ya que

dependiendo de la cantidad de puntos intermedios muestreados pasará o no cerca de uno de los puntos que el usuario especificó.

Para poder realizar la concatenación de trayectorias, existen diversas maneras, cada una dependiendo del interpolador a usar:

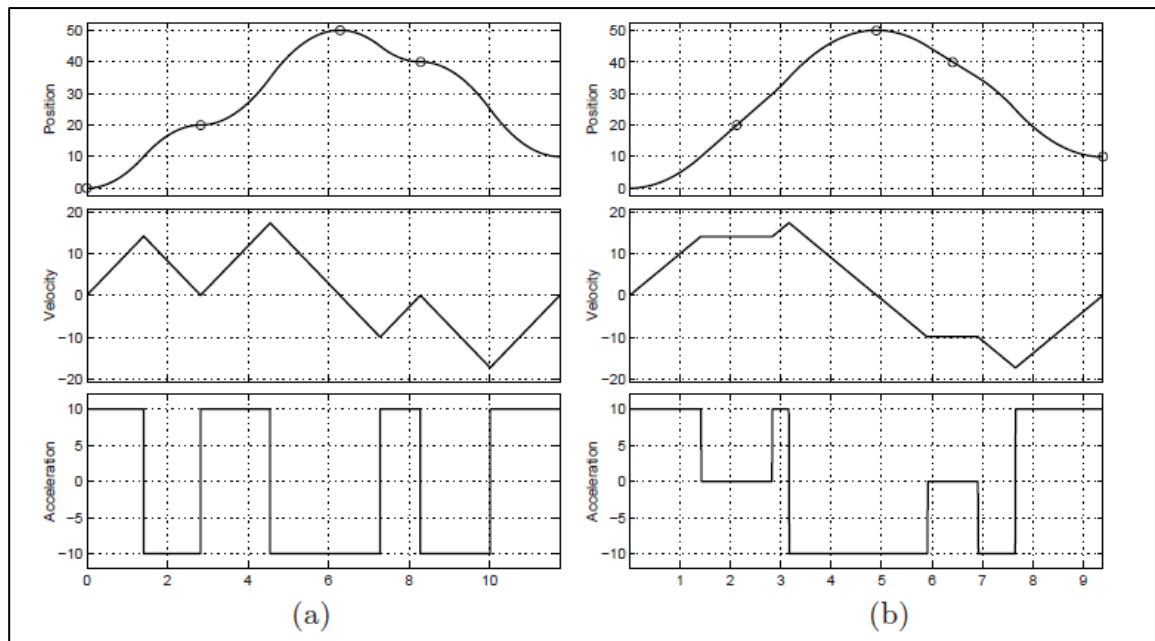
4.4.4.1. concatenación en interpolador cubico

Para el interpolador cubico, no existe la necesidad de cambiar de fórmulas matemáticas para la concatenación de trayectorias, ya que básicamente este interpolador es capaz de unir diferentes valores articulares modificando sus 4 parámetros ya hablados anteriormente.

4.4.4.2. concatenación en interpolador trapezoidal

En el caso del interpolador trapezoidal, no es posible crear trayectorias concatenadas en base a las mismas ecuaciones ya establecidas, por lo cual se proponen dos soluciones que serán abordadas para la implementación.

La primera solución la propone (I. biagiotti & c. melchiorri. 2008), donde expresa que se pueden sumar los tiempos de frenado del punto q^{i-1} con los tiempos de arranque del punto q^i , sumando las velocidades y aceleraciones de cada tramo, como se muestra en la Grafica 4.3.



Grafica 4.3: Posición, velocidad y aceleración de un interpolador a tramos con una secuencia de puntos, (a) con velocidades nulas, (b) sin velocidades nulas. Fuente: *Trajectory Planning For Automatic Machines And Robots*.

La segunda solución la propone (A. Barrientos. 2007), en donde básicamente cambiamos las fórmulas matemáticas a las ecuaciones 4.3, para determinar el arranque y frenado de cada punto, anticipando el movimiento, conservando la misma estructura básica del interpolador trapezoidal.

$$q(t) = \begin{cases} q^0 + \frac{q^1 - q^0}{T_1} t & 0 \leq t \leq T_1 - \tau \\ q^1 + \frac{(q^1 - q^0)}{T_1} (t - T_1) + \frac{a}{2} (t - T_1 + \tau)^2 & T_1 - \tau < t < T_1 + \tau \\ q^1 + \frac{q^2 - q^1}{T_2} (t - T_1) & T_1 + \tau < t < T_1 + T_2 \end{cases} \quad 4.3$$

4.5. Condiciones Para el Control Cinemático

4.5.1. Condiciones para iniciar el sistema de control

Para poder iniciar el control cinemático, es necesario establecer algunas condiciones, con el fin de que el usuario no tenga inconvenientes a la hora de ejecutar el control.

1. Como condición inicial, es necesario saber el estado de los actuadores, su posición actual, verificando así, que existe comunicación con ellos
2. Paso seguido es llevar cada articulación a su al punto inicial, comprobando que pueden generar movimientos, para la comprobación de las dos primeras articulaciones se deben de activar los finales de carrera, cualquiera de los dos por cada articulación, observamos en la Ilustración 4.10.

4.5.2. autoajuste

Al desacoplar cualquier elemento, para fines de mantenimiento o de cambios, se debe de tener en cuenta una sola consideración, y es, a la hora de hacer su instalación, el correcto sentido de las piezas, para su facilidad el ensamble es muy intuitivo y dispone graficas de la correcta instalación de las piezas, con el fin de poder realizar los adecuados ajustes.

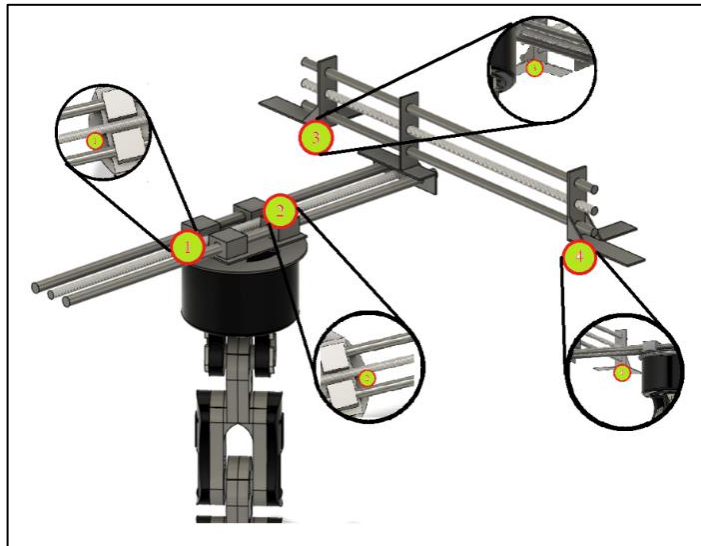


Ilustración 4.10: Ubicación de los finales de carrera para el reinicio de las articulaciones 1 y 2. Fuente: Autor

El sistema de autoajuste cuenta con los siguientes parámetros a cumplir:

1. El sistema no dispone sensores en las dos primeras articulaciones, por lo cual, no es posible leer la posición actual de los valores articulares, es por ello, que se disponen de 4 finales de carrera ubicados como se muestran en la Ilustración 4.10, y se enviará al inicio las articulaciones hasta activar los finales de carrera, identificando así, que llego al punto inicial.
2. Otro problema, que surge al no contar con sensores en las dos primeras, es que, por diversos factores, con la ejecución de los movimientos los valores articulares se pueden llegar a descalibrar en algunos milímetros, con el fin de no estar llevando al inicio en cada ejecución estas dos articulaciones, no se tomará en cuenta el desvío que se ocasione, el cual se corregirá al reiniciar el sistema.

4.6. Validación del Control Cinemático

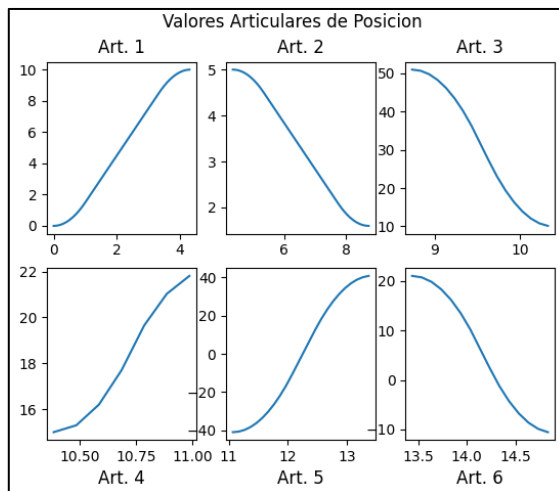
Con el fin de poder validar el funcionamiento del control cinemático, se evaluarán algunas pruebas con distintos tipos de trayectoria, así como la ejecución de cada interpolador con un tiempo estimado, con el fin de evitar analizar todas las posibles combinaciones, solo se realizar pruebas de manera aleatorias, que al comprobar y validar que todo esté bien, es suficiente para determinar el buen funcionamiento de la generación de trayectorias por parte de los interpoladores.

4.6.1. Prueba 1:

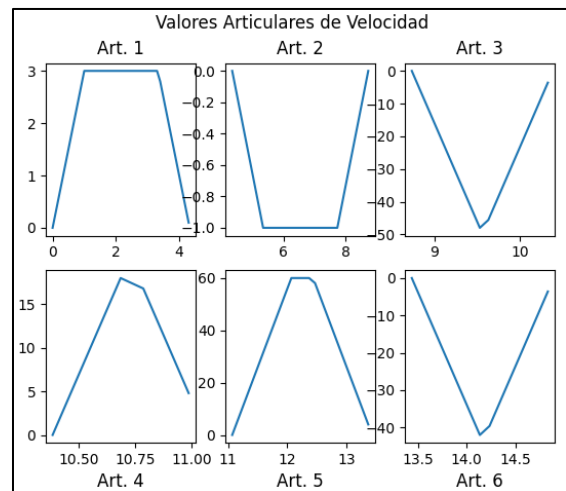
La primera validación corresponde a la generación de una trayectoria eje a eje por medio de un interpolador trapezoidal, sin un tiempo de ejecución determinado, dado por los siguientes puntos:

```
Posicion_Final = [10, 1.6, 10.0, 22.0, 41, -10.65]
Posicion_Inicial = [0, 5, 51, 15, -41, 21]
```

Como respuesta, se obtienen los resultados de las Grafica 4.4, en el cual se plasman las trayectorias articulares, en las cuales, se pueden observar las velocidades de cada articulación en las Grafica 4.5.



Grafica 4.4: Resultado de los valores articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria eje a eje sin tiempo deseado. Fuente: Autor



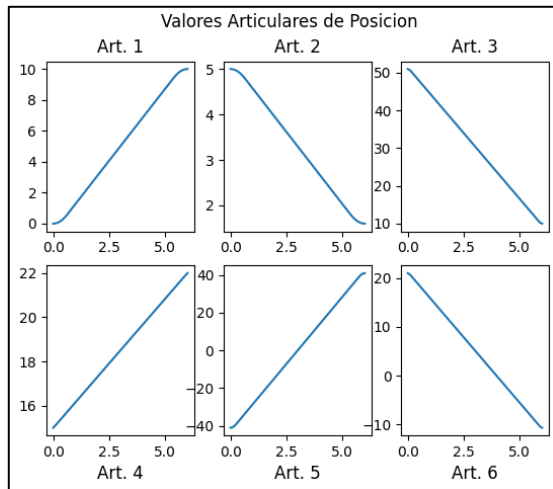
Grafica 4.5: Resultado de las velocidades articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria eje a eje sin tiempo deseado. Fuente: Autor

4.6.2. Prueba 2:

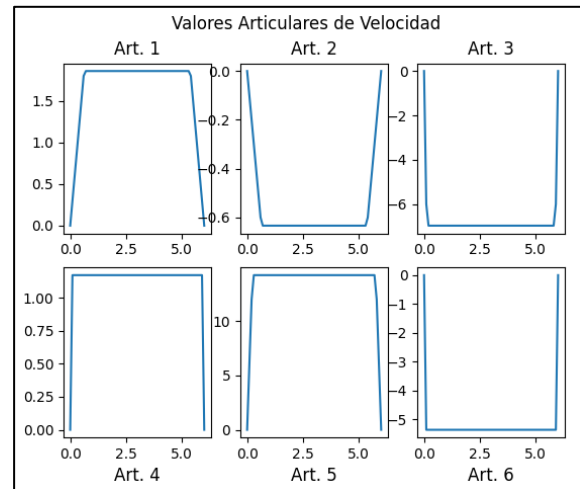
La siguiente prueba se determina en base a una trayectoria coordinada, realizada con el interpolador trapezoidal, con un tiempo deseado de ejecución de 6 segundos, con los siguientes puntos:

```
Punto_Final = [10, 1.6, 10.0, 22.0, 41, -10.65]
Punto_Inicial = [0, 5, 51, 15, -41, 21]
```

Los resultados de las trayectorias articulares se pueden observar en la Grafica 4.6, así como las velocidades de cada articulación expuestas en la Grafica 4.7.



Grafica 4.6: Resultado de los valores articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria coordinada con tiempo deseado de 6 seg. Fuente: Autor



Grafica 4.7: Resultado de las velocidades articulares del interpolador trapezoidal con trayectoria coordinada con tiempo deseado de 6 seg. Fuente: Autor.

4.6.3. Prueba 3:

En la prueba 3, se realiza una trayectoria simultánea a través de un interpolador cúbico, con un tiempo deseado de 12 seg, entre los puntos planteados a continuación:

```
Punto_Inicial = [8,25,12,55,-41,-11]
Punto_Final = [1, 20, -15.0, 60.0, -50, 10]
```

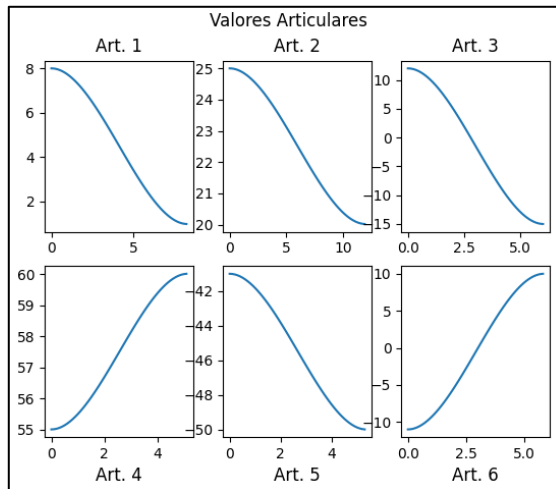
Los resultados de esta prueba se pueden observar en la Gráfica 4.8, que representa las gráficas de trayectorias articulares, junto con los resultados de las velocidades articulares expresadas en la Grafica 4.9.

4.6.4. Prueba 4:

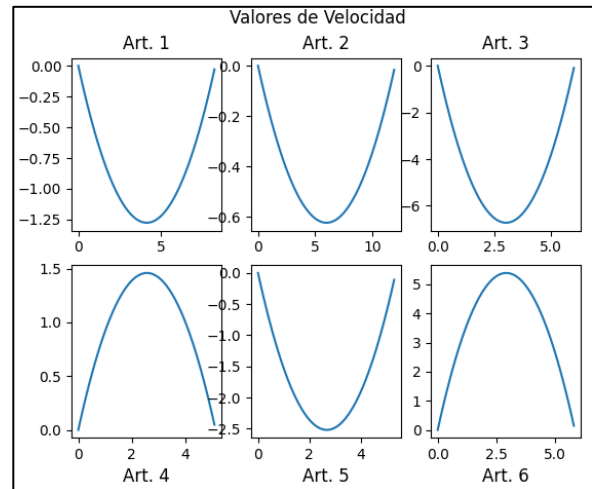
En esta prueba, se realiza una trayectoria coordinada, con base en el interpolador cubico, sin un tiempo deseado, por los puntos dados a continuación:

```
Punto_Inicial = [8, 5, 70, -20, 50, 30]
Punto_Final = [0, 8, -110, 40, -30, 30]
```

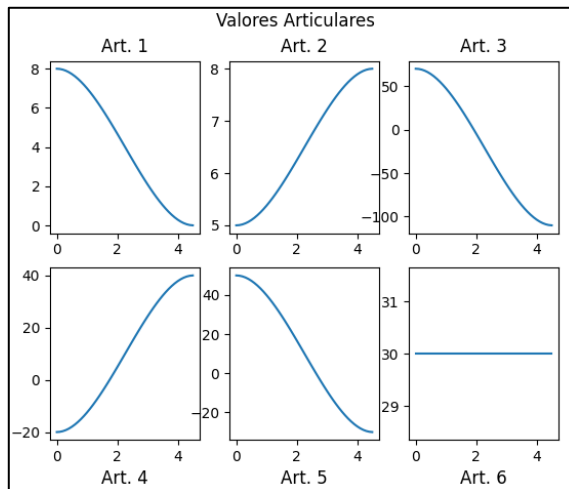
Los resultados de esta prueba se pueden evidenciar en la Grafica 4.10 y Grafica 4.11, en la primera grafica se observa los valores articulares con respecto al tiempo, y en la segunda, se pueden observar las variaciones de las velocidades articulares.



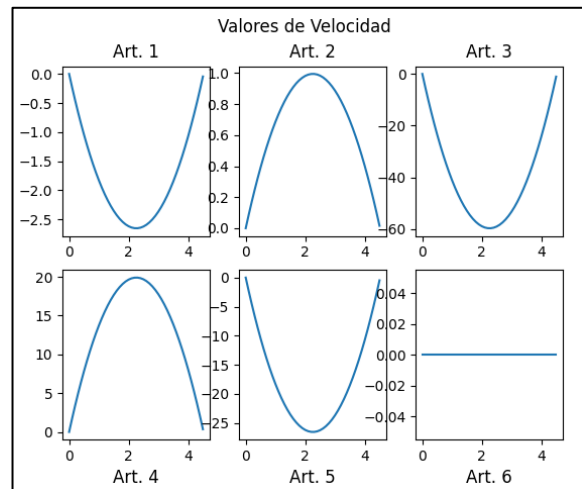
Gráfica 4.8: Resultado de los valores articulares del interpolador cubico con trayectoria simultanea con tiempo deseado de 12 seg. Fuente: Autor



Gráfica 4.9: Resultado de las velocidades articulares del interpolador cubico con trayectoria simultanea con tiempo deseado de 12 seg. Fuente: Autor



Gráfica 4.10: Resultado de los valores articulares del interpolador cubico con trayectoria coordinada sin tiempo deseado. Fuente: Autor

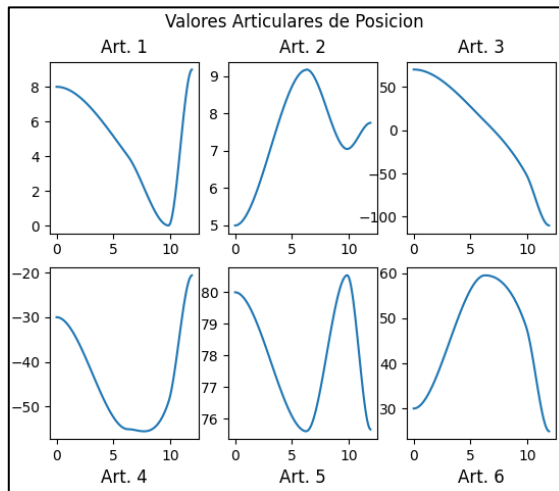


Gráfica 4.11: Resultado de las velocidades articulares del interpolador cubico con trayectoria coordinada sin tiempo deseado. Fuente: Autor

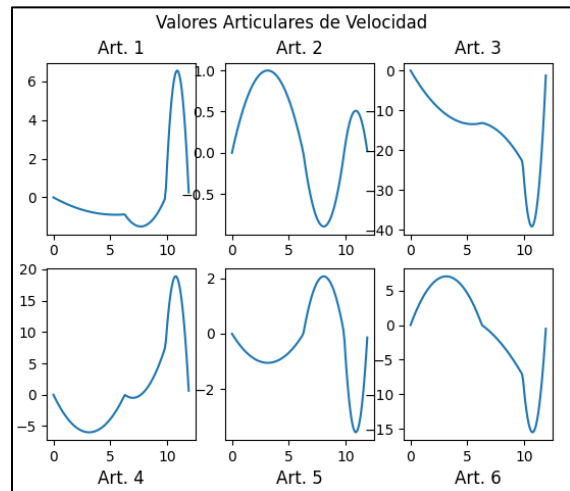
4.6.5. Prueba 5

Para la última prueba, se realizará una trayectoria en línea recta, correspondiente a una trayectoria analítica, por medio de un interpolador cubico, entre los puntos planteados a continuación, sin un tiempo deseado:

```
puntoa = [8, 5, 70, -30, 80, 30]
puntob = [[8, 5, -110, -30, 80, 30]]
```



Grafica 4.12: Resultado de los valores articulares del interpolador cubico con trayectoria analítica sin tiempo deseado. Fuente: Autor.



Grafica 4.13: Resultado de las velocidades articulares del interpolador cubico con trayectoria analítica sin tiempo deseado. Fuente: Autor.

4.6.6. Análisis de los resultados

Se observa de manera general que el interpolador Trapezoidal como Cubico, cumple sus funciones de unir los puntos deseados, sin superan los límites de velocidades de sus actuadores.

La primera diferencia que se puede observar radica en los perfiles de velocidad de las pruebas, en donde se crean los perfiles deseados dependiendo de los interpoladores, como por ejemplo en la prueba 1 y en la prueba 2, en donde sus resultados de los perfiles de velocidad dados por la Grafica 4.5 y Grafica 4.7, son perfiles con forma trapezoidal, característica propia de dicho interpolador.

También se puede apreciar en las gráficas, Grafica 4.12 y Grafica 4.13, que muestran los resultados de la prueba 5, en donde se genera una trayectoria en línea recta, la concatenación de trayectorias por medio del interpolador cubico, en donde tampoco se superan las velocidades límites de los actuadores dadas por las gráficas, ya que para realizar este tipo de trayectoria, se es necesario tomar muestras de puntos intermedios, creando la necesidad de concatenar cada punto en una misma trayectoria.



4.7. Futuras Actualizaciones

Una mejora significativa del proyecto, es el de poder implementar visión artificial dentro del volumen de trabajo, obteniendo diversas mejoras como la detección de obstáculos, la emulación en realidad aumentada, e incluso conceptos básicos como la identificación de figuras, colores y puntos específicos.

Por último, una actualización de suma importancia para la ejecución de sus tareas, es la de poder llegar a desarrollar el control dinámico, con el fin de comparar tipos de controles para el desarrollo de las trayectorias, también se obtienen trayectorias más fiables, así como la posibilidad de implementar un sistema en tiempo real, para las trayectorias articulares, reduciendo los tiempos de espera para el inicio de los trayectos.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



5. capítulo 4: DISEÑO DE LA INTERFAZ DEL SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se plantea los pasos seguidos para el desarrollo e implementación de la interfaz que servirá para el control cinemático del manipulador, desde su normativa básica para la creación de interfaces industriales según estándares internacionales, como el planteamiento de criterios y restricciones para el desarrollo del mismo, hasta su creación.

Para su desarrollo primero se investigó la normativa vigente relacionada a la creación de interfaces de control, posteriormente, se crea un prototipo básico en donde se plasmará las funcionalidades que tendrá la interfaz, dando paso a la creación del diseño básico, con las funcionalidades planteadas, teniendo como premisa la idea de un concepto moderno y llamativo.

Seguido del desarrollo de la interfaz, pasamos al diseño y creación de la estructura para el control de esta interfaz, dando la facilidad de que el usuario pueda manipular este control, tratando de cumplir con algunos criterios ergonómicos planteados.

Por último, se validará la interfaz de control, en donde se realizarán los ajustes necesarios para su buen funcionamiento.

5.1. diseño básico para la interfaz

5.1.1. normativa

El éxito de un sistema hmi, donde se observan o visualizan los datos constantemente, es que la aplicación de la visualización sea lo más simple posible, lo que el usuario está acostumbrado a manejar, creando interfaces intuitivas o cómodas para su manejo, evitando un estrés o cansancio tanto visual como psicológico a quien lo opera.

Según la normativa ISA 101, resaltando los aspectos más importantes, se deben de manejar algunas tonalidades neutras, como son las escalas de los grises en funciones no primordiales o sustanciales, obteniendo bajos contrastes. en el caso de estas funciones fundamentales, se pueden resaltar para facilitar al operario su ubicación dentro de la hmi. también establece que los colores brillantes solo deben de usarse para resaltar alarmas y situaciones anormales, y un mismo color de estos, no debe de usarse para para otra situación o caso que no sea una alarma.

Existe otras normas que regula algunos parámetros físicos como la ergonomía, que impacta directamente en conceptos como la distribución de información, dispositivos a controlar, orientación del usuario, diálogos del menú, navegación por la interfaz, gestión de alertas entre otros. la principal normativa en este ámbito es la norma *iso 11064-5: ergonomic design of control centers —part 5: displays and controls*.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Con el fin de no extender el documento, solo se mencionará algunos criterios aplicables, así como las restricciones consideradas para el diseño del prototipo de la interfaz, sin divulgación de algún contenido en específico por derechos reservados del autor.

Dentro de esta última normativa, la cual, será la base para realizar el diseño de la interfaz, establece como principio básico de diseño, la clara identificación de las estructuras visuales de una interfaz, donde cada sección o ventana de una página deben de estar bien de lineadas, y cada ventana deberá cumplir una función en específico.

5.1.2. Criterios para el desarrollo de la interfaz:

En base a las normativas expuestas anteriormente, se adaptaron algunos principios con el fin de su cumplimiento, como criterios para el desarrollo de la interfaz. Se establecen 3 principios, el primero como *principios generales*, son los alcances y restricciones de manera general sobre el desarrollo de la interfaz. el segundo principio, *principios para la visualización de la pantalla*, son una gamma de sugerencias que los diseñadores deben de considerar para una óptima ergonomía en diferentes ámbitos, como visual y mental. el tercer y último principio, *principios para el control y la interacción*, establece las restricciones

5.1.2.1. principios generales:

- Se debe de garantizar que el usuario esté siempre dentro de un “bucle” de control, no se permitirá ninguna clase de atajos, ni para usuarios expertos.
- No se debe de presentar latencias considerables en la respuesta del sistema
- Se debe de analizar todas las posibles fallas que se puedan generar
- El usuario no podrá pasar por las restricciones del sistema
- El sistema debe ser capaz de ser interrumpido dentro de un lapso de 2 segundos.
- El usuario podrá tener control del sistema, deteniendo funciones cuando lo desee
- La información presentada debe de ser relevante para el usuario
- No se debe de ocultar información importante
- Se debe garantizar toda la información necesaria en una sola pantalla
- La información de cada actividad debe de ser explicable por sí misma
- Se debe de contar con un menú o soporte de ayuda de fácil accesibilidad
- El usuario deberá ser capacitado antes de hacer uso del sistema

5.1.2.2. Principios para la visualización de pantallas:

- Se le debe de dar prioridad a la información “útil”, así como toda información debe de ser confiable
- Se debe de estandarizar todos los parámetros dentro de la interfaz, tales como fuente, tamaño de fuente, dimensiones de botones, recuadros de



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



información, distribución de elementos, contrastes de colores, uso de colores, etc....

- Cada elemento es único, no existe dos funciones para un mismo botón o Icono, así como deben de ser bien distinguibles entre los demás elementos.
- La información debe de estar agrupada por ventanas
- Con el fin de hacer llamativos los elementos de más importancia, se procura que sean elementos dinámicos.
- Cada mensaje de alarma debe de tener una adecuada atención dependiendo de su importancia
- La ubicación de cada pantalla debe de ser en lo mayor posible cómoda para el usuario
- La información debe de estar presente de una manera sencilla
- Procurar que cada elemento tenga una etiqueta

5.1.2.3. Principios para el control y la interacción:

- se debe de mostrar los resultados de las acciones de control
- se restringen los comandos que puedan llegar afectar negativamente la integridad del manipulador
- la interacción del sistema debe de ser simple, sin hacer que el usuario debe establecer
- se establecerán algunas entradas automáticas como el tipo de trayectoria, interpolador y tiempo de ejecución, para los casos en que el usuario no lo especifique.

Para el desarrollo de la interfaz se tendrán en cuenta otros apartados como el de “alertas”, y procesos de diseño de las normas anteriormente nombradas.

5.1.3. Diseño básico de la Interfaz

Con el fin de poder cumplir todos los criterios establecidos anteriormente, se diseñó una interfaz con 2 paginas, donde su estructura basica se puede observar por medio del diagrama en la ilustración 5.1, separando la funcionalidad de la utilidad, identificando asi, la pagina correspondiente dependiendo de la necesidad del usuario. esta estructura la podemos simplificar en la ilustración 5.1 por medio de un diagrama de bloque.

En la primera pagina, se desarrollará lo relacionado al control del manipulador, contará con 4 ventanas donde la informacion está dividida por su tematica, la primera venta servirá como entrada de datos para el control del manipulador, recogerá datos como valores articulares, tiempos estimados, tipo de interpolador y tipo de trayectoria, asi como la posibilidad de enlazar en tiempo real cada articulacion para su correcta posicion, la segunda ventana da la posibilidad de cambiar de visualizacion, obteniendo diferentes perspectivas de los sucesos, la tercera ventana será la ventana donde se podrá visualizar los eventos, la cuarta y



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

ultima ventana, contemplará una gamma de botones utiles, como la simulacion y la escritura de los datos para el desarrollo del control.

La segunda pagina facilitará la configuracion o utilidades del sistema y se dividirá en 3 ventanas, la primera ventana servirá para la calibracion de las articulaciones ya nombradas anteriormente, la segunda ventana proporciona la utilidad del modo de operación, situando al manipulador en una posicion determinada dependiendo de la necesidad, modos como de operación normal o de transporte, la tercera venta proporcionará botones de utilidad de manera general.

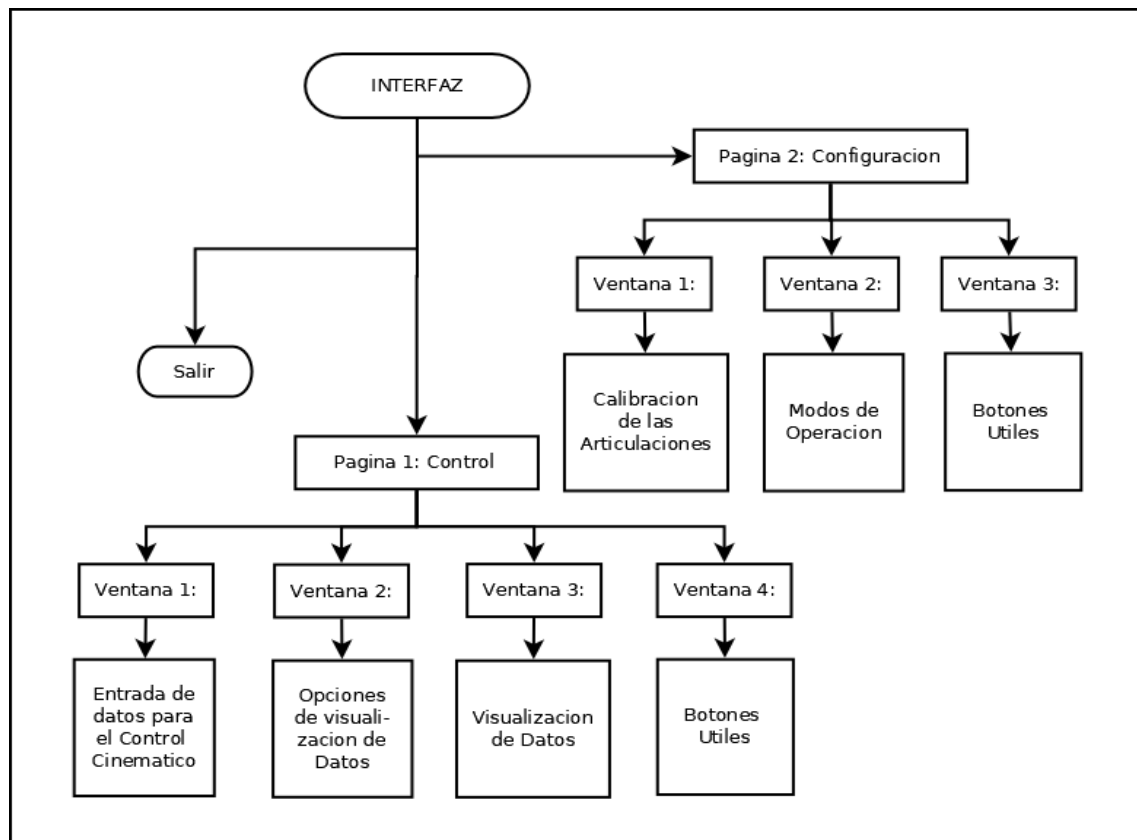


ilustración 5.1: Estructura básica para el diseño de la interfaz. Fuente: Autor

5.2. Prototipo de la HMI y sus Funcionalidades

Al iniciar el programa, la interfaz se ubicará en el panel principal, donde el usuario solo podrá ejecutar una seccion a la vez, y no podrá acceder al apartado de control a la misma vez que al apartado de configuracion.

Esta introduccion se logró hacer de una manera muy interactiva, por medio de elementos dinamicos, como lo muestra la ilustración 5.3, en donde se puede

observar que los elementos a seleccionar realizan un movimiento alusivo a su funcionalidad, haciendolos muy llamativos.

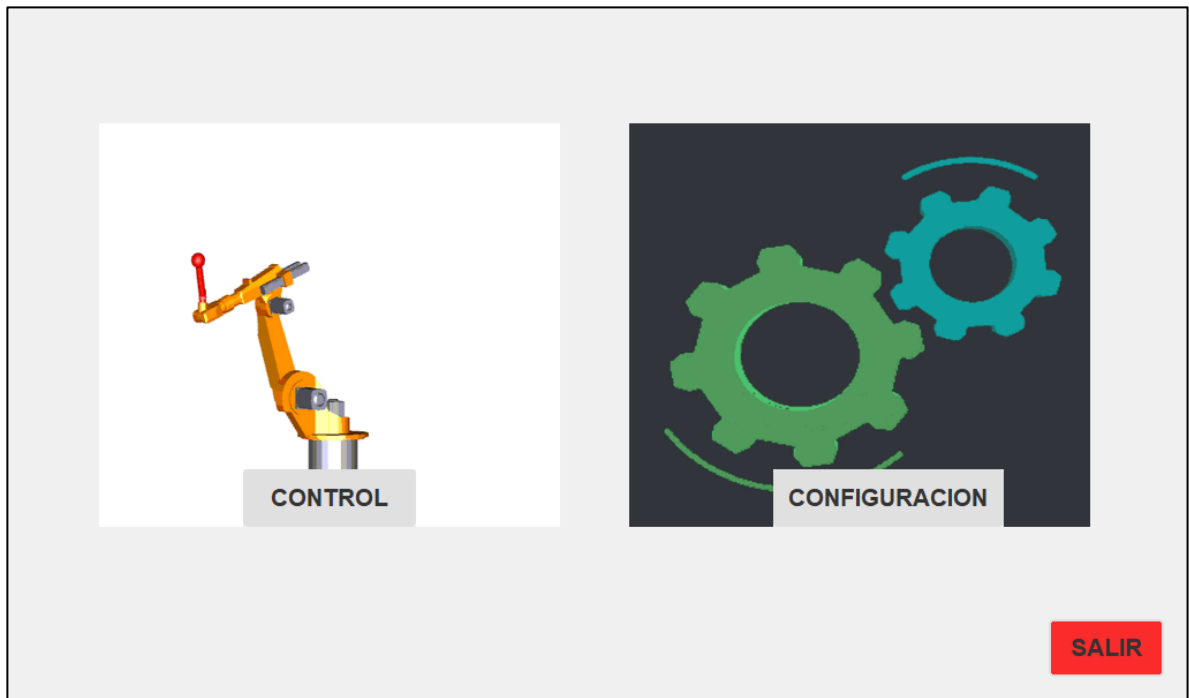


ilustración 5.2: panel principal de la interfaz. fuente: autor

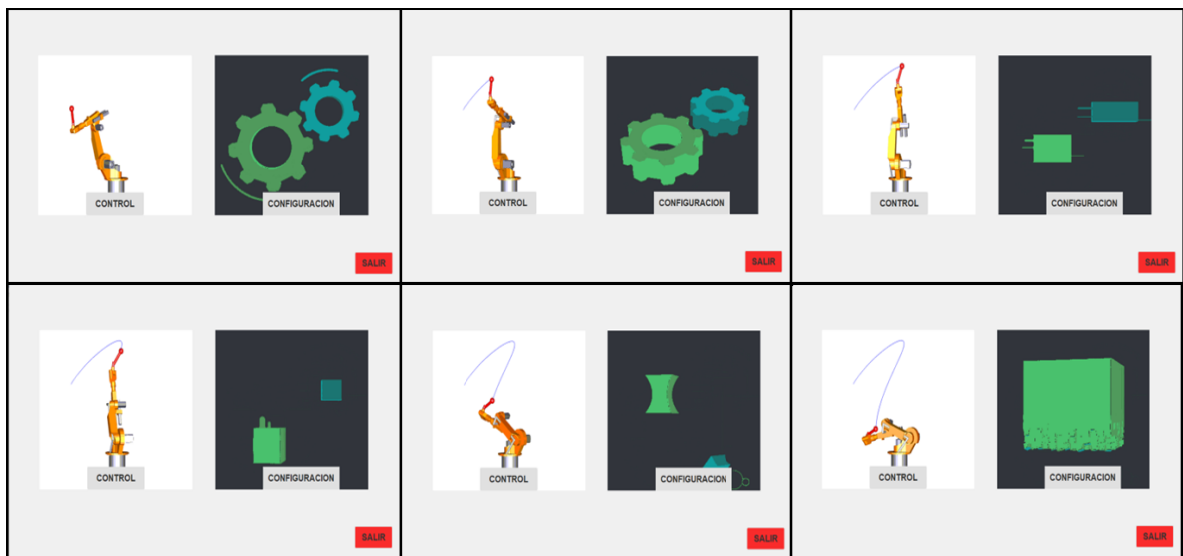


ilustración 5.3: dinámica de los elementos del panel principal de la interfaz. fuente: autor

5.2.1.1. página de control

Al ingresar al apartado de “control”, se visualizan las 4 ventanas, la primera ventana, para la entrada de datos, se ubica a la izquierda, la segunda ventana, para el cambio de vista central, se ubica en la parte derecha superior, la información central se ubica justo en la mitad al costado derecho, y la cuarta ventana, con una gamma de botones útiles, se ubica en la parte inferior derecha, como podemos observar en la Ilustración 5.4.

Al iniciar la página de control, la información que se obtiene de primera mano en la ventana 3, es una gráfica en 3d que nos representa el volumen de trabajo del manipulador, con un punto rojo, el cual nos ayuda a identificar la ubicación del extremo del manipulador.

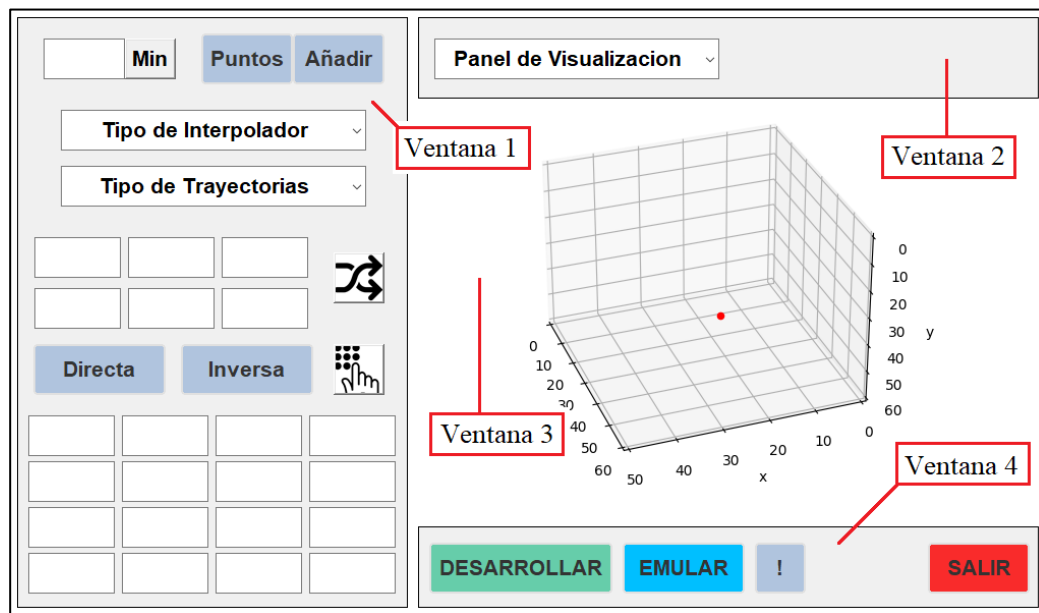


Ilustración 5.4: Ubicación de las ventanas en la página de control de la interfaz.
Fuente: Autor.

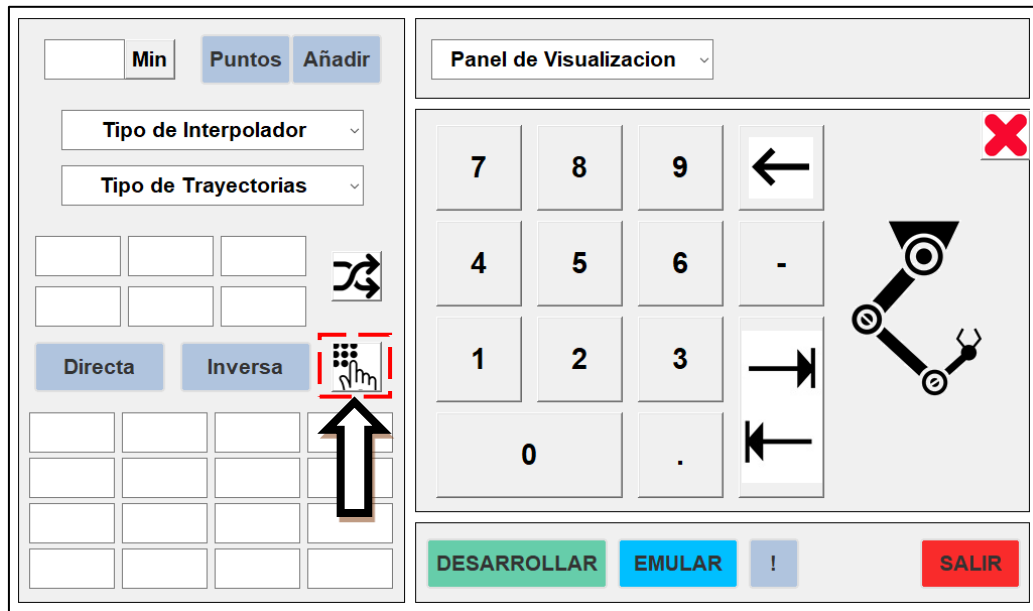


Ilustración 5.5: Atajo para el acceso al teclado en la página de control de la interfaz. Fuente: Autor.

Las únicas ventanas dinámicas son las ventanas 2 y 3, que cambian de vista dependiendo de lo ordenado por el usuario. Uno de los primeros cambios en la ventana 3, es la aparición de un teclado táctil al oprimir que se resalta en la Ilustración 5.5, este teclado facilita poder ingresar datos a la ventana 1.

Otro cambio en la ventana 3, se ejecuta al desplegar la lista resaltada por la Ilustración 5.6, de la ventana 2, mostrando las gráficas del último trayecto hecho por el manipulador de cada articulación (ver ilustración), subsecuentemente, aparece una nueva opción en la ventana 2, siendo el único cambio que esta realiza, la nueva opción nos permite cambiar de visualización el tipo de gráfica, ya sea de posición o velocidades. Estas graficas se pueden expandir para dar la posibilidad de observar al detalle sus variaciones, como lo observamos en la Ilustración 5.7.

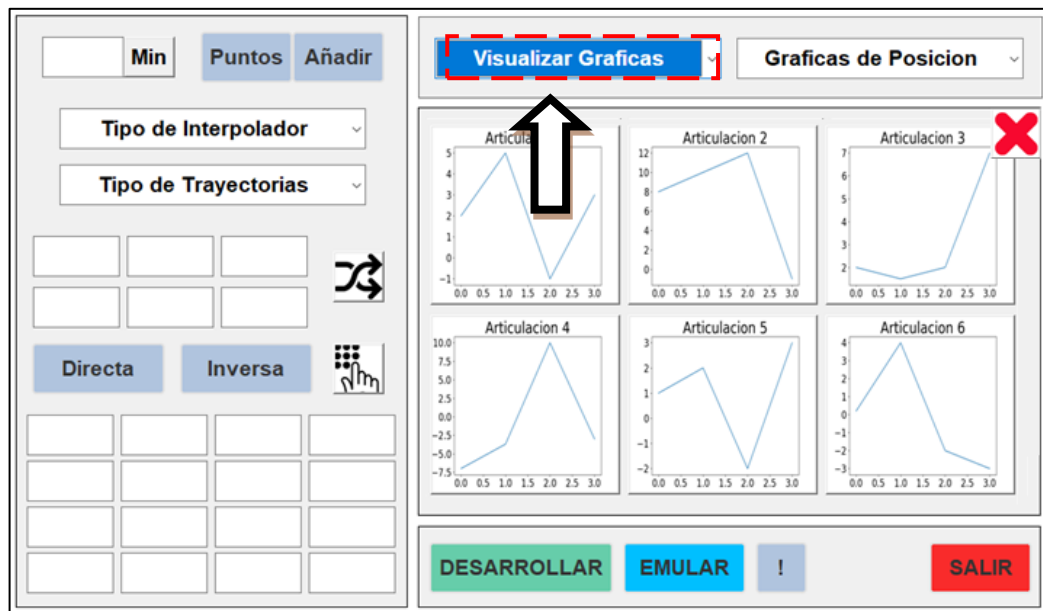


Ilustración 5.6: Atajo para visualizar las gráficas de trayectorias de las articulaciones en la página de control. Fuente: Autor

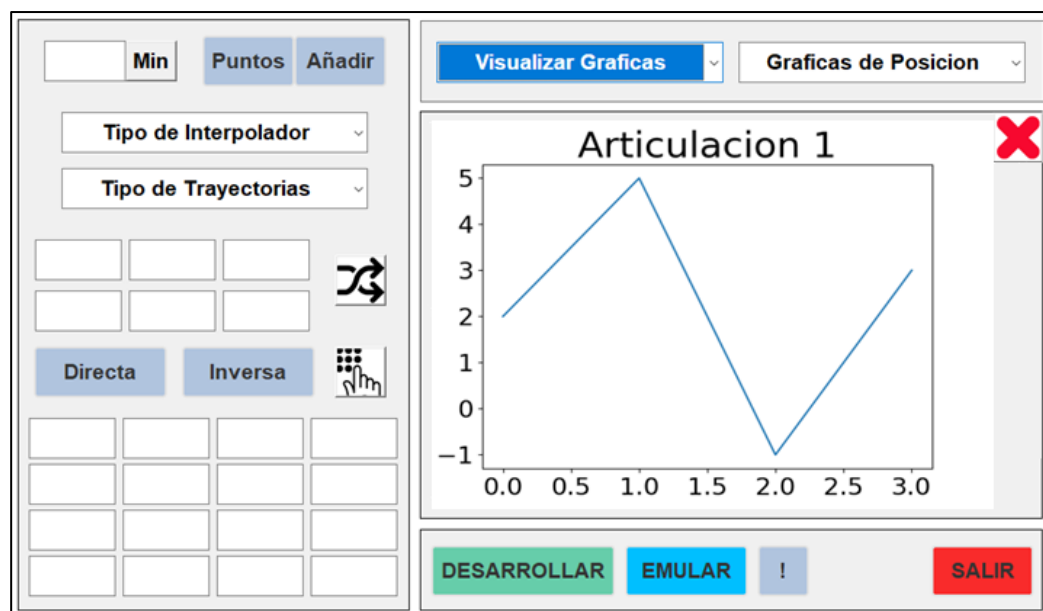


Ilustración 5.7: primer plano de la gráfica de trayectoria de la articulación 1 en la interfaz. Fuente: Autor.

Como ultimo cambio en la ventana 3, que se puede observar en la Ilustración 5.8, en donde por medio del botón “puntos”, ubicado en parte superior de la ventana 1, obtenemos una caja de texto, en el cual se despliega todos los puntos que serán ejecutados por el control cinemático.

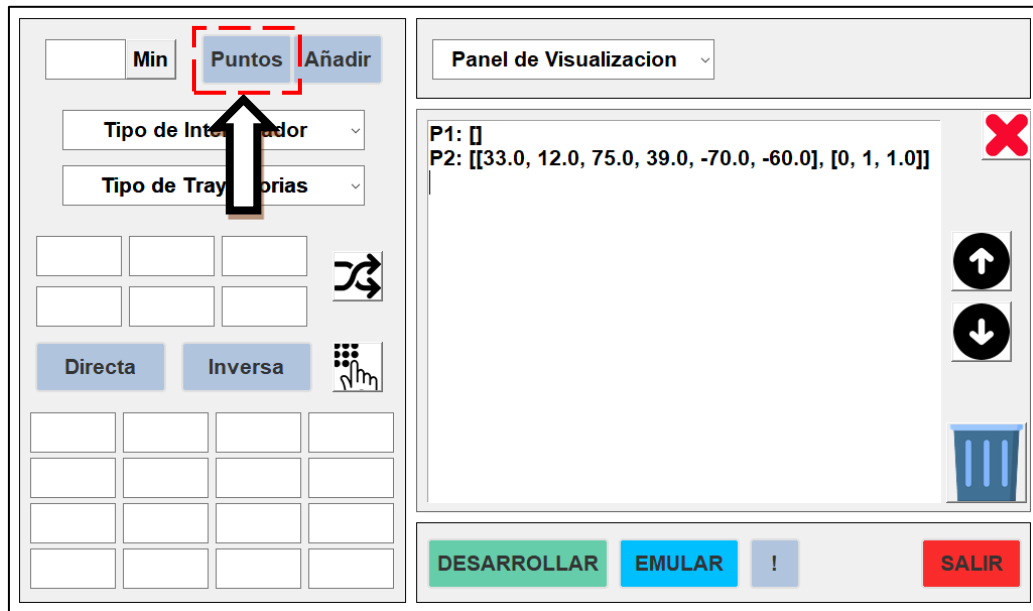


Ilustración 5.8: Atajos para la visualización de los puntos para la creación de las trayectorias. Fuente: Autor

5.2.1.2. Página de configuración

En la Ilustración 5.9, se puede observar la ubicación de las ventanas dentro de la página de configuración, en un primer plano, se observa la ubicación de los usos generales para la interfaz, en donde se exponen algunos conocimientos previos que debe de tener quien manipule el robot, así como una guía para el uso del control.

En esta página también se generan cambios en una ventana, específicamente en la ventana 1, en la cual de la información general se puede pasar a la utilidad de conexión de las articulaciones, enlazando los valores articulares en tiempo real, permitiendo al usuario posición adecuadamente el manipulador con una orientación en específico para el inicio del control cinemático (ver ilustración 5.10).

En este apartado de la interfaz, por medio de los modos ubicados en la ventana 2, se le da la posibilidad al usuario de posicionar el manipulador en un modo particular ya previamente definido, el modo “inicio”, en el cual el manipulador se posicionará de un modo particular, dejándolo listo para efectos de control. el otro modo llamado “transporte”, posición al manipulador de modo que su masa se distribuya uniformemente, evitando que todo el peso se concentre en un solo punto, así como de posicionar el manipulador al abrir sus pinzas y pegando las puntas a la superficie inferior proporcionando un mejor agarre.

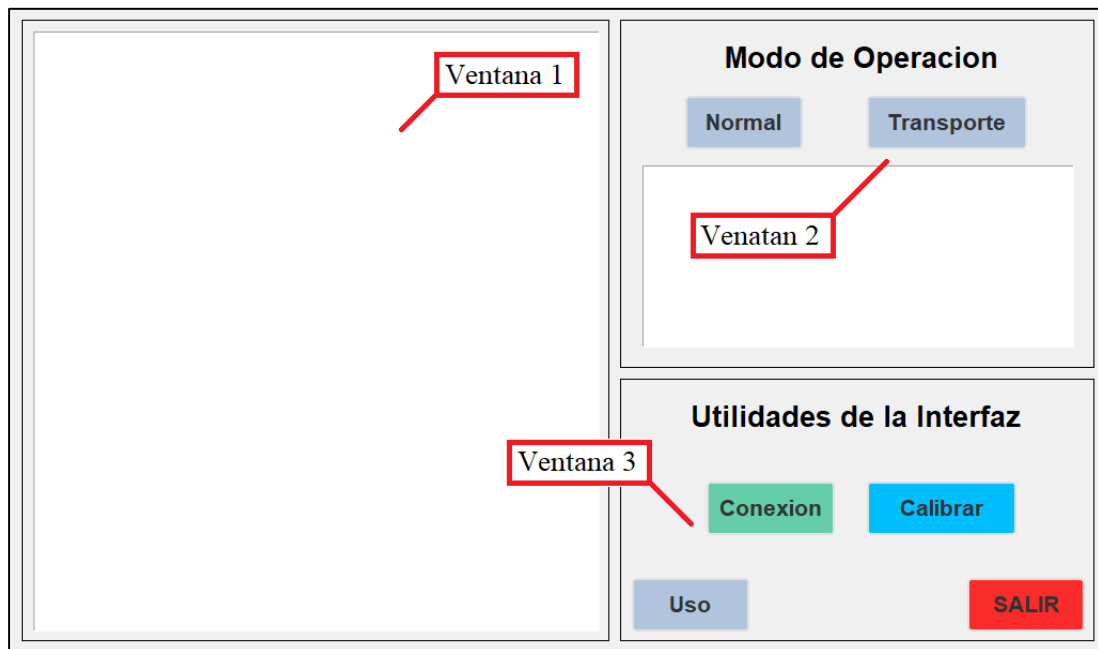


Ilustración 5.9: Ubicación de las ventanas en la página de configuración de la interfaz. Fuente: Autor.

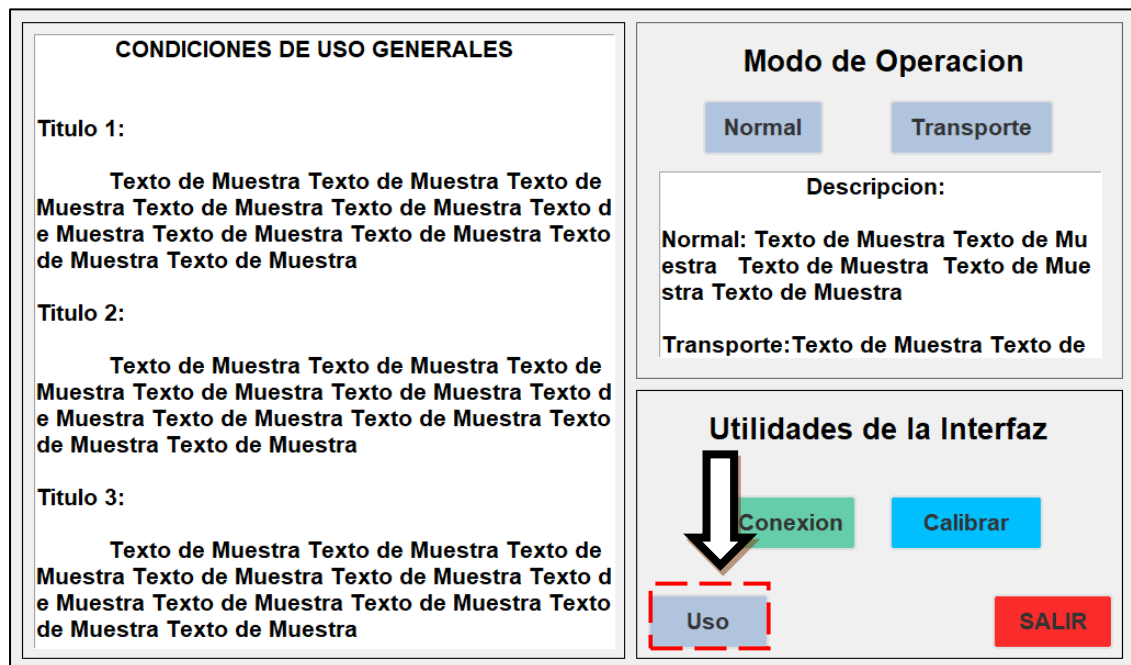


ilustración 5.10: atajos para la descripción de condiciones de usos generales. fuente: autor

Como ya se había expresado, al ingresar a este apartado, se muestra algunos usos o condiciones generales acerca del manipulador, si bien, la ventana 1 pueda cambiar, se puede volver al apartado por medio del botón llamado “uso”, que podemos observar en la ilustración 5.10, al oprimir este botón, se cerrara el contenido que esté expuesto en la ventana 1, para superponer nuevamente el texto.

Para poder ingresar al apartado de conexión en tiempo real de las articulaciones, se debe de oprimir sobre el botón llamado “conexión”, como se muestra en la Ilustración 5.11, una vez el usuario oprime dicho botón, se actualizará la ventana 1, en donde aparecerá una barra de desplazamiento por cada articulación, así como una pequeña caja de texto al lado de esta barra.

Allí habrá dos botones disponibles, uno llamado “conectar”, el cual, al oprimir habilitará la conexión en tiempo real, desplazando la barra a una ubicación relativa dependiendo del valor articular correspondiente a su posición, también, se podrá observar el valor articular de manera cuantitativa en las cajas de texto al lado derecho de cada barra. una vez conectado, el usuario podrá mover las articulaciones al desplazar la barra.

El segundo botón, llamado “desconectar”, deshabilita la conexión en tiempo real de las articulaciones, dejando sin efectos al usuario sobre la manipulación directa de las articulaciones. cabe resaltar, que, si el usuario no realiza la desconexión, al oprimir el botón “salir”, la desconexión se realizará de forma automática, para poder realizar el control.

Ilustración 5.11: Atajos para el enlace en tiempo real de las articulaciones. Fuente: Autor.

5.3. Implementación de la Interfaz

Para poder implementar la interfaz, esta será exportada como un programa, el cual va inicial cada vez que se encienda la Raspberry pi, como se observa en la Ilustración 5.12, sin la posibilidad de que el usuario pueda salir del programa, y solo al oprimir “salir”, se dará la orden de apagar el dispositivo. El usuario puede navegar dentro de la interfaz por medio de una pantalla táctil solo con oprimir la sección que desea, como se observa en la Ilustración 5.13.

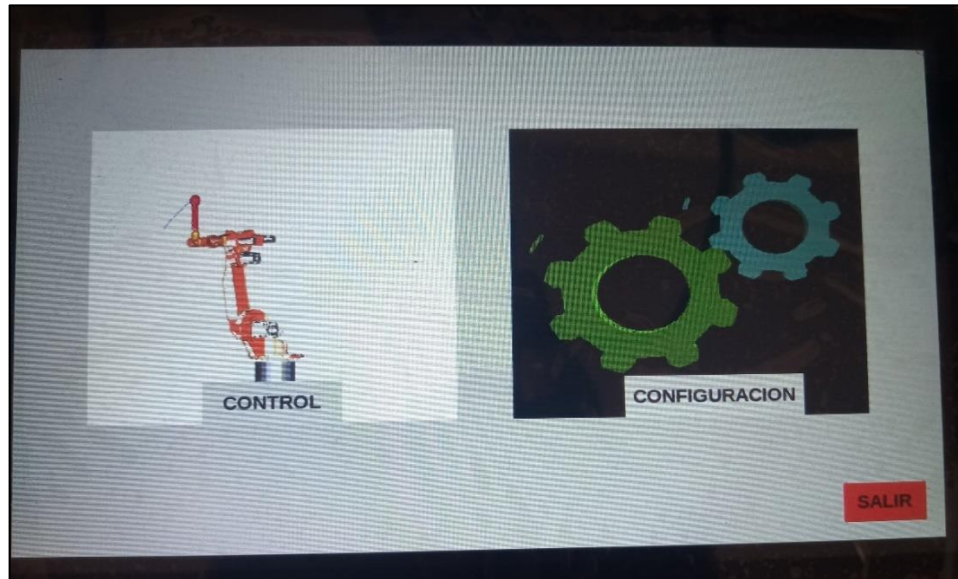


Ilustración 5.12: Imagen de la implementación de la interfaz. Fuente: Autor.

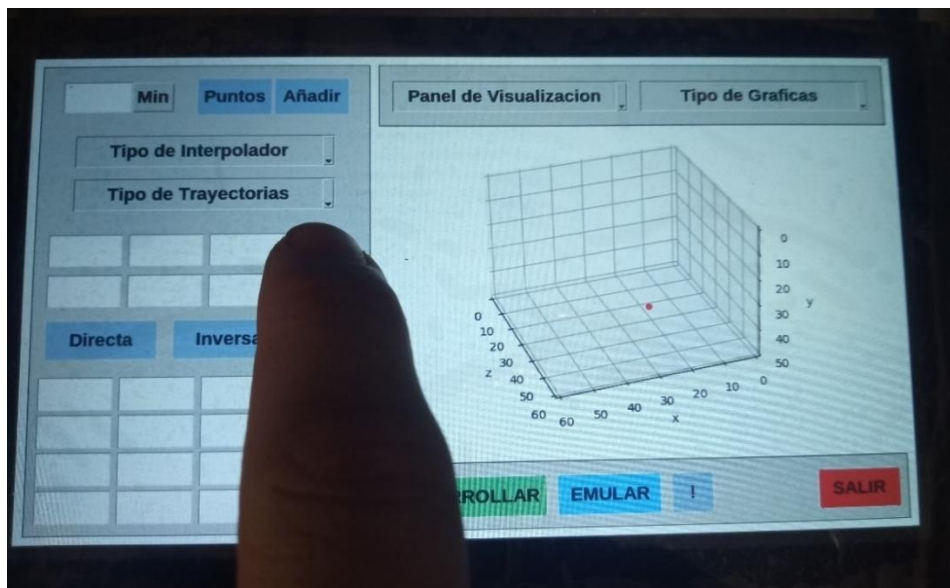


Ilustración 5.13: Imagen de navegación por la interfaz. Fuente: Autor.

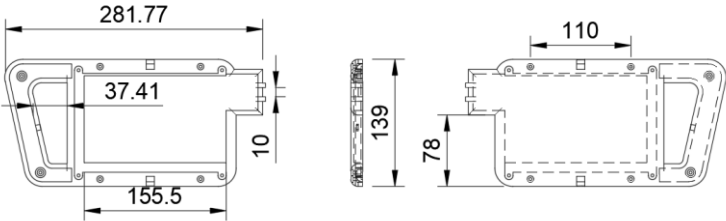
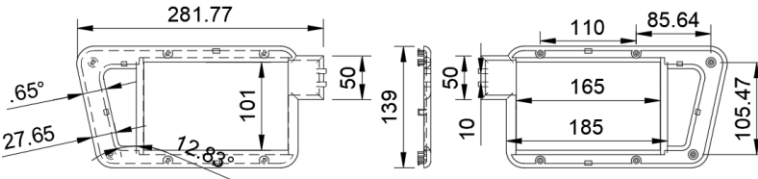
5.4. Diseño De Estructura Para Acople De Los Monitores

Para cumplir con la normativa en cuanto a la ergonomía visual, posicionar la pantalla de control en una ubicación fija, podría ocasionar cansancio a los usuarios, por ende, se decidió, que el usuario tuviera la posibilidad de manipular la pantalla por medio de una estructura que le ayudara a sostenerla con una mano o con dos manos, moviéndola libremente.

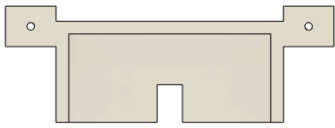
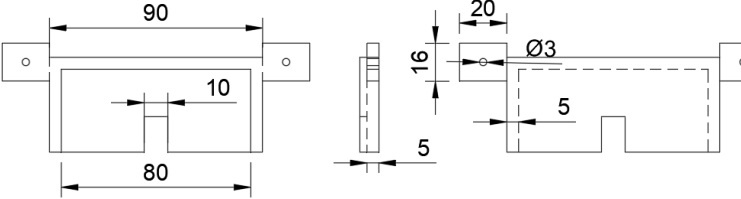
5.4.1. Diseño

Para el diseño de la estructura vuelven a aplicarse los criterios mecánicos ya plasmando anteriormente, para este caso en específico, se resalta la ergonomía, en cuanto a la posición de la flexión de la muñeca de la mano, al peso del conjunto estructura-pantalla y a la resistencia de la pieza. Obteniendo el prototipo detallado por piezas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Piezas del soporte de la pantalla. Fuente: Autor.

Pieza 1	Tapa Inferior
	Dimensiones 
	Funcionalidad es la cubierta de anclaje para la pantalla táctil, proporcionando los espacios adecuados para el buen funcionamiento.
Pieza 2	Tapa Superior
	Dimensiones 
	Funcionalidad esta tapa evita que se puedan desconectar o conectar algunos elementos a la pantalla, así como de dar un soporte extra a la estructura de la pieza, con un mejor acabado.

Continuacion de la Tabla 5.1

Pieza 3	Soporte Para El Anclaje
	Dimensiones
	
	Funcionalidad esta pieza es la base para el anclaje a la estructura, y soportará la pieza en general

El ensamblado final se puede observar en los renderizados de la Ilustración 5.14, donde se realiza una comparacion con el ambiente de trabajo para generar una idea de los tamaños de las piezas, cabe resaltar que solo se ingresan 2 cables a este soporte, uno de transmision de video, y otro de transmision de datos para el tactil.

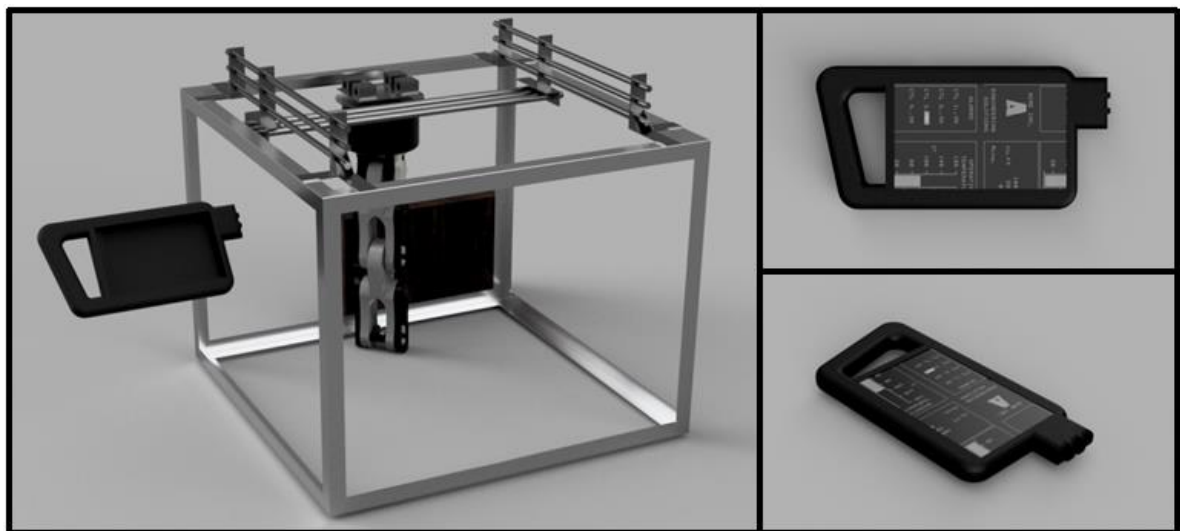


Ilustración 5.14: Renderizado de la estructura para la pantalla. Fuente: Autor

5.5. Validación de la Interfaz

Para la validación de la hmi se realizaron varias pruebas con valores articulares tanto aleatorios como conocidos, donde se validó todas las funciones que la interfaz prestará, como la generación de puntos aleatorios, el desarrollo y visualización de los tipos de trayectorias por medio de sus gráficas, así como la trayectoria que

seguirá el manipulador. Para ello, se estableció un paso a paso de los eventos que se generan al realizar la validación de la interfaz, que podemos observar en la Ilustración 5.15.

Algunos de los resultados obtenidos por medio de la validación los podemos constatar a continuación, en donde al introducir

Tabla 5.2: Resultados de la validación de la interfaz de control. Fuente: Autor.

Resultado n 1

art. 1	39 ► 30	art. 4	-45 ► -12
art. 2	18 ► 31	art. 5	-71 ► -54
art. 3	44 ► 82	art. 6	18 ► -74
tipo de interp.	trapezoidal		
tipo de trayect.	eje a eje		
tiempo deseado	0		

trayectorias articulares:

The figure displays six subplots showing joint trajectories for different articulations. Each plot has time on the x-axis and joint position on the y-axis.

- Articulacion 1:** Position decreases from 39 to 30 over 4.0 seconds.
- Articulacion 2:** Position increases from 18 to 31 over 18 seconds.
- Articulacion 3:** Position increases from 44 to 82 over 24 seconds. This plot is marked with a red X.
- Articulacion 4:** Position increases from -45 to -12 over 8.8 seconds.
- Articulacion 5:** Position increases from -71 to -54 over 1.6 seconds.
- Articulacion 6:** Position decreases from 18 to -74 over 4.0 seconds.

trayectoria cartesiana:

A 3D plot showing the Cartesian trajectory in a coordinate system with axes x, y, and z. The trajectory is a blue line starting from a red dot at approximately (30, 30, 30) and ending at approximately (20, 20, 20). The axes range from 0 to 60.

vista superior:

A top-down view of the Cartesian trajectory in the xy-plane. The trajectory is a blue line starting from a red dot at approximately (30, 30) and ending at approximately (20, 20). The axes range from 0 to 60.

Resultado n 2

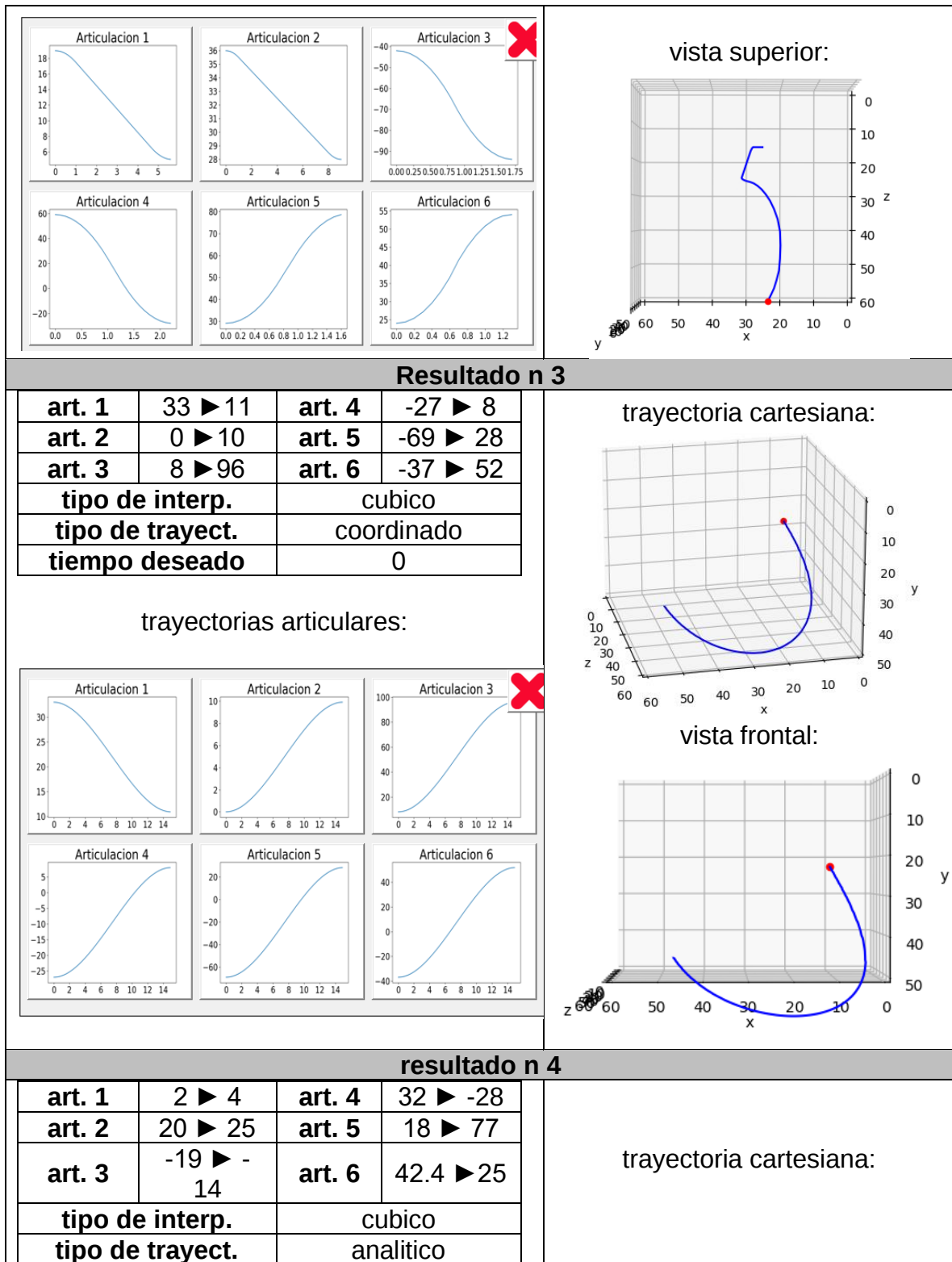
art. 1	19 ► 5	art. 4	59 ► -28
art. 2	36 ► 28	art. 5	29 ► 79
art. 3	-42 ► -94	art. 6	24 ► 54
tipo de interp.	trapezoidal		
tipo de trayect.	simultaneo		
tiempo deseado	0		

Trayectorias Articulares:

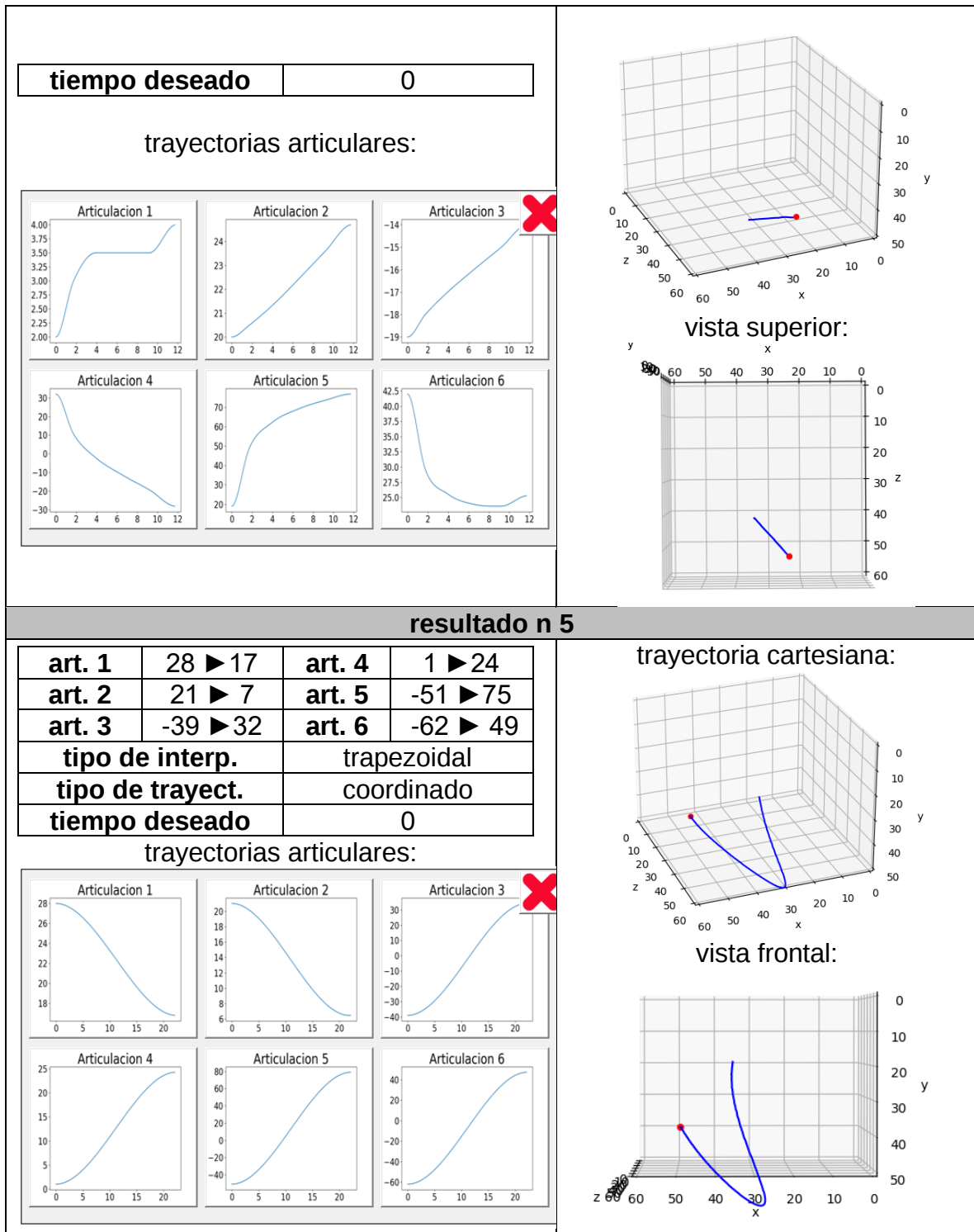
trayectoria cartesiana:

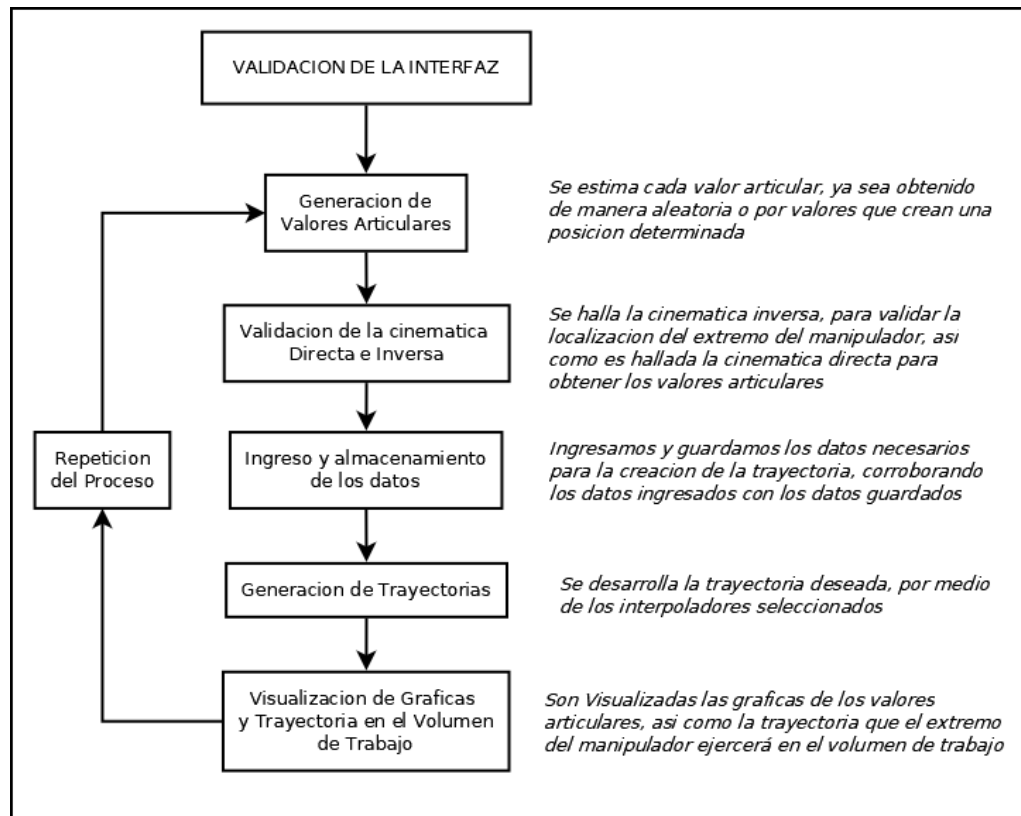
A 3D plot showing the Cartesian trajectory in a coordinate system with axes x, y, and z. The trajectory is a blue line starting from a red dot at approximately (30, 30, 30) and ending at approximately (20, 20, 20). The axes range from 0 to 60.

Continuacion de la Tabla 5.2



Continuacion de la Tabla 5.2





*Ilustración 5.15: Diagrama de pasos para la validación de la interfaz de control.
Fuente: Autor*

En la Tabla 5.2. se observan algunos de los resultados obtenidos de la validación de la interfaz de control, en el cual se visualiza en la segunda columna los tipos de trayectorias cartesianas generados por las condiciones dadas de la primera columna, que corresponden a los resultados de la unión de un punto inicial con su punto final en cada prueba, validando su correcto funcionamiento.



6. CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN EL CONTROL CINEMÁTICO DEL MANIPULADOR DIDÁCTICO COMO BANCO DE TRABAJO DE CÉLULA DE TRABAJO ROBOTIZADO A ESCALA

Este capítulo es el más corto, y está orientado al desarrollo del manipulador, armando el prototipo final, observando su construcción y ensamble de cada sección. En este capítulo se enfatiza sobre el desarrollo de las estructuras, sin tener en cuenta los acabados finales correspondiente a cada pieza.

Además, se busca desarrollar la protección necesaria para el funcionamiento exitoso de las trayectorias generadas por el extremo del manipulador, evitando desvíos de la trayectoria deseada, siempre y cuando, estas perturbaciones provengan por terceros y no por el usuario, que para efecto serán los instructores.

6.1. Ensamble del Brazo

El brazo se secciona en 3 partes por separados, que al unirlos crean el brazo, dos partes hacen referencia al ensamble 1, que se puede visualizar de manera aislada en la Ilustración 6.1, y la otra parte, dada por el ensamble 2, lo visualizamos en la Ilustración 6.2.

Para poder armar cada una de estas piezas se debe de seguir un paso a paso, en donde para armar el ensamble 1, primero se debe de ir ensamblando de la primera pieza a la última (de arriba hacia abajo), acoplando cada motor, así, garantizamos que no sea posible extraer de manera fácil ningún actuador, sin primero haber desamoblado todo el brazo.

Al igual, el diseño de construcción del ensamble 1, observado en la Ilustración 6.1, se tuvo en cuenta para su mantenimiento, pero por consideración, se da mayor importancia a que cualquier persona no pueda extraer de manera fácil ningún elemento del manipulador, sin realizar los pasos correctos.

Para realizar el ensamble 2, observado en la Ilustración 6.2 Ensamble 2. Fuente: Autor, este es armado de una manera muy interactiva, ya que cada pieza encaja de una posición y orientación en específico, haciendo que, llegado al caso de cambiar una pieza, se pueda realizar sin complicación alguna.

A fin de poder armar el brazo en su totalidad, primero se debe de unir las dos secciones del ensamble 1, al unir estas dos secciones se debe de garantizar la integridad de los cables internos para el buen funcionamiento de los motores. una vez unidas las 2 secciones, se incorpora al ensamble 2, obteniendo así, la figura de la Ilustración 6.3.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Ilustración 6.1: Ensamble 1. Fuente: Autor



Ilustración 6.2: Ensamble 2. Fuente: Autor

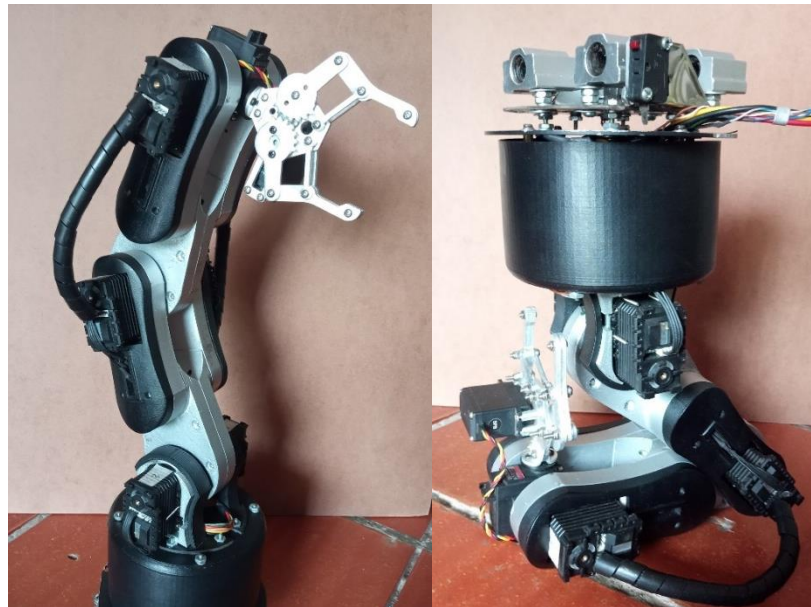


Ilustración 6.3: Imágenes del ensamble del manipulador. Fuente: Autor

Al realizar el acople de los ensambles, se termina de construir en su totalidad del manipulador, que podemos observar en físico en la Ilustración 6.3, dejándolo listo para ser unido al volumen de trabajo.

6.2. Estructura del Volumen de Trabajo

Antes de poder explicar el ensamble del manipulador al volumen de trabajo, se debe de explicar el desarrollo de la estructura del cuerpo de trabajo. Este se comprende de una estructura en acero, con forma de cubo, que, sobre este, van montadas las guías de la articulación 1, que podemos observar en los laterales de la Ilustración 6.4. sobre estas guías, van acopladas las guías de la articulación 2, ejes que se observan entre los laterales en la misma imagen.

El movimiento en los ejes laterales es transmitido desde el motor por medio de una cadena, que, a su vez girará un tornillo sin fin, desplazando una tuerca, que mueve los ejes de la articulación 2.



Ilustración 6.4: Imagen del volumen de trabajo. Fuente. Autor.



*Ilustración 6.5: Imagen del sistema de ejes y guías de las articulaciones 1 y 2.
Fuente. Autor.*

6.3. Acople del Manipulador a su Volumen de Trabajo

Ya una vez definida la estructura de trabajo, procedemos a explicar el proceso para el ensamble del manipulador a la estructura. Para poder realizar el acople, primero se deben de ingresar la guía a los ejes de la articulación 2, como se observa en la ilustración 6.6. Una vez ingresado a las guías, se procede a ajustar estas mismas, quedando fijas, siendo posible deslizar el manipulador sin restricción alguna de manera horizontal, como se observa en la ilustración 6.7.

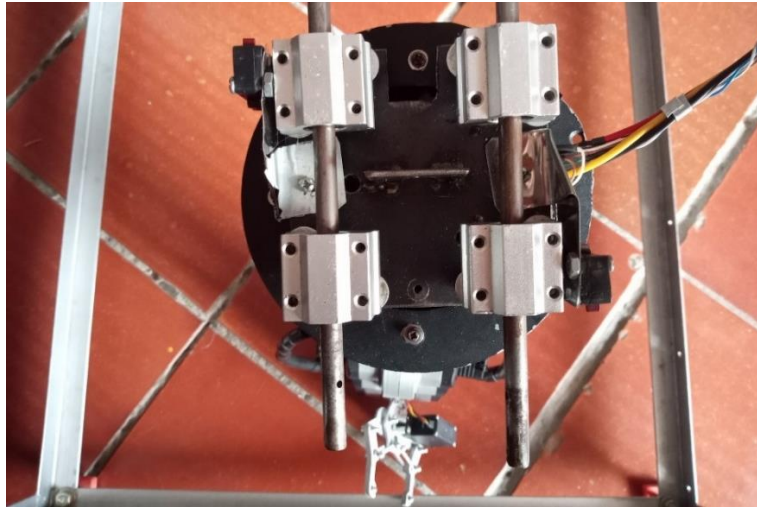


ilustración 6.6: paso para el ensamble del manipulador al volumen de trabajo. fuente: autor

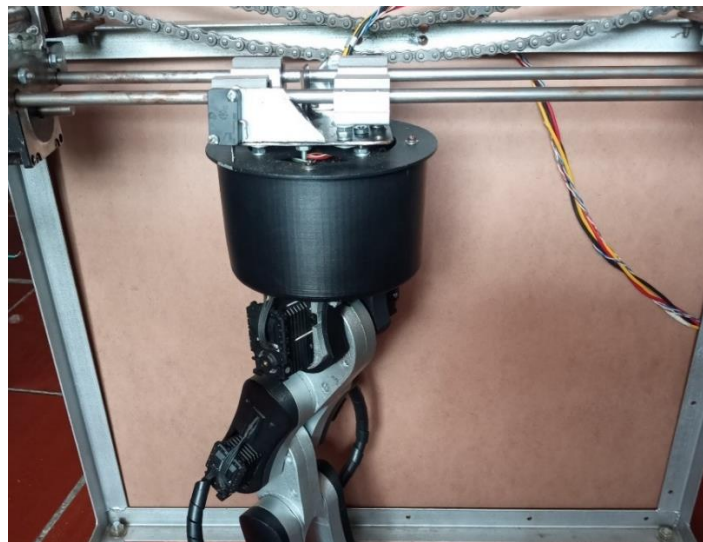


ilustración 6.7: ensamble del manipulador al volumen de trabajo. fuente: autor

6.4. Terminación

Una vez ensamblado el manipulador al volumen de trabajo, insertamos la varilla enroscada que proporcionará el movimiento de la articulación 2, a su vez, se introducen los cables en una coraza de plástico a fin de protegerlos, así como las conexiones internas en la caja distribuidora que contiene los dispositivos de control.

Una vez terminado estos pasos, se obtiene el banco de trabajo robótico del manipulador, ya listo para su funcionamiento, dado en la Ilustración 6.8. Recalamos que en estas imágenes no se visualizan los cavados de pintura y recubiertas necesarias para su total terminación e implementación, esto lo podemos ver a través de un renderizado en la ilustración 6.9.

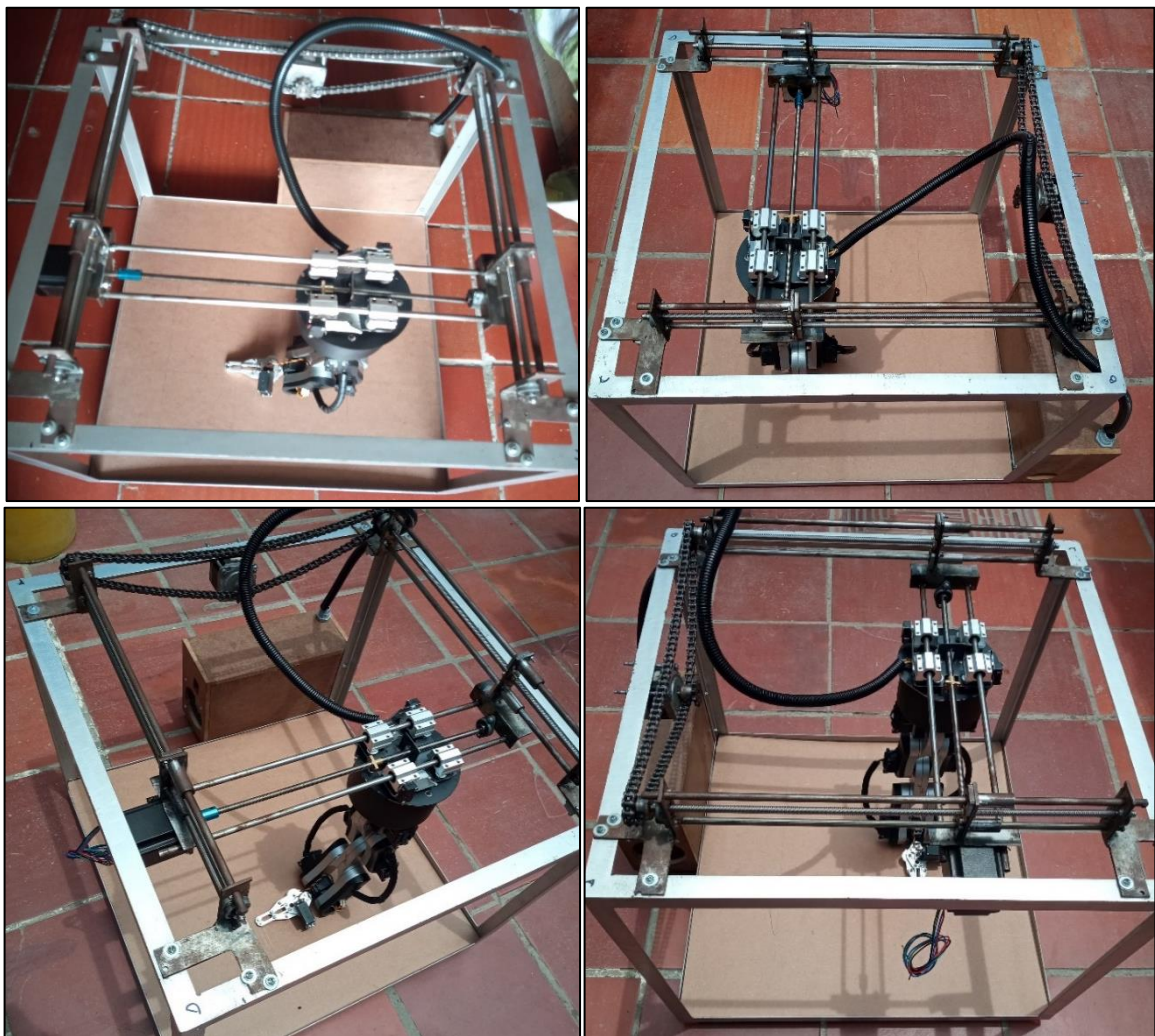


Ilustración 6.8: Imágenes del manipulador en su volumen de trabajo. Fuente: Autor

6.5. Sistema de Protección para la generación trayectorias y acabados del diseño

al no estar dotado el sistema de un control dinámico, que garantice el correcto posicionamiento del valor articular, mitigando las perturbaciones, es necesario proteger las trayectorias realizadas por el manipulador, las cuales son generadas por el control cinemático en un lazo de control abierto.

para su correcta protección, es solo de evitar que se presenten perturbaciones que desvíen el extremo del manipulador de su trayectoria generada. esto resulta muy sencillo, ya que se dispone de un cubo, el cual se puede forrar con un material que sea transparente y que no represente un peligro para los aprendices, como lo es el acrílico o láminas de plásticos rígidas transparentes.

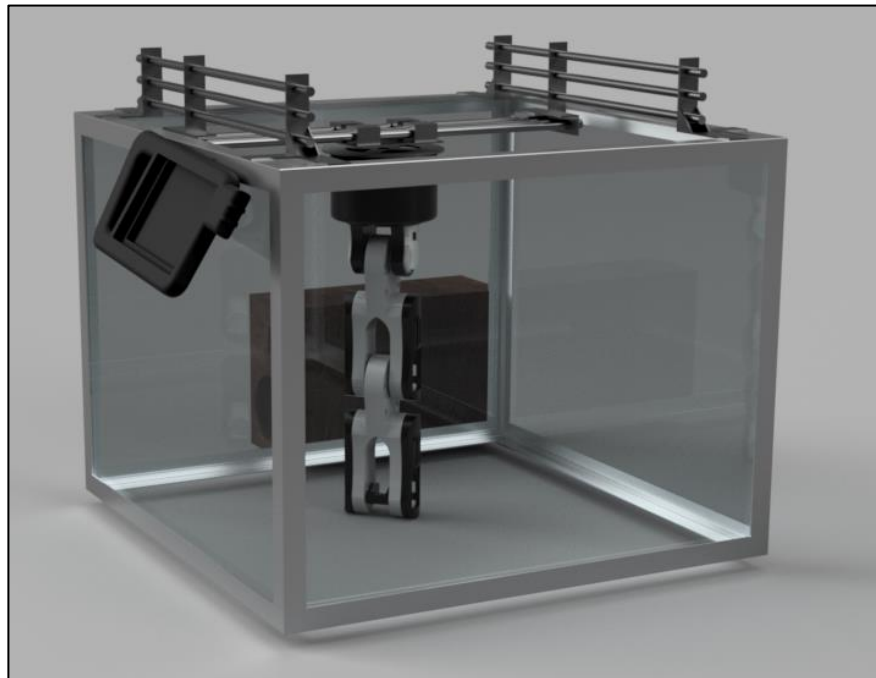


ilustración 6.9: renderizado del diseño final del manipulador. fuente: autor

6.6. Implementación Detallada del Manipulador.

6.6.1. Creación del Manipulador

Con el fin de detallar aún más la creación del manipulador, se procede a plasmar su implementación por medio de un diagrama en el cual se explican los pasos seguidos, observamos en la Ilustración 6.10

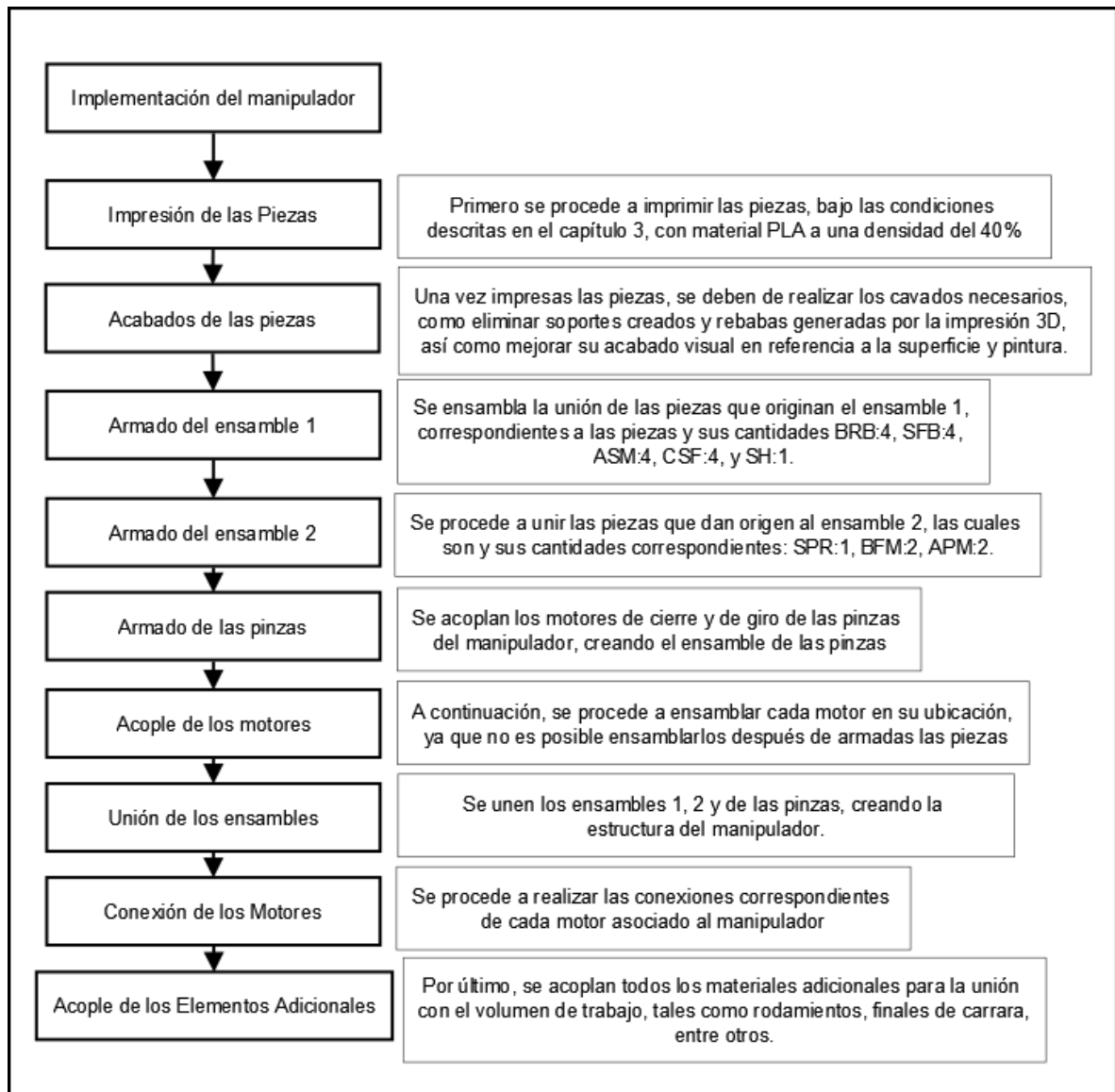


Ilustración 6.10: Estructura de la implementación del manipulador: Fuente: Autor.

6.7. Interruptores de Emergencia:

Se cuenta con 3 interruptores, el primer, observado en la ilustración 6.11, es para el reinicio de los motores del brazo, que llegado al caso de chocar con un obstáculo estos se apagaran, por lo cual se deben de reiniciar, el segundo interruptor de encendido que se observa en la ilustración 6.12, es para el apagado general del sistema desconectando la alimentación directamente, El ultimo pulsador, de la ilustración 6.13, es el de emergencia, el cual desacopla la alimentación de todos los

actuadores, sin apagar el sistema totalmente, como lo haría el interruptor de encendido.



*Ilustración 6.11: Interruptor para Reinicio de Actuadores del brazo (Art 3, 4, 5 y 6):
Fuente: Autor.*



Ilustración 6.12: Interruptor de alimentación general del sistema. Fuente: Autor.



Ilustración 6.13: Interruptor de Emergencia. Fuente: Autor.



7. capítulo 6: VALIDACIÓN Y RUTA DE GUÍA PARA APRENDIZAJE A TRAVÉS DEL BANCO DE TRABAJO ROBOTIZADO

7.1. Validación De Todo El Sistema De Control

Con dar finalidad al proyecto, para posteriormente generar las guías de aprendizaje, fin último de este proyecto, es necesario validar y comprobar el funcionamiento de todo el sistema de control, desde la lectura de los valores articulares deseados, hasta la posición correcta de ellos a través de las trayectorias generadas por el control cinemático.

Para ello, se estableció una metodología donde se tratará de plasmar adecuadamente la validación, observando con rigurosidad cada paso para completar la generación de la trayectoria correctamente, realizando las correcciones necesarias como ajustes de tiempo de lectura y escritura, calibración de articulaciones y corrección de datos.

7.1.1. metodología para le evaluación

Antes de poder establecer la metodología, existe la necesidad de abordar detalladamente la sección de control de la interfaz en un diagrama de flujo, donde se muestre los procesos llevados dentro de esta interfaz para poder visualizar o generar las trayectorias cartesianas realizadas por la extremidad del manipulador.

7.1.1.1. proceso de control

El proceso de control lo podemos representar por medio de un diagrama de flujo dado en la ilustración 7.2, enfocado solo a esta sección. al iniciar la interfaz se visualiza la página principal, donde básicamente existen 3 opciones: “configuración”, “control” y “salir”. al oprimir la segunda opción, se cambiará el entorno al entorno de la página 1, ya descrita anteriormente, el sistema queda en espera de las acciones del usuario, este antes de poder ejecutar el desarrollo, el cual es que el manipulador genere la trayectoria físicamente, debe de hacer primero la emulación de los puntos deseados que el usuario agregue al sistema.

Una vez ejecutado todos los pasos necesarios para iniciar el desarrollo, se leerá el estado de los actuadores, en el cual el manipulador adopta una posición en específico, como posición inicial, esto, para generar una activación de los relés de las articulaciones 1 y 2, con el fin de determinar si existe conexión. cabe resaltar que este proceso se realiza una vez se inicia el sistema y al realizar el enlace en tiempo real del manipulador, ya que una posible desconexión puede ser el causante de una mala estimación del punto del extremo del manipulador, ocasionando afectaciones en la estructura de este al tratar de salir del volumen de trabajo.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

7.1.1.2. metodología para la validación:

Teniendo claro el proceso para realizar las trayectorias, procedemos a establecer la metodología usada para la validación de todo el sistema de control, que podemos observar en la ilustración 7.1, en esta se realiza una breve descripción del proceso llevado en cada ítem.

Es de importancia aclarar que, durante el desarrollo de estos pasos, se fueron rectificando cada uno de ellos, con el fin de ir ajustando y corrigiendo en gran medida todo el sistema de control, así como se fue añadiendo restricciones y condiciones que posteriormente serán tratadas.

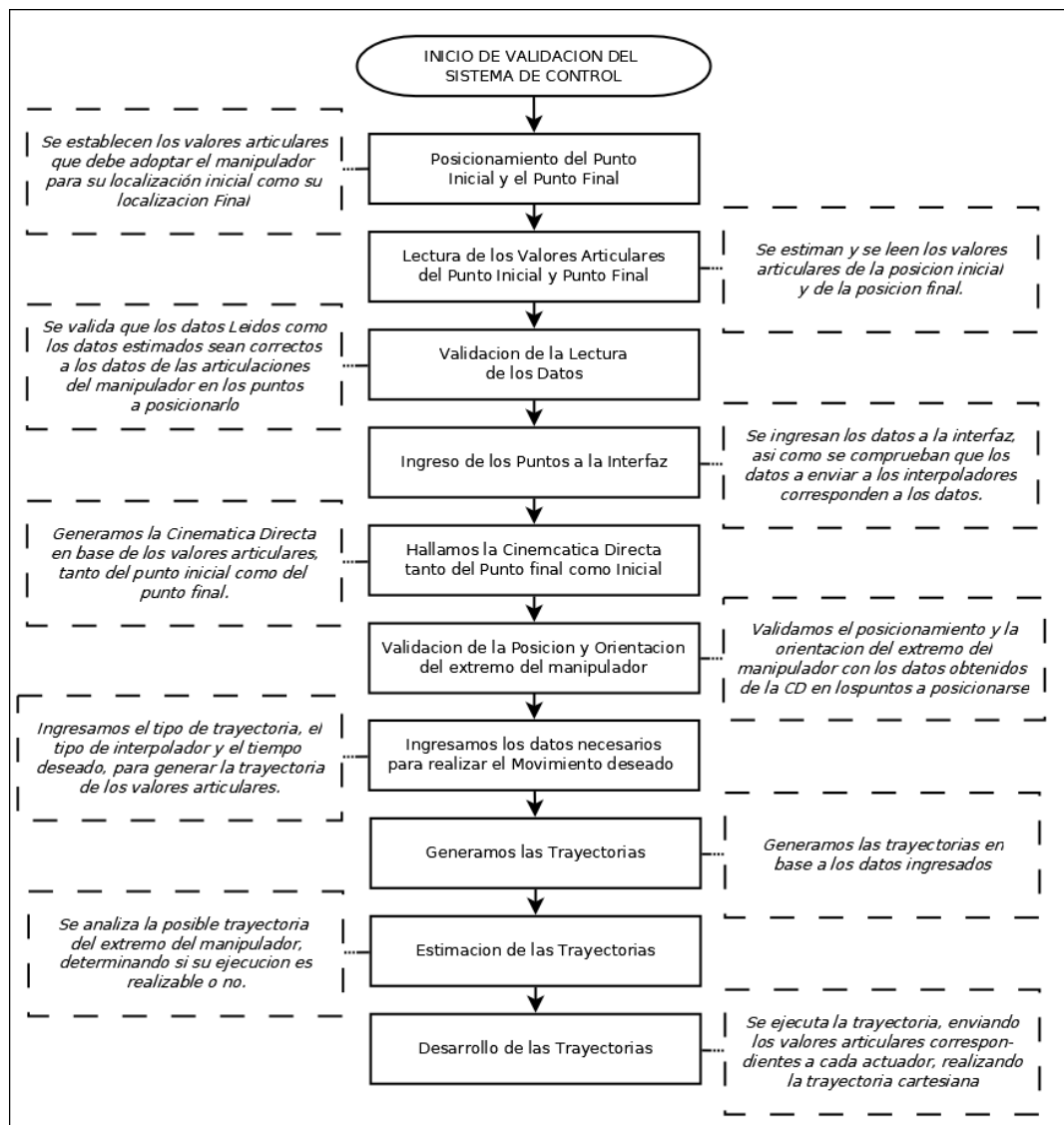


ilustración 7.1: metodología para la validación del sistema de control. fuente: autor

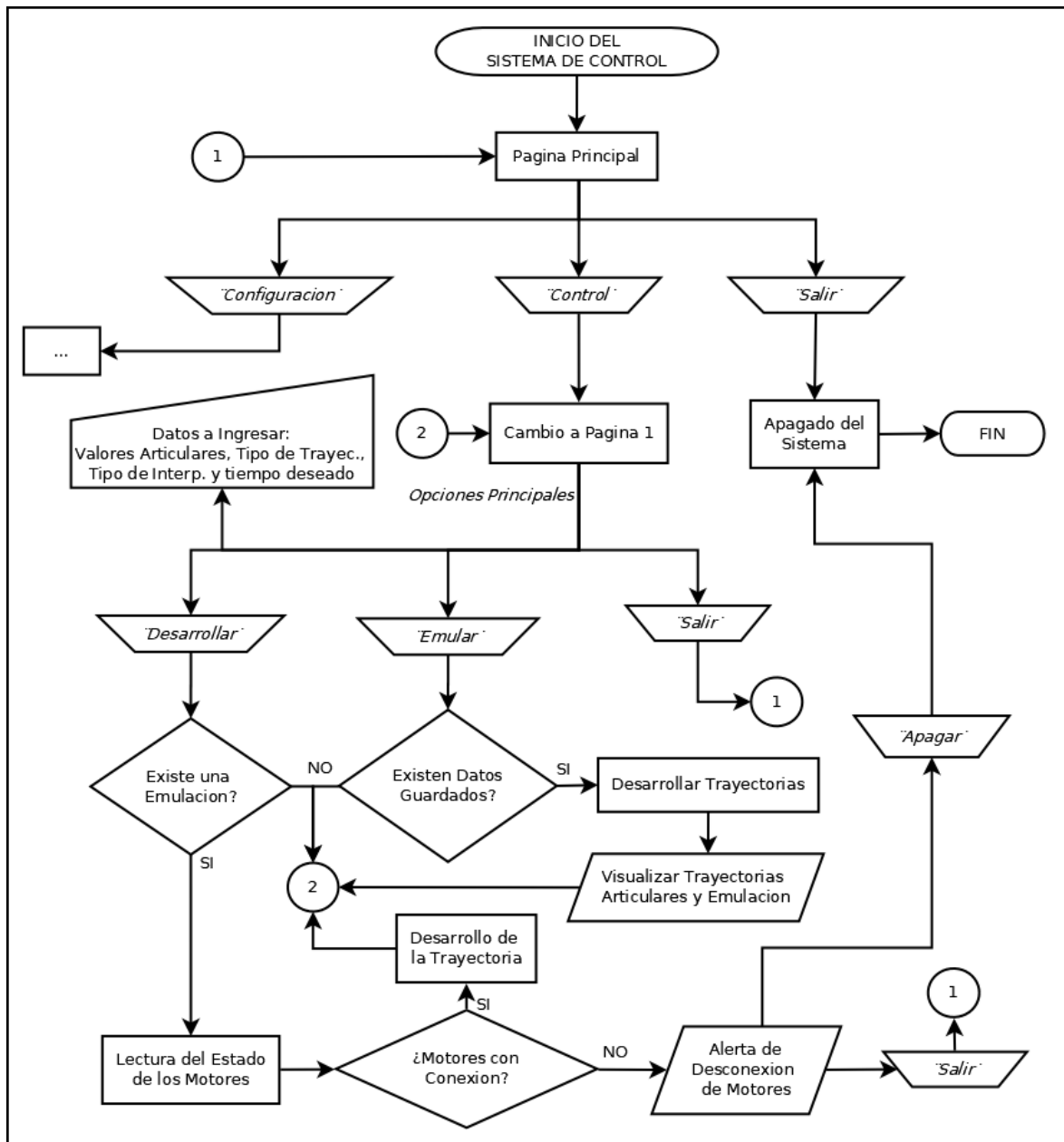


ilustración 7.2: diagrama de flujo del control cinemático. fuente: autor

7.1.2. Pruebas

Una vez corregido algunos errores dentro del sistema de control, así como el ajuste de algunos parámetros, procedemos a mostrar los resultados de la ejecución del control cinemático. para ello, se documentaron básicamente 3 pruebas predefinidas,

con diferentes tipos de trayectorias e interpoladores, en el cuales se siguió la metodología establecida para su desarrollo.

Para el desarrollo de las pruebas, se predeterminaron 4 puntos dentro del volumen de trabajo, llamados a, b, c y d, cada uno de estos tiene una posición de articulación determinada, dadas por:

valores articulares:

puntos:

art. 1, art. 2, art. 3, art. 4, art. 5, art. 6

a:	0, 0, 8, -30, 30, 90
b:	14, 11.5, -35, -20, 70, 80
c:	28, 16, 80, 40, 80, -90
d:	13, 13, 105, 20, 70, -30

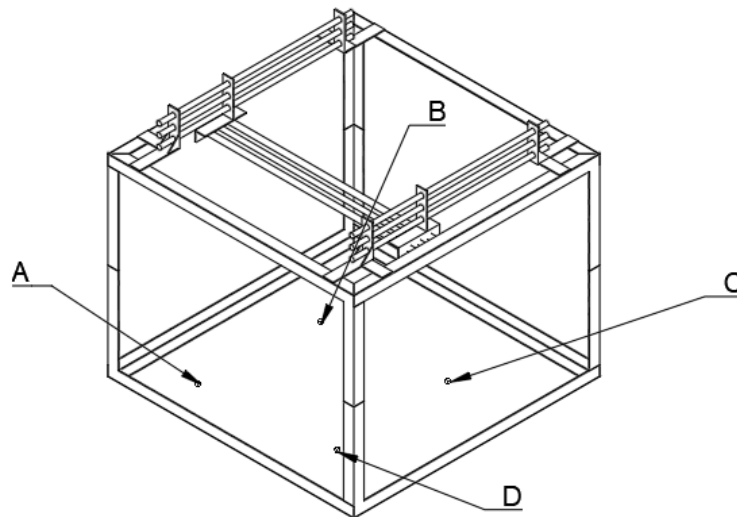


ilustración 7.3: ubicación del extremo del manipulador en el volumen de trabajo de acuerdo a los puntos a, b, c y d. fuente: autor

7.1.2.1. Prueba 1

Para la primera prueba, se desea llevar el extremo del manipulador de la posición a, a la posición c, por medio de una trayectoria en línea recta, correspondiente a una trayectoria analítica con el interpolador cubico con tiempo deseado de cero.

tabla 7.1: posiciones articulares del punto inicial de la prueba 1. fuente: autor

punto inicial			
articulación	valor deseado (Vd)	valor real (Vr)	error absoluto $E_{Abs} = Vd - Vr $
1	0	0.3	0.3
2	0	0.2	0.2
3	8	7.8	0.2
4	-30	-33.75	3.75
5	30	30	0
6	90	90	0



ilustración 7.4: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto inicial de la prueba 1. fuente: autor

tabla 7.2: posiciones articulares del punto final de la prueba 1. fuente: autor

punto final			
articulación	valor deseado (Vd)	valor real (Vr)	error absoluto $E_{Abs} = Vd - Vr $
1	28	27.6	0.4
2	16	16.1	0.1
3	80	80	0
4	40	43.75	3.75
5	80	82.5	2.5
6	-90	-90	0



ilustración 7.5: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto final de la prueba 1. fuente: autor

Se ingresan los puntos deseados al sistema para hallar la cinemática directa y validamos la posición del extremo del manipulador

0.0	0.0	8.0		28.0	16.0	80.0	
-30.0	30.0	90.0		40.0	80.0	-90.0	
Directa	Inversa			Directa	Inversa		
0.139	0.0	0.99	14.8	0.492	0.853	0.174	57.947
0.0	-1.0	0.0	47.057	0.866	-0.5	0.0	35.116
0.99	0.0	-0.139	17.694	0.087	0.15	-0.985	44.928
0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0

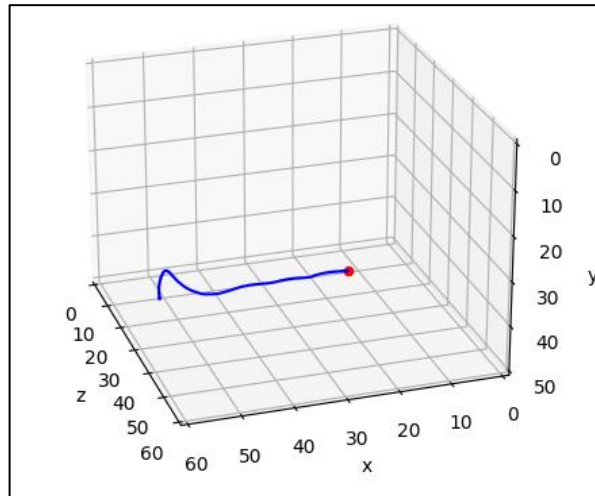
ilustración 7.6: cinemática directa del punto inicial y del punto final respectivamente de la prueba 1. fuente: autor

al cumplir con los valores de la tabla 7.1 y la tabla 7.2, garantizamos que la rotación del extremo del manipulador sea la deseada, y nos enfocaremos en la posición del extremo y en su trayectoria.

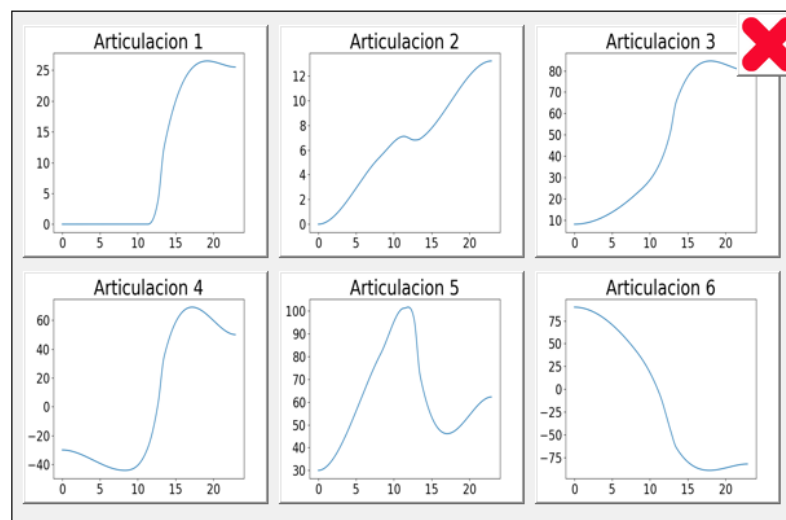
tabla 7.3: porcentaje de error de la ubicación del extremo del manipulador en sus puntos deseados por la prueba 1. Fuente: Autor.

ubicación del extremo	
punto inicial	punto final

valor deseado	valor real	error relativo	valor deseado	valor real	error relativo
px = 14.8 py = 47 pz = 17.6	px = 15.2 py = 46.2 pz = 17.4	ex = 2.7% ey = 1.7% ez = 1.13%	px = 57.94 py = 35.1 pz = 44.9	px = 55.6 py = 35.5 pz = 42.5	ex = 4.03% ey = 1.14% ez = 5.3%



grafica 7.1: trayectoria cartesiana generada por el interpolador cubico en una trayectoria analítica en la prueba 1. fuente: autor



grafica 7.2: trayectorias articulares generada por el interpolador cubico en una trayectoria analítica en la prueba 1. fuente: autor

Observamos que la grafica 7.1, no presenta trayectorias fuera del volumen de trabajo, por lo cual esta trayectoria es posible de realizar por el manipulador, tambien dentro de la interfaz, se analiza cada una de las posiciones articulares para saber si algun punto del manipulador pasa o se sale de los limites del volumen, de cualquier modo, en caso de presentarse dicho inconveniente, se enviará una alerta al usuario y no se podrá realizar el movimiento.

Al observar la grafica 7.2, esta no presenta ninguna discontinuidad de sus trayectorias articulares en el dominio del tiempo, por lo cual hace que esta trayectoria sea posible realizarse.

7.1.2.2. prueba 2

en la segunda prueba, deseamos llevar el extremo del manipulador del punto d a la posición del punto b, por medio de una trayectoria simultánea, a través de un interpolador trapezoidal

tabla 7.4: posiciones articulares del punto inicial de la prueba 2. Fuente: Autor

punto inicial			
articulación	valor deseado (Vd)	valor real (Vr)	error absoluto $E_{Abs} = Vd - Vr $
1	13	13.2	0.2
2	13	13.3	0.3
3	105	105	0
4	20	22.50	2.5
5	70	70	0
6	-30	-26.88	3.12



ilustración 7.7: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto inicial de la prueba 2. fuente: autor

tabla 7.5: posiciones articulares del punto final de la prueba 2. Fuente: Autor.

punto final			
articulación	valor deseado (Vd)	valor real (Vr)	error absoluto $E_{Abs} = Vd - Vr $
1	14	13.8	0.2
2	11.5	11.7	0.2
3	-35	-35.00	0
4	-20	-22.50	2.5
5	70	70.00	0
6	80	-80.00	0

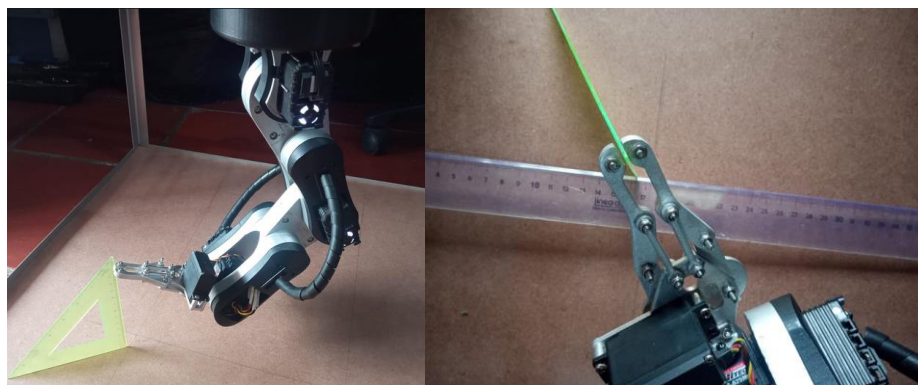


ilustración 7.8: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto final de la prueba 2. fuente: autor

Se ingresan los puntos deseados al sistema para hallar la cinemática directa para validar la posición del extremo del manipulador, observada en la ilustración 7.9.

13.0	13.0	105.0	
20.0	70.0	-30.0	
Directa		Inversa	
0.837	0.483	-0.259	
0.5	-0.866	0.0	40.126
-0.224	-0.129	-0.966	17.05
0.0	0.0	0.0	1.0

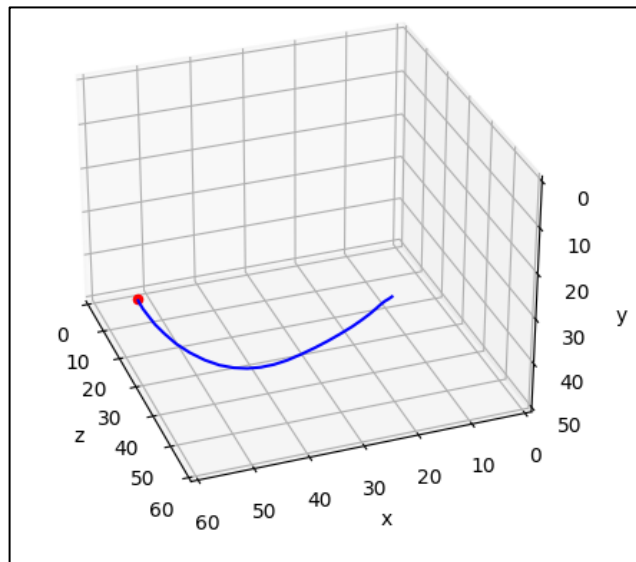
14.0	11.5	-35.0	
-20.0	70.0	80.0	
Directa		Inversa	
-0.439	0.369	0.819	
-0.643	-0.766	0.0	34.59
0.628	-0.527	0.574	39.194
0.0	0.0	0.0	1.0

ilustración 7.9: cinemática directa de la prueba 2, del punto inicial y del punto final respectivamente. fuente: autor

Al cumplir con los valores de la tabla 7.4 y la tabla 7.5, aseguramos al igual que la prueba anterior, que la rotación del extremo del manipulador sea la deseada, y nos enfocaremos en la posición del extremo y en su trayectoria.

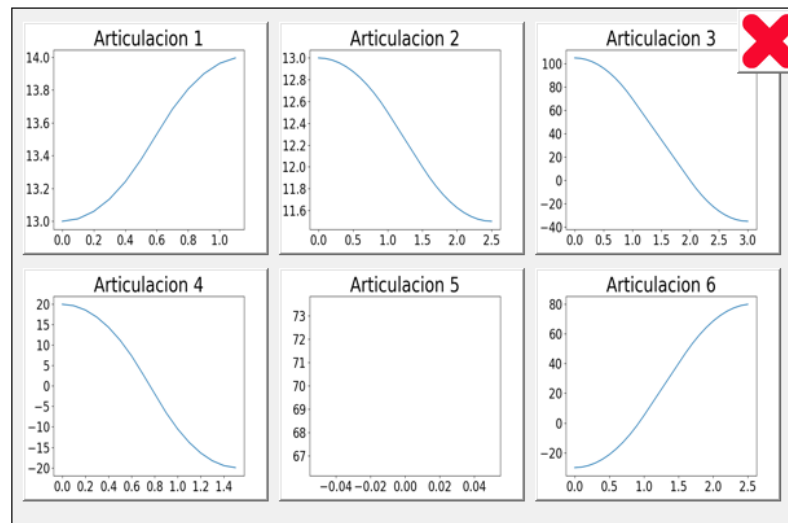
tabla 7.6: porcentaje de error de la ubicación del extremo del manipulador en sus puntos deseados de la prueba 2. Fuente: Autor

ubicación del extremo					
punto inicial			punto final		
valor deseado	valor real	error relativo	valor deseado	valor real	error relativo
px = 56.67 py = 40.13 pz = 17	px = 54.5 py = 41.2 pz = 15.5	ex = 3.83% ey = 2.67% ez = 8.8%	px = 16.26 py = 34.59 pz = 39.19	px = 16.5 py = 35.8 pz = 40	ex = 1.5% ey = 3.5% ez = 2%



grafica 7.3: trayectoria cartesiana generada por el interpolador trapezoidal en una trayectoria simultánea en la prueba 2. fuente: autor

Al observar la grafica 7.3, que ilustra la trayectoria deseada por parte del extremo del manipulador, no presenta ninguna discontinuidad, trayectos fuera del volumen de trabajo, por lo cual, esta trayectoria es posible de realizar, tambien dentro de la interfaz.



grafica 7.4: trayectorias articulares generada por el interpolador trapezoidal en una trayectoria simultánea en la prueba 2. fuente: autor

Al observar las trayectorias articulares, esta no presenta ninguna discontinuidad de sus trayectorias en el dominio del tiempo, por lo cual hace que esta trayectoria sea posible realizarse.

7.1.2.3. prueba 3

Para la tercera y última prueba, se va desarrollar como posición inicial la posición correspondiente al punto b, a través de una trayectoria en línea recta, propia de una trayectoria analítica en base a un interpolador cubico, hasta el punto o posición final, el cual será la posición del punto c. para esta nueva trayectoria, no se tomarán valores de lectura a los anteriores, y se tomarán nuevamente.

tabla 7.7: posiciones articulares del punto inicial de la prueba 3. Fuente: Autor

punto inicial			
articulación	valor deseado (Vd)	valor real (Vr)	error absoluto $E_{Abs} = Vd - Vr $
1	28	28.1	0.1
2	16	15.8	0.2
3	80	80.0	0
4	40	41.25	1.25
5	80	80.00	0
6	-90	90.00	0



ilustración 7.10: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto inicial de la prueba 3. fuente: autor

tabla 7.8: posiciones articulares del punto final de la prueba 3. Fuente: Autor

punto final			
articulación	valor deseado (Vd)	valor real (Vr)	error absoluto $E_{Abs} = Vd - Vr $
1	14	13.8	0.2
2	11.5	11.5	0
3	-35	-35.00	0
4	-20	-20.63	0.63
5	70	70.00	0
6	80	-80.00	0



ilustración 7.11: imágenes del extremo del manipulador sobre el punto final de la prueba 3. fuente: autor

Obtenemos los valores de la cinemática directa para comparar la posición del extremo del manipulador deseada con la real:

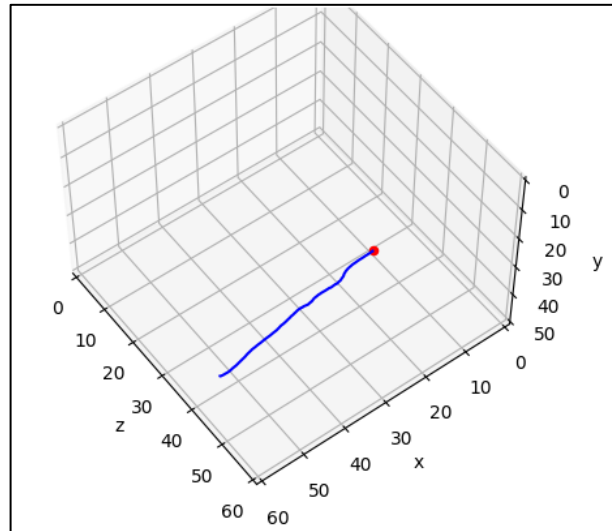
14.0	11.5	-35.0		28.0	16.0	80.0	
-20.0	70.0	80.0		40.0	80.0	-90.0	
Directa	Inversa			Directa	Inversa		
-0.439	0.369	0.819	16.261	0.492	0.853	0.174	57.947
-0.643	-0.766	0.0	34.59	0.866	-0.5	0.0	35.116
0.628	-0.527	0.574	39.194	0.087	0.15	-0.985	44.928
0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0

ilustración 7.12: cinemática directa del punto inicial y del punto final respectivamente de la prueba 3. fuente: autor

Al cumplir con los valores de la tabla 7.1 y la tabla 7.2, garantizamos que la rotación del extremo del manipulador sea la deseada, y nos enfocaremos en la posición del extremo y en su trayectoria.

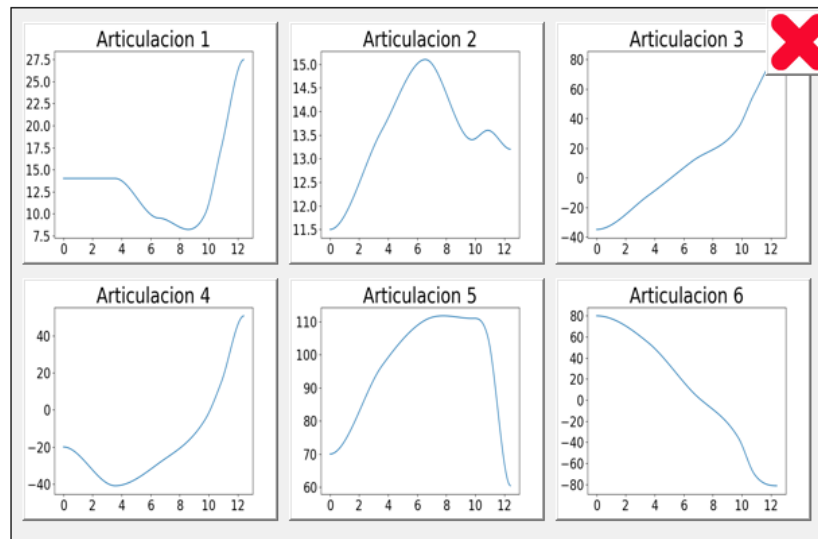
tabla 7.9: porcentaje de error de la ubicación del extremo del manipulador en sus puntos deseados de la prueba 3. Fuente: Autor

ubicación del extremo					
punto inicial			punto final		
valor deseado	valor real	error relativo	valor deseado	valor real	error relativo
px = 16.26 py = 34.59 pz = 39.19	px = 15.5 py = 35.8 pz = 40.8	ex = 4.6% ey = 3.5% ez = 4.1%	px = 57.94 py = 35.11 pz = 44.93	px = 56 py = 36 pz = 43.6	ex = 3.3% ey = 2.5% ez = 2.9%



grafica 7.5: trayectoria cartesiana generada por el interpolador cubico por una trayectoria analítica en la prueba 3. fuente: autor

Al igual que las pruebas anteriores, no se observa trayectorias por fuera del volumen de trabajo en la grafica 7.5, por lo cual, la hace potencial para su desarrollo.



grafica 7.6: trayectorias articulares generada por el interpolador cubico por una trayectoria analítica en la prueba 3. fuente: autor

Igualmente, las trayectorias articulares dadas, por la grafica 7.6, no presenta discontinuidades, esto es importante, ya que son los valores articulares que se les enviaran a los actuadores.



7.1.3. consideraciones:

Al no contar con un sistema de precisión en la articulación 1 y en la articulación 2 qué garantice la posición deseada, obtenemos que después de realizar múltiples pruebas sin reiniciar las articulaciones, se concluyó que, después de 3 pruebas simultáneas el manipulador subía más su porcentaje de error, por ende, con el fin de garantizar el porcentaje de error más pequeño posible, se decidió que el manipulador o las articulaciones 1 y 2 se tuviesen que reiniciar antes de generar o realizar una nueva trayectoria, garantizando que este factor no introduzca o no incida de manera negativa en la exactitud de la posición del extremo del manipulador.

7.2. Guías y Ruta de Aprendizaje

Para realizar las guías de prácticas para el desarrollo o el desempeño de actividades relacionadas a la adquisición de conocimiento del área de robótica, a través de este banco de trabajo, es necesario contar con algunos conocimientos enfocados hacia la orientación y el aprendizaje de niños y jóvenes, conocimientos de los cuales no se cuentan, por lo cual, realizar unas guías por parte del autor, no serán muy eficientes para el aprendizaje de los jóvenes o estudiantes que están aprendiendo con el banco de trabajo robótico, al contrario, podemos llegar a caer en un desinterés por parte de los jóvenes a la hora de seguir una única metodología educativa que se proponga, por lo cual, para la desarrollo de las guías, se sugiere que un educador o una persona con conocimientos en la materia desarrolle estas guías.

Para poder desarrollar las guías, se dejará planteada una metodología o pasos a seguir en donde el estudiante pueda comprobar o adquirir algunos conocimientos básicos a través de la observación o interacción directa con el manipulador. cabe señalar nuevamente, que el fin último, de cómo se debe de enseñar, por medio de una metodología educativa, está fuera de mis estudios. estos pasos a seguir, evidencian conocimientos como el control numérico de dispositivos, que en este caso es un manipulador, la integración a proceso de automatización como banco de trabajo y la adquisición de algunos conocimientos básicos en la parte de control, robótica, mecánica, entre otros.

De esta manera, los aprendices a los que llega tecnoacademia bajo la modalidad itinerante en zonas rurales, contarán con una formación educación más profunda y de una manera más práctica, donde puedan interactuar de manera directa y no teórica los conceptos relacionados a la robótica.

7.2.1. Metodología:

Antes de poder iniciar las enseñanzas en el área de robótica, es fundamental de que el aprendiz tenga conocimientos básicos en áreas de electrónica, como de



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co

mecánica, ya que son la base para entender el funcionamiento del banco de trabajo, puesto que, para poder comprender la interacción de cada uno de los elementos, es necesario abordar algunos temas básicos acerca de programación, dispositivos de desarrollo, actuadores eléctricos, eslabones, juntas, rodamientos, tipos de engranes, entre otros.

Con el fin de desarrollar unas actividades en donde el aprendiz interactúe de forma directa con el manipulador, adquiriendo un aprendizaje de forma directa con el banco de trabajo, propongo una serie de actividades descritas por la ilustración 7.13, en las cuales, el facilitador deberá profundizar, o si por consideraciones de él, podrá cambiar, por los temas ya mencionados anteriormente.

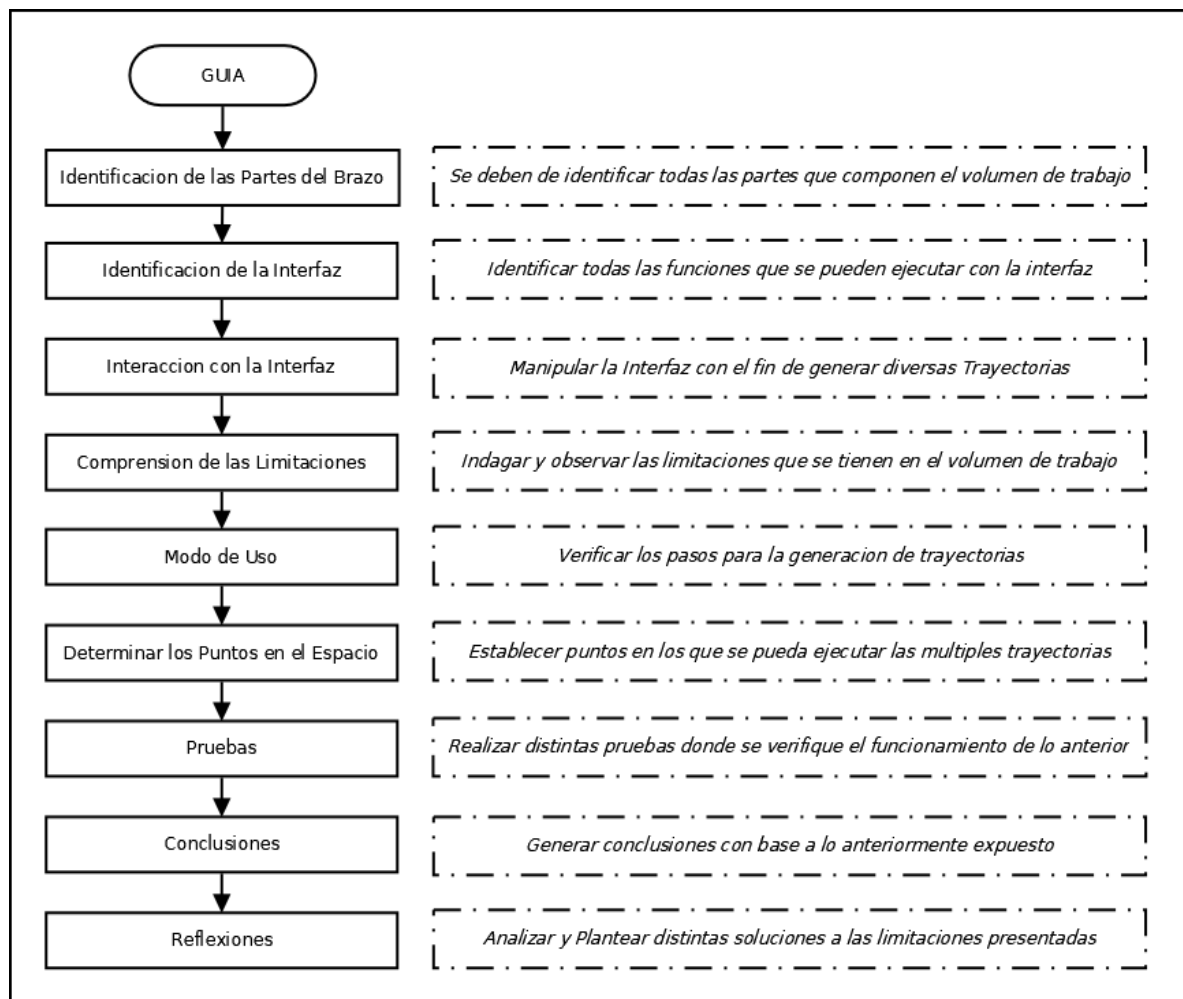


ilustración 7.13: diagrama de flujo de la metodología de aprendizaje con el banco de trabajo robotizado. fuente: autor

El primer paso, es la identificación de cada uno de los componentes o partes que conforman todo el banco de trabajo del manipulador, identificando sus secciones, sus piezas, su volumen de trabajo, sus limitaciones, sus actuadores, sus conexiones, las uniones de los eslabones, las articulaciones y demás elementos que juntos crean el banco de trabajo robotizado.

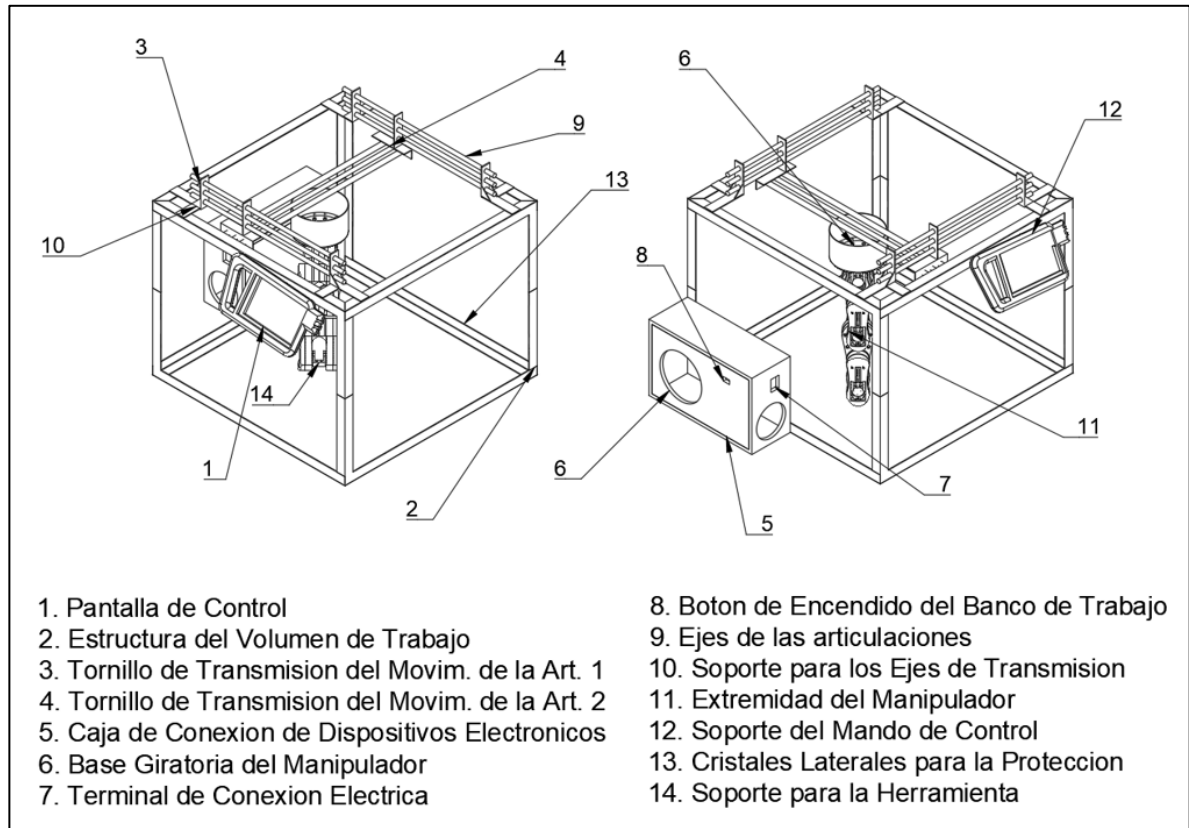
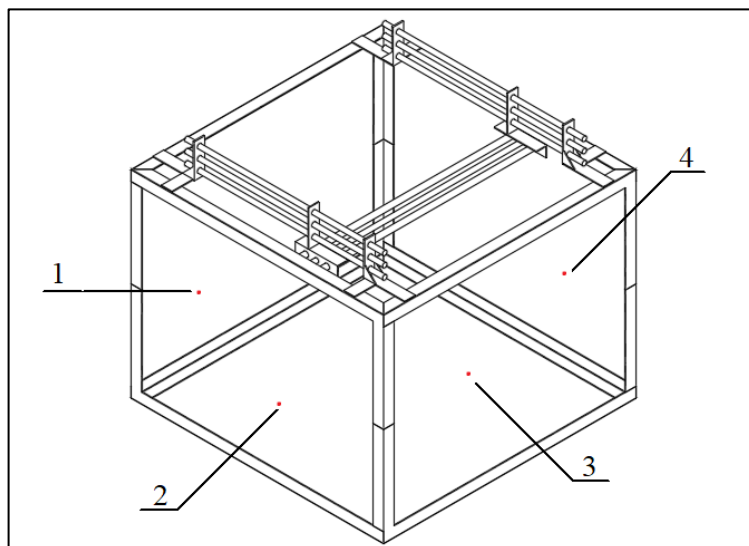


ilustración 7.14: partes del banco de trabajo robotizado. fuente: autor

El siguiente paso es poder comprender el funcionamiento de la interfaz, aprendiendo su contorno y los pasos a seguir, en los que el usuario ingresa los datos deseados de las trayectorias a generar y su interacción con la hmi de control. así como la identificación de las limitaciones físicas ya planteadas anteriormente.

Posteriormente, el facilitador predestinará puntos en el volumen de trabajo, en los cuales pasará el extremo en manipulador, estos deben de ser analizados previamente, de manera que se pueda evidenciar uno que otro concepto con la exitosa realización de las trayectorias (sin trayectorias fuera del volumen), con diferentes tipos de interpoladores para el control cinemático. así como las limitaciones en las articulaciones o las limitaciones de trabajar dentro de un volumen de trabajo cerrado (observando que las trayectorias fuera de este volumen, o

cualquier parte del brazo esté por fuera de este volumen de trabajo), no se puedan realizar, aunque el volumen de trabajo del manipulador sea mayor a este.



*ilustración 7.15: suposición de ubicación de puntos dentro del volumen de trabajo.
fuente: autor*

Otra opción de aprendizaje es poder integrar el manipulador o el banco de trabajo en una tarea en específico, introduciendo elementos didácticos dentro del volumen de trabajo, en tareas de automatización, cómo llevar objetos de un punto determinado o hasta otro punto determinado, de los cuales el facilitador ya habría identificado, observando así por parte del aprendiz, qué o cómo este manipulador a través de las estrategias de control se integra fácilmente a una tarea, reflexionando acerca de cómo influye la forma de su morfología y limitaciones al realizar dichas tareas.

El siguiente paso es realizar pruebas, en esta etapa, el facilitador tendría que establecer algunos puntos, en donde se evidencien las estrategias de control, es decir, que las trayectorias generadas sean posibles de realizar, para ello, se sugiere usar los puntos ya analizados anteriormente, en el título anterior, llamados puntos a, b, c y d, que se distribuyen en el espacio de tarea del manipulador, ubicados según la ilustración 7.3.

Por último, como parte del aprendizaje, se debe fomentar en los jóvenes un pensamiento crítico, por ende, es de gran importancia que, al culminar las pruebas, desarrollen una serie de conclusiones y reflexiones, de cómo mejorar las capacidades del manipulador, mejorando las limitaciones, desde su morfología, forma de trabajo, entre otros aspectos de gran importancia.



8. CONCLUSIONES

Al comparar los resultados de la posición del punto inicial como final de la prueba 2 y de la prueba 3, dadas por la tabla 7.6 y tabla 7.9 respectivamente, observamos que en alguno de los puntos existe un mayor porcentaje de error, en la prueba 2, el punto inicial tiene un mayor grado de error en comparación al punto final, y en la prueba 3, el punto final, tiene un mayor grado de error en comparación al punto inicial. al analizar estos casos, observamos que las posiciones descritas, en donde existe un mayor grado de inexactitud, capturadas por la ilustración 7.7 e ilustración 7.10, que representan la posición del punto inicial de la prueba 2 y el punto final de la prueba 3, podemos notar que el brazo se encuentra más extendido, por lo cual, al tener una mayor extensión, genera un mayor torque en la base de las guías y en la articulación 4 del manipulador, afectando directamente en la posición de su extremo, aunque los actuadores traten de posicionarse en los grados deseados, esto sucede debido a que no se cuenta con una estrategia de control dinámica, que compense las perturbaciones generadas.

La grafica 7.1, representa la trayectoria deseada en la prueba 1, notamos una desviación al final de la trayectoria, la cual debería ser recta, generada por el interpolador cubico, esto ocurre ya que, por cuestiones de ahorro energético el sistema siempre hallará una solución entre las múltiples respuestas que serán enviadas a las articulaciones, que implique un menor tiempo de ejecución, ahorrando energía. esto también implica que, al generar líneas rectas o trayectorias entre un punto con el siguiente, no dependa del anterior, haciendo que el siguiente trayecto, aunque si represente un menor costo energético, el manipulador tenga que hacer una determinada maniobra, con el fin de no sobrepasar los límites físicos del mismo.

Al observar las tablas (tabla 7.3, tabla 7.6 y tabla 7.9), qué contienen los valores cartesianos de la ubicación del extremo del manipulador de las pruebas realizadas, notamos que de forma general los resultados contienen cierto porcentajes de error, en posiciones donde el brazo no está extendido, deduciendo que el sistema cuenta con otras fuentes de error aparte del torque que genera la torción del brazo sobre sus ejes, teniendo en cuenta, que la precisión de los servos seleccionado es muy alta debido a un sistema de control interno, no debería de existir este error. analizando, podemos concluir qué se debe a dos factores, el primero, como ya se había expresado, es la falta de un control dinámico que mitigue las perturbaciones impactando en una mayor exactitud, el segundo factor se debe a que, al usar dispositivos usados en anteriores proyectos, los acoples de los motores, que se observan en la Ilustración 4.3, muestran cierto grado de desgaste, presentando una mayor holgura. por lo cual, para sistemas en los que es necesario una mayor precisión, es necesario calcular la vida útil de cada acople, cambiándolos cuando presenten una mayor tolerancia a la deseada.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Aunque la interfaz pueda realizar algunas trayectorias cómo la trayectoria de1 resultado *n 3* y el resultado *n 5*, de la Tabla 5.2, en dónde estás trayectorias se salen del volumen de trabajo, no es posible su desarrollo por obvias razones, limitando el potencial del manipulador. esta premisa ya se había tenido en cuenta a la hora de realizar el diseño del manipulador, debemos tener en cuenta que se desarrolló un banco de trabajo de fácil transporte, en este manipulador no existe la necesidad de que el usuario tenga que realizar algunas instalaciones para su funcionamiento, haciendo lo ideal para en transporte a zona rurales donde no se cuentan con múltiples herramientas, garantizando su funcionamiento durante más tiempo a comparación de que estuviera sin un sistema de protección



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



9. RECOMENDACIONES

Como recomendación primordial, con el fin de dejar el sistema más autónomo y verdaderamente autoajustable, es poder identificar todos los componentes conectados al controlador maestro, y este mismo los programe y configure, es decir, en el caso de que un Arduino se dañe, se debe subir nuevamente el código a la tarjeta, si se llegase a perder dicho código, no sería posible controlar una sección del brazo, y aunque se cambiase el controlador esclavo, no funcionaría. Para solución de esto, como mejora para futuros proyectos, es que el controlador maestro pueda programar y configurar al controlador esclavo, incluso dejando las bases para la creación de un sistema de inteligencia artificial.

A la hora de realizar dispositivos didácticos, con fines educativos, es necesario poderlos implementar en procesos reales, por lo cual, para próximos trabajos, se debería de contar con la posibilidad de vincular la celda de trabajo robotizada a una tarea en específico, conectándola a un sistema e interactuando con diversos elementos.

Para poder impartir un mejor aprendizaje en el área de robótica, será útil contar con el modelo dinámico del manipulador en su implementación, para poder comprar los tipos de control existentes sobre la generación de trayectorias

Una recomendación, de manera general, es a la hora de realizar un diseño de un manipulador o cualquier otro dispositivo, se deben de tener en cuenta los insumos y consumibles enlistados por mayor disponibilidad, realizando una tabla de los criterios que más le sean convenientes, esto es, ya que, llegado al caso, de una posible escasez de los materiales idealizados, los siguientes pasen a sustituirlos, simplemente redimensionando diseño, sin tener que pensar en un rediseño. cabe resaltar, que no es viable, diseñar un prototipo bajo materiales estándares, sin su previo estudio del mercado, obteniendo tiempos y costos para la adquisición de estos.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona

Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

www.unipamplona.edu.co



10. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. BARRIENTOS, Antonio, et al. Fundamentos de robótica. 2007.
- [2]. BIAGIOTTI, Luigi; MELCHIORRI, Claudio. Trajectory planning for automatic machines and robots. Springer Science & Business Media, 2008.
- [3]. D'ADDARIO, Miguel. Manual de robótica industrial: fundamentos, usos y aplicaciones, 2016.
- [4]. FESTO. Principios básicos de los motores de corriente continua, 2011.
- [5]. RODRIGUEZ, Miguel. Máquinas de corriente continua, 2017.
- [6]. LEON, Santiago Barragán; SUAREZ, Oscar Manuel Duque. Desarrollo De Un Banco De Control Dinámico Para El Manipulador Zebra 360 Del Ambiente Tecnoacademia-Cúcuta. Ingeniería e Innovación, 2021.
- [7]. SUÁREZ, María Carolina Duque, et al. Propuesta De Una Metodología Formal Para El Diseño De Sistemas De Control Cinemático Y Dinámico En Manipuladores Industriales Seriales. Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (RCTA), 2017, vol. 1, no 27, p. 67-72.
- [8]. MEDINA VILLARREAL, Jorge Arturo, et al. Diseño y elaboración de circuito, controlador e interfaz de usuario para el control de robots manipuladores a escala enfocados a la robótica educativa. 2019.
- [9]. JARQUE PÉREZ, Diego. Diseño, montaje y programación del control cinemático de un brazo robot manipulador de 5GDL. 2021. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [10]. TEJEDOR GARCÍA, Noelia, et al. Control cinemático de robots serie con Arduino. 2018.
- [11]. meneses, g., & calle, s. a. (2021). art. 02 art. 02 *mejores usos del plástico tipo PLA con alternativas ambientales y agrícolas*. sucre review, 2(2).
- [12]. PACHECO, G. Análisis de tracción de probetas impresas en 3d mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2019.
- [13]. MENDOZA, Gerardo Julián Pérez, et al. Caracterización Mecánica en un Material PLA Impreso en 3D con diferentes densidades. 2018.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- [14]. MINISTERIO DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL. Artículo 211-h del código del trabajo. ley 20949: *modifica el código del trabajo para reducir el peso de las cargas de manipulación manual*.
- [15]. LROBOTC.BLOGSPOT. La robótica educativa. 2015. *morfología de un robot*. Disponible en ... <http://lrobotc.blogspot.com/2015/06/morfologia-de-un-robot.html>
- [16]. vargas, e., villarreal, l., reynoso, j. m., & maza, r. m. (2001). diseño de un manipulador industrial para aplicaciones de limpieza en subestaciones eléctricas. *monterrey: instituto tecnológico y de estudios superiores de monterrey, centro metropolitano de investigación en mecatrónica*.
- [17]. vaca jiménez, s. d. (2012). *diseño y simulación de un robot manipulador industrial tipo puma capaz de levantar pesos de hasta 20kg*.
- [18]. SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Quiénes somos. Disponible en ... <https://www.sena.edu.co/es-co/sena/paginas/quienessomos.aspx>
- [19]. SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Proyecto tecno-academias itinerantes sennova. Disponible en ... <https://www.tecnoacademiassena.com/>
- [20]. EQUIPO EDITORIAL ETECÉ. Evolución del hombre. argentina. Disponible en ... <https://concepto.de/evolucion-del-hombre/>
- [21]. BADER, Ashraf M.; MACIEJEWSKI, Anthony A. The kinematic design of redundant robots for maximizing failure-tolerant workspace size. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, vol. 173, p. 104850.
- [22]. SINGH, g., & banga, v. k. Robots and its types for industrial applications. *materials today: proceedings*. 2022
- [23]. MOTION CONTROLS ROBOTICS. unraveling degrees of freedom and robot axis: what does it mean to have a multiple axis pick and place or multiple axis robot?, Disponible en ... <https://motioncontrolsrobotics.com/unraveling-degrees-of-freedom-and-robot-axis-what-does-it-mean-to-have-a-multiple-axis-pick-and-place-or-multiple-axis-robot/>
- [24]. UDACITY. *4 ways to pick your first programming language*. 2015. Disponible en... <https://www.udacity.com/blog/2015/05/pick-your-first-programming-language.html>
- [25]. LIN, Hsien-I.; LIU, Yu-Cheng; LIN, Yu-Hsiang. Intuitive kinematic control of a robot arm via human motion. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 79, p. 411-416.
- [26]. DI LILLO, Paolo, et al. A framework for set-based kinematic control of multi-robot systems. *Control Engineering Practice*, 2021, vol. 106, p. 104669.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- [27]. ABDULHAMEED, Osama, et al. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11, no 2, p. 1687814018822880.
- [28]. ARUNPRASATH, K., et al. Dynamic mechanical analysis performance of pure 3D printed polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 50, p. 1559-1562.
- [29]. NBS. *Sistemas de guiado Lineal, Linear Systems. Catalogo Técnico General*. 2012
- [30]. CRAIG. John J. *Robótica: Modelo Diferencial*. Tercera Edición. Editorial: Pearson Educación. México. 2006.
- [31]. ÑIQUE, Víctor A. Análisis sobre la difusión de la Robótica Industrial en Latinoamérica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 2011, p. 1-4.
- [32]. CARRARA, Valdemir. *Introdução à robótica industrial*. São José dos Campos: INPE, 2015.
- [33]. Azar, A. T., Serrano, F. E., Kamal, N. A., & Koubaa, A. (2020, October). Robust kinematic control of unmanned aerial vehicles with non-holonomic constraints. In *International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics* (pp. 839-850). Springer, Cham.
- [34]. Panahandeh, P., Alipour, K., Tarvirdizadeh, B., & Hadi, A. (2019). A kinematic Lyapunov-based controller to posture stabilization of wheeled mobile robots. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 134, 106319.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



ANEXOS

Anexo 1:

[Tabla de las dimensiones de los elementos](#)

Anexo 2:

[Modelo Dinámico](#)

Anexo 3:

[Estudio de Cargas del ensamble básico 1](#)

[Estudio de Cargas del ensamble básico 2](#)

Anexo 4:

[Código de Arduino](#)



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

ANEXO 1

Tabla 0.1: Diseño de piezas del manipulador. Fuente: Autor

Pieza 1	Soporte Principal De Rotación (SPR)
Dimensiones:	
Funciones:	
Es la pieza principal para realizar la rotación sobre el eje anclado a la base, permite girar libremente $\pm 180^\circ$ el brazo	
Pieza 2	Base Fija Para Motores (BFM)
Dimensiones:	
Funciones:	
Es una pieza que acopla la base del motor con la base principal y es el soporte que sostiene el motor y el primer eslabón de la cadena del brazo	
Pieza 3	Acople Primario Para Motores (APM)
Dimensiones:	
Funciones:	
Funciona como una cama para el motor, que une el motor con la pieza BFM, con el fin de encajar el motor en esta última pieza, distribuyendo todos los esfuerzos por toda la estructura	

Continuación de la Tabla 0.1

Pieza 4	Base Rotacional Del Brazo (BRB)
Dimensiones:	
Funciones:	
Es el soporte o el eje principal de rotación del inicio de cada eslabón del manipulador industrial, está acoplado directamente al motor y descansa sobre la pieza BFM	
Pieza 5	Soporte Fijo Del Brazo (SFB)
Dimensiones:	
Funciones:	
Este se acopla con la pieza n 4, haciendo que el eslabón sea más extenso, además de cumplir con la función de contenedor para la base del motor y soporte para el siguiente eslabón.	
Pieza 6	Acople Secundario Para Motores (ASM)
Dimensiones:	
Funciones:	
Este es el soporte o acople del motor al brazo, posicionado en los eslabones	

Continuación de la Tabla 0.1

Pieza 7	Cubierta Del Soporte Fijo (CSF)
Dimensiones:	
Funciones:	
Aparte de dar una apariencia mejor, ocultando la estructura interna de la pieza SFB, ayuda a proteger los cables del motor, y ayuda a encajar el ASM sobre las dos piezas para una mayor distribución de cargas	
Pieza 8	Soporte De Herramienta (SH)
Dimensiones:	
Funciones:	
Esta pieza permite acoplar el efector final al brazo, siendo de fácil encaje.	