



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE
UN ROBOT ESFÉRICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA
MANIPULACIÓN DE OBJETOS UTILIZANDO LA
PLATAFORMA ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS).**

**AUTORES: CHIMARRO AMAGUAÑA, JUAN DAVID
ENRÍQUEZ HERRERA, ANDRÉS DAVID**

DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2015

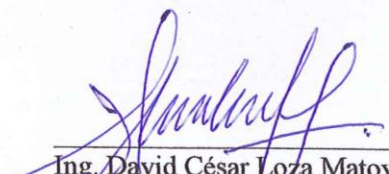


DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT ESFÉRICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS UTILIZANDO LA PLATAFORMA ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS).**” realizado por: **JUAN DAVID CHIMARRO AMAGUAÑA** y **ANDRÉS DAVID ENRÍQUEZ HERRERA** ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **JUAN DAVID CHIMARRO AMAGUAÑA** y **ANDRÉS DAVID ENRÍQUEZ HERRERA** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de Noviembre del 2015.


Ing. David César Loza Matovelle
DIRECTOR




DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **JUAN DAVID CHIMARRO AMAGUAÑA**, con cédula de identidad N° 1003746029 y **ANDRÉS DAVID ENRÍQUEZ HERRERA**, con cédula de identidad N° 1720095825 declaramos que este proyecto de titulación “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT ESFÉRICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS UTILIZANDO LA PLATAFORMA ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS).**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

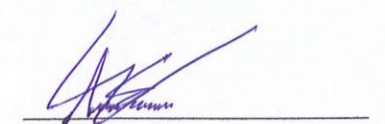
Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello, nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 18 de Noviembre del 2015



Juan David Chimarro Amaguaña.

1003746029



Andrés David Enríquez Herrera.

1720095825




DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN


Nosotros, **JUAN DAVID CHIMARRO AMAGUAÑA** y **ANDRÉS DAVID ENRÍQUEZ HERRERA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT ESFÉRICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS UTILIZANDO LA PLATAFORMA ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS).**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 18 de Noviembre del 2015



Juan David Chimarro Amaguaña.

1003746029



Andrés David Enríquez Herrera.

1720095825

DEDICATORIA

El presente trabajo fruto de mi esfuerzo y entrega, se la dedico a mi familia ya que gracias a su apoyo he podido culminar uno de mis más grandes sueños, el cual es ser un gran profesional, también dedico este trabajo a Dios y a mi padre que partió de este mundo, pero quedaron sus enseñanzas y su gran ejemplo de persona.

Juan.

Este trabajo va dirigido a mis padres Andrés y Goldi, a mi hermana Andrea y a todos mis amigos, quienes siendo parte importante de mi vida, han sabido apoyarme para alcanzar este objetivo. Va dirigido también al Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para todos aquellos estudiantes de la tecnología, a quienes les pudiera ser de utilidad.

Andrés David.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios que me ha dado salud y vida para cumplir una de mis más grandes metas, que ha sido llegar a obtener mi título profesional y a mi madre Teresa Amaguaña le agradezco por el sacrificio que ha hecho por mí ya que ella ha sido mi apoyo y sustento en cada paso que he dado y a mi padre Juan Carlos Chimarro que desde el cielo me está cuidando y bendiciendo a largo de mi camino, a mis hermanos Jefferson y Nahomi que me han brindado su cariño y felicidad y sé que con ellos contaré por el resto de mi vida, también agradezco a todo el equipo de ingenieros del “Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE” ya que ellos han sido pilares fundamentales para el desarrollo y culminación del proyecto, pero sobre todo por ser grandes seres humanos, también agradezco a Lina Tovar, Doménica Ruiz y Pedro Ruiz que son las personas con las que conviví toda mi etapa universitaria ya que las considero como mi familia y finalmente agradezco a mis amigos tanto del colegio y universidad con los que he compartido a lo largo de mi vida.

Juan.

Agradezco a Dios y a mi madre la Virgen María por que sin ellos ninguna cosa es posible. Agradezco a toda mi familia: padres, hermana, tíos y primos por su apoyo y preocupación constantes. Y a todos mis amigos por ser parte de mi vida, por sus consejos y oraciones muchas gracias.

Andrés David.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA	i
CERTIFICADO	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
PRESENTACIÓN	xvi
1. Introducción	1
1.1. Motivación y problemática	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación e importancia	7
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Alcance	8
1.6. Estructura del documento	8
2. Estado del Arte	9
2.1. Introducción a los manipuladores robóticos	9
2.1.1. Historia de la robótica	9
2.1.2. Definición de robótica	10
2.1.3. Clasificación de los robots	10
2.1.4. Manipuladores robóticos	11
2.1.5. Estructura de los robots industriales	12
2.1.6. Configuraciones morfológicas y parámetros característicos de los robots industriales	16
2.2. Diseño mecánico	19
2.2.1. Estructura Mecánica	19
2.2.2. Transmisiones mecánicas	20
2.3. Sistema sensorial	22
2.4. Sistema de Control	23
2.4.1. Cinemática del robot	23
2.4.1.1. El problema cinemático directo	24
2.4.1.2. Algoritmo Denavit – Hartenberg	25

2.4.2.	El problema cinemático inverso	33
2.4.2.1.	Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos	34
2.4.2.2.	Resolución de problema cinemático inverso a partir de la matriz de transformación homogénea	34
2.4.3.	Matriz Jacobiana	34
2.4.4.	Dinámica del robot	36
2.4.5.	Control de posición de robots manipuladores	45
2.4.6.	Sistema operativo ROS	48
2.5.	Efector final	50
2.6.	Resumen	51
3.	Metodología y diseño del manipulador robótico	52
3.1.	Definición de necesidades	52
3.2.	Especificaciones del concepto	53
3.3.	Definición del concepto	55
3.3.1.	Módulo 1. Estructura mecánica	56
3.3.1.1.	Tamaño de estructura mecánica	56
3.3.1.2.	Material de la estructura mecánica	57
3.3.1.3.	Articulación base del robot	60
3.3.1.4.	Articulación hombro del robot	61
3.3.1.5.	Articulación codo prismático del robot	62
3.3.2.	Módulo 2. Potencia de accionamiento	63
3.3.3.	Módulo 3. Accionamiento y Controlabilidad	65
3.3.4.	Módulo 4. Modelos técnicos para el control	68
3.3.4.1.	Cinemática del robot	68
3.3.4.2.	Tipo de control del robot	71
3.3.5.	Módulo 5. Sensorial	72
3.3.5.1.	Sensoramiento interno	72
3.3.5.1.1.	Sensores de presencia	73
3.3.5.1.2.	Sensores de posición	76
3.3.5.2.	Sensoramiento externo	78
3.3.6.	Módulo 6. Software	80
3.4.	Evaluación de conceptos	81
3.4.1.	Método ordinal corregido de los criterios ponderados	81
3.5.	Selección del concepto	114
3.6.	Desarrollo del concepto	115
3.6.1.	Estructura mecánica	115
3.6.2.	Potencia de accionamiento	126
3.6.3.	Accionamiento y Controlabilidad	139
3.6.4.	Modelos técnicos para el control	143
3.6.5.	Sensoramiento	156
3.6.5.1.	Sensoramiento interno	156
3.6.5.2.	Sensoramiento externo	156
3.6.6.	Software para control	157
3.7.	Resumen	158

4. Construcción y funcionamiento	160
4.1. Construcción del manipulador robótico	160
4.1.1. Manufactura de elementos	160
4.1.2. Ensamblaje	163
4.1.3. Cableado	163
4.1.4. Control por ROS	166
4.2. Pruebas y funcionamiento	171
4.2.1. Primera evaluación	171
4.2.2. Segunda evaluación	172
4.2.3. Tercera evaluación	174
4.2.4. Cuarta evaluación	176
4.3. Resumen	179
5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	180
5.1. Conclusiones	180
5.2. Recomendaciones y trabajos futuros	182
Referencias bibliográficas	184
Anexos	185
Anexo A: Planos de los elemento mecánicos del manipulador	
Anexo B: Programas implementados para los nodos de ROS	
Anexo C: CD con toda la información y documentación del proyecto	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Universidades investigadas	4
Tabla 2. Morfologías y características de manipuladores robóticos	17
Tabla 3. Articulaciones seleccionadas	20
Tabla 4. Sistemas de transmisión para robots	21
Tabla 5. Sistemas de transmisión seleccionados	21
Tabla 6. Tipos de sensores internos de robots	22
Tabla 7. Herramientas terminales para robots	50
Tabla 8. Detalle de Necesidades	53
Tabla 9. Matriz de necesidades-métricas	54
Tabla 10. Detalle de especificaciones	55
Tabla 11. Módulos del manipulador robótico	56
Tabla 12-88. Ponderación de criterios de evaluación para los 6 módulos	82-113
Tabla 89. Alternativas seleccionadas	114
Tabla 90. Componentes de la base	117
Tabla 91. Características de un engrane	121
Tabla 92. Componentes de la columna-hombro	122
Tabla 93. Especificaciones – actuador lineal LACT8P	125
Tabla 94. Sólidos que producen inercia con respecto al sistema de coordenadas 1	127
Tabla 95. Sólidos que producen inercia con respecto al sistema de coordenadas 2	135
Tabla 96. Especificaciones – Dynamixel AX-12A Robot actuator	141
Tabla 97. D-H del robot esférico	149
Tabla 98. Código de colores para cableado manipulador robótico	164
Tabla 99. Desempeño actuadores del manipulador robótico	173
Tabla 100. Evaluación cinemática directa del manipulador robótico	175
Tabla 101. Evaluación cinemática inversa del manipulador robótico	175

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfologías de manipuladores robóticos	2
Figura 2. Robot Unimate	3
Figura 3. Clasificación de los robots según su forma	11
Figura 4. Punto de Trabajo (TCP)	13
Figura 5. Gripper para manipulador robótico	14
Figura 6. Herramienta en el TCP	14
Figura 7. Componentes del robot	15
Figura 8. Grados de libertad	15
Figura 9. Robot esférico o polar	19
Figura 10. Tipos de articulaciones para robots	20
Figura 11. Cinemática del Robot	24
Figura 12. Estructura de una matriz homogénea	24
Figura 13-26. Método Sistemático D.H	25-32
Figura 27. Matriz jacobiana directa e inversa	35
Figura 28. Modelo de eslabón con masa concentrada	38
Figura 29. Momento angular	39
Figura 30. Diagrama de bloques control PD	46
Figura 31. Diagrama de bloques control PID	47
Figura 32. Sensor final de carrera	73
Figura 33. Sensor infrarrojo	74
Figura 34. Estructura mecánica del robot esférico	116
Figura 35. Base de la estructura mecánica del robot	117
Figura 36. Mecanismo de la articulación base del robot esférico	118
Figura 37. Columna y hombro de la estructura mecánica del robot esférico	122
Figura 38. Mecanismo de la articulación del hombro del robot esférico	123
Figura 39. Codo prismático de la estructura mecánica del robot esférico	125
Figura 40. Sistema de coordenadas en la articulación base	127
Figura 41. Sistema de coordenadas en la articulación del hombro	135
Figura 42. Fuerza y velocidad grafico de la familia Dynamixel	140
Figura 43. Dynamixel AX-12A Robot actuador	141

Figura 44. Adaptador USB2Dynamixel Robotis	142
Figura 45. Control de red tipo bus del adaptador <i>USB2Dynamixel Robotis</i>	143
Figura 46-55. Algoritmo de Denavit Hartenberg del robot esférico	144-148
Figura 56-59. Parámetros geométricos para analizar la cinemática inversa	150-153
Figura 60. Sistema de control del manipulador robótico. Cinemática inversa	155
Figura 61: Sistema de control del manipulador robótico para cinemática directa	156
Figura 62. Diagrama de flujo del sistema de control del manipulador robótico	157
Figura 63. Fabricación de engranajes	161
Figura 64. Construcción de piezas en TOL	162
Figura 65. Ensamblaje articulaciones base, hombro y efector final	163
Figura 66. Cableado por código de colores	164
Figura 67. Cableado estructurado y caja elementos electrónicos	165
Figura 68. Diagrama de conexión	166
Figura 69. motors.yaml	167
Figura 70. RoboPlus	168
Figura 71. modo_mover.launch	169
Figura 72. Conexiones internas de ROS	170
Figura 73. Manipulador, caja de control y computador	171
Figura 74. Conexión articulaciones base y hombro con flejamiento	172
Figura 75. Interfaz gráfica para control del manipulador robótico	176
Figura 76. Ingreso de valores para posicionamiento mediante cinemática inversa	177
Figura 77. Sliders para posicionamiento mediante cinemática directa	177
Figura 78. Matriz de transformación y resultados para cinemática directa e inversa en el HMI	178
Figura 79. Interfaz gráfica en pantalla completa con ícono de acceso	179

RESUMEN

El proyecto desarrollado consiste en el diseño y construcción de un manipulador robótico de morfología esférica, el cual utiliza hardware y software en tecnología abierta. El manipulador construido fue implementado en el laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Cuenta con 4 grados de libertad (3 rotacionales y uno lineal), y es capaz de mover masas de 100 gramos. Fue construido en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la institución, aplicando los conocimientos adquiridos tales como procesos de manufactura, mecanismos, diseño de elementos de máquinas, entre otros a lo largo de la carrera. Es controlado mediante el Sistema Operativo Robótico (ROS), para lo cual fue necesario emplear el sistema operativo Ubuntu. El proyecto se realizó con fines educativos para aportar en el área de la robótica a la universidad; ofreciendo un equipo que permite visualizar y comprender el funcionamiento y la aplicación de teorías de robótica tales como la cinemática directa e inversa.

PALABRAS CLAVES: ROBOT ESFÉRICO, SISTEMA OPERATIVO DE ROBOTS, UBUNTU, DYNAMIXEL.

ABSTRACT

The developed project consists of the design and construction of a robotic manipulator of spherical morphology, which uses hardware and software on open technology. The manipulator built was implemented in the laboratory of processes of manufacturing of the University of the armed forces - ESPE. It has 4 degrees of freedom (3 rotational and linear one), and is able to move masses of 100 grams. It was built in the laboratory of manufacturing processes of the institution, by applying the acquired knowledge such as manufacturing processes, mechanisms, design elements of machines, among others throughout the race. Is controlled by the operating system robotic (ROS), which was necessary to employ the operating system Ubuntu. The project was educational purposes to provide in the area of robotics to the University; offering a team that allows you to visualize and understand the operation and application of theories of Robotics such as direct and inverse kinematics.

KEYWORDS: SPHERIC ROBOT, ROBOTIC OPERATING SYSTEM, UBUNTU, DYNAMIXEL.

PRESENTACIÓN

En el presente proyecto se realiza el **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT ESFÉRICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS UTILIZANDO LA PLATAFORMA ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS).”**

El documento se estructura en 5 capítulos.

En el capítulo I nos hace partícipes de las generalidades y marco legal del proyecto, define los objetivos y el alcance planteados para el mismo.

En el capítulo II nos da una visión general de la robótica así como la clasificación de los robots manipuladores. También, se analizan diferentes aspectos de la robótica: cinemática directa e inversa, dinámica y diferentes técnicas de control.

En el capítulo III se centra en el diseño del manipulador robótico. Inicialmente se analizan las especificaciones y necesidades para obtener un concepto definitivo del producto. Se incluyen los cálculos pertinentes a dicho diseño y técnicas de control.

En el capítulo IV se muestra el proceso de construcción y evaluación de funcionamiento.

En el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Se incluye anexos y referencias bibliográficas para profundizar en el tema.

Capítulo 1

1. Introducción

El primer capítulo presenta el justificativo por el cual se construirá un manipulador robótico de morfología esférica. Se hace una breve revisión de la situación actual de los laboratorios de robótica de varias universidades de prestigio alrededor del mundo. Además, se definen los objetivos general y específicos entre los cuales se tiene la utilización de la plataforma “*Robotic Operating System (ROS)*”, definiendo a su vez el alcance del proyecto. Algunos de los temas tratados aquí serán desarrollados en los próximos capítulos.

1.1. Motivación y problemática

El presente proyecto tiene por objeto diseñar e implementar un robot de morfología esférica de 3 grados de libertad para manipulación de objetos utilizando ROS. La motivación de este proyecto es aportar a los laboratorios de la universidad en el área de la robótica. Lo cual servirá para mejorar el nivel la educación en carreras afines tales como: Mecatrónica y Electrónica en Control.

Actualmente, la comunidad científica ecuatoriana, está procurando realizar trabajos de investigación en el área de la robótica, en gran parte motivados por organismos gubernamentales como el SENECYT.

La universidad cuenta con laboratorios de alta calidad para la enseñanza en las diversas carreras que oferta, sin embargo, para la ciencia-tecnología robótica, la universidad dispone de cinco morfologías de manipuladores, las morfologías más conocidas se muestran en la figura 1.

Siendo el robot esférico la única con la que no cuenta por este motivo se vio la necesidad de diseñar e implementar un robot de este tipo.

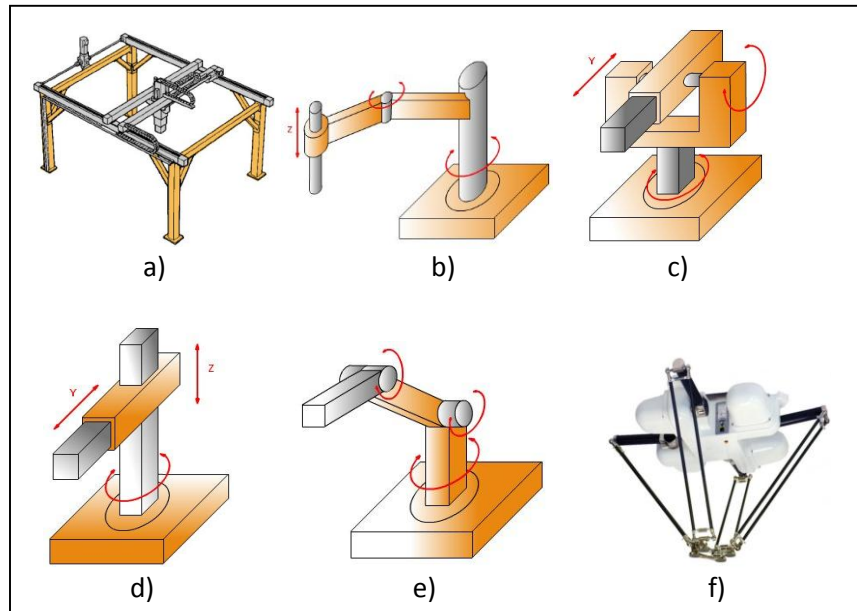


Figura 1: Morfologías de manipuladores robóticos: a) Robot cartesiano b) Robot SCARA, c) Robot esférico. d) Robot Cilíndrico e) Robot Antropomórfico, f) Robot paralelo

Fuente: [Fundamentos de robótica, 2005]

En la universidad se han realizado algunos proyectos similares al propuesto. Entre ellos tenemos el que se titula: “Diseño y construcción de un prototipo de robot delta con implementación de un cortador láser CNC utilizando la plataforma Robotic Operating System (ROS) para la elaboración de artículos publicitarios.” [Repositorio ESPE, 2014]. Otro trabajo destacable es el “Desarrollo de software para la programación y operación del manipulador robótico CRSA255” [Repositorio ESPE, 2008] en el cual se desarrolló una interfaz gráfica en lenguaje de programación Java mediante el entorno de desarrollo de aplicaciones *NetBeans*. También se puede observar el proyecto denominado “Control de movimiento del manipulador de cinco grados de libertad CRS-A255 por esqueletización” [Repositorio ESPE, 2010] en el cual se programa dicho manipulador a través de la imitación de los movimientos del brazo humano y para ello se empleó una técnica de visión artificial denominada esqueletización.

Como se puede observar el presente trabajo sigue la línea de algunos de los proyectos antes mencionados. Consiste en diseñar y construir la parte mecánica del manipulador robótico para posteriormente implementar el sistema de control empleando ROS.

1.2. Antecedentes

A lo largo de la historia el hombre ha procurado construir artefactos con características cada vez mejores. Al hablar de la historia de la robótica se puede observar el desarrollo en la técnica tanto para el diseño como para la construcción de estos artefactos que buscan asemejarse al ser humano tanto en su forma como en las aplicaciones para las que son construidos. Todo esto con el objetivo de facilitar tareas repetitivas, peligrosas o difíciles para un ser humano. Desde el siglo I A.C. pueden hallarse máquinas autómatas como por ejemplo el órgano de viento, máquinas de vapor y neumáticas. Con el desarrollo constante de artefactos empleando cada vez mejores técnicas para el diseño, construcción y aplicación de los mismos. [Fundamentos de Robótica, 2005]

En 1921 el novelista Karel Kapev acuña el término “robot” en su obra titulada “*Rossum’s Universal Robots*”. En 1961 la empresa Unimate instaló el primer robot industrial a partir de lo cual el desarrollo en esta ciencia y tecnología no se ha detenido hasta la actualidad. [Fundamentos de Robótica, 2005]

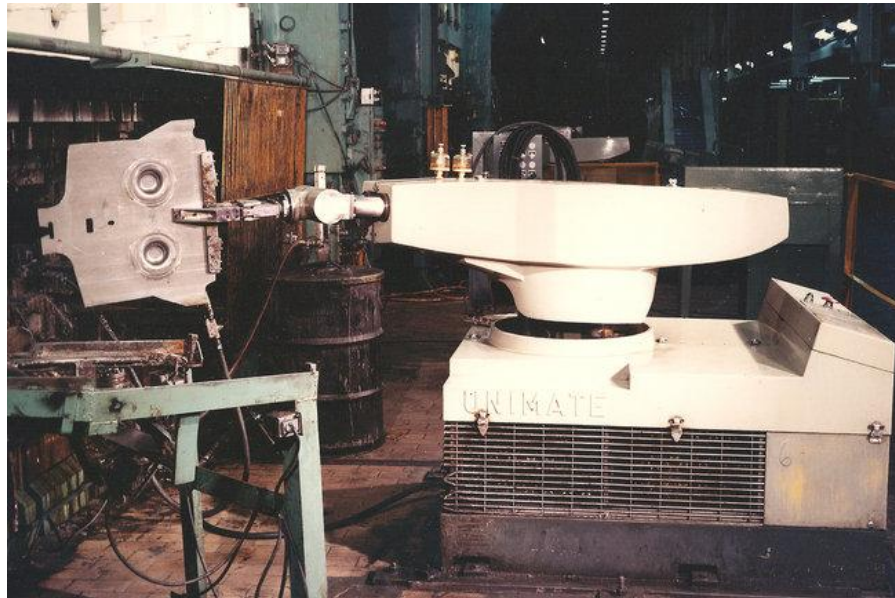


Figura 2: Robot Unimate. Historia de la robótica industrial.

Fuente: [The New York Times, 2011]

Se investigaron diversas universidades prestigiosas del mundo, con el objetivo de conocer la situación actual de sus laboratorios de ramas tales como la automatización industrial y robótica donde nos centramos en conocer con qué clase de equipos cuentan estas universidades.

Entre las instituciones investigadas tenemos:

Tabla 1: Universidades Investigadas.

UNIVERSIDAD	EMBLEMA
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	
Tecnológico de Monterrey	
Massachusetts Institute Technology (MIT)	
Universidad de los Andes Colombia	
Universidad de Sao Paulo Brasil	
Universidad de Tohoku	

Fuente: [Websites correspondientes, 2015]

A continuación se explica la situación actual de los laboratorios de robótica de las universidades mencionadas:

A. Tecnológico de Monterrey

El laboratorio de robótica de esta universidad cuenta actualmente con todas las morfologías de manipuladores robóticos mencionadas y proporciona un espacio donde los alumnos pueden utilizar su imaginación para desarrollar proyectos de robótica. Simultáneamente se están desarrollando aplicaciones con sensores de olor para robots móviles que detecten peligro en zonas de riesgo. El desarrollo en robots móviles abarca tanto robots terrestres como acuáticos y aéreos, Dentro del TEC de Monterrey el área de Robótica de manipulación, a cargo del doctor Ernesto Rodríguez, actualmente investiga procesos de manufactura, productos y modelos de robots pedagógicos, así como sistemas de inspección automática. [ITESM, 2015]

B. Massachusetts Institute Technology (MIT)

El MIT lleva a cabo la investigación interdisciplinaria orientada a conocer los principios básicos del diseño de robots con inteligencia artificial. Su objetivo es crear robots que pueden realizar los tipos de tareas de todos los días que vienen naturalmente a los seres humanos, pero que están más allá del alcance de la tecnología actual como por ejemplo el robot “Leonardo” que se ve y actúa como un perro de verdad; “squash y estiramiento” que son robots en forma de pingüino con la capacidad de realizar expresiones faciales como sorpresa, tristeza, enojo, etc.

Sus laboratorios para enseñanza de robótica cuentan con todas las morfologías de robots existentes y además robots híbridos que combinan morfologías de manipuladores robóticos industriales.

En su laboratorio de Maquinaria Háptica, conocido menos formalmente como el Laboratorio Touch, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts desarrollan la enseñanza y programación de robots con dispositivos hápticos. [MERS, 2015]

C. Universidad de los Andes Colombia

Sus laboratorios de robótica son espacios especialmente diseñados para la experimentación en diferentes disciplinas, cuenta con una amplia gama de morfologías de

robots además de un conjunto de equipos de última generación en conectividad, computación, visualización, robótica e interacción. Es la primera instalación en su género en Colombia, competitiva a nivel internacional. (Universidad de los Andes., 2015)

D. Universidad de São Paulo Brasil

El laboratorio de manipulación robótica - ManLab - lleva a cabo investigaciones en el modelado, simulación, diseño y puesta en marcha de la operación de los robots y dispositivos mecatrónicos especiales que interactúan con el medio ambiente.

Las obras incluyen la construcción de robots que integran los conceptos de diseño mecánico, electrónica incorporada, programación y control en tiempo real. Ejemplos de tales sistemas son los manipuladores robóticos Scara, Antropomórfico, Esférico, Cilíndrico, Cartesiano y la mano robótica Kanguera.

Estos robots especiales, a su vez, son ambientes ricos experimentales para el análisis de las cuestiones teóricas, tales como el control y la planificación de trayectorias de sistemas redundantes en la presencia de contacto. [Grupo de Mecatrónica USP, 2015]

E. Universidad de Tohoku Japón

El Laboratorio de Robótica Espacial de la Universidad de Tohoku ha enviado microsátélites en órbita y espera pronto aterrizar un robot en la Luna.

Los laboratorios de robótica con los que cuentan son de alta tecnología. Poseen varios kits de robótica ideales para aprendizaje de robótica móvil, morfologías de manipuladores, etc. [The Space Robotics Lab, 2015]

Considerando los avances que se desarrollan actualmente en las diversas universidades mencionadas, se ve la necesidad de trabajar en proyectos que aporten con equipos para el desarrollo tecnológico en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Lo que se busca es aportar a la infraestructura tecnológica de nuestra universidad contando con laboratorios que lleven a cabo investigaciones en modelado, simulación, diseño y puesta en marcha de la operación de los robots y dispositivos mecatrónicos especiales.

El robot esférico a implementar, servirá tanto para los puntos antes mencionados, como también para futuros proyectos tecnológicos a desarrollarse.

1.3. Justificación e importancia

El proyecto aquí presentado a más de los beneficios mencionados, busca satisfacer los objetivos estratégicos de la universidad, donde se manifiesta el deseo de incrementar la calidad de los profesionales y postgraduados e incrementar su producción científica y tecnológica. [ESPE- Plan Estratégico, 2015]

Se ha visto la necesidad de aportar a la universidad con un robot esférico, que es una morfología de manipulador robótico de la que actualmente no dispone. La misma que será parte de los equipos de laboratorio del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica DECEM para apoyar así a las futuras generaciones de estudiantes facilitando la comprensión de este tipo de manipulador robótico, dando la oportunidad de realizar prácticas de laboratorio o también futuras mejoras para el mismo como nuevos proyectos.

Además el proyecto busca fomentar la utilización de software libre en los estudiantes ya que todo el sistema de control será realizado en la plataforma ROS.

La universidad cuenta con algunas morfologías de manipuladores robóticos, excepto un manipulador polar o esférico que es el que se propone en este proyecto.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar e implementar un robot de morfología esférica de 3 grados de libertad para manipulación de objetos utilizando ROS.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la cinemática inversa del robot por medio de métodos geométricos para el posicionamiento del Punto de Trabajo de la Herramienta (*“Tool Center Point”* - TCP)
- Diseñar y construir la estructura mecánica del robot.
- Implementar la etapa de electrónica de potencia para el correcto funcionamiento de los actuadores del manipulador.
- Programar el sistema de control del manipulador robótico utilizando la plataforma ROS.

- Establecer un modo de operación del robot de manera que sea amigable con el usuario, mediante la elaboración de un manual de operación para facilidad de uso del sistema.

1.5. Alcance

El robot contará con los siguientes elementos:

- Estructura mecánica
- Transmisiones
- Sistema de accionamiento
- Sistema sensorial
- Sistema de control
- Elementos terminales o efector final

El alcance técnico del proyecto consiste en diseñar, construir e implementar un manipulador robótico esférico de 3 grados de libertad capaz de levantar un objeto de 100 gramos de masa y que será controlado empleando el programa ROS, para el control del robot se emplearán herramientas de estudio tales como la cinemática y control de posición de un manipulador.

1.6. Estructura del documento

El documento se estructura en 5 capítulos. El primer capítulo nos hace partícipes de las generalidades y marco legal del proyecto, define los objetivos y el alcance planteados para el mismo. El segundo capítulo nos da una visión general de la robótica así como la clasificación de los robots manipuladores. También, se analizan diferentes aspectos de la robótica: cinemática directa e inversa, dinámica y diferentes técnicas de control. El tercer capítulo se centra en el diseño del manipulador robótico. Inicialmente se analizan las especificaciones y necesidades para obtener un concepto definitivo del producto. Se incluyen los cálculos pertinentes a dicho diseño y técnicas de control. En el cuarto capítulo se muestra el proceso de construcción y evaluación de funcionamiento. Para finalizar el documento en el quinto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 2

2. Estado del Arte

En este capítulo se presenta el sustento teórico cinemático, dinámico y de control para manipuladores robóticos. Inicialmente se presentará una introducción general a la robótica, puntualizando en los manipuladores robóticos industriales para posteriormente centrarse en el manipulador de morfología esférica. Se analizan diferentes aspectos de la robótica: cinemática directa e inversa, dinámica y diferentes técnicas de control.

2.1. Introducción a los manipuladores robóticos

2.1.1. Historia de la robótica

En el mundo de hoy, las personas han tenido que acoplar a su vocabulario una gran terminología tecnológica que hace 25 años no existía. Entre estas nuevas palabras tenemos por ejemplo el término “robot” [Revolución industrial, 2009].

A lo largo de toda la historia el hombre ha sentido una gran atracción por la maquinaria. Particularmente por máquinas capaces de imitar las diversas acciones de los seres vivos. De la palabra griega “automatos” proviene el actual término “autómata” que significa: máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado. Por citar algunos ejemplos, los mecanismos animados de Herón de Alejandría (85 d.C.) se movían a través de dispositivos hidráulicos, poleas y palancas y tenían fines de entretenimiento.

A inicios del siglo XVI se destacan los ingenios más relevantes de Leonardo Da Vinci que construyó un león mecánico para el rey Luis XII de Francia, que se abría el pecho con su garra y mostraba el escudo de armas del rey.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX se desarrolló maquinaria con la cual se empiezan a utilizar dispositivos automáticos en la producción, aplicados a la industria textil como por ejemplo el telar de Jacquard (1801). Este último utilizaba una cinta de papel perforada como un programa para las acciones de la máquina. Este desarrollo dará paso a lo que hoy se conoce como automatización industrial [Historia de la robótica, 2007].

2.1.2. Definición de robótica

Robótica es la ciencia y tecnología de los robots. Se ocupa de su diseño, manufactura y aplicaciones. Entendiendo el término “robot” como un dispositivo multifuncional reprogramable diseñado para manipular o transportar material a través de movimientos programados para la realización de tareas variadas. Su utilidad consiste en reproducir ciertas capacidades de los organismos vivos [Apuntes de robótica industrial, 2015].

2.1.3. Clasificación de los robots

Existen algunos tipos de clasificaciones, donde algunas de las más importantes son:

- *Clasificación según sus capacidades:*
 - Robot móvil: Exploración y transporte.
 - Robot fijo: Asistencia médica, automatización de procesos industriales.
 - Otros: Control de prótesis, entretenimiento.
- *Clasificación según su arquitectura.-* Considera la potencia del software en el controlador, lo que es determinante de la utilidad y flexibilidad del robot.
 - Generación
 - Nivel de inteligencia
 - Nivel de control
 - Lenguaje de programación
- *Clasificación según su forma.- como se observa en la figura 3.*
 - Androides y humanoides: Simular o realizar robots de forma humana.
 - Zoomórficos: Imitan la forma de animales
 - Robots móviles: Tienen elementos que les permiten desplazarse como patas, ruedas u orugas.
 - Robots industriales: Autómatas destinados a realizar procesos de fabricación o manipulación.
 - Robots teledirigidos: Dirigir a un robot por conexión eléctricamente activa.
 - Robots híbridos: Tienen varias configuraciones, básicamente combinando una forma con otra.

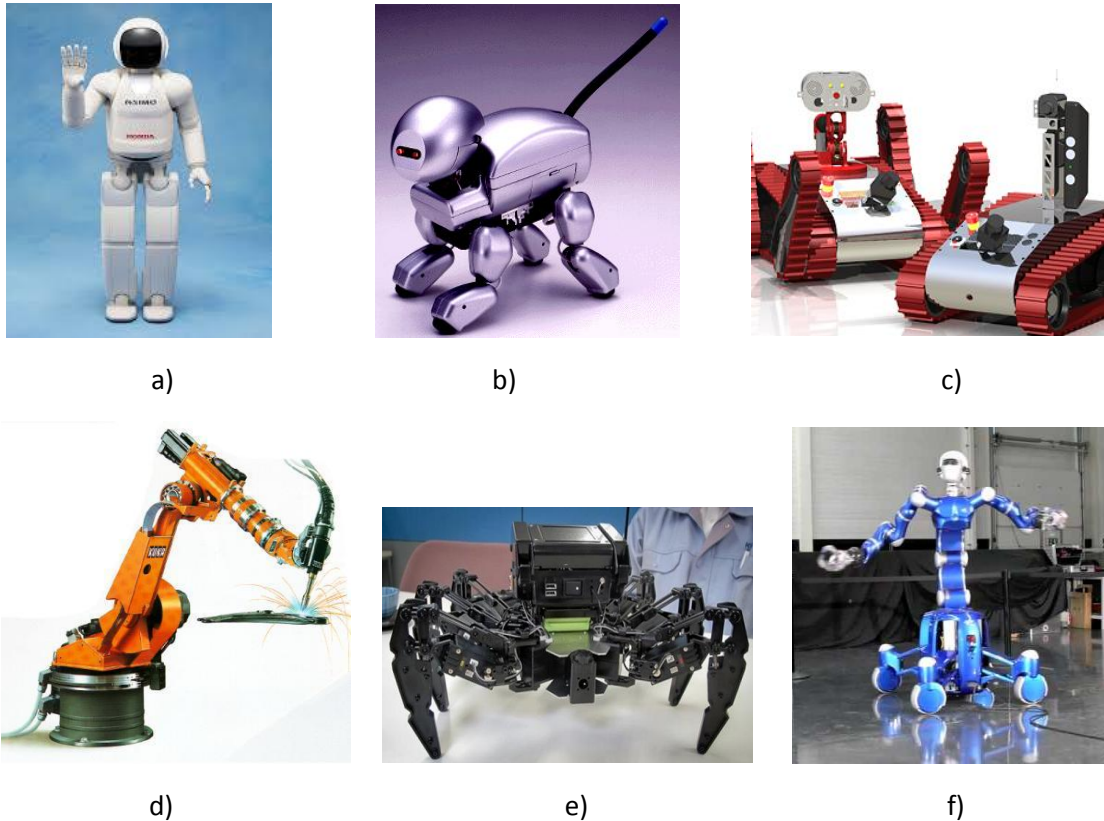


Figura 3: Clasificación de los robots según su forma. a) Humanoide, b) Zoomórfico, c) Móvil, d) Robot industrial e) Teledirigido f) Híbrido

Fuente: [Díaz & Dutra, 2013, Barnes & Jentsch, 2010, Sakagami et al., 2002, Boston Dynamics, 2013]

2.1.4. Manipuladores robóticos

Entre los robots considerados de más utilidad en la actualidad se encuentran los robots industriales o manipuladores. Existen ciertas dificultades a la hora de establecer una definición formal de lo que es un robot industrial. La primera de ellas surge de la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro-americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Así, mientras que para los japoneses un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobre todo en lo relativo al control. En segundo lugar, y centrándose ya en el concepto occidental, aunque existe una idea común acerca de lo que es un robot industrial, no es fácil ponerse de acuerdo a la hora

de determinar una definición formal. Además, la evolución de la robótica ha ido obligando a diferentes actualizaciones de su definición [Robotic Association, 2013].

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, Robotic Industry Association), según la cual:

"Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas" [Robotic Industry, 2013].

Se incluye en esta definición la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. Una definición más completa es la establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), que define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot:

- Manipulador: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.
- Robot: manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectoria variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material [Manipulador robótico-Jair Rodriguez, 2012]. (Berger, 2013)

2.1.5. Estructura de los robots industriales

Un manipulador robótico consta de una secuencia de elementos estructurales rígidos, denominados enlaces o eslabones, conectados entre sí mediante juntas o articulaciones, que permiten el movimiento relativo de cada dos eslabones consecutivos, en el punto terminal donde termina la cadena cinemática se encuentra el efector final y donde se sitúa el punto de trabajo de la herramienta (TCP) como se muestra en la figura 4.

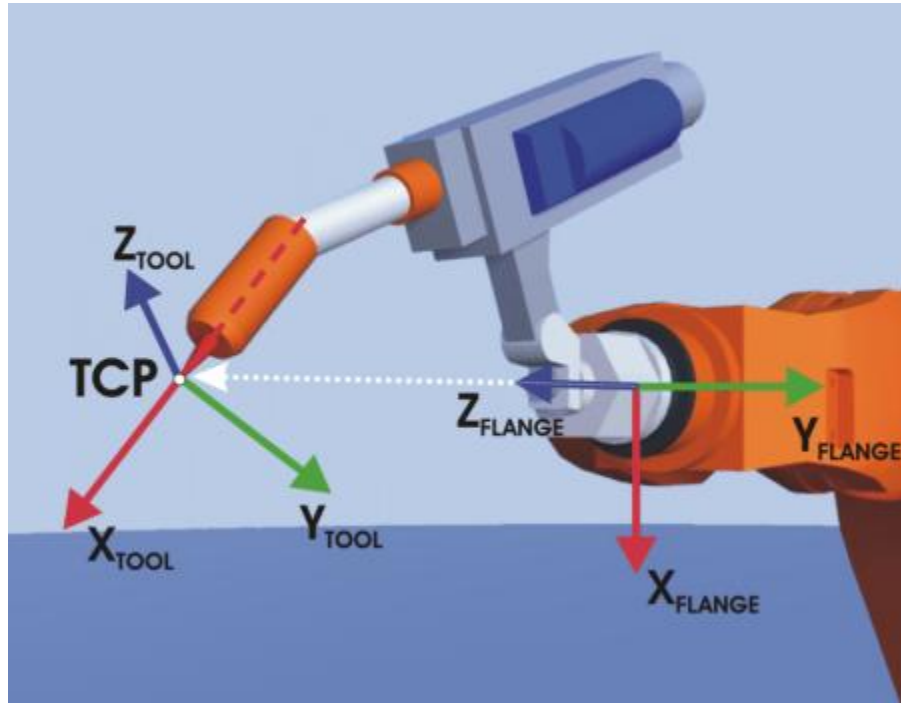


Figura 4: Punto de Trabajo (TCP).

Fuente: [Holland, 2007, Boston Dynamics, 2013, Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

Los elementos terminales pueden dividirse en dos categorías:

- pinzas (gripper)
- herramientas

Las pinzas se muestran en la figura 5 se utilizan para tomar un objeto, normalmente la pieza de trabajo, y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot. Hay una diversidad de métodos de sujeción que pueden utilizarse, además de los métodos mecánicos obvios de agarre de la pieza entre dos o más dedos. Estos métodos suplementarios incluyen el empleo de casquillos de sujeción, imanes, ganchos, y cucharas.



Figura 5: Gripper para manipulador robótico.

Fuente: [Holland, 2007, Boston Dynamics, 2013, Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

Una herramienta se utiliza como actuador final en aplicaciones en donde se exija al robot realizar alguna operación sobre la pieza de trabajo como se muestra en la figura 6. Estas aplicaciones incluyen la soldadura por puntos, la soldadura por arco, la pintura por pulverización y las operaciones de taladro. En cada caso, la herramienta particular está unida a la muñeca del robot para realizar la operación.



Figura 6: Herramienta en el TCP.

Fuente: [Holland, 2007, Boston Dynamics, 2013, Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

A los manipuladores robóticos se les suele denominar también brazos de robot por la analogía que se puede establecer, en muchos casos, con las extremidades superiores del cuerpo humano.

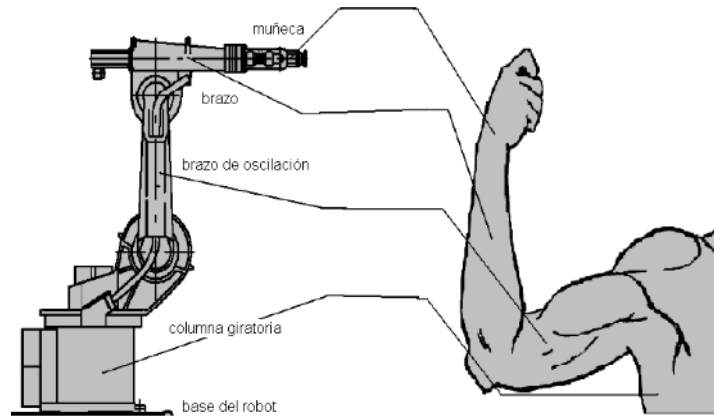


Figura 7: Componentes del robot

Fuente: [Holland, 2007, Boston Dynamics, 2013, Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

Se denomina grado de libertad (G.D.L.) a cada una de las coordenadas independientes que son necesarias para describir el estado del sistema mecánico del robot (posición y orientación en el espacio de sus elementos). Normalmente, en cadenas cinemáticas abiertas, cada par eslabón-articulación tiene un solo grado de libertad, ya sea de rotación o de traslación. Pero una articulación podría tener dos o más G.D.L. que operan sobre ejes que se cortan entre sí.



Figura 8: Grados de libertad.

Fuente: [Holland, 2007, Boston Dynamics, 2013, Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

Para describir y controlar el estado de un brazo de robot es preciso determinar:

- La posición del punto terminal (o de cualquier otro punto) respecto de un sistema de coordenadas externo y fijo, denominado el sistema mundo.
- El movimiento del brazo cuando los elementos actuadores aplican sus fuerzas y momentos.
- El análisis desde el punto de vista mecánico de un robot se puede efectuar atendiendo exclusivamente a sus movimientos (estudio cinemático) o atendiendo además a las fuerzas y momentos que actúan sobre sus partes (estudio dinámico) debidas a los elementos actuadores y a la carga transportada por el elemento terminal.

2.1.6. Configuraciones morfológicas y parámetros característicos de los robots industriales

Según la geometría de su estructura mecánica, un manipulador puede ser:

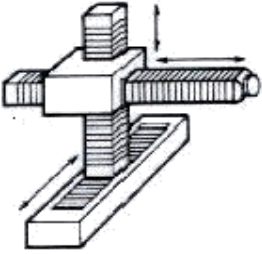
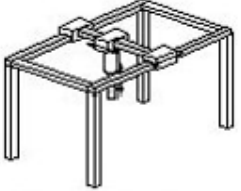
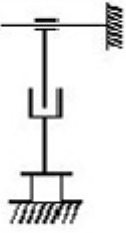
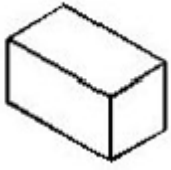

- Cartesiano, cuyo posicionamiento en el espacio se lleva a cabo mediante articulaciones lineales.
- Cilíndrico, con una articulación rotacional sobre una base y articulaciones lineales para el movimiento en altura y en radio.
- Polar, que cuenta con dos articulaciones rotacionales y una lineal.
- Esférico (o de brazo articulado), con tres articulaciones rotacionales.
- Mixto, que posee varios tipos de articulaciones, combinaciones de las anteriores. Es destacable la configuración SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)
- Paralelo, posee brazos con articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes.

Los principales parámetros que caracterizan a los robots industriales son:

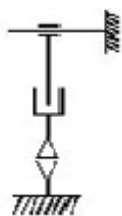
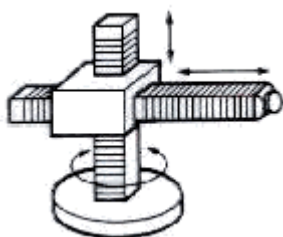
- Número de grados de libertad. Es el número total de grados de libertad de un robot, dado por la suma de g.d.l. de las articulaciones que lo componen. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 g.d.l., como las de soldadura, mecanizado y almacenamiento, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso de las labores de montaje.

- Espacio de accesibilidad o espacio (volumen) de trabajo. Es el conjunto de puntos del espacio accesibles al punto terminal, que depende de la configuración geométrica del manipulador. Un punto del espacio se dice totalmente accesible si el PT puede situarse en él en todas las orientaciones que permita la constitución del manipulador y se dice parcialmente accesible si es accesible por el PT pero no en todas las orientaciones posibles. En la figura inferior se aprecia el volumen de trabajo de robots de distintas configuraciones.
- Capacidad de posicionamiento del punto terminal. Se concreta en tres magnitudes fundamentales: resolución espacial, precisión y repetibilidad, que miden el grado de exactitud en la realización de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.
- Capacidad de carga. Es el peso que puede transportar el elemento terminal del manipulador. Es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot dependiendo de la tarea a la que se destine.
- Velocidad. Es la máxima velocidad que alcanzan el PT y las articulaciones.

Tabla 2: Morfologías y características de manipuladores robóticos

Configuración geométrica	Estructura cinemática	Espacio de trabajo	Ejemplo
<p>cartesianos</p>  <p>tipo cantilever</p>  <p>tipo pórtico</p>			

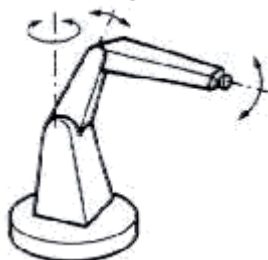
cilindrico



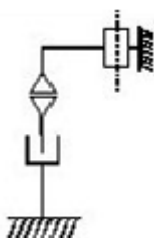
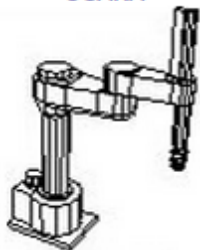
polar

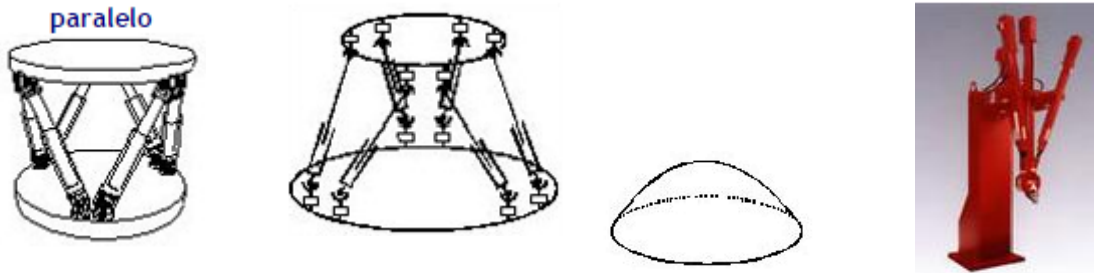


antropomórfico



SCARA





Fuente: [The Space Robotics Lab, 2015]

2.2. Diseño mecánico

2.2.1. Estructura Mecánica

Morfología: La morfología del robot a construir es de tipo esférica o polar, como se muestra en la figura. Cuenta con 3 eslabones sin contar la base.

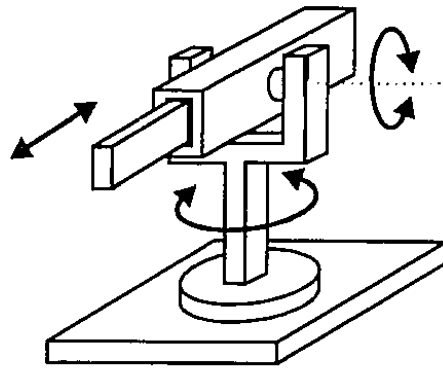


Figura 9. Robot esférico o polar.

Fuente: [McGraw-Hill, Fundamentos de robótica -2011]

Grados de libertad: Se cuenta con 3 grados de libertad equivalentes en analogía al cuerpo humano con: cintura, hombro y codo. Siendo este último no rotacional sino prismático. En la siguiente figura se muestran algunos de los tipos de articulaciones para robots existentes:

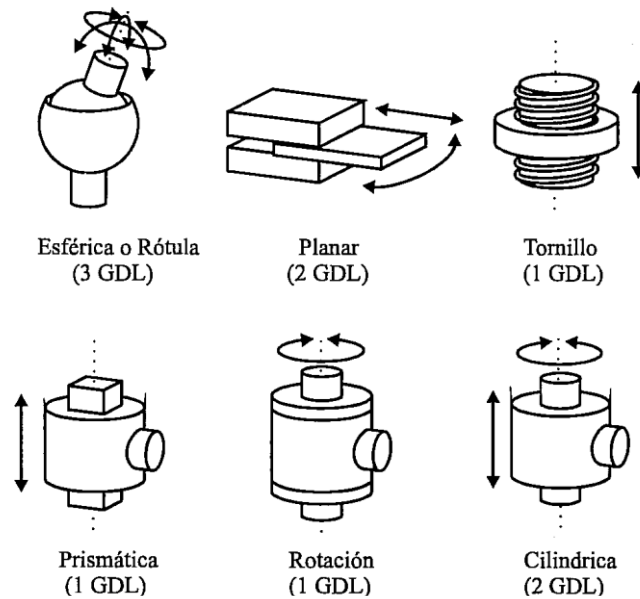


Figura 10. Tipos de articulaciones para robots.

Fuente: [McGraw-Hill, Fundamentos de robótica -2011]

De los tipos de articulaciones mencionadas, para el manipulador seleccionado se emplearán las siguientes:

Tabla 3: Articulaciones seleccionadas

Articulación	Tipo de articulación
Cintura	Rotación
Hombro	Rotación
Codo prismático	Prismática

2.2.2. Transmisiones mecánicas

Las transmisiones mecánicas son mecanismos encargados de transmitir potencia entre dos o más elementos dentro de una máquina, convierten movimiento circular-circular, circular-lineal o viceversa, otra función muy importante de las transmisiones mecánicas es que reducen los momentos de inercia y pares estáticos [Apuntes de robótica industrial, 2015], los sistemas de transmisión para robots se puede observar en la tabla 4:

Tabla 4. Sistemas de transmisión para robots

Entrada – Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal-Circular	Enlace rígido	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Fuente: [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011]

De los tipos de transmisiones mecánicas mencionados, para el robot polar se emplearán según sus articulaciones:

Tabla 5. Sistemas de transmisión seleccionados

Articulación	Entrada-Salida	Tipo de transmisión
Cintura	Circular-circular	Engrane
Hombro	Circular-Circular	Engrane
Codo prismático	Circular-lineal	Cremallera

2.3. Sistema sensorial

Para tener un sistema de control funcional, la parte de sensoramiento es indispensable ya que se encarga de enviar la información interna del robot y también del entorno del mismo, hacia el controlador para la toma de decisiones y posterior funcionamiento de los actuadores. En la siguiente tabla se muestra la clasificación de sensores existentes para la toma de información interna al volumen de trabajo de un manipulador robótico:

Tabla 6. Tipos de sensores internos de robots

Variable	Tipo	Sensor
Presencia		Inductivo
		Capacitivo
		Efecto Hall
		Célula Reed
		Óptico
		Ultrasónico
		Contacto
Posición	Analógicos	Potenciómetros
		Resolver
		Sincro
		Inductosyn
		LVDT
	Digitales	Encoders absolutos
		Encoders incrementales
		Regla óptica

Velocidad

Tacogeneratriz

Fuente: [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011]

De los sensores mencionados se utilizarán aquellos que mejores prestaciones ofrecen para la medición de parámetros en cuanto a presencia los cuales serán fines de carrera, ópticos y ultrasónicos. Para la medición de posición y velocidad se emplearán potenciómetros y encoders respectivamente.

2.4. Sistema de Control

2.4.1. Cinemática del robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia.

Los robots clásicos presentan una arquitectura antropomórfica serial, semejante al brazo humano. Consisten de una serie de barras rígidas unidas entre sí a través de articulaciones de un grado de libertad del tipo rotacional o prismática. En general cada articulación logra su movimiento a través de un accionamiento de potencia e incluye otros dispositivos como reductores de velocidad, frenos y sensores de posición o velocidad.

Existen 2 problemas fundamentalmente a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo y el segundo como el problema cinemático inverso [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011].

Problema cinemático directo

Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia; conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.

Problema cinemático inverso

Resuelve la configuración del robot que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

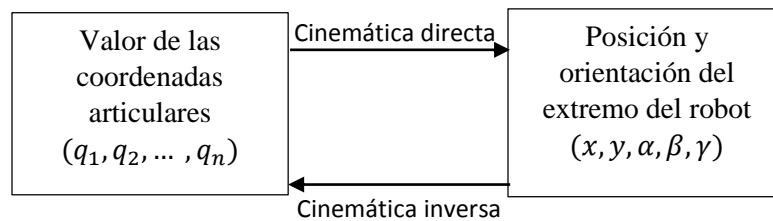


Figura 11. Cinemática del Robot

Fuente: [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011]

2.4.1.1. El problema cinemático directo

El problema cinemático directo se plantea en términos de encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo en movimiento respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia. Para lograr esta representación se usan las matrices de transformación homogénea 4×4 como se muestra en la figura 12, la cual incluye las operaciones de traslación y la orientación. La matriz de transformación homogénea es una matriz de 4×4 que transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas.

La matriz de transformación homogénea tiene la siguiente estructura:

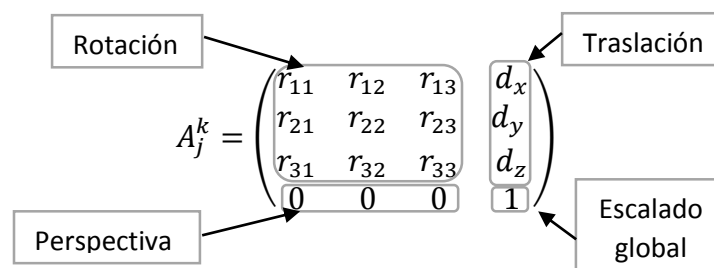


Figura 12. Estructura de una matriz homogénea

Fuente: [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011]

$$T = \begin{bmatrix} \text{matriz de rotación} & \text{vector de posición} \\ f_{1 \times 3} & \text{escalado} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nx & sx & ax & px \\ ny & sy & ay & py \\ nz & sz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{s} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Donde los vectores \mathbf{n} , \mathbf{s} , \mathbf{a} , son vectores ortogonales unitarios y \mathbf{p} es un vector que describe la posición x , y , z del origen del sistema actual respecto del sistema de referencia.

2.4.1.2. Algoritmo Denavit – Hartenberg

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4×4 que relacione la localización espacial del extremo del robot con respecto al sistema de coordenadas de su base.

Parámetros de D-H

Algoritmo D-H se relaciona con el siguiente sistema de coordenadas mediante cuatro parámetros:

θ_i :(rotación con respecto al eje z)

d_i :(traslación con respecto al eje z)

a_i :(traslación con respecto al eje x)

α_i :(rotación con respecto al eje x)

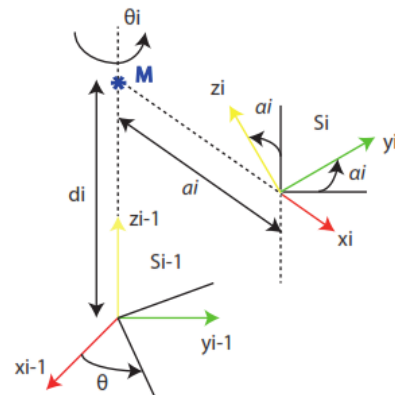


Figura 13. Método Sistemático D.H.
Fuente: [Fuente propia, 2015]

D-H 1: Numerar los eslabones comenzando con 1(primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.

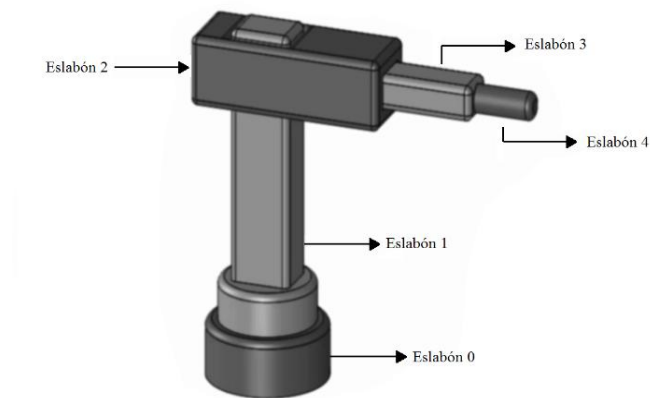


Figura 14. Numeración de eslabones, D.H.

D-H 2: Numerar cada articulación comenzando por 1(la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.

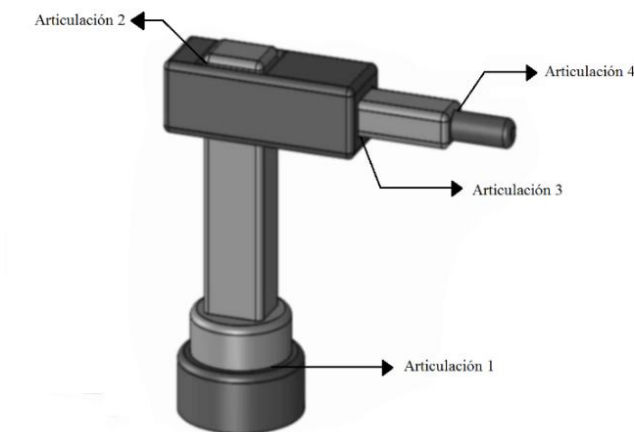


Figura 15. Numeración de articulaciones, D.H.

D-H 3: Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

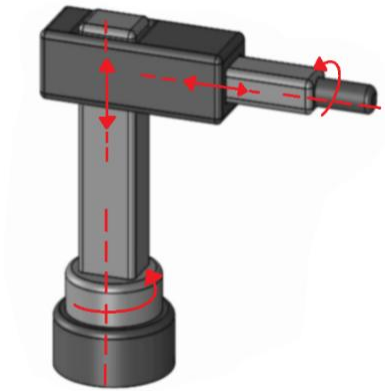


Figura 16. Localización de ejes en articulaciones, D.H.

D-H 4: Para i de 0 a $n-1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.

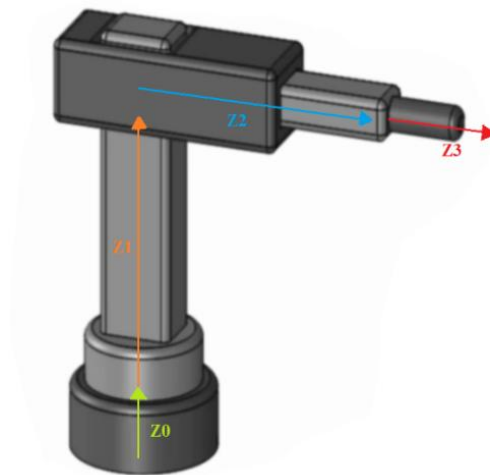


Figura 17. Localización de z_i , D.H.

D-H 5: Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

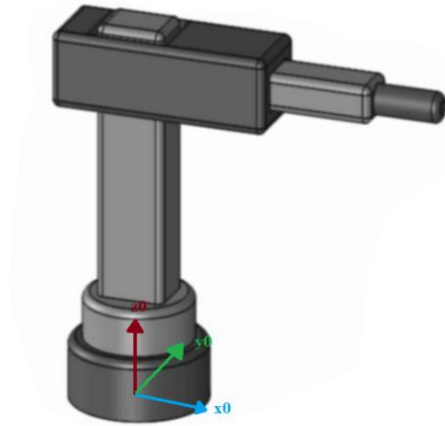


Figura 18. Localización del origen del sistema, D.H.

D-H 6: Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i+1$.

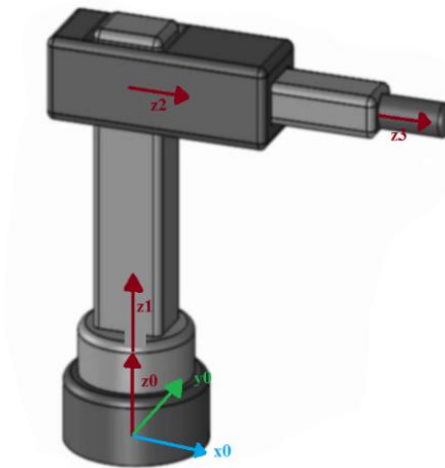


Figura 19. Posicionamiento del Z_i , D.H.

D-H 7: Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

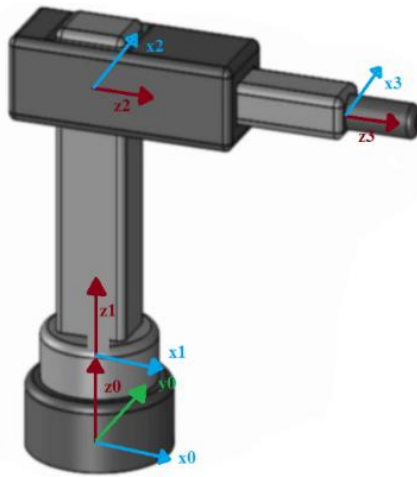


Figura 20. Posicionamiento del x_i , D.H.

D-H 8: Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con X_i y Z_i .
 Para entender un poco más acerca de esta regla, primero debemos de proceder a definir lo que es un sistema dextrógiro y también un sistema levógiro.
 Dextrógiro: Giro hacia la derecha, en el mismo sentido que las agujas del reloj
 Levógiro: Giro hacia la izquierda, en sentido contrario a las manecillas del reloj.

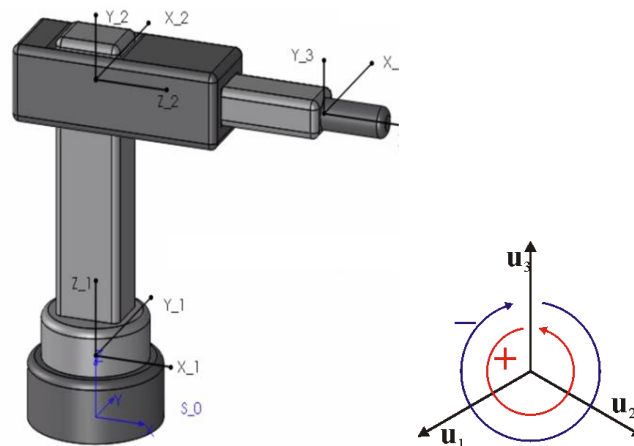


Figura 21. Posicionamiento del y_i , D.H.

D-H 9: Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que Z_0 coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n

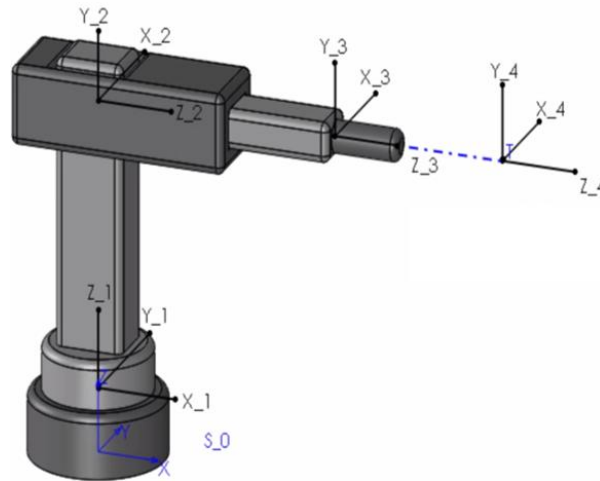


Figura 22. Posicionamiento del sistema S_n , D.H.

D H 10: Obtener el θ_i como el ángulo que hay que girar entorno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.

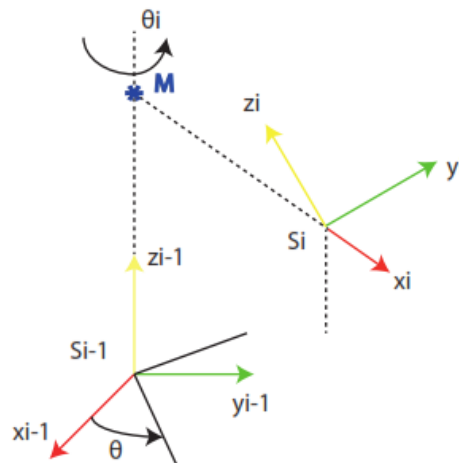


Figura 23. Determinación del θ_i , D.H.

Dh11: Obtener el d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.

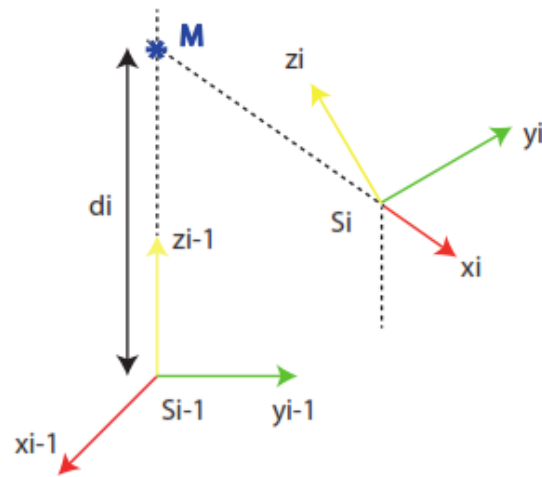


Figura 24. Determinación del d_i , D.H.

Dh12: Obtener el a_i como la distancia, medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.

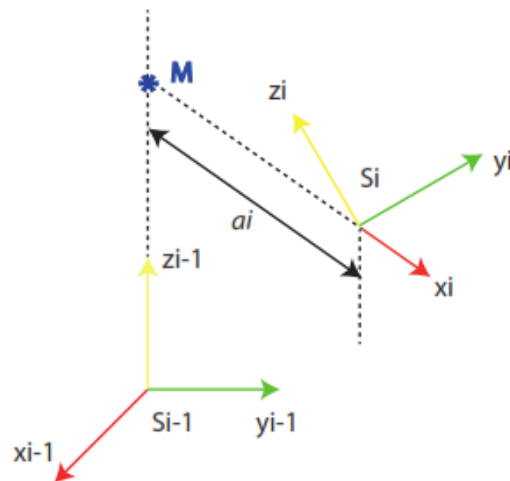


Figura 25. Determinación del a_i , D.H.

Dh13: Obtener el α_i como el ángulo que habría que girar entorno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

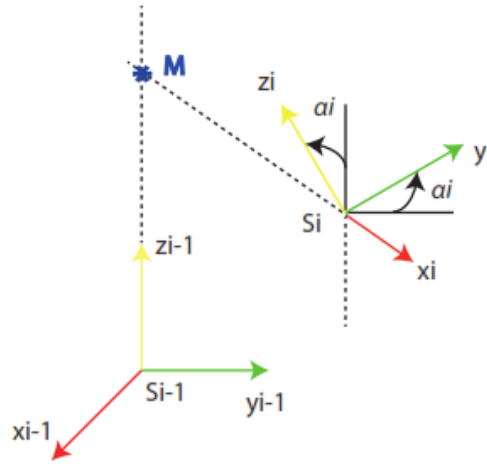


Figura 26. Determinación del α_i , D.H.

Dh14: Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$

Los pasos anteriores permitirán hallar las matrices homogéneas que son necesarias para hallar las relaciones matemáticas entre los sistemas coordenados. Por tanto un sistema de coordenadas (S_i) definido según el algoritmo D-H se relaciona con el siguiente sistema de coordenadas mediante cuatro parámetros: θ_i (rotación con respecto al *eje z*), d_i (traslación con respecto al *eje z*), a_i (traslación con respecto al *eje x*), α_i (rotación con respecto al *eje x*), resultados de los parámetros DH.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \alpha_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & \alpha_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dh15: Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot.

$$T = {}^0A_1, {}^1A_2, {}^2A_3 \dots {}^{n-1}A_n \quad (2.3)$$

Dh16: La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de la n coordenada articulares. Finalmente se obtiene los parámetros de Denavit Hartenberg [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011].

2.4.2. El problema cinemático inverso

La cinemática inversa consiste en hallar los valores de las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ conocida la posición y orientación del punto de trabajo.

Así cómo es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot.

A la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada. Esto es encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

$$k = 1 \dots n \quad (GDL)$$

A pesar de que se pueden encontrar diversos métodos genéricos para la resolución de la cinemática inversa que pueden ser implementados en computadora, suele ser habitual la resolución por medio de métodos geométricos. La mayor parte de los robots suelen tener cadenas cinemáticas relativamente sencillas, que facilitan la utilización de los métodos geométricos. Para muchos robots, si se consideran sólo los tres primeros grados de libertad, se tiene una estructura planar. Este hecho facilita la resolución del problema. Asimismo los últimos tres grados de libertad suelen usarse para la orientación de la herramienta, lo cual permite una resolución geométrica desacoplada de la posición de la

muñeca del robot y de la orientación de la herramienta [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011].

Como alternativas para resolver el mismo problema se puede recurrir a los siguientes métodos:

2.4.2.1. Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos

Este procedimiento es adecuado para robots con pocos grados de libertad, dedicados a posicionar el extremo.

El procedimiento es encontrar suficiente número de relaciones geométricas donde estén relacionadas con las coordenadas del extremo del robot (p_x, p_y, p_z) referidas a $\{S_0\}$, con sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos; se procede a encontrar una relación matemática explícita.

2.4.2.2. Resolución de problema cinemático inverso a partir de la matriz de transformación homogénea

En principio es posible tratar de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de su modelo directo. Es decir conocidas las relaciones que expresan el valor de la posición y orientación del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, obtener por manipulación de aquéllas las relaciones inversas.

Puesto que el problema cinemático directo, resuelto a través de la expresión (2.1) las relaciones por cada grado de libertad, existirá cierta dependencia, entonces el resultado de la condición de ortonormalidad de los vectores \mathbf{n} , \mathbf{o} y \mathbf{a} con lo cual la elección de las ecuaciones de (2.1) se debe escoger con sumo cuidado.

2.4.3. Matriz Jacobiana

El modelo cinemático de un robot busca las relaciones entre las variables articulares y la posición (expresa normalmente en forma de coordenadas cartesianas) y orientación del extremo del robot. En esta relación no se tienen en cuenta las fuerzas o pares que actúan sobre el robot (actuadores, cargas, fricciones, etc.) y que pueden originar el movimiento del mismo. Sin embargo, sí que debe permitir conocer, además de la relación entre sus respectivas derivadas. Así, el sistema de control del robot debe establecer qué

velocidades debe imprimir a cada articulación (a través de sus actuadores) para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta, por ejemplo, una línea recta a velocidad constante.

Para este y otros fines, es de gran utilidad disponer de la relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las de la posición y orientación del extremo del robot. La relación entre ambos vectores de velocidad se obtiene a través de la denominada *matriz jacobiana*.

2.4.3.1. Relaciones diferenciales

El método más directo para obtener la relación entre velocidades articulares y del extremo del robot consiste en diferenciar las ecuaciones correspondientes al modelo cinemático directo.

Así, supóngase conocidas las ecuaciones que resuelven el problema cinemático directo de un robot de n GDL:

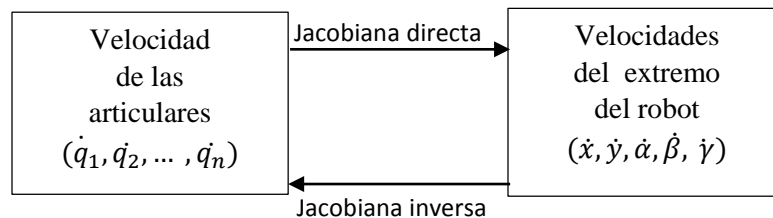


Figura 27. Matriz jacobiana directa e inversa

Fuente: [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011]

$$\begin{aligned}
 x &= f_x(q_1, \dots, q_n) & y &= f_y(q_1, \dots, q_n) & z &= f_z(q_1, \dots, q_n) \\
 \alpha &= f_\alpha(q_1, \dots, q_n) & \beta &= f_\beta(q_1, \dots, q_n) & \gamma &= f_\gamma(q_1, \dots, q_n)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Si se derivan con respecto al tiempo ambos miembros del conjunto de las ecuaciones anteriores, se tendrá:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \sum_1^n \frac{\partial f_x}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{y} &= \sum_1^n \frac{\partial f_y}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{z} &= \sum_1^n \frac{\partial f_z}{\partial q_i} \dot{q}_i \\
 \dot{\alpha} &= \sum_1^n \frac{\partial f_\alpha}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{\beta} &= \sum_1^n \frac{\partial f_\beta}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{\gamma} &= \sum_1^n \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_i} \dot{q}_i
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

O expresado en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_n} \end{bmatrix}
 \tag{2.6}$$

La matriz \mathbf{J} se denomina matriz Jacobiana.

Puesto que el valor numérico de cada uno de los elementos $[j_{pq}]$ de la Jacobiana dependerá de los valores instantáneos de las coordenadas articulares θ_i , el valor de la Jacobiana será diferente en cada uno de los puntos del espacio articular [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011].

2.4.4. Dinámica del robot

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot tiene por objetivo conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo.

En esta relación se obtiene mediante el denominado modelo dinámico, que relaciona matemáticamente:

1. La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
2. Las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones (o en el extremo del robot).
3. Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masas e inercias de sus elementos.

La obtención de este modelo para mecanismos de uno o dos grados de libertad no es excesivamente compleja, pero a medida que el número de grados de libertad aumenta, el planteamiento y obtención del **modelo dinámico** se complica enormemente. Por este motivo no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, esto es, mediante una serie de ecuaciones, normalmente de tipo diferencial de 2° orden, cuya integración permita conocer qué movimiento surge al aplicar unas fuerzas o qué fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado. El modelo dinámico debe ser resuelto entonces de manera iterativa mediante la utilización de un procedimiento numérico.

El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot es, por lo tanto, uno de los aspectos más complejos de la robótica, lo que ha llevado a ser obviado en numerosas ocasiones. Sin embargo, el modelo dinámico es imprescindible para conseguir los siguientes fines:

1. Simulación del movimiento del robot.
2. Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.
3. Dimensionamiento de los actuadores.
4. Diseño y evaluación del control dinámico del robot.

Este último fin es evidentemente de gran importancia, pues de la calidad del control dinámico del robot depende la precisión y velocidad de sus movimientos. La gran complejidad ya comentada existente en la obtención del modelo dinámico del robot, ha motivado que se realicen ciertas simplificaciones, de manera que así pueda ser utilizado en el diseño del controlador [Antonio Padilla, Fundamentos de robótica -2011].

2.4.4.1. Modelo dinámico de Newton de la estructura mecánica de un robot rígido

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, se la denomina ley de Euler:

$$\Sigma \mathbf{F} = m\dot{\mathbf{v}} \qquad \Sigma \mathbf{T} = \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) \qquad (2.7)$$

Así, en el caso simple de un robot monoarticular como el representado en la figura 28 el equilibrio de fuerzas-pares daría como resultado la ecuación:

$$\tau = I \frac{d^2\theta}{dt^2} + MgL\cos\theta = ML^2\ddot{\theta} + MgL\cos\theta \quad (2.8)$$

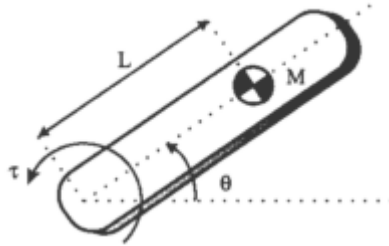


Figura 28. Modelo de eslabón con masa concentrada

Fuente: [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011]

En donde se ha supuesto que toda la masa se encuentra en el centro de gravedad del elemento, que no existe rozamiento alguno y que no manipula ninguna carga.

Si el robot tuviese que ejercer alguna fuerza en su extremo, ya sea al manipular una carga o, por ejemplo, realizar un proceso sobre alguna pieza, bastaría con incluir esta condición en la ecuación (2.8) y proceder del mismo modo.

El planteamiento del equilibrio de fuerzas en un robot real de 5 o 6 grados de libertad, es mucho más complicado que el ejemplo de la Figura 28. Debe tenerse en cuenta que junto con las fuerzas de inercia y gravedad, aparecen fuerzas de Coriolis debidas al movimiento relativo existente entre los diversos elementos, así como fuerzas centrípetas que dependen de la configuración instantánea del manipulador [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011].

Cálculo de potencia del actuador en articulaciones rotacionales

Dado que estará en reposo la estructura mecánica del robot es necesario vencer la inercia del sistema completo, por lo cual se debe calcular todas las inercias implícitas en el movimiento. El primer paso es describir los movimientos tridimensionales de un cuerpo rígido. Luego se representara el análisis de dichos movimientos usando las ecuaciones de movimiento de Euler. También las ecuaciones de movimiento angular y usando las

expresiones del momento angular de un cuerpo rígido [Dinámica de Bedford Fowler, 2009].

Momento angular

Si un cuerpo gira respecto a un punto fijo O con velocidad angular ω figura 29. (a), las componentes del momento angular respecto a O están dadas por:

$$\begin{bmatrix} H_{Ox} \\ H_{Oy} \\ H_{Oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Esta ecuación también da las componentes del momento angular del cuerpo rígido respecto al centro de masa en el movimiento tridimensional general figura 29. (b). En ese caso los momentos de inercia se evalúan respecto a un sistema coordenado con su origen en el centro de masa.

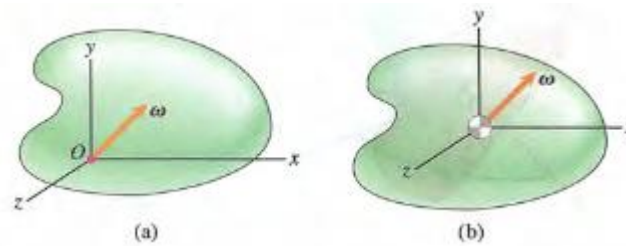


Figura 29. Momento angular

Fuente: [Dinámica de Bedford Fowler, 2009].

Ecuaciones de Euler

Las ecuaciones que rigen el movimiento tridimensional de un cuerpo rígido, conocidas como ecuaciones de Euler, consisten en la segunda ley de Newton.

Y las ecuaciones del movimiento angular. Para un cuerpo rígido que gira alrededor de un punto fijo O como se muestra en la figura 29. (a), las ecuaciones del movimiento angular se expresan en función de las componentes del momento total respecto a O:

$$\Sigma M_{O} = \frac{\partial H_{O}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma M_{ox} \\ \Sigma M_{oy} \\ \Sigma M_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_x}{\partial t} \\ \frac{\partial \omega_y}{\partial t} \\ \frac{\partial \omega_z}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Por lo tanto el torque con respecto a un punto fijo O se define:

$$\tau = \sqrt{\Sigma M_{ox}^2 + \Sigma M_{oy}^2 + \Sigma M_{oz}^2} \quad (2.12)$$

Donde Ω es la velocidad angular del sistema coordenado. Si el sistema coordenado está fijo al cuerpo $\Omega = \omega$. En el caso del movimiento tridimensional general (Fig. b), las ecuaciones del movimiento angular son idénticas excepto que se expresan en función de las componentes del momento total respecto al centro de masa.

La aceleración angular del cuerpo rígido está relacionada con las derivadas de las componentes de ω mediante:

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial \omega_x}{\partial t} \mathbf{i} + \frac{\partial \omega_y}{\partial t} \mathbf{j} + \frac{\partial \omega_z}{\partial t} \mathbf{k} + \Omega \times \omega \quad (2.13)$$

Si el sistema coordenado no gira o está fijo al cuerpo, los términos $\frac{\partial \omega_x}{\partial t}$, $\frac{\partial \omega_y}{\partial t}$ y $\frac{\partial \omega_z}{\partial t}$ son las componentes de la aceleración angular [Dinámica de Bedford Fowler, 2009].

Momentos y productos de inercia

En un sistema coordenado dado xyz, la matriz de inercia de un cuerpo se define con la siguiente ecuación:

$$[I] = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & -\int xy dm & -\int xz dm \\ -\int yx dm & \int (x^2 + z^2) dm & -\int yz dm \\ -\int zx dm & -\int zy dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Donde x, y, z son las coordenadas del elemento diferencial de masa dm.

Los términos I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} son los momentos de inercia respecto a los ejes x, y, z e I_{xy} , I_{yz} , I_{zx} son los productos de inercia.

Si x', y', z' es un sistema coordenado con su origen en el centro de masa de un cuerpo y x, y, z es un sistema paralelo, los teoremas de los ejes paralelos (teorema de Steiner) establecen que:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= I_{x'x'} + (dy^2 + dz^2) \cdot m \\
 I_{yy} &= I_{y'y'} + (dx^2 + dz^2) \cdot m \\
 I_{zz} &= I_{z'z'} + (dx^2 + dy^2) \cdot m \\
 I_{xy} &= I_{x'y'} + dx \cdot dy \cdot m \\
 I_{yz} &= I_{y'z'} + dy \cdot dz \cdot m \\
 I_{zx} &= I_{z'x'} + dz \cdot dx \cdot m
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Donde (dx, dy, dz) son las coordenadas del centro de masa en el sistema coordenado xyz .

El momento de inercia respecto a un eje arbitrario que pase por el origen y paralelo a un vector unitario e está dado por [Dinámica de Bedford Fowler, 2009]:

$$\begin{aligned}
 I_o &= I_{xx} \cdot ex^2 + I_{yy} \cdot ey^2 + I_{zz} \cdot ez^2 - 2 \cdot I_{xy} \cdot ex \cdot ey \\
 &\quad - 2 \cdot I_{yz} \cdot ey \cdot ez - 2 \cdot I_{zx} \cdot ez \cdot ex
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Por lo tanto el torque con respecto a un eje giro fijo O se define:

$$\tau = I_o \cdot \alpha_o + M \cdot g \cdot \iota \tag{2.17}$$

2.4.4.2. Modelo dinámico de Hamilton de la estructura mecánica de un robot rígido

La energía del robot es la integral de la potencia del robot $\dot{q}^T T$ sobre el intervalo de tiempo $[0, t]$. La energía hamiltoniana $H(q, \dot{q})$ del robot manipulador está dada por la suma de la energía cinética $K(q, \dot{q})$ más la energía potencial $U(q)$:

$$H(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) + U(q) \tag{2.18}$$

El modelo de energía del robot se basa en el principio de la conservación de la energía, el cual establece que el trabajo efectuado por las fuerzas aplicadas a un sistema es igual al

cambio de energía total del sistema. Es decir la energía aplicada es igual a la suma de la energía almacenada más la energía disipada. [Fernando Reyes, Robótica - 2011]

Por este motivo, el análisis y estudio de los fenómenos del robot se lleva a cabo por medio de ecuaciones diferenciales no lineales para formar el **modelo dinámico**. A diferencia de otros métodos de modelado de la física como el de Newton o el de Hamilton, las ecuaciones de movimiento de Euler-LaGrange representa la mejor alternativa de modelado para robots manipuladores debido a las propiedades matemáticas que se deducen de manera natural usando esa metodología. Este procedimiento facilita el análisis y diseño de algoritmos de control [Fernando Reyes Cortés, Robótica-Control de robots manipuladores, 2011].

2.4.4.3. Ecuaciones de Euler-Lagrange

Mediante este método se obtiene el modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad, formado con eslabones rígidos conectados por articulaciones libres de elasticidad en cadena cinemática abierta.

El **lagrangiano** $\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ de un robot manipulador de n grados de libertad se define como la diferencia entre la energía cinética $\mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ y la energía potencial $\mathcal{U}(\mathbf{q})$:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathcal{U}(\mathbf{q}) \quad (2.19)$$

Donde $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ representa los vectores de posición y velocidad articular, respectivamente. Obsérvese que la energía cinética $\mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ tiene una dependencia de la posición y la velocidad articular, mientras que la energía potencial $\mathcal{U}(\mathbf{q})$ está relacionada con el campo conservatorio de la gravedad y por lo tanto únicamente depende de la posición.

Las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange de un robot manipulador de n grados de libertad están dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{v}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \quad (2.20)$$

Donde $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbb{R}^n$ representa el vector de posiciones articulares o coordenadas generalizadas, $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T \in \mathbb{R}^n$ es el vector de velocidades articulares, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares aplicados, donde el i -ésimo par τ_i se encuentra asociado con la i -ésima coordenada generalizada q_i , y $\boldsymbol{v}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas o pares de fricción que depende de la velocidad articular y de la fricción estática \mathbf{f}_e que se encuentran presente en las articulaciones del mismo; $t \in \mathbb{R}_+$ representa el tiempo, $n \in N$ es el número de grados de libertad.

La energía cinética tiene una estructura matemática cuadrática bien definida en función de la velocidad articular:

$$\mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.21)$$

Aquí $M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia del manipulador, y es una matriz definida positiva (por lo tanto simétrica). Por otro lado la energía potencial $\mathcal{U}(\mathbf{q})$ no tiene una forma específica. Sin embargo, tiene una dependencia exclusivamente del vector de posición \mathbf{q} , ya que se considera su presencia a campos conservativos como la fuerza de gravedad.

Con esta forma del lagrangiano, las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange pueden escribirse en forma compacta como:

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{q})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.22)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] = M(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \dot{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.24)$$

El modelo dinámico de un robot manipulador proporciona una descripción completa entre los pares aplicados a los servomotores y el movimiento de la estructura mecánica. Con la formulación Euler-Lagrange las ecuaciones de movimiento pueden ser obtenidas de manera sistemática independiente del sistema de referencia coordinado. Las

ecuaciones de movimiento Euler-Lagrange (2.19) para un robot de n grados de libertad adquieren la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\tau} = M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + M(\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] + \frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} + \boldsymbol{\nu}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \quad (2.25)$$

El modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad está dado por la ecuación (2.26), que en su forma compacta y con la notación más ampliamente utilizada en el área de robótica se encuentra descrito de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\tau} = M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\nu}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \quad (2.26)$$

Aquí se tiene que:

$\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ Es el vector de coordenadas generalizadas o posiciones articulares.

$\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ Es el vector de velocidades articulares.

$\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ Es el vector de aceleraciones articulares.

$M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Es la matriz de inercia, la cual es simétrica y definida positiva.

$C(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Es la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis.

$$C(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.27)$$

$\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ Es el vector de fuerzas o pares gravitacionales obtenido como el gradiente de la energía potencial es decir:

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.28)$$

$\boldsymbol{\nu}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \in \mathbb{R}^n$ Es el vector de pares de fricción que incluye la fricción viscosa, de Coulomb y estática (\mathbf{f}_e) de cada articulación del robot.

$$\boldsymbol{\nu}(\dot{q}_i, f_{ei}) = b_i \dot{q}_i + f_{ci} \text{signo}(\dot{q}_i) + f_{ei} [1 - \text{signo}(\dot{q}_i)] \quad (2.29)$$

Donde:

$b_i =$ *coeficiente de viscosidad*

$f_{ci} =$ *coeficiente de rozamiento cinético*

$f_{ei} =$ *coeficiente de rozamiento estático*

$$\text{signo}(\dot{q}_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \dot{q}_i > 0 \\ 0 & \text{si } \dot{q}_i = 0 \\ -1 & \text{si } \dot{q}_i < 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Por lo tanto el par aplicado en una i – ésima articulación queda de la siguiente forma:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial q_i} + \nu(\dot{q}_i, f_{ei}) \quad (2.31)$$

2.4.5. Control de posición de robots manipuladores

El control de posición o regulación de robots manipuladores es uno de los temas más importantes en el control de robots manipuladores. El potencial de control de posición en robots manipuladores se ubica en el sector industrial como traslado, estibado, pintado de objetos, soldadura, transporte de material, etc. [Robótica – Fernando Reyes, 2011]

La técnica del moldeo de energía representa una técnica de control moderna que permite diseñar una familia extensa de algoritmos de control. La ecuación de lazo cerrado formada por la dinámica no lineal del robot manipulador y el algoritmo de control genera un punto de equilibrio único y asintóticamente estable en forma global. Considerando que varios algoritmos de control ofrecen muy buen desempeño, el moldeo de energía es una herramienta de desarrollo tecnológico que presenta las siguientes ventajas:

- Permite implementar instrucciones de programación de robótica industrial.
- Facilita el guiado del robot a través de una base de datos o curva de registro
- Aplicaciones de control punto a punto

2.4.5.1. Control proporcional derivativo:

El algoritmo de control proporcional derivativo (PD) es el esquema de controlador más simple y más popular que puede ser usado en robots manipuladores. Se muestra a continuación el diagrama de bloques del control proporcional derivativo con compensación de gravedad:

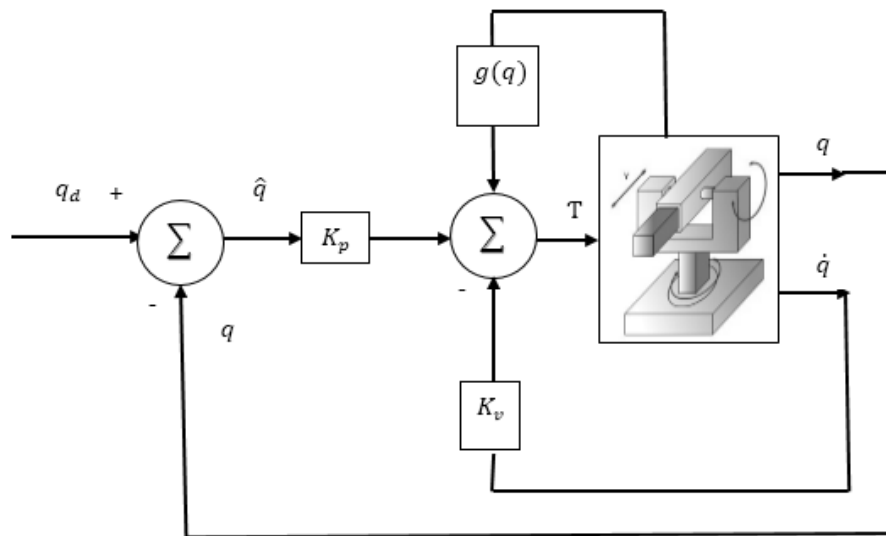


Figura 30. Diagrama de bloques control PD

Fuente: [Fernando Reyes, Robótica -2011]

La posición articular del robot q se retroalimenta para generar la señal de error de posición $\tilde{q} = q_d - q$. La velocidad de movimiento \dot{q} se emplea para inyección de amortiguamiento. El control proporcional derivativo más compensación de gravedad (PD) está dado por la siguiente ecuación:

$$T = K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} + g(q) \quad (2.32)$$

Donde $\tilde{q} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de error de posicionamiento que se define como la diferencia entre la posición deseada q_d y la posición actual del robot q .

$K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Es una matriz definida positiva, $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la ganancia derivativa la cual es una matriz definida positiva.

La ecuación en lazo en cerrado en variables de estado que definen el problema de control de posición es:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} - C(q, \dot{q}) \dot{q}] \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

La cual es la ecuación diferencial autónoma.

2.4.5.2. Control proporcional integral derivativo:

El algoritmo de control PD tiene la desventaja de que en régimen estacionario presenta un error permanente de posición denominado “*offset*”; en otras palabras, el error de posición $\tilde{q}(t)$ converge a una constante diferente de cero. Para disminuir este error se incorpora en la estructura matemática del PD un término más denominado acción de control integral la cual disminuye la magnitud del error en el régimen estacionario.

Esto da origen al control proporcional integral derivativo (PID), el cual no representa un nuevo esquema de control sino más bien es la versión modificada del control proporcional derivativo que busca subsanar la deficiencia del error en régimen estacionario. A continuación se muestra el diagrama de bloques del algoritmo de control PID:

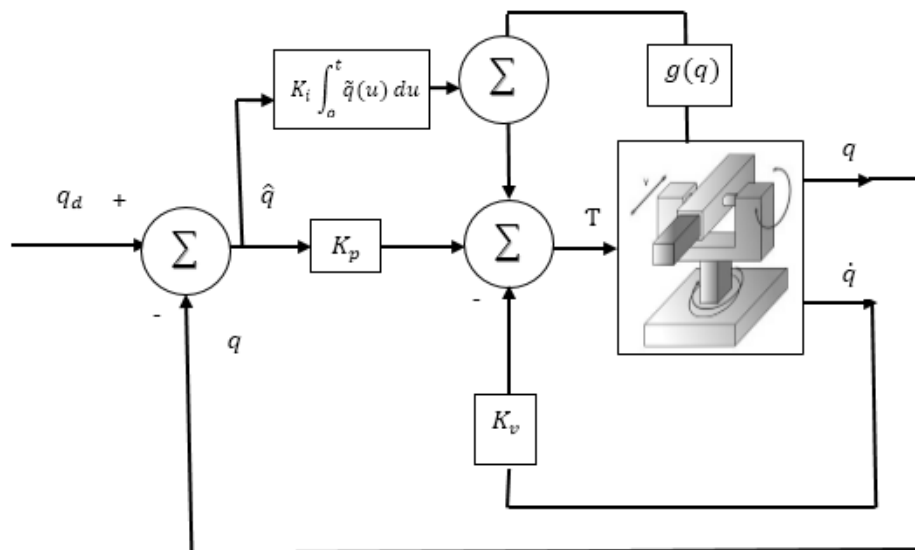


Figura 31. Diagrama de bloques control PID

Fuente: [Fernando Reyes, Robótica -2011]

El algoritmo de control PID está dado por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{q}} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}} + K_i \int_0^t \tilde{\mathbf{q}}(u) du + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (2.34)$$

Donde $K_p, K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices definidas positivas y se les denomina ganancias proporcional y derivativa, respectivamente. $K_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Es una matriz definida positiva denominada ganancia integral. Todas las ganancias K_p, K_v y K_i son matrices definidas positivas.

La acción de control PID introduce una nueva variable de estado, que aquí denotaremos por \mathbf{v} , la cual se encuentra relacionada con la derivada temporal del error de posición $\dot{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{q}}$. Por lo tanto, $\mathbf{v} = \int_0^t \tilde{\mathbf{q}} dt + \mathbf{v}(0)$ con $\mathbf{v}(0) \in \mathbb{R}^n$ es un vector constante. La ecuación en lazo cerrado en términos de las variables de estado $[\mathbf{v}, \tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}]^T$ adquiere la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}} \\ M(\mathbf{q})^{-1} [K_p \tilde{\mathbf{q}} - K_v \dot{\mathbf{q}} + K_i \mathbf{v} - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - B \dot{\mathbf{q}}] \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Esta es una ecuación diferencial autónoma cuyo único punto de equilibrio es el origen $[\mathbf{v}^T, \tilde{\mathbf{q}}^T, \dot{\mathbf{q}}^T] = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^{3n}$.

2.4.6. Sistema operativo ROS

El Sistema Operativo Robótico (ROS) es un marco de trabajo para desarrollar software de control de robots. Creado en 2007 bajo el nombre de “*switchyard*” por el Laboratorio de Inteligencia Artificial de *Stanford*. Continúa desarrollándose en el instituto de investigación robótico “*Willow Garage*”.

ROS provee los servicios estándar de un sistema operativo tales como abstracción del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidad de uso común, paso de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes.

Se basa en una arquitectura gráfica donde el procesamiento toma lugar en los nodos que pueden recibir, mandar y multiplexar mensajes de sensores, control, estados,

planificaciones y actuadores, entre otros. La librería de ROS se ejecuta en UNIX. Es decir es necesario emplear el sistema operativo Ubuntu. Aunque existen versiones beta para los sistemas operativos: OS X (*Homebrew*) y Android (NDK).

Para el sistema de control del robot polar se empleará la plataforma ROS es un “*framework*” para el desarrollo de software para robots que provee la funcionalidad de un sistema operativo en un clúster heterogéneo; ROS provee los servicios estándar de un sistema operativo tales como abstracción del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidad de uso común, paso de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes. Está basado en una arquitectura de grafos donde el procesamiento toma lugar en los nodos que pueden recibir, mandar y multiplexar mensajes de sensores, control, estados, planificaciones y actuadores, entre otros.

ROS tiene dos partes básicas: la parte del sistema operativo, *ros*, como se ha descrito anteriormente y *ros-pkg*, una suite de paquetes aportados por la contribución de usuarios (organizados en conjuntos llamados pilas o en inglés *stacks*) que implementan la funcionalidades tales como localización y mapeo simultáneo, planificación, percepción, simulación, etc.

Dentro de las aplicaciones de los paquetes de ROS tenemos:

- Percepción
- Identificación de Objetos
- Segmentación y reconocimiento
- Reconocimiento facial
- Reconocimiento de gestos
- Seguimiento de objetos
- Egomoción
- Comprensión de movimiento
- Estructura de movimientos (SFM)
- Visión estéreo: percepción de profundidad mediante el uso de dos cámaras
- Movimientos
- Robots móviles

- Control
- Planificación
- Agarre de objetos

2.5. Efecto final

Este es un elemento sumamente importante para considerar en el desarrollo del proyecto aquí presentado, ya que el efecto final se encarga de la interacción entre el manipulador robótico y su entorno, habiendo dos maneras de hacerlo que son por elementos de aprehensión como por herramientas como las que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Herramientas terminales para robots.

Tipo de Herramienta	Comentarios
Pinza soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar
Soplete soldadura al arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde
Cucharón para colada	Para trabajos de fundición
Atornillador	Suelen incluir la alimentación de tornillos
Fresa-lijas	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir, etc
Pistola de pintura	Por pulverización de la pintura
Cañón laser	Para corte de materiales, soldadura o inspección
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales

Fuente: [McGraw-Hill, Fundamentos de robótica -2011].

Para el robot a construir se empleará un efector final de aprensión tipo Gripper para cumplir con el enfoque de manipular objetos.

2.6. Resumen

Los puntos importantes en el capítulo son:

- Reseña histórica de la robótica y los primeros manipuladores robóticos industriales. Desde el siglo primero A.C. existieron y se han ido desarrollando los autómatas. El primer manipulador robótico, Unimation, se puso en operación en 1961 para la ensambladora Ford.
- Manipuladores robóticos: historia, definiciones, estructura. Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas. Sus configuraciones morfológicas son: robot cartesiano, cilíndrico, esférico, antropomórfico, paralelo, etc.
- Sistema sensorial. Para tener un sistema de control funcional, la parte de sensoramiento es indispensable ya que se encarga de enviar la información interna del robot y también del entorno del mismo, hacia el controlador para la toma de decisiones y posterior funcionamiento de los actuadores.
- Sistema de Control. Se analizan la cinemática directa e inversa, dinámica y diferentes técnicas de control. La implementación del control se realizará en la plataforma ROS de la cual se hablará con mayor profundidad en próximos capítulos.
- El efector final es un elemento sumamente importante para considerar en el desarrollo del proyecto aquí presentado, ya que el efector final se encarga de la interacción entre el manipulador robótico y su entorno, habiendo dos maneras de hacerlo que son por elementos de aprehensión y por herramientas.

Capítulo 3

3. Metodología y diseño del manipulador robótico

El capítulo se centra en el diseño del manipulador robótico. Empieza por establecer las necesidades de los usuarios y diseñadores. A continuación se definen las especificaciones que satisfacen las necesidades para definir la elaboración del manipulador robótico. Se analizan los módulos con sus diferentes alternativas para con ello valorar las más convenientes y decidir el concepto definitivo del manipulador. Posteriormente se realiza la definición del diseño donde se da origen a la fabricación e implementación de los componentes. Por último se corrigen posibles fallos y se mejora el diseño en la definición del concepto final.

3.1. Definición de necesidades

Identificar las necesidades es parte integral de la fase del proceso de desarrollo del producto. Las necesidades que resulten se usan para establecer especificaciones del producto, generar conceptos del producto para su posterior desarrollo [Karl T. Ulrich, Diseño y desarrollo de productos, 2013].

Para el presente proyecto se identificó las diversas necesidades tanto del usuario como del diseñador y se la separó en varios conceptos como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8: Detalle de Necesidades

Concepto	N°	Necesidad
Aplicación	1	Brazo robótico de morfología esférica 3GDL.
	2	Manipulación de objetos.
	3	Posicionamiento preciso en un área de trabajo.
Manufactura	4	Fácil ensamble.
	5	Estructura estable.
	6	Estructura estética.
	7	Movimientos precisos.
	8	Sensoramiento interno.
Control	9	Sensoramiento externo.
	10	Control robusto (uso del sistema ROS).
	11	Fácil de operar.
Mantenimiento	12	Fácil mantenimiento.
Costo	13	Bajo costo.

3.2. Especificaciones del concepto

Para obtener una guía específica acerca de cómo diseñar y construir un producto, se debe establecer un conjunto de especificaciones.

Las métricas más útiles son aquellas que reflejan, en forma tan directa como es posible el grado al cual el producto satisface las necesidades del usuario. La relación entre necesidades y métricas es esencial para todo el concepto de especificaciones.

Una matriz de necesidad-métrica representa relación entre necesidades y métricas como se muestra en la tabla 9. Las filas de la matriz corresponden a las necesidades y las columnas corresponden a las métricas.

10	Control robusto (uso del sistema ROS)				x		x		x		x		
11	Fácil de operar								x		x		
12	Fácil mantenimiento							x	x		x	x	
13	Bajo costo		x					x			x		x

Tabla 10: Detalle de especificaciones

N°	Núm. de necesidades	Métricas	Unidades
1	5	Densidad del material de los eslabones	Kg/cm^3
2	4, 6, 13	Tipo de material de la estructura	—
3	2,7	Potencia de los motores	Kgf_cm
4	3, 7, 10	Controlabilidad de motores	—
5	2, 5	Carga máxima	g
6	2, 7, 8, 10	Velocidad máxima de extremo final	m/s
7	4, 6, 12, 13	Costo de manufactura	\$
8	1, 10, 11, 12	Grados de libertad del manipulador	-
9	1, 3, 9	Alcance máximo del manipulador	cm
10	10,11,12,13	Costo del sistema operativo del robot	\$
11	2, 4, 9, 12	Tipo del gripper	-
12	13	Costo del gripper	\$

3.3. Definición del concepto

El concepto de un producto es la descripción aproximada de la tecnología, principios de operación y forma del producto. Esto permite descomponer la operatividad del mismo en varios módulos. Finalmente, estos módulos permiten el desarrollo del concepto como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Módulos del manipulador robótico

N°	Módulo	Funciones
1	Estructura mecánica	Dimensiones, materiales y transmisiones mecánicas de la estructura.
2	Potencia de accionamiento	Dinámica del manipulador (torques necesarios).
3	Accionamiento y Controlabilidad	Tipos de actuadores.
4	Modelos técnicos para el control	Algoritmos para resolver el problema cinemático y tipo de control del robot
5	Sensoramiento	Sensores internos y externos.
6	Software para el control	Sistema operativo del robot

El proceso de generación de conceptos se inicia con un conjunto de necesidades del cliente y especificaciones objetivo, y resulta un conjunto de conceptos del producto de los que el diseñador hará una selección final.

3.3.1. Módulo 1. Estructura mecánica

En cuanto a la Estructura mecánica del manipulador se deben considerar básicamente 3 aspectos. Los cuales son:

- Dimensiones
- Materiales
- Transmisiones mecánicas

Se obtienen para los mismos las siguientes alternativas de estructuras mecánicas valorando en cada una de ellas las ventajas y desventajas que presentan:

3.3.1.1. Tamaño de estructura mecánica

Estructura mecánica pequeña

Es decir para la misma morfología de manipulador robótico esférico, se considera la opción de tener un alcance (volumen de revolución) pequeño. Entendiendo pequeño por un radio para volumen de revolución inferior a 0,25 metros.

Ventajas:

- Menor cantidad de material de fabricación.
- Disminución de costos.
- Disminución en requerimiento de potencia de actuadores.
- Facilidad de traslado e instalación.

Desventajas:

- Dificultad para conseguir el objetivo de movilizar masa de 100g.
- Apariencia desfavorable.
- Menor alcance del manipulador robótico en el espacio de trabajo.

Estructura mecánica mediana

Considerando para esta alternativa un volumen de revolución de radio incluido en el rango de 0,25 a 1 metro, se tienen las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Facilidad para la manipulación de objeto de 100g.
- Apariencia imponente
- Mayor alcance del manipulador robótico en el espacio de trabajo.

Desventajas:

- Mayor requerimiento de material.
- Aumento de costos.
- Requerimiento de actuadores de mayor potencia.
- Dificultad de traslado e instalación.

3.3.1.2. Material de la estructura mecánica**Estructura mecánica de material plástico**

Dentro de este aspecto pueden considerarse materiales ligeros como los polímeros. Se analiza en este aspecto las ventajas y desventajas de fabricar los eslabones de la estructura mecánica del manipulador en materiales plásticos, por ejemplo: nylon, acrílico, ABS.

Estructura mecánica de Nylon (duralón)

Ventajas:

- Bajo costo del material.
- Buena resistencia mecánica.
- Menor inercia, que influye positivamente en menor trabajo para los actuadores.
- Facilidad de maquinado

Desventajas:

- Apariencia desfavorable
- Menor vida útil en eslabones sometidos a esfuerzos mecánicos
- Menor precisión para ensamblaje en juntas mecánicas (juntas empernadas)

Estructura mecánica de Acrílico

Ventajas:

- Bajo costo del material.
- Buena apariencia.
- Menor inercia, que influye positivamente en menor trabajo para los actuadores.
- Facilidad de construcción. Corte por laser

Desventajas:

- Baja resistencia mecánica. Material frágil.
- Menor vida útil en eslabones sometidos a esfuerzos mecánicos
- Piezas cortadas de planchas. Dificultad para obtener formas tridimensionales.

Estructura mecánica de plástico ABS (prototipado rápido)

Ventajas:

- Piezas de alta complejidad por su forma
- Facilidad de construcción
- Menor inercia, que influye positivamente en menor trabajo para los actuadores.
- Buena apariencia

Desventajas:

- Menor vida útil en eslabones sometidos a esfuerzos mecánicos
- Muy costoso
- Piezas impresas en 3D no pueden ser de tamaños grandes.

Estructura mecánica de aluminio:

Se ha considerado este material como alternativa para la construcción de los eslabones en la estructura mecánica por tratarse de un metal (con todas las ventajas en resistencia mecánica que ello implica) pero sumado a esto la ventaja de la baja densidad.

Ventajas:

- Alta resistencia mecánica
- Metal ligero
- Bajo costo
- Apariencia favorable
- Facilidad de manipulación
- Fácil adquisición
- Alta maleabilidad

Desventajas:

- Dificultad para realizar juntas soldadas
- Menor resistencia mecánica que otros metales

Estructura mecánica de acero**Ventajas:**

- Alta resistencia mecánica
- Apariencia favorable
- Fácil adquisición
- Alta maleabilidad

Desventajas:

- Metal de peso considerable.
- Alto costo de fabricación.

3.3.1.3. Articulación base del robot**Motor fijo a la base**

Esta alternativa de mecanismo para el diseño de la base del manipulador es la más común ya que consiste en sujetar el motor a un bastidor y recibir la potencia mecánica de su flecha para efectuar el giro de la articulación que equivale a la cintura.

Ventajas:

- Cables del motor permanecen sin movimiento
- Mecanismo simple para transmitir potencia mecánica.

Desventajas:

- Requerimiento de transmisión de potencia
- Toda la estructura se posiciona sobre una sola flecha.

Motor sobre plato giratorio

Este modelo de mecanismo para la articulación rotatoria de la cintura se basa en el diseño empleado por los robots comerciales Kuka. Ya que en ellos el cuerpo del motor que transmite potencia para el movimiento de esta articulación se posiciona en la parte rotatoria del eslabón y no va fijo como en la alternativa anterior.

Ventajas:

- Todos los actuadores se posicionan sobre la estructura mecánica
- Proporciona mayor estabilidad a la estructura
- Mayor transmisión de potencia mecánica con respecto a una transmisión simple.

Desventajas:

- Cables permanecen en movimiento

3.3.1.4. Articulación hombro del robot**Por reducción de engranajes**

Un engranaje es el mecanismo empleado para transmitir potencia mecánica desde una flecha motriz a una flecha conducida mediante un par de ruedas dentadas denominadas piñón y corona respectivamente.

Ventajas

- Excelente transmisión de potencia.
- Reducción de velocidad aumenta el torque en el engrane conducido.

Desventajas

- Costo de fabricación superior al de otros medios de transmisión de potencia.
- No permite transmitir potencia a distancias superiores que la distancia entre flechas.

Por accionamiento directo

Se refiere este punto a la no utilización de transmisiones mecánicas, siendo los actuadores los que mueven directamente la flecha motriz en una articulación.

Ventajas

- No se emplean transmisiones mecánicas
- Facilidad de mantenimiento

Desventajas

- Peso de actuador en articulaciones
- No hay aumento de torque por no utilizar reductor de velocidad

3.3.1.5. Articulación codo prismático del robot

Cilindro neumático

En un cilindro neumático la energía del aire comprimido se transforma por medio de cilindros en un movimiento lineal de vaivén, a menudo, la generación de un movimiento rectilíneo con elementos neumáticos combinados con accionamientos eléctricos supone un gasto considerable, cabe recalcar que los actuadores hidráulicos funcionan de forma similar.

Ventajas:

- Baratos
- Rápidos
- Robustos

Desventajas:

- Dificultad de control continuo.
- Instalación especial (compresor, filtros).
- Ruidoso.

Cilindro eléctrico

En un cilindro eléctrico transforma el giro de un motor eléctrico en un movimiento lineal por medio de un mecanismo los cuales pueden ser una combinación entre husillo-tuerca o piñón-cremallera.

Ventajas

- Exactitud para la transmisión de movimiento
- Estos actuadores son muy fiables
- Fácil control
- Sencilla instalación
- Silenciosos

Desventajas

- Alto costo.
- Potencia limitada.

3.3.2. Módulo 2. Potencia de accionamiento

El módulo de potencia de accionamiento hace referencia al estudio dinámico del manipulador con lo que se podrá dimensionar el torque necesario para cada actuador y lograr los movimientos requeridos, dicho esto se analizarán las teorías estudiadas en el capítulo 2 anunciando sus ventajas y desventajas de cada una de ellas, a continuación se muestra las teorías más convenientes:

- a) Modelo dinámico de Hamilton
- b) Modelo dinámico de Newton
- c) Ecuaciones de Euler-Lagrange

Modelo dinámico de Hamilton

El modelo dinámico de Hamilton del robot se basa en el principio de la conservación de la energía, el cual establece que el trabajo efectuado por las fuerzas aplicadas a un sistema es igual al cambio de energía total del sistema. Es decir la energía aplicada es igual a la suma de la energía almacenada más la energía disipada. El hamiltoniano es similar, en esencia, al lagrangiano, aunque describe la evolución temporal de un sistema mediante ecuaciones diferenciales de primer orden, lo cual permite integrar más fácilmente las ecuaciones de movimiento [Fernando Reyes Cortés, Robótica-Control de robots manipuladores, 2011].

Ventajas

- El número de ecuaciones es igual al número de grados de libertad que tiene el manipulador robótico.
- La modelación matemática es de menor orden en comparación al modelo de Lagrange-Euler lo cual simplifica su integración de las ecuaciones de movimiento.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.

Desventajas

- La extensión de sus expresiones matemáticas resultan muy grandes para muchos grados de libertad lo que complica a su evaluación.
- No válida para sistemas no holónomos (ranura sin deslizamiento).

- No permite tratar la fricción.

Modelo dinámico de Newton

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, se la denomina ley de Euler [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica -2011].

Ventajas

- Su modelación matemática es fácil de condicionar para manipuladores robóticos con bajos grados de libertad.
- Se minimiza el tiempo de evaluación de cálculos.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.

Desventajas

- Resulta muy complejo la evaluación de este método para manipuladores robóticos con muchos grados de libertad.
- Para disponer de los parámetros dinámicos reales es necesario conocer la geometría exacta en todos los sólidos y sus características mecánicas.

Ecuaciones de Euler-Lagrange

Representa una alternativa de modelado dinámico para robots manipuladores debido a las propiedades matemáticas que se deducen de manera natural usando esa metodología. Se basan en una interpretación de la energía involucrada. Mediante este método se obtiene el modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad, formado con eslabones rígidos conectados por articulaciones libres de elasticidad en cadena cinemática abierta [Fernando Reyes Cortés, Robótica-Control de robots manipuladores, 2011].

Ventajas

- Este método es muy eficiente para manipuladores robóticos que tienen muchos grados de libertad

- Presenta mayor calidad de control dinámico en el manipulador robótico.
- Tiene mayores prestaciones a nivel industrial.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.

Desventajas

- Este método tiene un alto coste computacional.
- Se necesita un controlador robusto para el procesamiento de datos.

3.3.3. Módulo 3. Accionamiento y Controlabilidad

El módulo de Accionamiento y Controlabilidad hace referencia al tipo de actuadores que en este caso será por accionamiento eléctrico caracterizado por su sencillez en el control y precisión en sus movimientos, a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente.

Las características a considerar son:

- Potencia
- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Coste

Con esto se definen 3 tipos de actuadores eléctricos:

- a) Motores de corriente continua (DC). Servomotores
- b) Motores paso a paso
- c) Motores de corriente alterna (AC).

Motores de corriente continua (DC). Servomotores

Un Servo es un dispositivo que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del

engranaje (reducción de engranes). Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones. Ellos también se usan en radio control, títeres, y por supuesto, en robots.

Ventajas

- La cantidad de voltaje aplicado al servomotor es proporcional a la distancia que éste necesita desplazarse.
- Los servomotores brindan una capacidad de sobrecarga de trabajo, lo que quiere decir que puede trabajar tres veces más rápido y potente que su velocidad y torque nominal.
- Alta capacidad de torque que tienen con una estructura física reducida.
- Alta Controlabilidad y precisión en sus movimientos.

Desventajas

- Pueden llegar a ser muy costosos dependiendo de la aplicación.
- Para poder controlar varias secuencias de posiciones, se necesita un control robusto con altas prestaciones para que el sistema resulte eficiente.
- No puede operarse directamente de la red de suministro, obligatoriamente necesita un servo driver o controlador que opera *PWM (Pulse Width Modulation)*.

Motores paso a paso

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, ocupan un lugar único en el mundo del control. Estos motores son usados comúnmente en mediciones y aplicaciones de control. Ejemplo de estas aplicaciones son impresoras chorro de tinta, máquinas de control numérico computarizado (CNC) y bombas volumétricas entre otras.

Ventajas

- El ángulo de rotación es proporcional a los pulsos de entrada.
- El motor tiene torque máximo cuando el mismo está enclavado (bobinas energizadas).
- Excelente respuesta ante arranque, parada y reversa.

- El motor responde a pulsos de entrada digitales, lo que permite un control de lazo abierto, haciendo un control más simple y barato.
- Pueden tener un gran rango de velocidades de rotación, dado que la misma es proporcional a la frecuencia de los pulsos de entrada.

Desventajas

- Puede ocurrir un fenómeno de resonancia si el motor no es controlado adecuadamente.
- Muy difícil de operar a altas velocidades.
- Los pares para los que están disponibles no son muy altos.
- Existe el riesgo de pérdida de alguna posición por trabajar en bucle abierto.
- Tiende a sobrecalentarse a velocidades altas.

Motores de corriente alterna (AC)

Este tipo de motores no ha tenido aplicación en robótica hasta hace unos años, debido fundamentalmente a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se han introducido en las máquinas síncronas hacen que se presenten como un claro competidor de los motores de corriente continua. Esto se debe principalmente a tres factores:

- La construcción de los motores síncronos sin escobillas.
- El uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.
- El empleo de la microelectrónica, que permite una gran capacidad de control.

Existen dos tipos fundamentales de motores de corriente alterna:

- Motores asíncronos
- Motores síncronos

Motores asíncronos

Son probablemente los más sencillos y robustos de los motores eléctricos. La frecuencia de la corriente alterna de la alimentación determina la velocidad a la cual rota el

campo magnético del estator. El rotor sigue a este campo, girando más despacio, la diferencia de velocidades se denomina deslizamiento. Un deslizamiento normal ronda el 5%.

Motores síncronos

El motor síncrono, como su nombre indica, opera exactamente a la misma velocidad que le campo del estator, sin deslizamiento. En los motores síncronos la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la tensión que alimenta el inducido. Para poder variar esta precisión, el control de velocidad se realiza mediante un convertidor de frecuencia.

Ventajas

- Los motores AC pueden trabajar a altas potencias
- El mantenimiento de este tipo de actuadores es mínimo, y el desgaste mecánico es bajo.
- Su implementación junto con un control robusto puede llegar a tener altas prestaciones a nivel de robótica industrial.

Desventajas

- El control para este tipo de actuadores puede llegar a ser muy compleja.
- Requiere construirse una caja de reducción debido a que por sí solo es incapaz de mantener el torque cuando está en reposo.
- Alto costo de implementación.

3.3.4. Módulo 4. Modelos técnicos para el control

El módulo de modelos técnicos de control se analiza 2 aspectos importantes para el control los cuales son: la cinemática y el tipo de control del robot.

3.3.4.1. Cinemática del robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. En los manipuladores robóticos existen 2 problemas fundamentalmente a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo y el segundo como el problema cinemático inverso, estos problemas se estudiaron en el capítulo anterior, en esta sección se analizará las diferentes técnicas y algoritmos con sus respectivas ventajas y desventajas que presenta cada uno ellos.

Algoritmo de Denavit Hartenberg

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo.

Ventajas

- Se obtiene una matriz homogénea para dar solución al problema cinemático directo y describir la relación espacial entre los elementos rígidos.
- A partir de la matriz homogénea se puede solucionar el problema cinemático inverso.
- Facilidad de obtener el Jacobiano a partir de la matriz homogénea, es necesario derivar.
- Este método es un estándar para robot con pocos GDL.

Desventajas

- Es necesario construir los sistemas de referencia de todos los eslabones de la cadena cinemática.
- Alto coste computacional.

Algoritmos genéticos

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización.

Un algoritmo genético consiste en una función matemática o una rutina de software que toma como entradas a los ejemplares y retorna como salidas cuáles de ellos deben generar descendencia para la nueva generación.

Versiones más complejas de algoritmos genéticos generan un ciclo iterativo que directamente toma a la especie (el total de los ejemplares) y crea una nueva generación que reemplaza a la antigua una cantidad de veces determinada por su propio diseño. Una de sus características principales es la de ir perfeccionando su propia heurística en el proceso de ejecución, por lo que no requiere largos períodos de entrenamiento especializado por parte del ser humano, principal defecto de otros métodos para solucionar problemas, como los Sistemas Expertos.

Ventajas

- Operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.
- Resulta sumamente fácil ejecutarlos en las modernas arquitecturas masivamente paralelas.
- Cuando se usan para problemas de optimización maximizar una función objetivo- resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones) que las técnicas tradicionales.
- Es muy útil en aplicaciones de robótica, por ejemplo en la cinemática se tiene varias soluciones pero por medio de este algoritmo se puede obtener el más óptimo.

Desventajas

- Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo número de generaciones, etc.
- Pueden converger prematuramente debido a una serie de problemas de diversa índole.
- Alto coste computacional.

Grupos y álgebra de Lie

El álgebra de Lie proporciona una formulación elegante de varios problemas canónicos, la idea de este método es reducir la complejidad del problema cinemático inverso mediante la división del mismo mediante sub-problemas más sencillos, que ocurre frecuentemente en la mecánica de robots, y cuyas relaciones geométricas son conocidas.

Ventajas

- Solo es necesario conocer dos sistemas de referencia, estos son: el de la base y el del eslabón cinemático de interés, que normalmente es el sistema de referencia de la herramienta.
- Facilidad de obtener el Jacobiano a partir del POE (Producto de Exponenciales) que especifica la asignación de las velocidades en el espacio cartesiano, no es necesario derivar.

- Es eficiente para robot con muchos GDL.

Desventajas

- Es necesario un procesador de datos de alta capacidad.

3.3.4.2. Tipo de control del robot

El tipo de control es muy importante analizar los diferentes métodos que existen tales como: control ON/OFF, control PD, control PID

Control ON/OFF

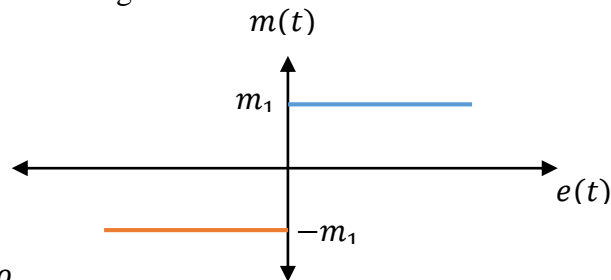
Este control está caracterizado por dos posiciones fijas en su accionar los cuales son encendido y apagado; más del 70% de aplicaciones industriales se soluciona con este tipo de control; la señal de control se comporta de la siguiente manera:

$$m(t) = \begin{cases} m_1; & e(t) > 0 \\ -m_1; & e(t) < 0 \end{cases}$$

Donde:

$m(t)$: Señal de control en el tiempo

$e(t)$: Señal de error en el tiempo



Ventajas

- Se pueden utilizar en sistemas donde la oscilación propia de estos controladores son señales de error que se aproximan a cero.
- Es un control de fácil implementación.
- Bajo costo computacional.

Desventajas

- No son útiles en sistemas sensibles donde presentan comportamientos inestables.
- No se puede llevar a cabo un control preciso

Control PD

Este control presenta una señal de control proporcional al error y a su derivada como se analizó en el capítulo 2 epígrafe 2.4.5.1.

Ventajas

- Reduce la sobre oscilación por el efecto anticipativo de la acción derivativa.
- Eficiente para sistema rápidos.

Desventajas

- Presenta problemas con el ruido

Control PID

Este control posee una señal de control proporcional al error a su integral y derivada; este controlador se analizó en el capítulo 2 epígrafe 2.4.5.2.

Ventajas

- Reduce la sobre oscilación.
- Eficiente para aplicaciones de robótica.

Desventajas

- Este controlador no siempre garantiza un control óptimo del sistema, pudiéndose aplicar los controladores anteriormente analizados

3.3.5. Módulo 5. Sensorial

En cuanto al sensoramiento para el manipulador robótico se deben considerar básicamente dos aspectos. Los cuales son un sensoramiento interno y un sensoramiento externo. Se hace esta distinción para el módulo de sensoramiento debido a que un manipulador robótico en ambiente de trabajo necesita conocer tanto factores externos como internos, para funcionar correctamente. A continuación se analizan alternativas para selección de sensoramiento tanto interno como externo:

3.3.5.1. Sensoramiento interno

Por medio del sensoramiento interno del manipulador robótico se puede conocer la ubicación espacial y velocidad exacta del TCP, otra función del sensoramiento interno es que se lo utiliza como medida de seguridad ante las limitaciones mecánicas que tiene el manipulador robótico, por lo cual se analizarán las ventajas y desventajas en sensores de presencia y posición.

3.3.5.1.1. Sensores de presencia

El sensor de presencia, es un tipo de sensor que activa o desactiva automáticamente el mecanismo eléctrico al que está conectado, cuando detecta o no, la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado. Esta detección puede hacerse con o sin contacto con el objeto. En el primer caso, se trata siempre de un interruptor, abierto o cerrado, dependiendo de la aplicación que se quiera hacer, y segundo caso se utilizan diferentes principios físicos para detectar la presencia, dando lugar a los diferentes tipos de sensores tales como: final de carrera, sensores infrarrojos, ultrasónicos, capacitivos e inductivos.

Sensor final de carrera

Dentro de los componentes eléctricos, se encuentra el final de carrera o sensor de contacto (también conocido como "interruptor de límite"), como se puede observar en la figura 32, son dispositivos situados al final del recorrido o de un elemento móvil, con el objetivo de enviar señales que puedan modificar el estado de un circuito.



Figura 32. Sensor final de carrera

Fuente: [Robo-control, 2015]

Ventajas

- Facilidad de instalación.
- Robustez del sistema.
- Insensible a estados transitorios.
- Trabaja a tensiones altas.
- No afecta su funcionamiento la electricidad estática.

Desventajas

- La velocidad de detección es muy lenta.
- Riesgo de enviar señal errónea ya que hay la posibilidad de rebotes en el contacto.
- Depende de la fuerza de actuación.

Sensor infrarrojo

El sensor es un dispositivo electrónico que se muestra en la figura 33 el cual mapea un atributo ambiental resultando una medida cuantizada, normalmente un nivel de tensión eléctrica. Particularmente, el sensor infrarrojo es un dispositivo electrónico capaz de medir la radiación electromagnética infrarroja de los cuerpos en su campo de visión. Todos los cuerpos reflejan una cierta cantidad de radiación, esta resulta invisible para nuestros ojos pero no para estos aparatos electrónicos, ya que se encuentran en el rango del espectro justo por debajo de la luz visible.



Figura 33: Sensor infrarrojo

Fuente: [Solarbotics, 2015]

Ventajas

- Requerimientos de bajo voltaje.
- Sensor de bajo costo.
- Acondicionamiento de señal sencillo.

Desventajas

- Se bloquea la señal con materiales comunes por lo que puede causar un error de medición

- Sensor de corto alcance.
- La transmisión de datos es más baja que la típica transmisión cableada.

Sensor ultrasónico

Los sensores de ultrasonidos son detectores de proximidad que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos a distancias que van desde pocos centímetros hasta varios metros. El sensor emite un sonido y mide el tiempo que la señal tarda en regresar. Estos reflejan en un objeto, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas, las cuales son elaboradas en el aparato de valoración. Estos sensores trabajan solamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y de diferentes materiales.

Ventajas

- Realiza la medición sin contacto físico.
- Medición continua puntual.
- Detecta cualquier tipo de material.
- Sensor de alcance hasta 5 metros.
- Mantenimiento mínimo.

Desventajas

- La medición puede ser afectada por el movimiento.
- Alto costo

Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos se basan en la detección de un cambio en la capacidad del sensor provocado por una superficie próxima a éste. La gran ventaja que detecta la proximidad de objetos de cualquier naturaleza.

Ventajas

- Realiza la medición sin contacto físico.
- Detecta la capacidad de cualquier tipo de material.

- Es robusto y resiste en ambientes industriales.
- Mantenimiento mínimo.

Desventajas

- Corto alcance.
- Alto costo.
- Acondicionamiento de señal para regular su sensibilidad.

Sensores inductivos

Los sensores inductivos, se basan en el cambio de inductancia que provoca un objeto metálico en un campo magnético, constan básicamente de una bobina y de un imán, su funcionamiento es sencillo: si se detecta una corriente en la bobina, algún objeto ferromagnético ha entrado en el campo del imán.

Ventajas

- Realiza la medición sin contacto físico.
- Detecta materiales metálicos.
- Es robusto y resiste en ambientes industriales.
- Mantenimiento mínimo.

Desventajas

- Corto alcance.
- Son limitados a objetos ferromagnéticos.
- Alto costo.
- Acondicionamiento de señal para regular su sensibilidad.

3.3.5.1.2. Sensores de posición

Los sensores de posición generalmente se usan para la medición de parámetros tales como: posición, la velocidad y la aceleración. Algunos sensores que se incluyen en esta alternativa son por ejemplo los potenciómetros para medir posición o encoders para medición posición y velocidades angulares.

Potenciómetros

El potenciómetro se utiliza para fines de medición, la equivalencia existe entre la longitud de una resistencia alámbrica y su valor óhmico. Actualmente es el sensor de recorrido/velocidad angular más económico.

Ventajas

- Estructura sencilla y fácil de comprender.
- Efecto de medición muy grande (carrera de medición \cong tensión de medición)
- No se requiere electrónica.
- Buena resistencia a tensiones parasitas.
- Facilidad de calibrado.

Desventajas

- Desgaste mecánico, abrasión.
- Errores de medición a causa de restos de abrasión.
- Levantamiento del cursor en caso de fuertes aceleraciones y/o vibraciones.
- Necesidad de acondicionamiento de señales

Encoders absolutos

Los codificadores de posición absolutos ofrecen a su salida una señal codificada correspondiente a la posición de un elemento móvil, regla o disco, con respecto a una referencia interna. Para ello, el elemento móvil dispone de zonas con una propiedad que las distingue, y a las que se asigna un valor binario "0" o "1". Pero, a diferencia de los codificadores incrementales, hay varias pistas con zonas diferenciadas y están agrupadas de tal forma que el sistema de lectura obtiene directamente, en cada posición del elemento móvil, el número codificado que da su posición.

Ventajas

- Un encoder absoluto siempre conoce su posición y su punto de inicio, puede ser definido electrónicamente a gusto del operador.

- Un encoder absoluto lleva registro del movimiento dentro de su propio marco de referencia absoluto.

Desventajas

- El encoder absoluto típico especifica un solo código de ángulo.
- El encoder absoluto es más costoso.

Encoders incrementales

Un encoder incremental, como su nombre lo indica, es un encoder que determina el ángulo de posición por medio de realizar cuentas incrementales. Esto quiere decir que el encoder incremental provee una posición estratégica desde donde siempre comenzará la cuenta. La posición actual del encoder es incremental cuando es comparada con la última posición registrada por el sensor.

Ventajas

- Un encoder incremental tiene más bajo costo que el encoder absoluto.
- Los encoders incrementales son un tipo de encoder óptico y este tiene su posición completamente única.

Desventajas

- Cuando se enciende un encoder incremental, este debe ser recalibrado antes de comenzar a operar.
- El encoder incremental lleva registro del movimiento relativo a un punto de inicio definido al momento de arrancar.

3.3.5.2. Sensoramiento externo

Para el sensoramiento externo analizará que parámetros son los más indispensables de controlar para que el sistema alcance los objetivos planteados. Por lo cual factores externos como por ejemplo si su pinza está abierta o cerrada, si un objeto a movilizar ya está en la posición requerida, si la temperatura del ambiente es ideal para algún tipo de procedimiento, etc. En donde se analizarán las ventajas y desventajas en sensores de

presencia, temperatura y visión artificial. Como los sensores de presencia se analizaron en el sensoramiento interno solo se analizaran los restantes.

Sensores de temperatura del ambiente

Según la aplicación que un manipulador robótico vaya a realizar, el sensoramiento de la temperatura del ambiente tendrá mayor o menor importancia. Un caso donde si sería necesaria esta medición es por ejemplo para un sistema de seguridad o de conformado de metales fundidos, donde una vez alcanzada cierta temperatura un objeto requiere ser movilizado a otro lugar para continuar con su proceso.

Ventajas

- Variedad de sensores de temperatura.
- Múltiples aplicaciones industriales.
- Variedad de precios.

Desventajas

- El acondicionamiento de señal requiere de la electrónica
- Sensibilidad baja

Sensores de visión artificial

La gamma de alternativas de automatización que este tipo de sensores permiten realizar es bastante amplia. Entre ellos tenemos por ejemplo el conocido Kinect. Sin embargo se debe tomar en cuenta la importancia de no emplear equipo superior al necesarios porque en términos mecánicos sería un equivalente a “sobredimensionar” el sistema, lo cual no es correcto.

Ventajas

- Prestaciones para estrategias de control usando inteligencia artificial.
- Múltiples aplicaciones en el sector de automatización industrial y la robótica.

Desventajas

- Altos costos
- Requerimiento de software dedicado
- Mayor complejidad de programación

3.3.6. Módulo 6. Software

El término software se refiere al conjunto de programas que se instalan en la computadora para crear la interfaz gráfica del usuario. Para el proyecto en desarrollo, este aspecto es de mucha importancia ya que en el software seleccionado se realizará todo el control del sistema.

Todos los programas que conforman el software, pueden clasificarse en dos grupos que se diferencian en la función que realizan. El software de sistema está compuesto por el conjunto de programas imprescindibles para el funcionamiento del hardware, más un conjunto cuya misión es de facilitar el uso del sistema y optimizar sus recursos. Por otra parte el software de aplicación: es el conjunto de programas que se desarrollan para que una computadora realice cualquier trabajo controlado por el usuario.

Los programas de control constituyen la parte del sistema operativo dedicada a coordinar el funcionamiento de todos los recursos y elementos de la computadora, es decir, el procesador, la memoria, las operaciones de entrada y salida, la información y en definitiva todo el entorno del sistema incluidos los periféricos. Los programas de control están especialmente desarrollados para que puedan ayudar con éxito a la computadora, se cual fuese la modalidad con que trabaje: mono programación, multiprogramación, proceso distributivo, etc. Esto se hace con el fin de conseguir la utilización óptima de los recursos disponibles.

El Sistema Operativo Robótico (*Robot Operating System*, ROS) es un framework para el desarrollo de software para robots que provee la funcionalidad de un sistema operativo en un clúster heterogéneo. ROS provee los servicios estándar de un sistema operativo tales como abstracción del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidad de uso común, paso de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes. Está basado en una arquitectura de grafos donde el procesamiento toma lugar en los nodos

que pueden recibir, mandar y multiplexar mensajes de sensores, control, estados, planificaciones y actuadores, entre otros. La librería está orientada para un sistema UNIX (Ubuntu (Linux)).

Ya que la utilización del software ROS es parte del proyecto a desarrollar, a continuación se mencionan algunas de las ventajas y desventajas del mismo:

Ventajas

- Especializado en proyectos de robótica
- Software libre
- Facilidad para programación de morfologías particulares de manipuladores robóticos

Desventajas:

- Ausencia de interfaz gráfica
- Requerimiento de emplear el sistema operativo Linux

3.4. Evaluación de conceptos

Para evaluar conceptos con respecto a las necesidades del usuario y los criterios del diseñador se deben comparar puntos fuertes y los débiles de los módulos que se analizaron en la definición del concepto, y seleccionar para su posterior desarrollo.

Todos los diseñadores usan algún método, implícito o explícito, para seleccionar conceptos. Las técnicas de decisión empleadas para selección de los conceptos, se usará el método ordinal corregido de los criterios ponderados.

3.4.1. Método ordinal corregido de los criterios ponderados

La mayor parte de las veces, para decidir entre diversas soluciones, especialmente en la etapa de diseño conceptual, basta conocer el orden de preferencia de su evaluación global. Es por ello que se recomienda el método ordinal corregido de criterios ponderados que, sin la necesidad de evaluar los parámetros de cada propiedad y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio, permite obtener resultados globales suficientemente significativos.

Se basa en unas tablas donde cada criterio o solución, para un determinado criterio se confronta con los restantes criterios o soluciones y se asignan los valores siguientes:

- **1:** Si el criterio o solución de las filas es superior o mejor que el de las columnas.
- **0,5:** Si el criterio o solución de las filas es equivalente o igual al de las columnas.
- **0:** Si el criterio o solución de las filas es inferior o peor que el de las columnas

Luego, para cada criterio o solución, se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios o soluciones al que se le añade una unidad para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula; después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio o solución.

Finalmente, la evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

Módulo 1. Estructura mecánica

Tamaño de la Estructura Mecánica

Tabla 12: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	0,5	1	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0,5	-	1	1	1	4,5	0,30
Control	0	0	-	1	0,5	2,5	0,17
Mantenimiento	0	0	0	-	0	1	0,07
Costo	0	0	0,5	1	-	2,5	0,17
					Suma	15	1

- Solución A: Tamaño pequeño
- Solución B: Tamaño mediano

Tabla 13: Ponderación de aplicación para las alternativas del módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

Aplicación	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 14: Ponderación de manufactura para las alternativas del módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

Manufactura	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1

Tabla 15: Ponderación de control para las alternativas del módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

Control	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1

Tabla 16: Ponderación de mantenimiento para las alternativas del módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

Mantenimiento	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1

Tabla 17: Ponderación de costo para las alternativas del módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 18: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 1 (Tamaño de la estructura mecánica).

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,10	0,15	0,08	0,03	0,11	0,48	2
Solución B	0,20	0,15	0,08	0,03	0,06	0,52	1

Material de la estructura mecánica

Tabla 19: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	0	1	1	1	4	0,27
Manufactura	1	-	1	0	0,5	3,5	0,23
Control	0	0	-	0	0	1	0,07
Mantenimiento	0	1	1	-	0	3	0,20
Costo	0	0,5	1	1	-	3,5	0,23
					Suma	15	1,00

- Solución A: Nailon
- Solución B: Acrílico
- Solución C: ABS
- Solución D: Aluminio
- Solución E: Acero

Tabla 20: Ponderación de aplicación para las alternativas del módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	0	1	4	0,27
Solución B	0	-	0	0	0	1	0,07
Solución C	0	1	-	0	0	2	0,13
Solución D	1	1	1	-	0,5	4,5	0,30
Solución E	0	1	1	0,5	-	3,5	0,23
					Suma	15	1,00

Tabla 21: Ponderación de manufactura para las alternativas del módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	0	0	1	0,07
Solución B	1	-	0	1	1	4	0,27
Solución C	1	1	-	1	1	5	0,33
Solución D	1	0	0	-	0,5	2,5	0,17
Solución E	1	0	0	0,5	-	2,5	0,17
					Suma	15	1,00

Tabla 22: Ponderación de control para las alternativas del módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

Control	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	0,5	0,5	0,5	3	0,20
Solución B	0,5	-	0,5	0,5	0,5	3	0,20
Solución C	0,5	0,5	-	0,5	0,5	3	0,20
Solución D	0,5	0,5	0,5	-	0,5	3	0,20
Solución E	0,5	0,5	0,5	0,5	-	3	0,20
					Suma	15	1,00

Tabla 23: Ponderación de mantenimiento para las alternativas del módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	0,5	0,5	4	0,27
Solución B	0	-	1	0	0	2	0,13
Solución C	0	0	-	0	0	1	0,07
Solución D	0,5	1	1	-	0,5	4	0,27
Solución E	0,5	1	1	0,5	-	4	0,27
					Suma	15	1,00

Tabla 24: Ponderación de costo para las alternativas del módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,5	1	3,5	0,23
Solución B	1	-	1	0,5	1	4,5	0,30
Solución C	0	0	-	0	0	1	0,07
Solución D	0,5	0,5	1	-	1	4	0,27
Solución E	0	0	1	0	-	2	0,13
					Suma	15	1,00

Tabla 25: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 1 (Material de la estructura mecánica).

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,071	0,016	0,013	0,053	0,054	0,21	2
Solución B	0,018	0,062	0,013	0,027	0,070	0,19	4
Solución C	0,036	0,078	0,013	0,013	0,016	0,16	5
Solución D	0,080	0,039	0,013	0,053	0,062	0,25	1
Solución E	0,062	0,039	0,013	0,053	0,031	0,20	3

Articulación base del robot

Tabla 26: Ponderación de criterios de evaluación para la articulación base del robot.

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	1	1	0	3	0,20
Control	0,5	0	-	1	0	2,5	0,17
Mantenimiento	0	0	0	-	0	1	0,07
Costo	0	1	1	1	-	4	0,27
					Suma	15	1,00

- Solución A: Motor fijo
- Solución B: Motor móvil

Tabla 27: Ponderación de aplicación para la articulación base del robot.

Aplicación	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1

Tabla 28: Ponderación de manufactura para la articulación base del robot.

Manufactura	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 29: Ponderación de control para la articulación base del robot.

Control	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 30: Ponderación de mantenimiento para la articulación base del robot.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1,00

Tabla 31: Ponderación de costo para la articulación base del robot.

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 32: Conclusión en la articulación base del robot.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,150	0,067	0,083	0,022	0,133	0,456	2
Solución B	0,150	0,133	0,083	0,044	0,133	0,544	1

Articulación hombro del robot

Tabla 33: Ponderación de criterios de evaluación para la articulación hombro del robot.

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	1	1	0	3	0,20
Control	0,5	0	-	1	0	2,5	0,17
Mantenimiento	0	0	0	-	0	1	0,07
Costo	0	1	1	1	-	4	0,27
					Suma	15	1,00

- Solución A: Por reducción de engranes
- Solución B: Por accionamiento directo

Tabla 34: Ponderación de aplicación para la articulación hombro del robot.

Aplicación	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1,00

Tabla 35: Ponderación de manufactura para la articulación hombro del robot.

Manufactura	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 36: Ponderación de control para la articulación hombro del robot.

Control	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1,00

Tabla 37: Ponderación de mantenimiento para la articulación hombro del robot.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 38: Ponderación de costo para la articulación hombro del robot.

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1,00

Tabla 39: Conclusión en la selección de la articulación hombro del robot.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,200	0,100	0,111	0,033	0,089	0,533	1
Solución B	0,100	0,100	0,056	0,033	0,178	0,467	2

Articulación codo prismático del robot

Tabla 40: Ponderación de criterios de evaluación para la articulación codo prismático del robot

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	1	1	0	3	0,20
Control	0,5	0	-	1	0	2,5	0,17
Mantenimiento	0	0	0	-	0	1	0,07
Costo	0	1	1	1	-	4	0,27
					Suma	15	1,00

- Solución A: Cilindro neumático
- Solución B: Cilindro eléctrico

Tabla 41: Ponderación de aplicación para la articulación codo prismático del robot.

Aplicación	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 42: Ponderación de manufactura para la articulación codo prismático del robot.

Manufactura	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0,67
Solución B	0	-	1	0,33
		Suma	3	1,00

Tabla 43: Ponderación de control para la articulación codo prismático del robot.

Control	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1,00

Tabla 44: Ponderación de mantenimiento para la articulación codo prismático del robot.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Suma	3	1,00

Tabla 45: Ponderación de costo para la articulación codo prismático del robot.

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0,33
Solución B	1	-	2	0,67
		Suma	3	1,00

Tabla 46: Conclusión en la articulación codo prismático del robot.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,150	0,133	0,056	0,033	0,089	0,461	2
Solución B	0,150	0,067	0,111	0,033	0,178	0,539	1

Módulo 2. Potencia de accionamiento

Tabla 47: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 2

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	1	1	0	4	0,27
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	0	1	-	1	0,5	3,5	0,23
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	1	1	0,5	1	-	4,5	0,30
					Suma	15	1,00

- Solución A: Modelo dinámico de Hamilton
- Solución B: Modelo dinámico de Newton
- Solución C: Ecuaciones de Euler-Lagrange

Tabla 48: Ponderación de aplicación para las alternativas del módulo 2

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	1	3	0,50
Solución C	1	0	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 49: Ponderación de manufactura para las alternativas del módulo 2

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	0,5	2	0,33
Solución B	0,5	-	0,5	2	0,33
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 50: Ponderación de control para las alternativas del módulo 2

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	0,5	1,5	0,25
Solución B	1	-	0	2	0,33
Solución C	0,5	1	-	2,5	0,42
			Suma	6	1,00

Tabla 51: Ponderación de mantenimiento para las alternativas del módulo 2

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	1	3	0,50
Solución C	1	0	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 52: Ponderación de costo para las alternativas del módulo 2

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	2	0,31
Solución B	1	-	1	3	0,46
Solución C	0,5	0	-	1,5	0,23
			Suma	6,5	1,00

Tabla 53: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 2

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,04	0,02	0,06	0,02	0,09	0,24	3
Solución B	0,13	0,02	0,08	0,07	0,14	0,44	1
Solución C	0,09	0,02	0,10	0,04	0,07	0,32	2

Módulo 3. Accionamiento y Controlabilidad

Tabla 54: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	0,5	1	-	1	0,5	4	0,27
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	0	1	0,5	1	-	3,5	0,23
					Suma	15	1,00

- Solución A: Motores de corriente continua (DC). Servomotores
- Solución B: Motores paso a paso
- Solución C: Motores de corriente alterna (AC).

Tabla 55: Ponderación de aplicación para las alternativas del módulo 3

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	0,5	2,5	0,42
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 56: Ponderación de manufactura para las alternativas del módulo 3

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 57: Ponderación de control para las alternativas del módulo 3

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 58: Ponderación de mantenimiento para las alternativas del módulo 3

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 59: Ponderación de costo para las alternativas del módulo 3

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 60: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 3

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,13	0,03	0,13	0,06	0,08	0,42	1
Solución B	0,08	0,03	0,09	0,06	0,12	0,36	2
Solución C	0,10	0,01	0,04	0,02	0,04	0,22	3

Módulo 4. Modelos técnicos para el control

Cinemática del robot

Tabla 61: Ponderación de criterios de evaluación para la cinemática del robot

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0	1	0,5	3,5	0,23
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	1	1	-	1	0,5	4,5	0,30
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	0,5	1	0,5	1	-	4	0,27

Suma 15 1,00

- Solución A: Algoritmo de Denavit Hartenberg.
- Solución B: Algoritmos genéticos.
- Solución C: Grupos y álgebra de Lie

Tabla 62: Ponderación de aplicación para la cinemática del robot.

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	0,5	2,5	0,42
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 63: Ponderación de manufactura para la cinemática del robot.

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 64: Ponderación de control para la cinemática del robot.

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 65: Ponderación de mantenimiento para la cinemática del robot.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 66: Ponderación de costo para la cinemática del robot.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 67: Conclusión en la selección de la cinemática del robot.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,13	0,03	0,13	0,06	0,08	0,42	1
Solución B	0,08	0,03	0,09	0,06	0,12	0,36	2
Solución C	0,10	0,01	0,04	0,02	0,04	0,22	3

Tipo de control del robot

Tabla 68: Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de control del robot.

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0	1	0,5	3,5	0,23
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	1	1	-	1	0,5	4,5	0,30
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	0,5	1	0,5	1	-	4	0,27
					Suma	15	1,00

- Solución A: Control ON/OFF
- Solución B: Control PD
- Solución C: Control PID

Tabla 69: Ponderación de aplicación para el tipo de control del robot.

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	0,5	2,5	0,42
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 70: Ponderación de manufactura para el tipo de control del robot.

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 71: Ponderación de control para el tipo de control del robot.

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 72: Ponderación de mantenimiento para el tipo de control del robot.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 73: Ponderación de costo para el tipo de control del robot.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5	-	1	2,5	0,42
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 74: Conclusión en la selección del tipo de control del robot.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,13	0,03	0,13	0,06	0,08	0,42	1
Solución B	0,08	0,03	0,09	0,06	0,12	0,36	2
Solución C	0,10	0,01	0,04	0,02	0,04	0,22	3

Módulo 5. Sensorial

Sensoramiento interno

Sensor de presencia

Tabla 75: Ponderación de criterios de evaluación para los sensores de presencia.

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	0,5	1	-	1	1	4,5	0,30
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	0	1	0	1	-	3	0,20
					Suma	15	1,00

- Solución A: Sensor final de carrera
- Solución B: Sensor infrarrojo
- Solución C: Sensor ultrasónico
- Solución D: Sensor capacitivo
- Solución E: Sensor inductivo

Tabla 76: Ponderación de aplicación para los sensores de presencia.

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0,5	1	1	1	4,5	0,30
Solución B	0,5	-	1	1	1	4,5	0,30
Solución C	0	0	-	1	1	3	0,20
Solución D	0	0	0	-	1	2	0,13

Solución E	0	0	0	0	-	1	0,07
					Suma	15	1,00

Tabla 77: Ponderación de manufactura para los sensores de presencia.

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	1	1	5	0,33
Solución B	0	-	1	1	1	4	0,27
Solución C	0	0	-	1	1	3	0,20
Solución D	0	0	0	-	1	2	0,13
Solución E	0	0	0	0	-	1	0,07
					Suma	15	1,00

Tabla 78: Ponderación de control para los sensores de presencia.

Control	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	0	1	1	4	0,27
Solución B	0	-	0	0,5	0,5	2	0,13
Solución C	1	1	-	1	1	5	0,33
Solución D	0	0,5	0	-	0,5	2	0,13
Solución E	0	0,5	0	0,5	-	2	0,13
					Suma	15	1,00

Tabla 72: Ponderación de mantenimiento para los sensores de presencia.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	0	0	1	0,07
Solución B	1	-	0	1	1	4	0,27
Solución C	1	1	-	1	0	4	0,27
Solución D	1	0	0	-	0,5	2,5	0,17
Solución E	1	0	1	0,5	-	3,5	0,23
					Suma	15	1,00

Tabla 73: Ponderación de costo para los sensores de presencia.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	1	1	5	0,33
Solución B	0	-	1	1	1	4	0,27
Solución C	0	0	-	0,5	0,5	2	0,13
Solución D	0	0	0,5	-	0,5	2	0,13
Solución E	0	0	0,5	0,5	-	2	0,13
					Suma	15	1,00

Tabla 74: Conclusión en la selección de los sensores de presencia.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,09	0,02	0,08	0,01	0,07	0,27	1
Solución B	0,09	0,02	0,04	0,04	0,05	0,24	2
Solución C	0,06	0,01	0,10	0,04	0,03	0,24	3

Solución D	0,04	0,01	0,04	0,02	0,03	0,14	4
Solución E	0,02	0,00	0,04	0,03	0,03	0,12	5

Sensores de posición

Tabla 75: Ponderación de criterios de evaluación para los sensores de posición.

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	0,5	1	-	1	1	4,5	0,30
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	0	1	0	1	-	3	0,20
					Suma	15	1,00

- Solución A: Potenciómetro.
- Solución B: Encoder absoluto.
- Solución C: Encoder incremental.

Tabla 76: Ponderación de aplicación para los sensores de posición.

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	2	0,33
Solución B	1	-	1	3	0,50
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 77: Ponderación de manufactura para los sensores de posición.

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0	0,5	-	1,5	0,25
			Suma	6	1,00

Tabla 78: Ponderación de control para los sensores de posición.

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 79: Ponderación de mantenimiento para los sensores de posición.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0	0,5	-	1,5	0,25
			Suma	6	1,00

Tabla 80: Ponderación de costo para los sensores de posición.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	0	1	0,17
Solución C	0	1	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 81: Conclusión en la selección de los sensores de posición.

	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,10	0,03	0,15	0,07	0,10	0,45	1
Solución B	0,15	0,02	0,10	0,03	0,03	0,33	2
Solución C	0,05	0,02	0,05	0,03	0,07	0,22	3

Sensoramiento externo

Tabla 82: Ponderación de criterios de evaluación para el sensoramiento externo.

Criterio	Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aplicación	-	1	0,5	1	1	4,5	0,30
Manufactura	0	-	0	0	0	1	0,07
Control	0,5	1	-	1	1	4,5	0,30
Mantenimiento	0	1	0	-	0	2	0,13
Costo	0	1	0	1	-	3	0,20
					Suma	15	1,00

- Solución A: Sensores de presencia.
- Solución B: Sensores de temperatura.
- Solución C: Sensores de visión artificial.

Tabla 83: Ponderación de aplicación para el sensoramiento externo.

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	0,5	2,5	0,42
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 84: Ponderación de manufactura para el sensoramiento externo.

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 85: Ponderación de control para el sensoramiento externo.

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 86: Ponderación de mantenimiento para el sensoramiento externo.

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	0,5	1,5	0,25
Solución C	0	0,5	-	1,5	0,25
			Suma	6	1,00

Tabla 87: Ponderación de costo para el sensoramiento externo.

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0,50
Solución B	0	-	1	2	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 88: Conclusión en la selección del sensoramiento externo.

Aplicación	Manufactura	Control	Mantenimiento	Costo	Σ	Orden de selección
Solución A	0,13	0,03	0,15	0,07	0,48	1
Solución B	0,08	0,02	0,10	0,04	0,31	2
Solución C	0,10	0,01	0,05	0,02	0,22	3

3.5. Selección del concepto

La selección del concepto se aplica no sólo durante el desarrollo del concepto sino en todo el subsiguiente proceso de diseño y desarrollo. La selección del concepto es un proceso que facilita al diseñador la selección de un concepto ganador en cada módulo que se realizó en la evaluación de conceptos, ayuda a construir y crear un registro del proceso de toma de decisiones.

En la tabla 89 se muestra las alternativas seleccionadas. Estas soluciones serán implementadas en cada módulo.

Tabla 89: Alternativas seleccionadas

Módulos	Definición	Selección
Módulo 1	Estructura mecánica	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño mediano. - Material aluminio. - Articulación cintura: plato giratorio. - Articulación hombro: reducción de engranes. - Articulación codo prismático: cilindro eléctrico
Módulo 2	Potencia de accionamiento	Modelo dinámico de Newton
Módulo 3	Accionamiento y Controlabilidad	Motores de corriente continua (DC). Servomotores
Módulo 4	Modelos técnicos para el control	<ul style="list-style-type: none"> - Algoritmo de Denavit-Hartenberg. - Control PID
Módulo 5	Sensorial	Sensoramiento interno:

- Sensor presencia: final de carrera.
- Sensor posición y velocidad: encoder absoluto.

Sensoramiento externo:

- Sensor presencia.

Módulo 6

Software para control

Sistema Operativo
Robótico (*Robot Operating System, ROS*)

3.6. Desarrollo del concepto

3.6.1. Estructura mecánica

Tamaño de la estructura mecánica

En este módulo se definirá las dimensiones geométricas de la estructura mecánica del manipulador robótico con los parámetros seleccionados, considerando para esta alternativa un tamaño mediano en el cual su volumen de revolución de radio está incluido en el rango de 250 a 600 mm, como se puede observar en la figura 34.

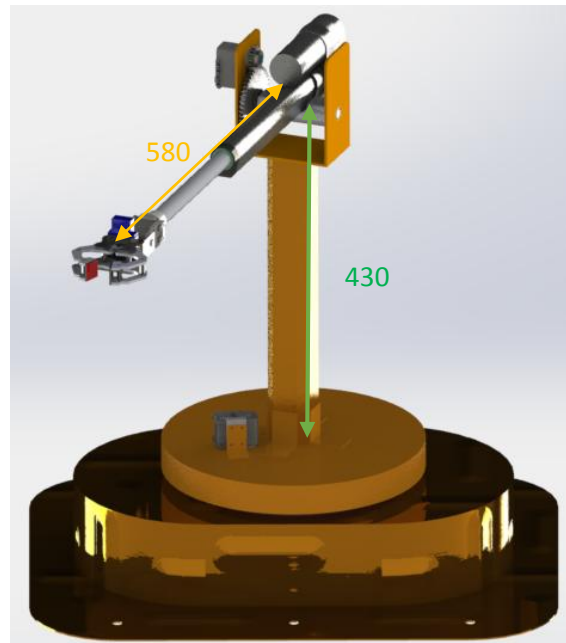


Figura 34: Estructura mecánica del robot esférico

Material de la estructura mecánica

Como segundo parámetro para el diseño de la estructura mecánica se escogió el material el aluminio ya que cumple con los requerimientos del diseño, el aluminio es un metal que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no féreos, de ahí su elevado uso en la industria, por ejemplo en la industria de la automoción su uso es cada vez mayor debido a su baja densidad y sus buenas propiedades mecánicas. Estudios independientes de mercado indican que, a finales de esta década, serán de aluminio hasta el 25 % de la carrocería y el 20 % del chasis de los coches. Las propiedades mecánicas se pueden medir también mediante ensayos como el de choque, fatiga o tracción, y cuyos resultados están también tabulados y normalizados. La densidad del aluminio ($2,70 \text{ g/cm}^3$) es realmente baja comparada con la del hierro ($7,90 \text{ g/cm}^3$), lo que hace que este metal sea relativamente ligero. Este metal también es muy dúctil y maleable, lo que hace que el mecanizado sea sencillo en comparación con otros metales. El aluminio también presenta buena resistencia a la corrosión gracias a la película de alúmina, que se forma en su superficie de forma espontánea y lo protege de la corrosión.

Articulación base del robot

En la selección del concepto se definió un mecanismo en la cual la estructura mecánica girará con respecto a un punto fijo en la base y será un plato giratorio como se muestra en la figura 35 y la tabla 90 detallan los componentes de la base.

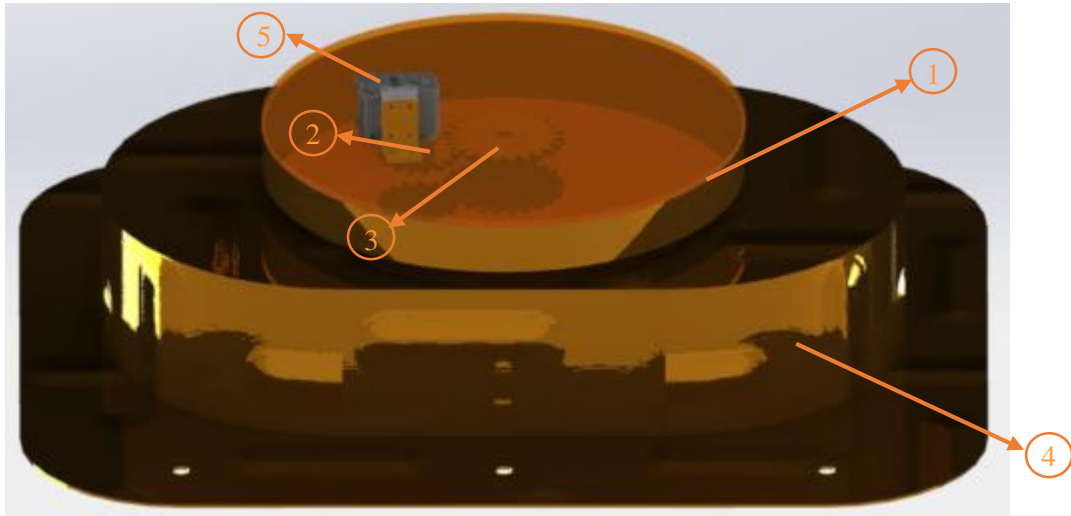


Figura 35: Base de la estructura mecánica del robot

Tabla 90: Componentes de la base

Número	Descripción del componente
1	Plato giratorio
2	Piñón móvil
3	Engrane fijo
4	Base
5	Actuador de la cintura

Relación de la velocidad de giro del piñón móvil con respecto al plato giratorio

Para encontrar la relación del movimiento relativo entre el piñón móvil y la base giratoria del robot se analizan sus velocidades relativas, por medio de la ecuación (3.1) [Dinámica de Bedford Fowler, 2009].

$$V_A = V_B + V_{A/B}, \text{ donde: } V_{A/B} = \omega_{AB} \times r_{A/B} \therefore V_A = V_B + \omega_{AB} \times r_{B/A} \quad (3.1)$$

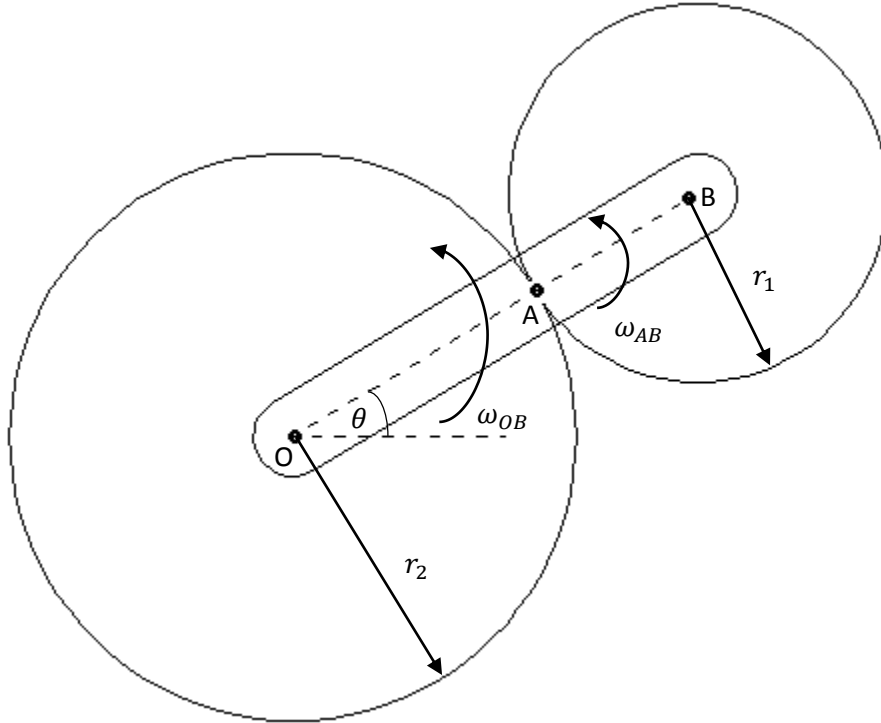


Figura 36: Mecanismo de la articulación base del robot esférico.

Sea el piñón que rueda sobre la superficie de un engrane con una velocidad angular ω_{AB} como se muestra en la figura 36. Rodar implica que la velocidad del piñón en su punto de contacto A con respecto a la superficie de contacto es cero; la velocidad en el punto O también es cero ya que es un punto fijo. En lo cual usando la ecuación (3.1) se obtiene:

$$V_B = V_O + \omega_{0B} \times r_{B/O} = V_A + \omega_{AB} \times r_{B/A}$$

$$\omega_{0B} \times r_{B/O} = \omega_{AB} \times r_{B/A}$$

$$\omega_{0B} \cdot \mathbf{k} \times [r_{B/O} \cdot \cos\theta \cdot \mathbf{i} + r_{B/O} \cdot \sin\theta \cdot \mathbf{j}] = \omega_{AB} \cdot \mathbf{k} \times [r_{B/A} \cdot \cos\theta \cdot \mathbf{i} + r_{B/A} \cdot \sin\theta \cdot \mathbf{j}]$$

$$\begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \omega_{0B} \\ r_{B/O} \cos\theta & r_{B/O} \sin\theta & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \omega_{AB} \\ r_{B/A} \cos\theta & r_{B/A} \sin\theta & 0 \end{vmatrix}$$

$$-\omega_{0B} \cdot r_{B/O} \cdot \sin\theta \cdot \mathbf{i} + \omega_{0B} \cdot r_{B/O} \cdot \cos\theta \cdot \mathbf{j} = -\omega_{AB} \cdot r_{B/A} \cdot \sin\theta \cdot \mathbf{i} + \omega_{AB} \cdot r_{B/A} \cdot \cos\theta \cdot \mathbf{j}$$

$$\omega_{0B} \cdot r_{B/O} = \omega_{AB} \cdot r_{B/A}$$

Donde:

$$\omega_{0B} = \omega_{cintura} \quad \omega_{AB} = \omega_{motor}$$

$$r_{B/O} = r_1 + r_2 \quad r_{B/A} = r_1$$

$$N = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{relación de engranes}$$

Por lo tanto:

$$\omega_{motor} = \omega_{cintura}(1 + N) \quad (3.2)$$

Cálculo de transmisiones para la cintura

Para el cálculo de las transmisiones se debe definir la velocidad máxima nominal V a la que se moverá el efector final del manipulador ya que por medio de este dato y el radio máximo de giro del brazo R se podría definir la velocidad angular ω de la articulación por medio de la siguiente ecuación [Física-Movimiento circular – Gustavo Belmonte, 2007]:

$$V = R \cdot \omega \quad (3.3)$$

Para la cintura se definirá una relación de engranes de $N = 1.5$ y también una velocidad nominal de $V = 1.6 \text{ m/s}$; en la figura 34 se puede observar que el radio máximo de giro es $R = 850 \text{ mm}$, por lo cual con la ecuación (3.3) la velocidad angular de la cintura será $\omega_{cintura} = 18 \text{ rpm}$; usando la ecuación (3.2) la velocidad angular del motor es $\omega_{motor} = 45 \text{ rpm}$.

Cuando se tiene la relación de transmisión N se calcula el número mínimo y máximo de dientes que deben tener los engranes para que no exista interferencia, con la ecuación (3.4) [Diseño de ingeniería mecánica de Shigley, 2008]:

$$N_p = \frac{2k}{(1 + 2N)(\sin \phi)^2} \left(N + \sqrt{N^2 + (1 + 2N)(\sin \phi)^2} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

N_p : Número mínimo de dientes

k : Dientes de profundidad por lo general $k = 1$

N : Relación de transmisión $N = Z_1/Z_0$

ϕ : Angulo de presión por lo general $\phi = 20^\circ$

Por lo tanto:

$$N_p = \frac{2(1)}{(1 + 2(1.5))(\sin 20^\circ)^2} \left(1.5 + \sqrt{(1.5)^2 + (1 + 2(1.5))(\sin 20^\circ)^2} \right)$$

$$N_p = 13.45$$

Con ello escogemos el número de dientes del piñón $Z_0 = 15$

Una vez obtenido Z_0 calculamos el número de dientes del engrane Z_1 por medio de la relación:

$$\frac{Z_1}{Z_0} = N$$

$$Z_1 = 22.5 \approx 23$$

Luego verificamos calculando el número máximo de dientes para que no exista interferencia, con la ecuación (3.5) [Diseño de ingeniería mecánica de Shigley, 2008]:

$$N_g = \frac{Z_0^2 \cdot (\sin \phi)^2 - 4 \cdot k}{4 \cdot k - 2 \cdot Z_0 \cdot (\sin \phi)^2} \quad (3.5)$$

Donde:

N_g : Número máximo de dientes

$$N_g = \frac{15^2 \cdot (\sin 20^\circ)^2 - 4 \cdot (1)}{4 \cdot (1) - 2 \cdot (15) \cdot (\sin 20^\circ)^2} = 45.49$$

Con lo cual comprobamos que Z_1 no excede el número máximo de dientes.

El diseñador debe demostrar validez de las siguientes relaciones útiles mostradas en la siguiente tabla 91 de un engrane [Diseño de ingeniería mecánica de Shigley, 2008]:

Tabla 91: Características de un engrane

Parámetros del engrane	Formula
Paso diametral, <i>dientes/pulg</i>	$P = \frac{Z}{d}$
Número de dientes	Z
Diámetro de paso, <i>mm</i>	d
Módulo, <i>mm</i>	$M = \frac{d}{Z}$
Altura del diente, <i>mm</i>	$h = 2.25 \cdot M$
Diámetro externo	$de = d + 2M$
Paso circular	$p = \frac{\pi d}{Z} = \pi M$

Por medio de la relación que existe entre el módulo del engrane y el número de dientes se calcula los diámetros de los engranes, para el diseño se seleccionó un módulo comercial de $M = 3$, en lo cual resultado: $de_0 = 5.1 \text{ cm}$, $de_1 = 7.5 \text{ cm}$ y $h = 6.75 \text{ mm}$

Articulación hombro del robot

En la selección del concepto se definió un mecanismo en la cual el hombro girará con respecto a un eje de giro fijo a través de una reducción de engranes como se muestra en la figura 37 y la tabla 92 detallan los componentes del hombro.

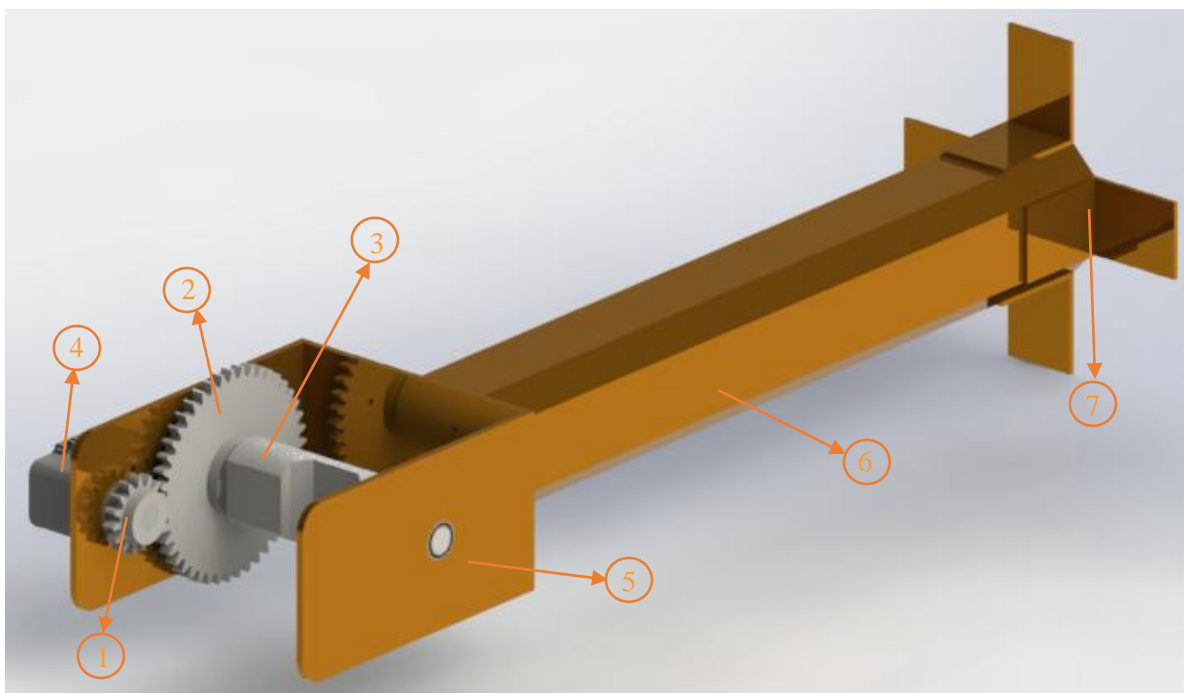


Figura 37: Columna y hombro de la estructura mecánica del robot esférico

Tabla 92: Componentes de la columna-hombro

Número	Descripción del componente
1	Piñón impulsor
2	Engrane impulsado
3	Flecha de giro del hombro
4	Actuador del hombro
5	Soporte del hombro
6	Columna
7	Soportes de la columna

Relación de velocidad angular entre el piñón impulsor y el engrane impulsado

En la articulación del hombro se diseñará una reducción de engranes en la que se analizará la relación de velocidad angular entre los engranes por medio la ecuación (3.6).

$$r_0 \cdot \omega_0 = r_s \cdot \omega_s \quad (3.6)$$

Donde:

$\omega =$ velocidad angular

$r =$ radio del engrane

Donde el piñón impulsor y el engrane impulsado tendrán una velocidad angular ω_0 y ω_s respectivamente como se muestra en la figura 38.

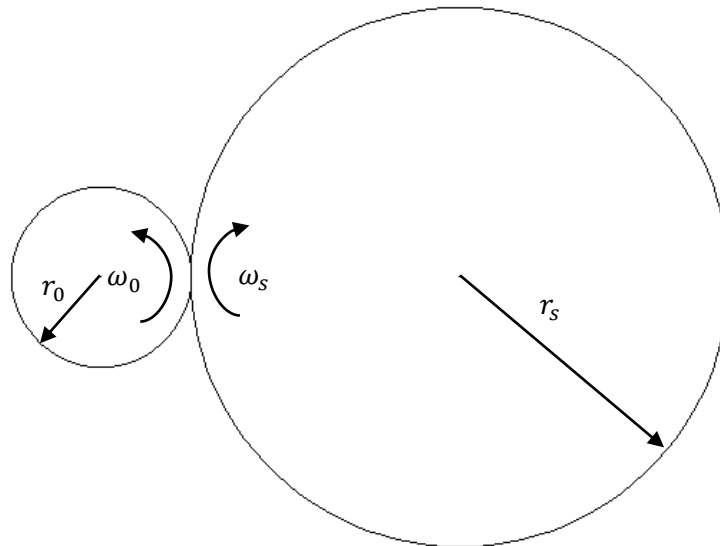


Figura 38: Mecanismo de la articulación del hombro del robot esférico.

Donde:

$$\omega_s = \omega_{hombro} \quad \omega_0 = \omega_{motor}$$

$$N = \frac{r_s}{r_0} \quad \text{relación de engranes}$$

Por lo tanto:

$$\omega_{motor} = N \cdot \omega_{hombro} \quad (3.7)$$

Para el hombro se definirá una relación de engranes de $N = 3$ y también una velocidad nominal de $V = 1.6 \text{ m/s}$; en la figura 34 se puede observar que el radio máximo de giro es $R = 850 \text{ mm}$, por lo cual con la ecuación (3.3) la velocidad angular de la hombro será $\omega_{\text{hombro}} = 18 \text{ rpm}$; usando la ecuación (3.7) la velocidad angular del motor es $\omega_{\text{motor}} = 54 \text{ rpm}$.

Para el cálculo de la interferencia de la transmisión usamos la ecuación (3.4) por lo tanto:

$$Np = \frac{2(1)}{(1 + 2(3))(\sin 20^\circ)^2} \left(3 + \sqrt{(3)^2 + (1 + 2(3))(\sin 20^\circ)^2} \right)$$

$$Np = 14.98$$

Con ello escogemos el número de dientes del piñón $Z_0 = 15$

Una vez obtenido Z_0 calculamos el número de dientes del engrane Z_1 por medio de la relación:

$$\frac{Z_1}{Z_0} = N$$

$$Z_1 = 45$$

Luego verificamos calculando el número máximo de dientes para que no exista interferencia, con la ecuación (3.5) por lo tanto:

$$N_g = \frac{15^2 \cdot (\sin 20^\circ)^2 - 4 \cdot (1)}{4 \cdot (1) - 2 \cdot (15) \cdot (\sin 20^\circ)^2} = 45.49$$

Con lo cual comprobamos que Z_1 no excede el número máximo de dientes.

Por medio de la relación que existe entre el módulo del engrane y el número de dientes se calcula los diámetros de los engranes, para el diseño se seleccionó un módulo comercial de $M = 1.75$, en lo cual resulto: $de_0 = 2.975 \text{ cm}$, $de_1 = 8.225 \text{ cm}$ y $h = 3.9375 \text{ mm}$

Articulación codo prismático del robot

En la selección del concepto se definió un cilindro eléctrico el cual producirá un movimiento lineal como se muestra en la figura 39.



Figura 39: Codo prismático de la estructura mecánica del robot esférico

Fuente: [Trossen robotics, 2015]

El actuador lineal LACT8P de *Creative Werks* que se muestra en la figura 39. Son fiables para realizar movimientos lineales precisos, construidos por la empresa *Trossen robotics*, son robustos y también son fáciles de montar. Para el control de estos actuadores se puede usar un *Arduino*, se recomienda revisar los tutoriales *Arduino* del actuador lineal.

Características del actuador lineal

- Built-in es un potenciómetro para la detección de posición
- Caja metálica sellada es resistente al agua y sellado contra el polvo
- Motor de imán permanente
- Interruptores de límite en ambos extremos para proteger contra el daño

El actuador lineal cuenta con las especificaciones mostradas en la tabla 93.

Tabla 93: Especificaciones – actuador lineal LACT8P

Especificación	Magnitud
Tensión De Funcionamiento	12V
Capacidad estática	550 lb. Máx.
Capacidad de carga	110 lb. Máx.
Velocidad con carga máx.	0,5 in/s
Peso del actuador lineal	1,6 kg
Longitud de carrera	8 in
Longitud cuando está retraído	13,49 in
Longitud cuando está extendido	21,49 in

Posición/Feedback	Sí
Lista de controladores	<i>Arduino</i>

Fuente: [*Trossen robotics*, 2015]

3.6.2. Potencia de accionamiento

En este módulo se debe evaluar los torques necesarios que se requiere en cada articulación para generar los movimientos del manipulador, por lo tanto por medio de la evaluación de conceptos se escogió la teoría más conveniente que fue el modelo dinámico de Newton y obtener el correcto dimensionamiento de los actuadores.

Dado que el manipulador de morfología esférica tiene 4 GDL, las cuales son dos rotacionales y una prismática, se procederá a calcular la potencia necesaria de cada articulación. Para ello se necesitan tener bien definido los parámetros de la estructura mecánica tales como las dimensiones geométricas y tipo de material de la estructura lo cual se realizó en la selección del concepto en el módulo 1. Por lo tanto procedemos a realizar los cálculos:

Cálculo de potencia del actuador de la articulación base del robot

En esta articulación se cumple que un cuerpo gira con respecto a un punto O (la base) con una velocidad angular ω , ya que en el módulo 1, se definió el tipo de material y las dimensiones de la estructura mecánica se proceden a calcular la inercia del manipulador robótico con respecto a un sistema de coordenadas como se muestra en la figura 41.

Con ayuda de herramientas CAD se realiza el cálculo de los momentos y productos inercias de cada uno de los elementos solidos del manipulador robótico por lo tanto queda de la siguiente forma:

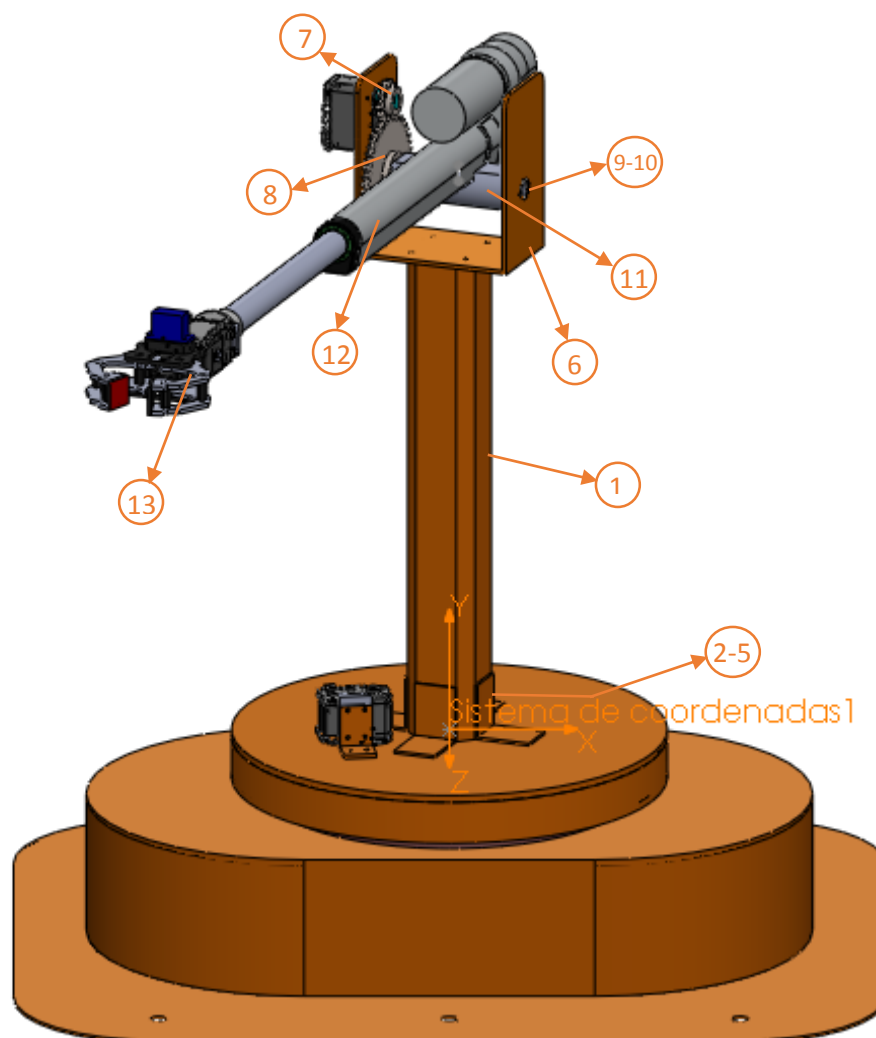


Figura 40: Sistema de coordenadas en la articulación base

Tabla 94: Sólidos que producen inercia con respecto al sistema de coordenadas 1.

N°	Sólidos
1	Columna del robot
2,3,4,5	Soportes de la columna robot
6	Soporte del hombro
7	piñón impulsor hombro
8	engrane impulsado hombro

9,10	rodamientos en el eje del hombro
11	Eje soporte del cilindro eléctrico
12	Cilindro eléctrico
13	Gripper

Sólido 1

Sistema de coordenadas 1 - Columna del robot

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0027 \text{ kg/cm}^3$

Masa $0,1695 \text{ kg}$

Volumen $9,6000 \text{ cm}^3$

Área de superficie $1257,0844 \text{ cm}^2$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$I_{xx} = 74,45 \quad I_{xy} = 0,00 \quad I_{xz} = 0,00$$

$$I_{yx} = 0,00 \quad I_{yy} = 1,18 \quad I_{yz} = 0,00$$

$$I_{zx} = 0,00 \quad I_{zy} = 0,00 \quad I_{zz} = 74,46$$

Sólidos 2,3,4,5

Sistema de coordenadas - Soportes de la columna robot

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0027 \text{ kg/cm}^3$

Masa $0,0260 \text{ kg}$

Volumen	9,6000 cm^3	
Área de superficie	80,3884 cm^2	
Momentos de inercia ($kg \cdot cm^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:		
$I_{xx} = 0,2712$	$I_{xy} = 0,00$	$I_{xz} = 0,00$
$I_{yx} = 0,00$	$I_{yy} = 0,404$	$I_{yz} = 0,00$
$I_{zx} = 0,00$	$I_{zy} = 0,00$	$I_{zz} = 0,2712$

Sólido 6

Sistema de coordenadas - Soporte del hombro

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0027 \text{ kg/cm}^3$

Masa	0,2435 kg	
Volumen	90,2014 cm^3	
Área de superficie	636,3801 cm^2	
Momentos de inercia ($kg \cdot cm^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:		
$I_{xx} = 382,4064$	$I_{xy} = 0,0000$	$I_{xz} = 0,00$
$I_{yx} = 0,00$	$I_{yy} = 7,3679$	$I_{yz} = 1,4527$
$I_{zx} = 0,00$	$I_{zy} = 1,4527$	$I_{zz} = 378,4399$

Sólido 7
Sistema de coordenadas: piñón impulsor hombro

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0012 \text{ kg/cm}^3$

Masa	$0,0034 \text{ kg}$
Volumen	$2,9133 \text{ cm}^3$
Área de superficie	$21,0282 \text{ cm}^2$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$\begin{array}{lll}
 I_{xx} = 6,9860 & I_{xy} = -0,0038 & I_{xz} = -0,0004 \\
 I_{yx} = -0,0038 & I_{yy} = 0,0806 & I_{yz} = 0,7377 \\
 I_{zx} = -0,0004 & I_{zy} = 0,7377 & I_{zz} = 6,9088
 \end{array}$$

Sólido 8
Sistema de coordenadas - engrane impulsado hombro

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0012 \text{ kg/cm}^3$

Masa	$0,0310 \text{ kg}$
Volumen	$26,9780 \text{ cm}^3$
Área de superficie	$135,9501 \text{ cm}^2$

Momentos de inercia ($kg \cdot cm^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$\begin{array}{lll}
 I_{xx} = 50,0126 & I_{xy} = 0,0000 & I_{xz} = 0,0000 \\
 I_{yx} = 0,0000 & I_{yy} = 0,8683 & I_{yz} = 5,9887 \\
 I_{zx} = 0,0000 & I_{zy} = 5,9887 & I_{zz} = 49,4201
 \end{array}$$

Sólidos 9,10

Sistema de coordenadas - rodamientos en el eje del hombro

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0027 \text{ kg/cm}^3$

Masa	0,0016 kg
Volumen	0,5760 cm^3
Área de superficie	18,9090 cm^2

Momentos de inercia ($kg \cdot cm^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$\begin{array}{lll}
 I_{xx} = 2,5092 & I_{xy} = 0,0000 & I_{xz} = 0,0000 \\
 I_{yx} = 0,0000 & I_{yy} = 0,0452 & I_{yz} = 0,0000 \\
 I_{zx} = 0,0000 & I_{zy} = 0,0000 & I_{zz} = 2,4644
 \end{array}$$

Sólido 11
Sistema de coordenadas: Soporte de eslabón 2

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0012 \text{ kg/cm}^3$

Masa $0,0621 \text{ kg}$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$I_{xx} = 93,1324 \quad I_{xy} = 0,0133 \quad I_{xz} = -0,0001$$

$$I_{yx} = 0,0133 \quad I_{yy} = 0,5388 \quad I_{yz} = -0,5468$$

$$I_{zx} = -0,0001 \quad I_{zy} = -0,5468 \quad I_{zz} = 92,6673$$

Sólido 12
Sistema de coordenadas: Cilindro eléctrico

El centro de masa y los momentos de inercia son los

Masa $1,6 \text{ kg}$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$I_{xx} = 3312,19 \quad I_{xy} = -93,01 \quad I_{xz} = -109,79$$

$$I_{yx} = -93,01 \quad I_{yy} = 334,07 \quad I_{yz} = 349,91$$

$$I_{zx} = -109,79 \quad I_{zy} = 349,91 \quad I_{zz} = 3065,63$$

Sólido 13
Sistema de coordenadas: Gripper

Masa $0,2500 \text{ kg}$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$I_{xx} = 1120,42 \quad I_{xy} = -213,57 \quad I_{xz} = -253,63$$

$$I_{yx} = -213,57 \quad I_{yy} = 754,40 \quad I_{yz} = 550,98$$

$$I_{zx} = -253,63 \quad I_{zy} = 550,98 \quad I_{zz} = 564,42$$

Una vez definidas las inercias con respecto al punto O (sistemas de coordenadas 1) se procede a encontrar los momentos de inercia totales:

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^{13} I_{xx_i} = 5.032 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{yy} = \sum_{i=1}^{13} I_{yy_i} = 1.099 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{zz} = \sum_{i=1}^{13} I_{zz_i} = 4.235 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^{13} I_{xy_i} = 4.958 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{yz} = \sum_{i=1}^{13} I_{yz_i} = 908.522 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{zx} = \sum_{i=1}^{13} I_{zx_i} = -363.421 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{yx} = I_{xy} = 4.958 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{zy} = I_{yz} = 908.522 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{xz} = I_{zx} = -363.421 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

La velocidad angular únicamente será con respecto al *eje y* y será constante, en lo cual se definió $\omega_y = 18 \text{ rpm}$ y $\alpha_y = 0$ en los cálculos de transmisión de la cintura, por lo tanto las velocidades y aceleraciones angulares en los ejes restantes serán cero: $\omega_x = 0$, $\omega_z = 0$ y $\alpha_x = 0$, $\alpha_z = 0$ respectivamente. Después se procede a aplicar las ecuaciones (2.11) y (2.12) de movimiento, usando la segunda ley de Newton y las ecuaciones de movimiento angular para calcular el torque necesario para girar la cintura con respecto al punto O.

$$\begin{bmatrix} \Sigma M_{ox} \\ \Sigma M_{oy} \\ \Sigma M_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_x}{\partial t} \\ \frac{\partial \omega_y}{\partial t} \\ \frac{\partial \omega_z}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma M_{ox} \\ \Sigma M_{oy} \\ \Sigma M_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.228 \times 10^3 \text{ kg. cm}^2/\text{s}^2 \\ 0 \text{ kg. cm}^2/\text{s}^2 \\ 1.762 \times 10^4 \text{ kg. cm}^2/\text{s}^2 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto el torque con respecto a un punto fijo O se define:

$$\tau = \sqrt{\Sigma M_{ox}^2 + \Sigma M_{oy}^2 + \Sigma M_{oz}^2}$$

$$\tau = 1.791 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \cdot \text{cm} \cdot \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \cdot \frac{1\text{kgf}}{9.80\text{N}}$$

$$\tau = \tau_{cintura} = 18.275 \text{ kgf. cm}$$

Una vez obtenido el torque con respecto a O se procede a calcular el torque del motor con la relación de movimiento que existe entre el giro de la cintura y el actuador, cabe recalcar que la relación de engranes es $N = 1.5$. Por lo tanto:

$$\tau_{motor} = \frac{\tau_{cintura}}{(1 + N)}$$

$$\tau_{motor} = 7.31 \text{ kgf. cm}$$

Cálculo de potencia del actuador de la articulación hombro del robot

En esta articulación se cumple que un cuerpo gira con respecto a un eje fijo O (el hombro) con una velocidad angular ω , ya que en el módulo 1, se definió el tipo de material

y las dimensiones de la estructura mecánica se proceden a calcular la inercia del manipulador robótico con respecto a un sistema de referencia como se muestra en la figura 42.

Con ayuda de herramientas CAD se realiza el cálculo de los momentos y productos inercias de cada uno de los elementos sólidos del manipulador robótico por lo tanto queda de la siguiente forma:

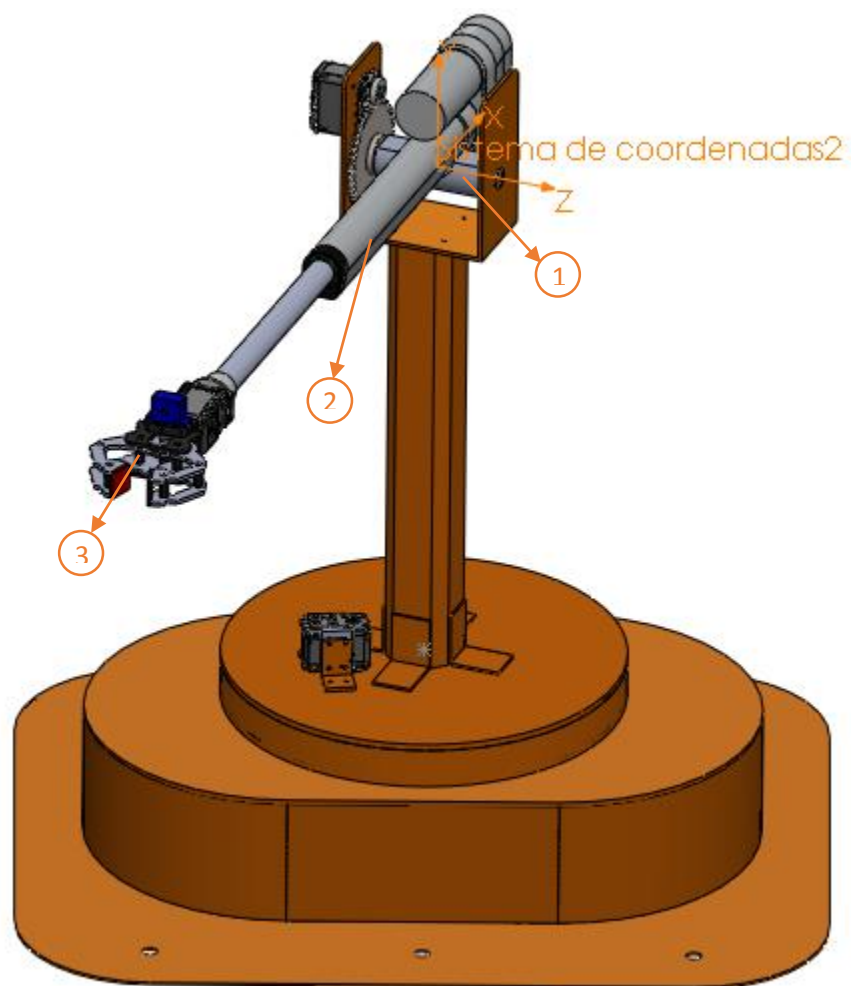


Figura 41: Sistema de coordenadas en la articulación del hombro

Tabla 95: Sólidos que producen inercia con respecto al sistema de coordenadas 2.

N°	Sólidos
1	Eje soporte del cilindro eléctrico

2	Cilindro eléctrico
3	Gripper

Sólido 1

Sistema de coordenadas: Soporte de eslabón 2

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema. $Densidad = 0,0012 \text{ kg/cm}^3$

Masa	0,0621 kg
Volumen	53,9678 cm ³
Área de superficie	100,2905 cm ²
Centro de masa (cm)	$x = 0,0054$
	$y = 38,6289$
	$z = -0,2286$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$\begin{array}{lll}
 I_{xx} = 0,5271 & I_{xy} = 0,0002 & I_{xz} = -0,0001 \\
 I_{yx} = 0,0002 & I_{yy} = 0,5388 & I_{yz} = -0,0050 \\
 I_{zx} = -0,0001 & I_{zy} = -0,0050 & I_{zz} = 0,0619
 \end{array}$$

Sólido 2
Sistema de coordenadas: Cilindro eléctrico

El centro de masa y los momentos de inercia son los

Masa $1,6 \text{ kg}$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$I_{xx} = 23,83 \quad I_{xy} = -12,89 \quad I_{xz} = 0,00$$

$$I_{yx} = -12,89 \quad I_{yy} = 333,45 \quad I_{yz} = 0,00$$

$$I_{zx} = 0,00 \quad I_{zy} = 0,00 \quad I_{zz} = 354,44$$

Sólido 3
Sistema de coordenadas: Gripper

El centro de masa y los momentos de inercia son los

Masa $0,25 \text{ kg}$

Momentos de inercia ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$) Medido desde el sistema de coordenadas de salida:

$$I_{xx} = 3,39 \quad I_{xy} = -39,09 \quad I_{xz} = 0,81$$

$$I_{yx} = -39,09 \quad I_{yy} = 754,32 \quad I_{yz} = -0,04$$

$$I_{zx} = 0,81 \quad I_{zy} = -0,04 \quad I_{zz} = 755,95$$

Una vez definidas las inercias con respecto sistemas de coordenadas 2 se procede a encontrar los momentos de inercia totales:

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^3 I_{xx_i} = 27.747 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{yy} = \sum_{i=1}^3 I_{yy_i} = 1.088 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{zz} = \sum_{i=1}^3 I_{zz_i} = 1.11 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^3 I_{xy_i} = 27.22 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{yz} = \sum_{i=1}^3 I_{yz_i} = -0.035 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{zx} = \sum_{i=1}^3 I_{zx_i} = 0.81 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{yx} = I_{xy} = 27.22 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{zy} = I_{yz} = -0.035 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$I_{xz} = I_{zx} = 0.81 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Después con la ecuación (2.16) se procede a encontrar el momento de inercia respecto a un eje arbitrario que pase por el origen y paralelo a un vector unitario \mathbf{e} está dado por:

$$I_o = I_{xx} \cdot e_x^2 + I_{yy} \cdot e_y^2 + I_{zz} \cdot e_z^2 - 2 \cdot I_{xy} \cdot e_x \cdot e_y \\ - 2 \cdot I_{yz} \cdot e_y \cdot e_z - 2 \cdot I_{zx} \cdot e_z \cdot e_x$$

Donde el vector unitario $\mathbf{e} = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 1\mathbf{k}$ ya que es paralelo al eje z, por lo cual $e_x = 0$; $e_y = 0$; $e_z = 1$ entonces:

$$I_o = I_{zz} = 1.11 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

La velocidad angular únicamente será con respecto al *eje z*, en lo cual se definió $\omega_z = 18 \text{ rpm}$ en los cálculos de transmisión del hombro, dicha velocidad angular alcanzará en un intervalo de tiempo $\Delta t = 0.35 \text{ s}$, por lo cual la aceleración angular será: $\alpha_z = \frac{\Delta\omega_z}{\Delta t} = 5.386 \text{ rad/s}^2$. Las velocidades y aceleraciones angulares en los ejes restantes serán cero: $\omega_x = 0$, $\omega_y = 0$ y $\alpha_x = 0$, $\alpha_y = 0$ respectivamente. Después se procede a aplicar la ecuación

(2.17) de movimiento, usando la segunda ley de Newton para calcular el torque necesario para girar el hombro con respecto al eje de giro fijo z.

$$\tau = I_o \cdot \alpha_o + M \cdot g \cdot \iota$$

Donde:

I_o = Momento de inercia con respecto a un eje de giro fijo

α_o = aceleración angular con respecto a un eje de giro fijo

M = Masa total del hombro

g = gravedad de la tierra 9.81 m/s^2

ι = distancia del centro de masa con el eje de giro

Con ayuda de la herramienta CAD podremos definir los valores de M y ι

Por lo tanto:

$$M = 1.90 \text{ kg}$$

$$\iota = 12.98 \text{ cm}$$

$$\tau = \left(1.11 \cdot 10^3 \cdot 5.386 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} + 1.90 \cdot 9.81 \cdot 12.98 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{cm} \right) \cdot \frac{1\text{kgf}}{9.8\text{N}}$$

$$\tau = \tau_{\text{hombro}} = 30.79 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Una vez obtenido el torque con respecto al eje de giro fijo se procede a calcular el torque del motor con la relación de movimiento que existe entre el giro del hombro y el actuador, cabe recalcar que la relación de engranes es $N = 3$. Por lo tanto:

$$\tau_{\text{motor}} = \frac{\tau_{\text{hombro}}}{N}$$

$$\tau_{\text{motor}} = 10.263 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

3.6.3. Accionamiento y Controlabilidad

En este módulo se escogió como tipo de actuador un servomotor de corriente continua (DC) como la alternativa más conveniente en la selección del concepto. Por lo tanto se investigó un servomotor con las características de potencia y controlabilidad que cumplan

con los requerimientos del diseño. Para la selección del motor nos enfocamos en la familia de servomotores Dynamixel como se muestra en la figura 45.

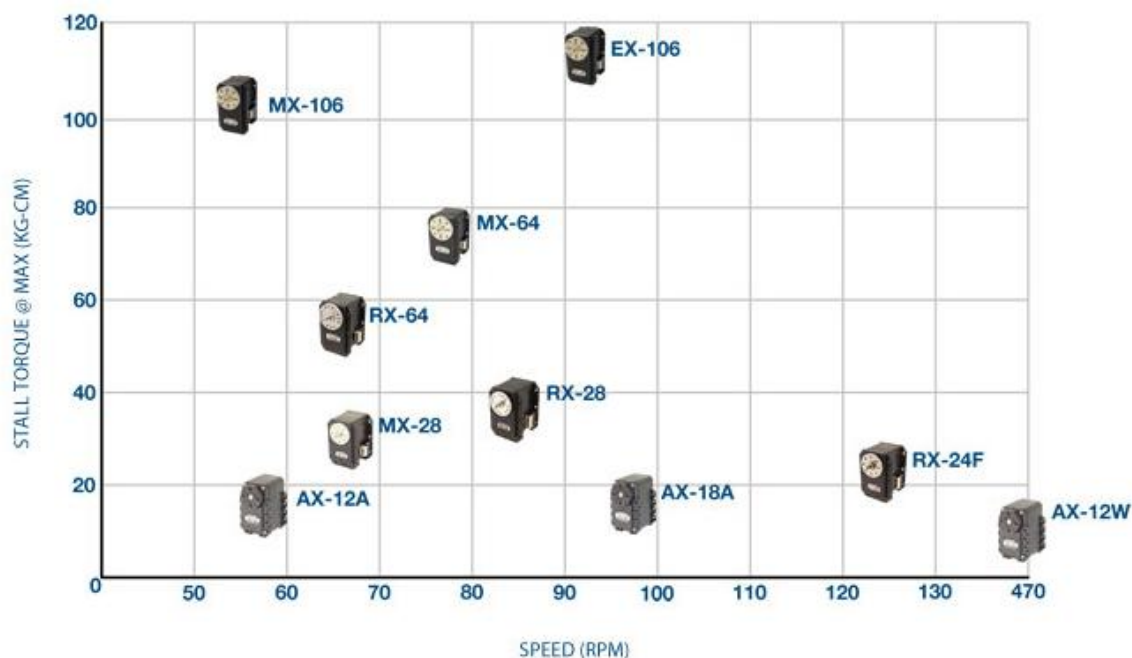


Figura 42: Fuerza y velocidad grafico de la familia Dynamixel

Fuente: [Trossen robotics, 2015]

Dicho servomotor será un *Dynamixel AX-12A Robot Actuator* que se muestra en la figura 46. Es el actuador que se ha convertido en el estándar para la próxima generación de la robótica. El robot servo AX-12A tiene la capacidad de realizar un seguimiento de su velocidad, la temperatura, la posición del eje, el voltaje, y la carga. Como si esto fuera poco, el algoritmo de control utilizado para mantener la posición del eje del actuador AX-12A se puede ajustar individualmente para cada servo, que le permite controlar la velocidad y la fuerza de la respuesta del motor. Todo el control de la gestión del sensor y la posición es manejado por una función de microcontrolador del servo. Este enfoque distribuido sale de un controlador principal libre para realizar otras funciones [Trossen robotics, 2015].



Figura 43: Dynamixel AX-12A Robot actuador

Fuente: [Trossen robotics, 2015]

El servomotor cuenta con las especificaciones mostradas en la tabla 96.

Tabla 96: Especificaciones – Dynamixel AX-12A Robot actuador

Especificación	Magnitud
Tensión De Funcionamiento	12V
Puesto Torque	15,3 kg · cm 212 oz · in
Sin carga Velocidad	59 rpm 0.169sec / 60 °
Peso	55g
Tamaño	32 x 50 x 40 mm
Resolución	0.29 °
Relación de Reducción	1/254
Ángulo de funcionamiento	300 ° o giro continua
Tensión De Funcionamiento	9 – 12V (Recomendado Voltaje 11.1V)
Max actual	900 mA
Corriente espera	50 mA
Temperatura de funcionamiento	-5 ° C ~ 85 ° C
Protocolo	TTL Half Duplex asíncrono de serie
Límite Módulo	254 direcciones válidas

Velocidad de comunicación	7343bps ~ 1 Mbps
Posición/Feedback	Sí
Temperatura/Feedback	Sí
Cargar Voltaje/Feedback	Sí
Voltaje de entrada/Feedback	Sí
Control PID	Sí
Material	Engranajes de plástico y cuerpo
Lista de controladores	3-Pin TTL Dynamixel controladores compatibles:
	<ul style="list-style-type: none"> • Arbotix-m robocontroller • Robotis cm-530 • Robotis usb2dynamixel • Robotis cm-700

Fuente: [Trossen robotics, 2015]

Cabe recalcar que para el funcionamiento del servomotor Dynamixel AX-12A necesita de un controlador como se puede observar en las especificaciones, por ende se vio la necesidad de seleccionar uno de ellos, el cual fue *Robotis USB2dynamixel* como se muestra en la figura 47. El cual tiene menor costo con respecto a los demás controladores.



Figura 44. Adaptador USB2Dynamixel Robotis

Fuente: [Trossen robotics, 2015]

El adaptador *Robotis USB2Dynamixel* puede hacer un control de red tipo bus por medio del puerto USB de la PC como se muestra en la figura 48, y tiene tres opciones de salida:

- RS232-nivel TTL: conector de 3 pines; se utiliza con dynamixel series AX y MX-T.
- RS485: conector de 4 pines; se utiliza con dynamixel series RX, EX y MX-R.
- RS232 DB9: puerto serie RS232 de 9 pines; se utiliza con dynamixel series CM-5 o el CM-510.

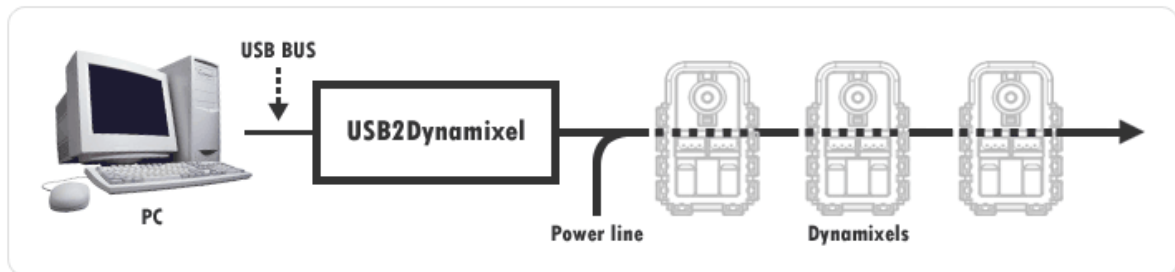


Figura 45: Control de red tipo bus del adaptador *USB2Dynamixel Robotis*

Fuente: [Trossen robotics, 2015]

El adaptador *Robotis USB2Dynamixel* puede ser controlado utilizando el *Dynamixel SDK*. El adaptador no encenderá los servos *Dynamixel*, por lo tanto se debe tener una fuente de alimentación adecuada para arrancar los actuadores.

3.6.4. Modelos técnicos para el control

Cinemática del Robot

En este módulo se aplicará el método de cinemática directa, por lo cual se procederá a encontrar la matriz homogénea por medio del algoritmo de Denavit Hartenberg, por lo tanto:

Matriz Homogénea

Robot configuración esférica (RRP)

La configuración esférica presenta dos articulaciones rotacionales y una articulación prismática o lineal, cuya principal aplicación es la manipulación de objetos sobre el piso.

Para encontrar la matriz homogénea se aplica el algoritmo de Denavit-Hartenberg

Pasos D-H

D-H 1: Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.

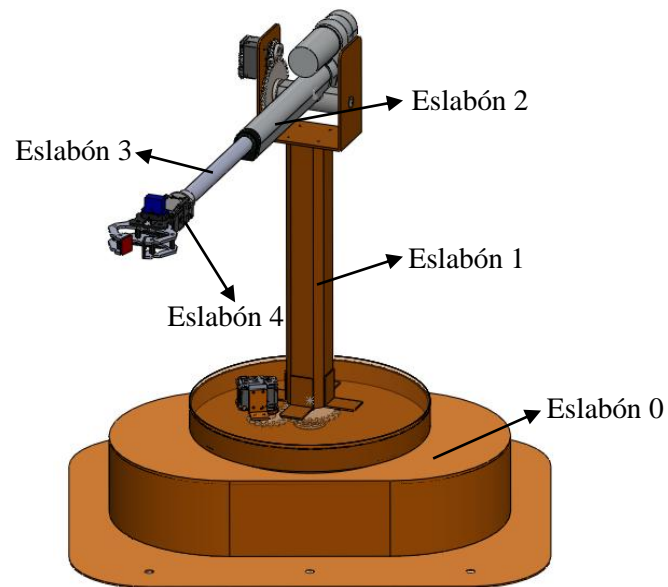


Figura 46. Numeración de eslabones, D.H.

D-H 2: Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.

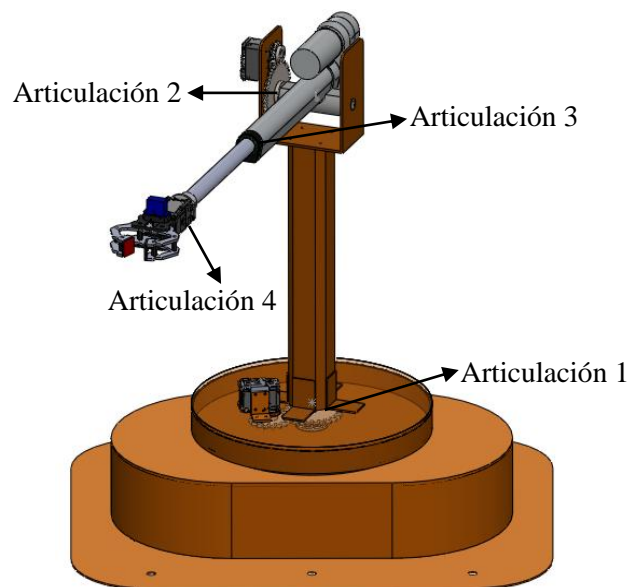


Figura 47. Numeración de articulaciones, D.H.

D-H 3: Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

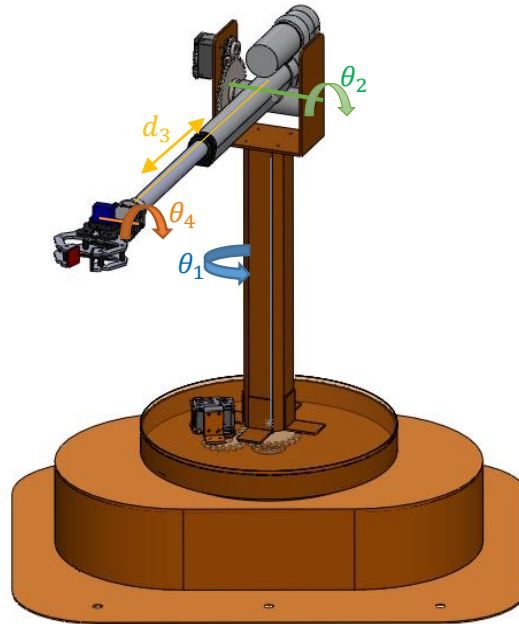


Figura 48. Localización de ejes en articulaciones, D.H.

D-H 4: Para i de 0 a $n-1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.

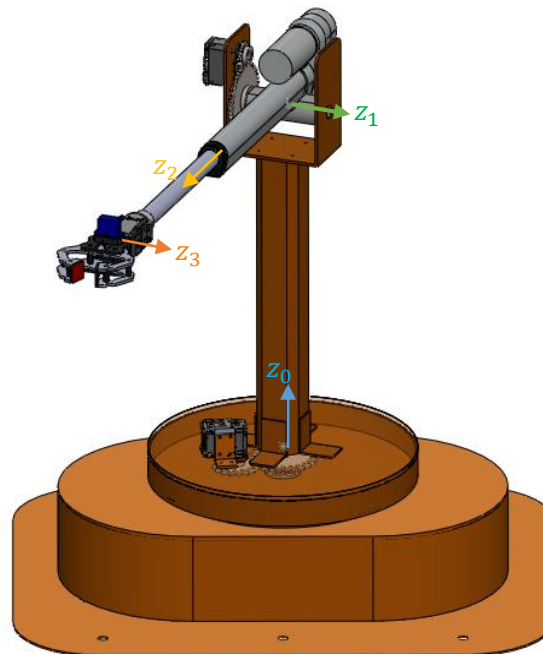


Figura 49. Localización del eje z_i en articulaciones, D.H.

D-H 5: Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

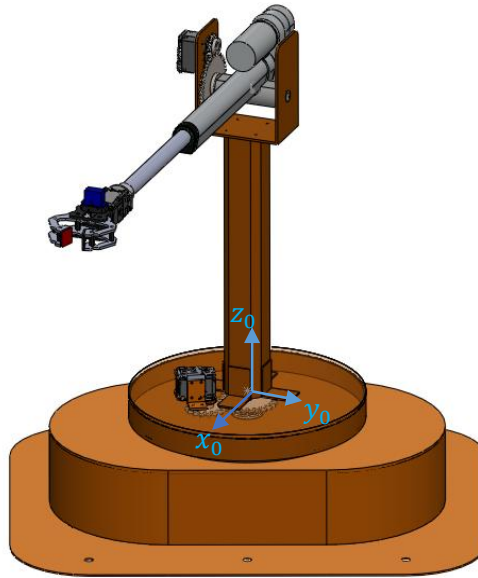


Figura 50. Localización del origen del sistema, D.H.

D-H 6: Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i+1$.

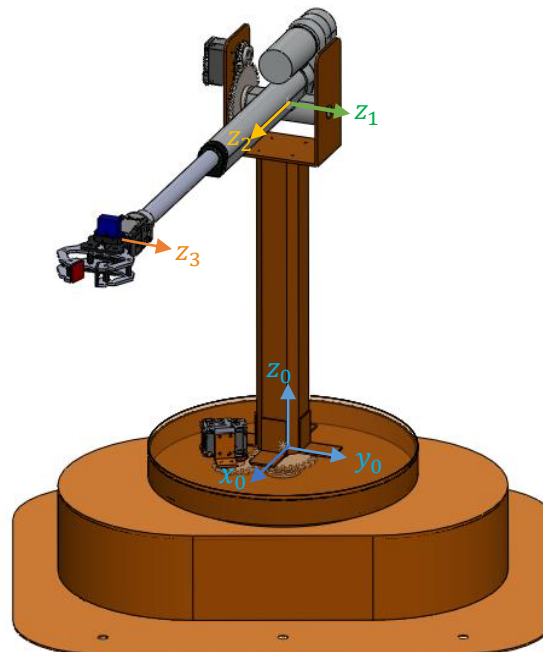


Figura 51. Posicionamiento del Z_i , D.H.

D-H 7: Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

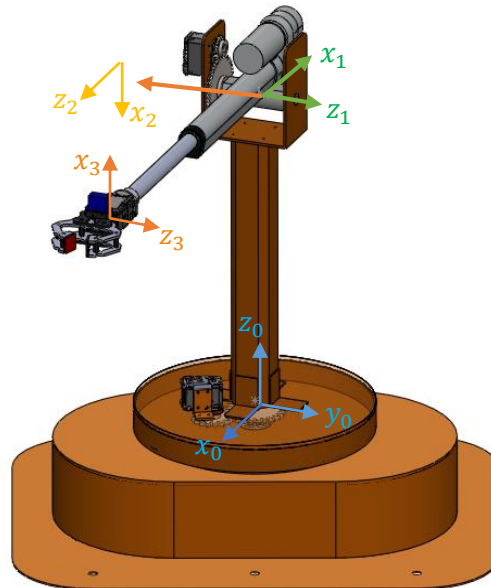


Figura 52. Posicionamiento del x_i , D.H.

D-H 8: Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i
 Para entender un poco más acerca de esta regla, primero debemos de proceder a definir lo que es un sistema dextrógiro y también un sistema levógiro.
 Dextrógiro: Giro hacia la derecha, en el mismo sentido que las agujas del reloj
 Levógiro: Giro hacia la izquierda, en sentido contrario a las manecillas del reloj.

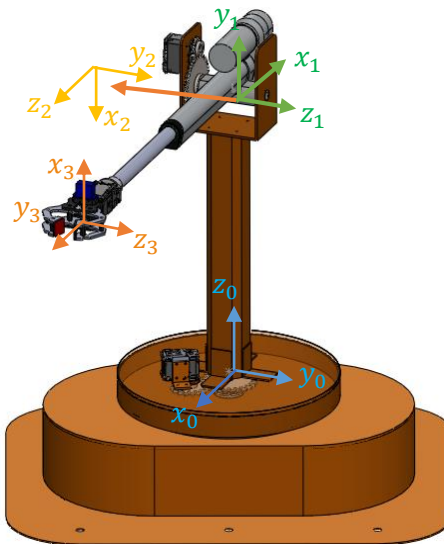


Figura 53. Posicionamiento del y_i , D.H.

D-H 9: Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que Z_0 coincida con la dirección de Z_{n-1} y x_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n

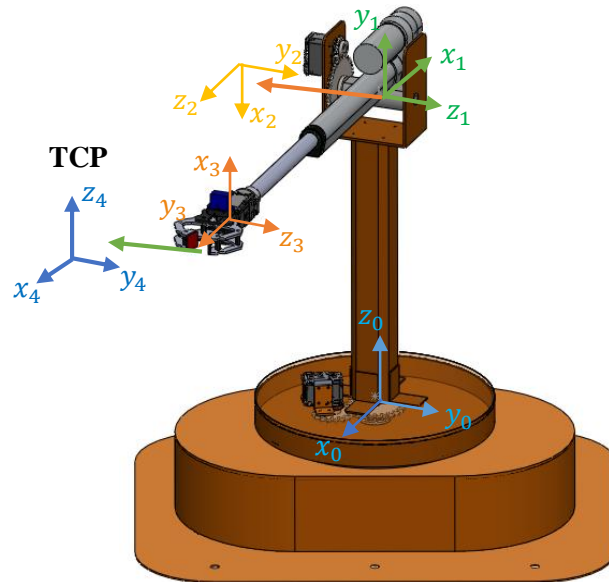


Figura 54. Posicionamiento del sistema S_n , D.H.

La tabla x presenta los parámetros de la convención Denavit-Hartenberg para el robot en la configuración esférica, para llenar la tabla se deben seguir los pasos DH 10, 11, 12 y 13 definidos en capítulo 2.

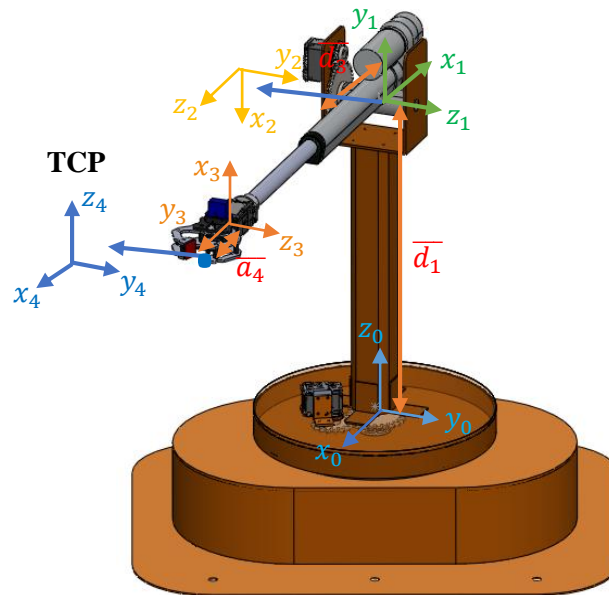


Figura 55: Parámetros geométricos del robot

Tabla 97: D-H del robot esférico

Eslabón i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_1 + 180^\circ$	$\overline{d_1}$	0	90°
2	$\theta_2 - 90^\circ$	0	0	90°
3	180°	$d_3 + \overline{d_3}$	0	90°
4	$\theta_4 + 90^\circ$	0	$\overline{a_4}$	90°

$$\overline{d_1} = 43 \text{ cm}$$

$$\overline{d_3} = 28 \text{ cm}$$

$$\overline{a_4} = 10,5 \text{ cm}$$

Las matrices de transformación homogénea para el robot en la configuración esférica tienen la siguiente estructura:

$${}^1A_0 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1) & 0 & -\text{sen}(\theta_1) & 0 \\ -\text{sen}(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \overline{d_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_1 = \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ -\cos(\theta_2) & 0 & -\text{sen}(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 + \overline{d_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_3 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\theta_4) & 0 & \cos(\theta_4) & -\overline{a_4}\text{sen}(\theta_4) \\ \cos(\theta_4) & 0 & \text{sen}(\theta_4) & \overline{a_4}\cos(\theta_4) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = {}^4A_0$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_4) & -\text{sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1)\text{sen}(\theta_2 + \theta_4) & \cos(\theta_1)[(d_3 + \overline{d_3})\cos(\theta_2) + \overline{a_4}\cos(\theta_2 + \theta_4)] \\ \text{sen}(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_4) & \cos(\theta_1) & \text{sen}(\theta_1)\text{sen}(\theta_2 + \theta_4) & \text{sen}(\theta_1)[(d_3 + \overline{d_3})\cos(\theta_2) + \overline{a_4}\cos(\theta_2 + \theta_4)] \\ -\text{sen}(\theta_2 + \theta_4) & 0 & \cos(\theta_2 + \theta_4) & \overline{d_1} - (d_3 + \overline{d_3})\text{sen}(\theta_2) - \overline{a_4}\text{sen}(\theta_2 + \theta_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3.8)

Por lo tanto la cinemática directa de un robot manipulador en la configuración esférica está dada por la siguiente expresión matemática:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) [(d_3 + \bar{d}_3) \cos(\theta_2) + \bar{a}_4 \cos(\theta_2 + \theta_4)] \\ \sin(\theta_1) [(d_3 + \bar{d}_3) \cos(\theta_2) + \bar{a}_4 \cos(\theta_2 + \theta_4)] \\ \bar{d}_1 - (d_3 + \bar{d}_3) \sin(\theta_2) - \bar{a}_4 \sin(\theta_2 + \theta_4) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Cinemática inversa

Para resolver el problema de cinemática inversa se lo planteará por medio de relaciones geométricas y se encontrarán sus ángulos a partir de las coordenadas cartesianas del TCP como se muestra en la figura 56.

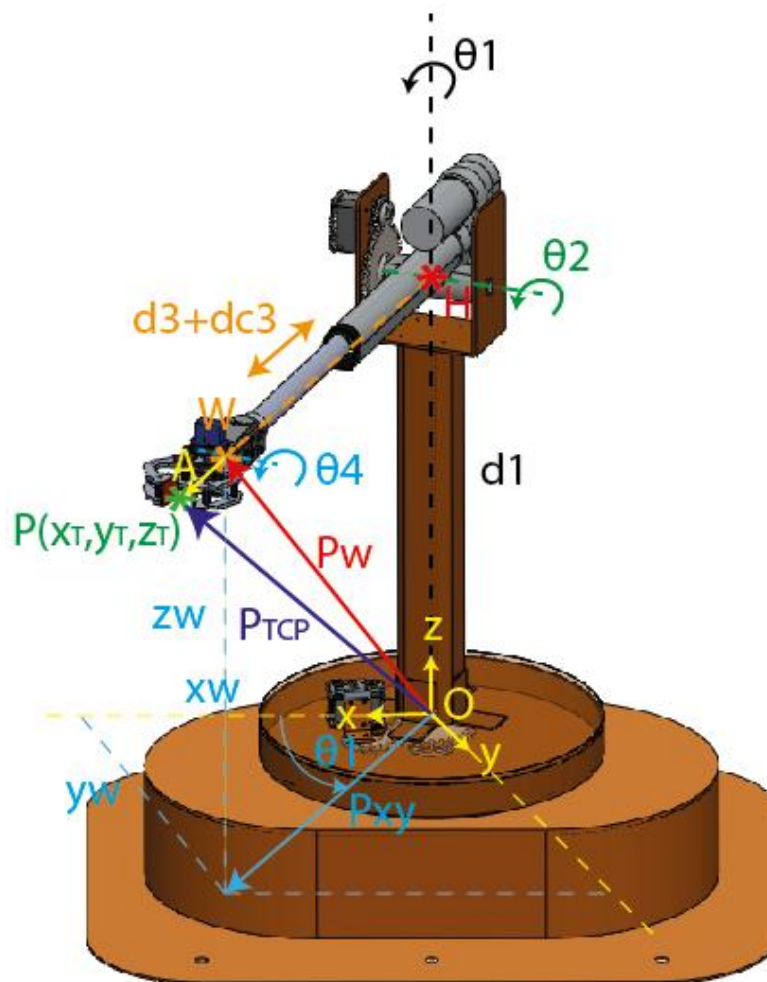


Figura 56: Parámetros geométricos para analizar la cinemática inversa

Pasos para encontrar la cinemática inversa:

1. Para iniciar el análisis geométrico y encontrar θ_1, θ_2, d_3 y θ_4 a partir de x_T, y_T y z_T , entonces para encontrar θ_1 tenemos que observar el plano xy donde obtiene que:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_T}{x_T}\right) \quad (3.10)$$

2. Procedemos a calcular el vector $\mathbf{P}_w = x_w \mathbf{i} + y_w \mathbf{j} + z_w \mathbf{k}$, entonces tenemos que observar el plano donde se encuentra el triángulo OWP el cual contiene la siguiente suma vectorial:

$$\mathbf{P}_{TCP} = \mathbf{P}_w + \mathbf{a} \therefore \mathbf{P}_w = \mathbf{P}_{TCP} - \mathbf{A} \quad (3.11)$$

Donde:

$$\mathbf{P}_{TCP} = x_T \mathbf{i} + y_T \mathbf{j} + z_T \mathbf{k} \quad (3.12)$$

Definiendo que el vector unitario de \mathbf{P}_{xy} es el mismo para el vector \mathbf{A} ya que tendrá la misma dirección y sentido pero diferente módulo entonces tenemos que:

$$\mathbf{A} = \overline{a_4} \cos(\theta_1) \mathbf{i} + \overline{a_4} \sen(\theta_1) \mathbf{j} \quad (3.13)$$

Entonces:

$$x_w = x_T - \overline{a_4} \cos(\theta_1) \quad (3.14)$$

$$y_w = y_T - \overline{a_4} \sen(\theta_1) \quad (3.15)$$

$$z_w = z_T \quad (3.16)$$

3. Para encontrar el ángulo θ_2 y d_3 se tiene que observar el plano que contiene el triángulo OHW , en el cual tenemos dos casos diferentes el primer caso cuando $z_w \leq d_1$, como se puede observar en la figura 57.

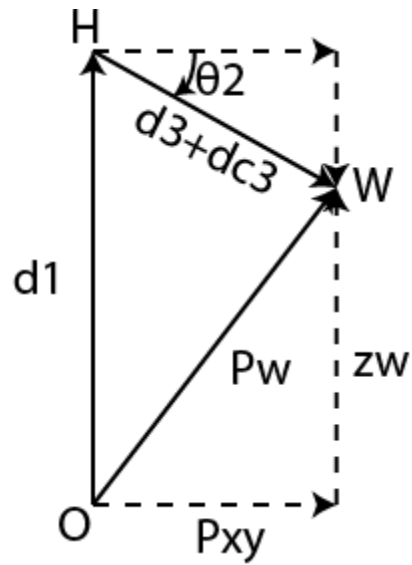


Figura 57: Triángulo OHW cuando $z_w \leq d_1$

Se obtiene que:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{\bar{d}_1 - z_w}{P_{xy}}\right) = \arctan\left(\frac{\bar{d}_1 - z_w}{\sqrt{x_w^2 + y_w^2}}\right) \quad (3.17)$$

$$d_3 = \sqrt{x_w^2 + y_w^2 + (\bar{d}_1 - z_w)^2} - \bar{d}_3 \quad (3.18)$$

Para el segundo caso cuando $z_w > d_1$, como se puede observar en la figura 58.

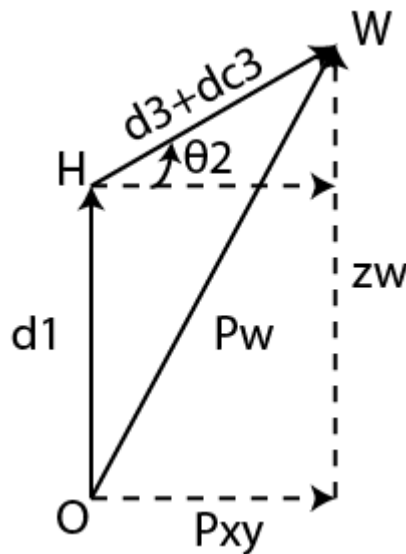


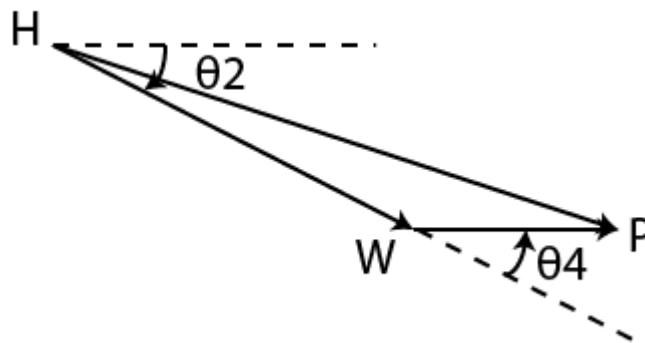
Figura 58: Triángulo OHW cuando $z_w > d_1$

Se obtiene que:

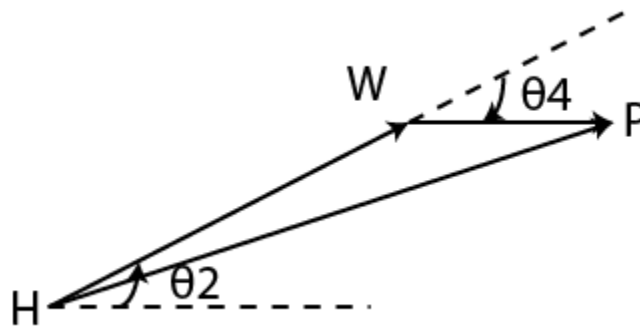
$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{z_w - \bar{d}_1}{\sqrt{x_w^2 + y_w^2}}\right) \quad (3.19)$$

$$d_3 = \sqrt{x_w^2 + y_w^2 + (z_w - \bar{d}_1)^2} - \bar{d}_3 \quad (3.20)$$

4. Para encontrar θ_4 se necesita observar el plano que contiene el triángulo PWH como se puede observar en la figura 59, y sabiendo que el vector \mathbf{A} es paralelo al plano xy como se definió en el paso 2.



a)



b)

Figura 59: Solución del ángulo θ_4 : a) Triángulo PWH cuando $z_w \leq d1$,

b) Triángulo PWH cuando $z_w > d1$

Por lo tanto:

$$\theta_4 = -\theta_2 \quad (3.21)$$

Matriz Jacobiana

La matriz jacobiana del robot esférico está dada por:

$$J(q) = \frac{\partial f_R(q)}{\partial q} = \begin{bmatrix} -(d_3 + \bar{d}_3)S_1C_2 - \bar{a}_4S_1C_{2,4} & -(d_3 + \bar{d}_3)C_1S_2 - \bar{a}_4C_1S_{2,4} & C_1C_2 & -\bar{a}_4C_1S_{2,4} \\ (d_3 + \bar{d}_3)C_1C_2 + \bar{a}_4C_1C_{2,4} & -(d_3 + \bar{d}_3)S_1S_2 - \bar{a}_4S_1S_{2,4} & S_1C_2 & -\bar{a}_4S_1S_{2,4} \\ 0 & -(d_3 + \bar{d}_3)C_2 - \bar{a}_4C_{2,4} & -S_2 & -\bar{a}_4C_{2,4} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix}$$

Tipo de control del Robot

Para el control del manipulador robótico tomando en cuenta los feedbacks de posición y velocidad que tienen los actuadores se tomó en consideración un control PID, donde sus diagramas de control se representan en las figuras 60 y 61.

En cuanto a los sistemas de control empleados para el manipulador robótico, se debe tomar en cuenta una consideración importante, ya que mediante el análisis de la cinemática del robot se lo tomar como una cadena cinemática cerrada por lo tanto todo sistema de control del manipulador puede considerarse un Lazo cerrado.

Los actuadores empleados en este proyecto cuentan con retroalimentaciones que son de gran ayuda para realizar el control deseado.

Los motores Dynamixel cuentan con retroalimentaciones de posición, velocidad, temperatura y torque. Mientras que el actuador lineal cuenta con una retroalimentación de posición lineal. Los motores cuentan con un control PID interno, el cual cabe dentro de la clasificación de un sistema Lazo cerrado. Para el actuador lineal se realizó un control proporcional mediante la retroalimentación de posición antes mencionada.

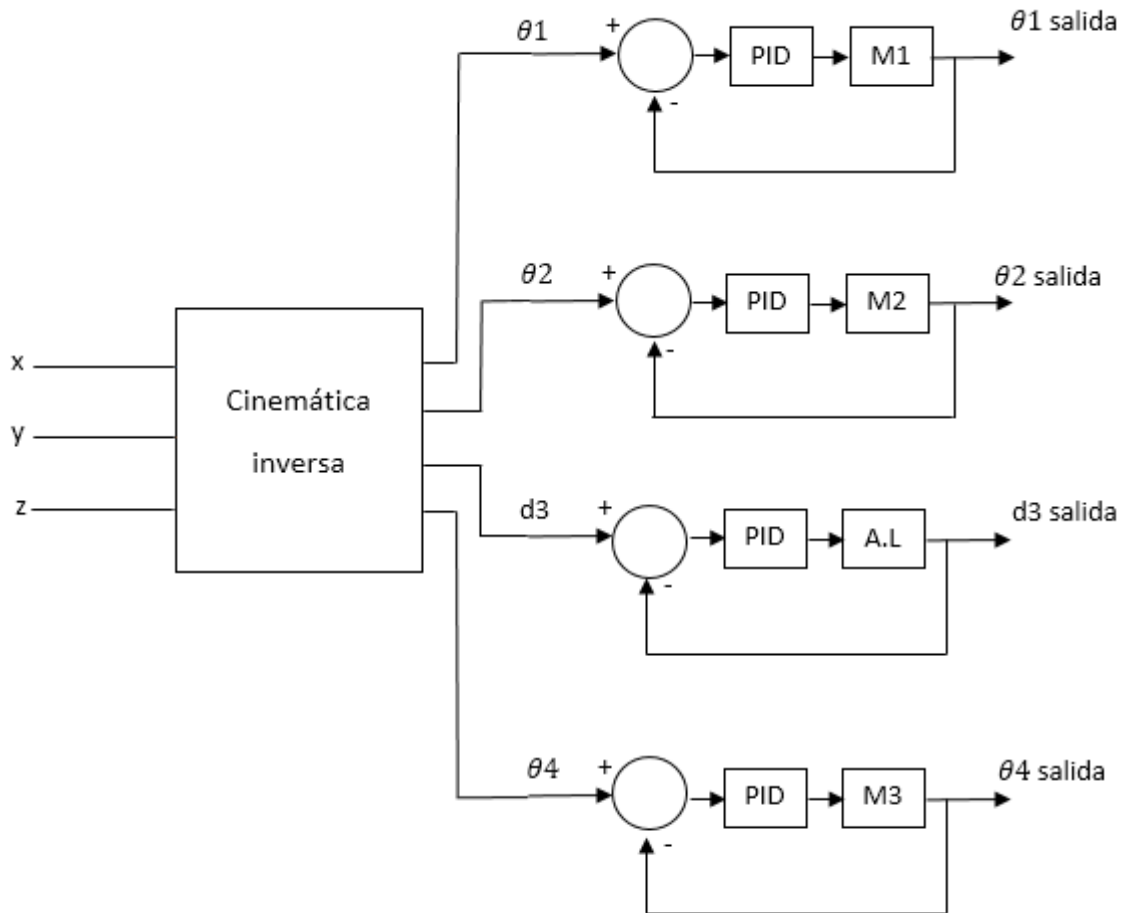


Figura 60: Sistema de control del manipulador robótico. Cinemática inversa.

Por tal razón está correctamente expresado el hecho de que cada actuador trabaja en un Lazo cerrado; sin embargo el sistema total (el control de la posición espacial del TCP) viene a ser un Lazo Abierto.

Para que se pudiera considerar al sistema total un Lazo Cerrado, sería necesario hallar la manera de sensar la posición espacial real del TCP y usar esa información como retroalimentación para el posicionamiento del sistema.

En la figura 60 se puede apreciar el diagrama de sistema de control para cinemática inversa. Donde se visualiza lo antes explicado: cada actuador cuenta con su sistema de control de Lazo Cerrado, mientras que el sistema total bien puede considerarse un control en Lazo Abierto para múltiples entradas y múltiples salidas.

El diagrama de control para cinemática directa corresponde a la siguiente imagen:

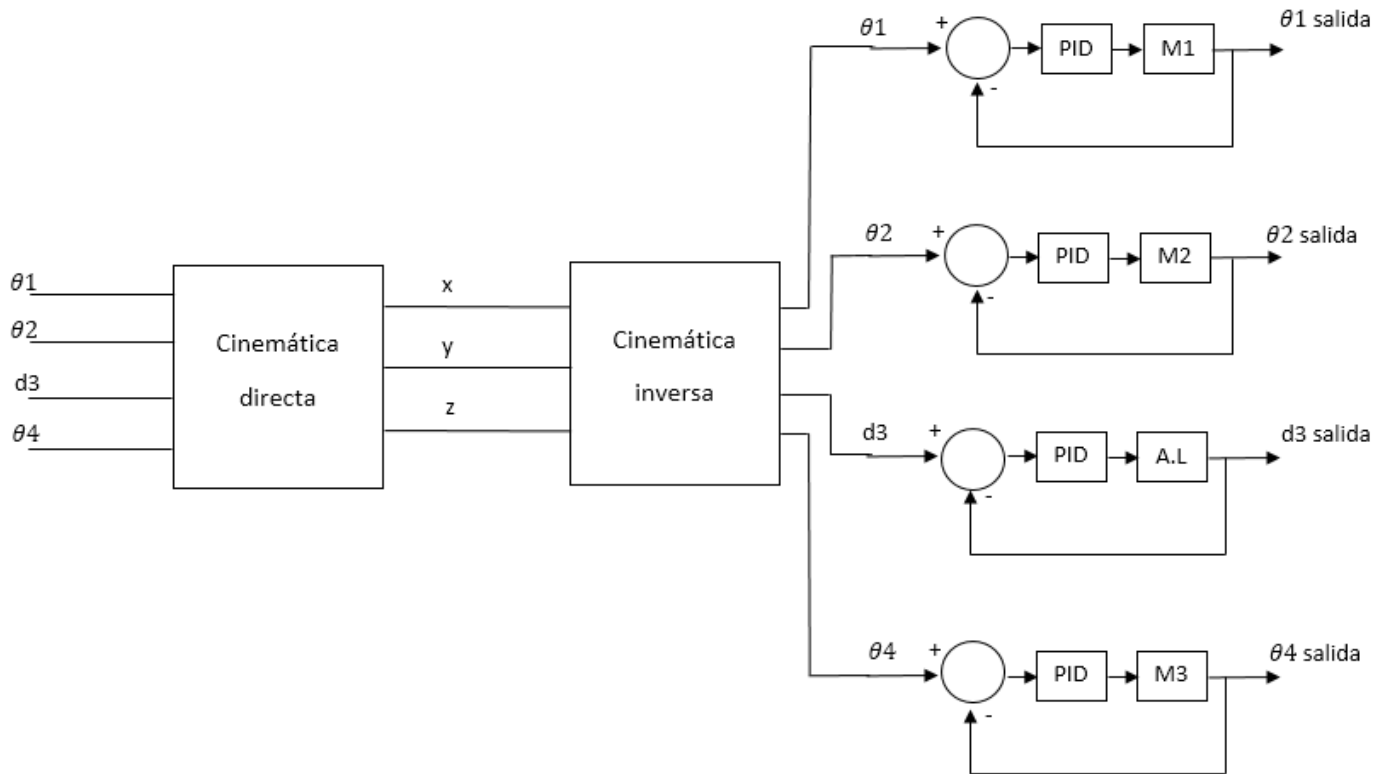


Figura 61: Sistema de control del manipulador robótico para cinemática directa.

3.6.5. Sensoramiento

En este módulo se mencionará los sensores internos y externos que se seleccionaron en la definición del concepto.

3.6.5.1. Sensoramiento interno

Como sensor de presencia se escogió el final de carrera ya que cumple con los requerimientos de diseño, dicho sensor se explicó sus ventajas y desventajas en la definición del concepto, los sensores de posición y velocidad no se implementarán ya que en los actuadores seleccionados en el módulo de accionamiento y controlabilidad, tienen incluidos estos sensores por lo cual representa una gran ventaja al momento de realizar el control.

3.6.5.2. Sensoramiento externo

En el sensoramiento externo se usarán finales de carrera y sensores infrarrojos ya que son de fácil implementación y muy útiles en aplicaciones industriales tales como la manipulación de objetos.

3.6.6. Software para control

Para implementar el software de control se usó un metasisistema operativo el cual es ROS dicho sistema operativo se instala sobre el sistema operativo Ubuntu 14.04 LST, estos sistemas son totalmente libres, se lo puede descargar directamente desde el siguiente link: [http://wiki.ros.org/ROS/Installation]. Para el presente proyecto se usará la última versión la cual es ROS JADE. Mediante la arquitectura de ROS el control puede ser a nivel gráfico usando nodos. Los nodos son procesos ejecutables que realizan el cómputo y se los puede implementar usando lenguajes como C++ y Python ya que ROS posee librería directas con los programas antes mencionados, para iniciar el diseño se procede a realizar el siguiente diagrama de flujo que representará el controlador del manipulador robótico.

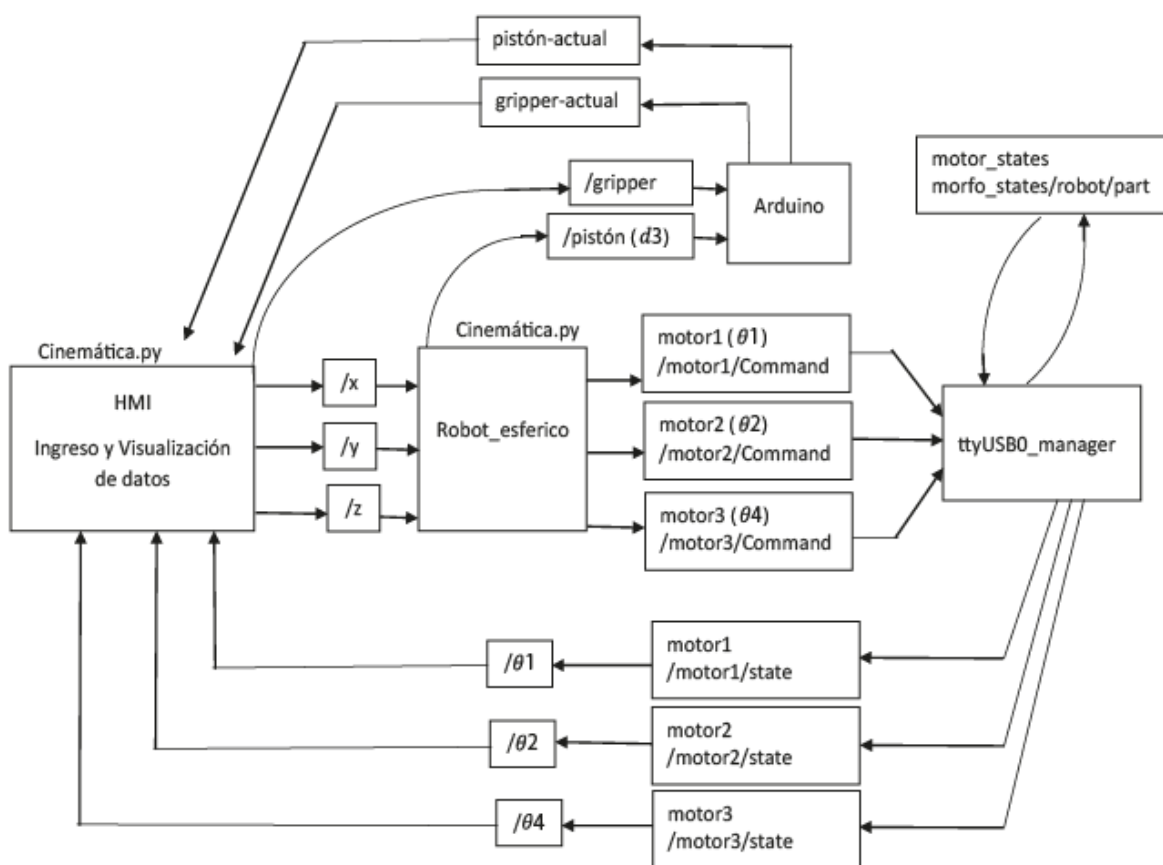


Figura 62. Diagrama de flujo del sistema de control del manipulador robótico

Como se puede observar en la figura 62. El diagrama consta de varios bloques los cuales representan los nodos que tendrán una tarea específica y se procederá a explicar cada uno de ellos:

- **Nodo HMI:** en este nodo realizaremos una interfaz gráfica de mando y control, en la cual podremos tener acceso a las diferentes acciones que realizará el manipulador robótico, dicha interfaz se la implementa usando el paquete PyQt4 el cual se encuentra dentro del repositorio del interprete Python.
- **Nodo Robot esférico:** en este nodo realizaremos las acciones de cinemática directa e inversa, donde se procesarán los datos que se enviarán a los nodos de control de los actuadores los cuales son: ttyUSB0 manager y Arduino.
- **Nodo ttyUSB0 manager:** este nodo es donde se realizará la acción de control de las articulaciones base, hombro y muñeca, mediante el dispositivo USB2Dynamixel. Cabe recalcar que estas articulaciones son accionadas por los motores Dynamixel AX 12 A, cada uno de ellos posee su propio controlador PID, como ya se explicó en las especificaciones de los motores.
- **Nodo Arduino:** este nodo realiza exactamente lo mismo que el nodo anterior solo con la diferencia que usa el dispositivo Arduino para realizar la acción de control sobre la articulación prismática (cilindro eléctrico), dicho actuador lineal tiene un control proporcional.

3.7. Resumen

Los puntos importantes en el capítulo son:

- La identificación de las necesidades tanto del usuario como del diseñador, para establecer especificaciones y generar conceptos del producto para su posterior desarrollo.
- Establecer métricas que se relacionen directamente con las necesidades del usuario lo cual es esencial para todo concepto, para ello se usarán técnicas tales como *House of Quality* (casa de la calidad), *Quality Function Deployment* (despliegue de la función de calidad) o *QFD*.

- Definición del concepto donde se analizarán las diferentes alternativas mediante módulos para definir el tipo de tecnología, principios de operación y forma del producto.
- Evaluación del concepto donde se seleccionará el concepto final mediante el método ordinal corregido de los criterios ponderados.
- Desarrollo del concepto se diseñara el concepto final en su totalidad mediante teorías e investigaciones realizadas tanto en el presente capítulo como en los anteriores capítulos, tomando en cuenta todas las necesidades y especificaciones tanto del usuario como del diseñador.

Capítulo 4

4. Construcción y funcionamiento

El capítulo detalla el proceso de fabricación de los elementos mecánicos, así como la instalación de componentes eléctricos y electrónicos que forman parte de la estructura física y operativa del manipulador robótico. También, se detalla los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento mecánico, control por ROS y manipulación de objetos.

4.1. Construcción del manipulador robótico

La construcción del manipulador robótico inicia en la fabricación de las transmisiones mecánicas engranajes, continuando con la manufactura de los elementos mecánicos de mayor tamaño como la base, columna, hombro y base giratoria, para terminar con el acoplamiento de los actuadores (motores y actuador lineal) con sus respectivas reducciones mecánicas.

4.1.1. Manufactura de elementos

El manipulador robótico consta de varias piezas. Las de mayor tamaño, correspondientes al bastidor y la columna del manipulador fueron elaboradas empleando TOL galvanizado de 0,9 mm de espesor. Para otros elementos de menor tamaño se utilizó también plásticos como duralón (nylon) y ABS (impresión 3D). La fabricación de los elementos se realizó en el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Las partes construidas clasificadas según sus articulaciones son:

Articulación base

- Bastidor
- Base para rodamientos
- Tambor giratorio
- Arandela para rodamiento axial
- Tapa tambor

- Engranaje
- Flecha motor base
- Acople para sujeción motor base

Articulación Hombro

- Columna sujeta a tapa tambor
- Soporte para articulación hombro
- Bujes y soportes para bujes
- Flecha
- Engranaje

Articulación actuador lineal

- Acople entre actuador lineal y motor muñeca.

Los planos correspondientes a los elementos mecánicos construidos constan el en anexo A del presente proyecto.

Los procesos realizados en la construcción de los elementos del manipulador incluyen corte, doblado, taladrado, remachado, entre otros. En la siguiente galería de imágenes se muestra algunos de los procesos realizados:



Figura 63. Fabricación de engranajes



Figura 64. Construcción de piezas en TOL

4.1.2. Ensamblaje

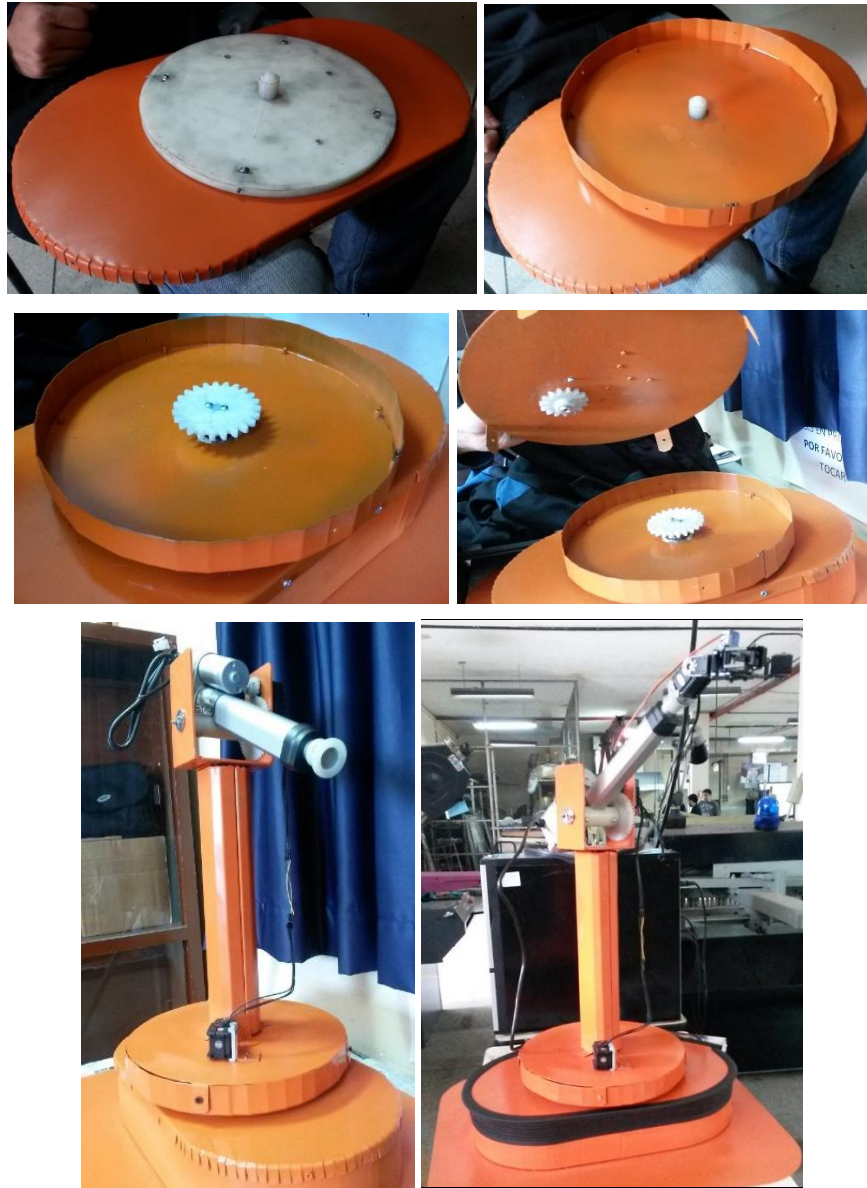


Figura 65. Ensamblaje articulaciones base, hombro y efector final

4.1.3. Cableado

Los motores Dynamixel empleados en este proyecto permiten realizar una red *Daisy chain* que consiste en conectar los motores serialmente, y luego mediante un driver para el control se identifica a cada motor mediante una dirección IP. A más de ello se necesita cableado para el efector final y un sensor fin de carrera que detecta objetos en la posición para ser manipulados. El actuador lineal también requiere cableado; tanto para su

energización como para su control. En el siguiente diagrama se especifica la distribución del cableado para cada elemento según el código de colores definido:

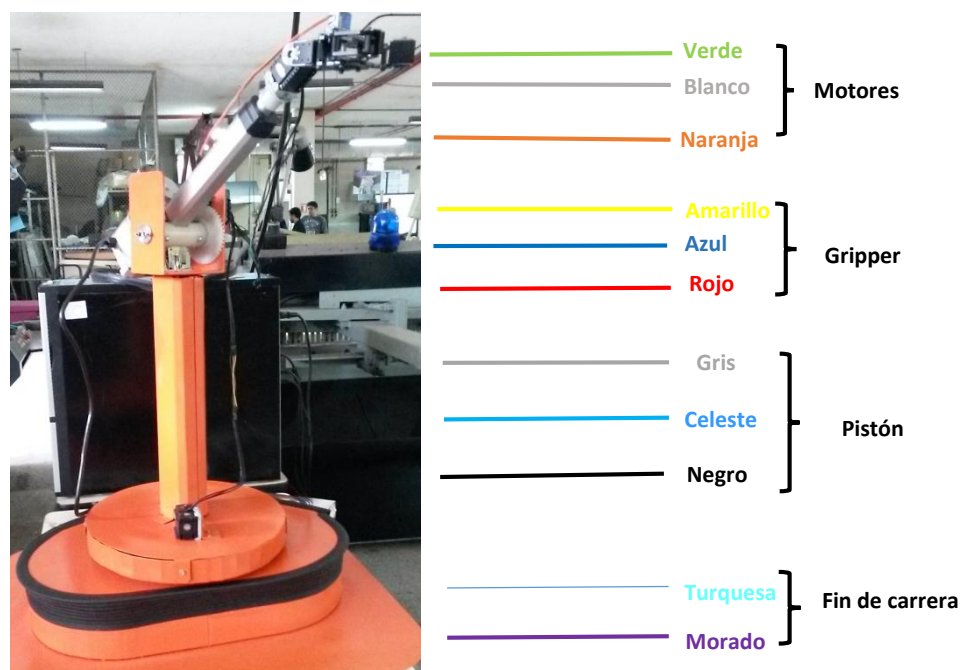


Figura 66. Cableado por código de colores

En la siguiente tabla se especifican los colores correspondientes a cada parámetro de los diversos actuadores y elementos:

Tabla 98: Código de colores para cableado manipulador robótico.

	Cables	Función
Motores	verde	potencia
	blanco	señal de control
	naranja	tierra
Gripper	amarillo	señal de control
	azul	tierra
	rojo	+5V
Actuador lineal	gris	señal análoga potenciómetro
	celeste	+12V
	negro	-12V
Fin de carrera	turquesa	Fuente
	morado	tierra

Todo el conjunto de cables se empaquetó en un caucho termo compresible para conseguir una presentación estética, técnica y segura tanto para el usuario como para el robot manipulador.



Figura 67. Cableado estructurado y caja elementos electrónicos

Mediante la figura 68. Se muestra el diagrama de conexión de todos los dispositivos electrónicos, drivers, controladores y actuadores que están presentes en el manipulador robótico.

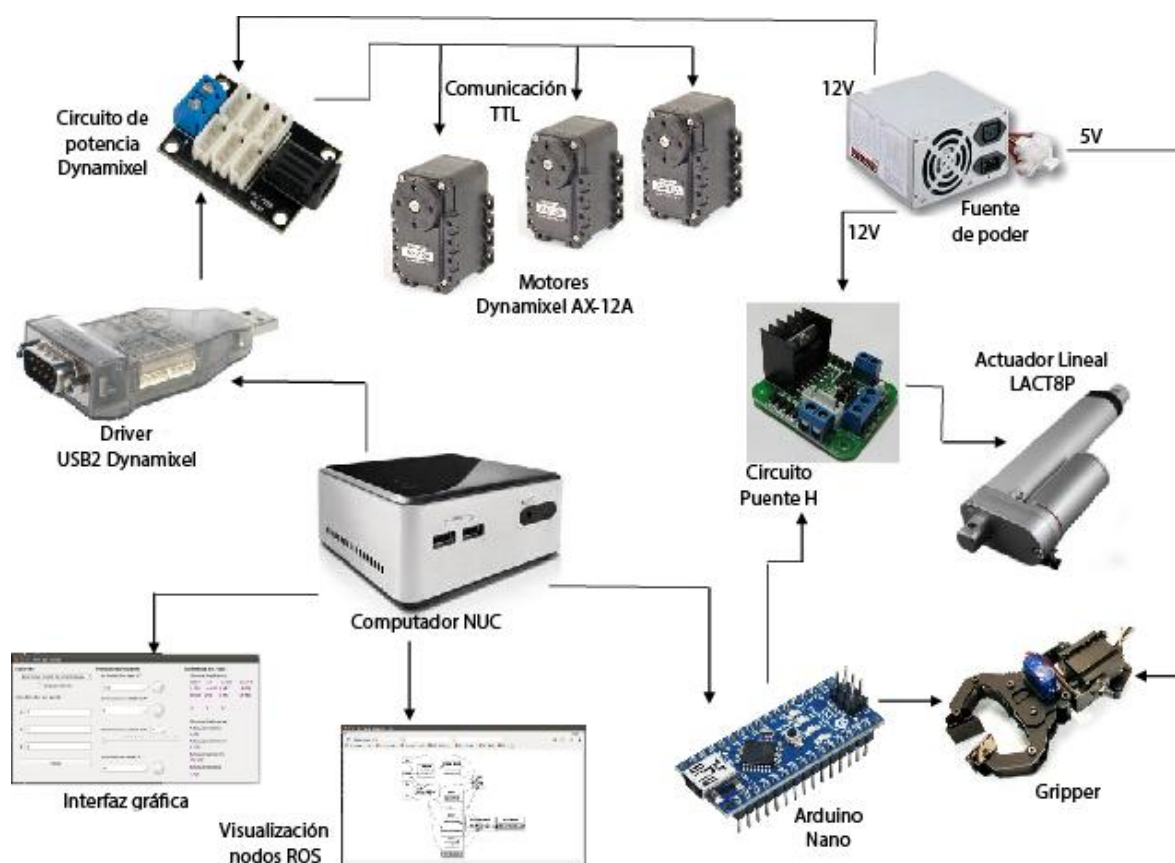


Figura 68. Diagrama de conexión.

4.1.4. Control por ROS

En cuanto al control del manipulador robótico, para iniciar se instala todos los paquetes respectivos de ROS tales como: *Dynamixel Controller* el cual se encarga de las configuraciones de los actuadores Dynamixel AX-12 A, mediante un archivo *motors.yaml* se pueden configurar dichos actuadores su velocidad, límites máximos y mínimos de posición y el torque como se muestra en la figura 69.

```

modo_mover.launch x  motors.yaml x
motor1:
  controller:
    package: dynamixel_controllers
    module: joint_position_controller
    type: JointPositionController
  joint_name: motor_1
  joint_speed: 1
  joint_torque_limit: 0.9
  motor:
    id: 1
    init: 78.15
    min: 78.15
    max: 1023
motor2:
  controller:
    package: dynamixel_controllers
    module: joint_position_controller
    type: JointPositionController
  joint_name: motor_2
  joint_speed: 1.2
  joint_torque_limit: 0.9
  motor:
    id: 2
    init: 0
    min: 0
    max: 1023
motor4:
  controller:
    package: dynamixel_controllers
    module: joint_position_controller
    type: JointPositionController
  joint_name: motor_4
  joint_speed: 0.4
  joint_torque_limit: 0.9
  motor:
    id: 3
    init: 480
    min: 480
    max: 1023

```

Figura 69. motors.yaml

El id de los actuadores se los puede configurar usando el programa RoboPlus usando la opción Dynamixel Wizard, se lo puede descargar en el siguiente link: http://en.robotis.com/BlueAD/board.php?bbs_id=downloads&mode=view&bbs_no=1132559&page=1&key=&keyword=&sort=&scate=

Es compatible con Windows 7 u otras versiones, la interfaz del programa se lo puede apreciar en la figura 70.



Figura 70. RoboPlus

Rospay es un paquete que tiene como función iniciar todos los nodos por medio del intérprete Python. Una vez instalado los paquetes, se procede a crear un espacio de trabajo en ROS, se recomienda seguir los tutoriales que se encuentran en la página de ROS, una vez creado el espacio de trabajo se inicia los controles mediante el terminal de Ubuntu, para el presente proyecto se usa el siguiente comando:

\$ roscd my_dynamixel

Todos los nodos implementados en el sistema de control del manipulador robótico se deben disparar al mismo tiempo y esto se lo debe hacer por medio de un archivo *modo_mover.launch*, como se muestran en la figura 71.


```

modo_mover.launch x
<launch>
  <!-- Start the low-level driver manager with parameters -->
  <node name="ttyUSB0_manager" pkg="dynamixel_controllers" type="controller_manager.py" output="screen">
    <roscparam>
      namespace: dxl_manager
      serial_ports:
        robot_port:
          port_name: "/dev/ttyUSB0"
          baud_rate: 1000000
          min_motor_id: 1
          max_motor_id: 3
          update_rate: 20
    <!--
      dxl_tty2:
        port_name: "/dev/ttyUSB1"
        baud_rate: 1000000
        min_motor_id: 10
        max_motor_id: 20
        update_rate: 15
    -->
  </roscparam>
</node>
  <!-- Start motor1 controller -->
  <roscparam file="$(find my_dynamixel)/config/motors.yaml" command="load"/>
  <node name="motor_spawner" pkg="dynamixel_controllers" type="controller_spawner.py"
    args="--manager=dxl_manager
          --port=robot_port
          --type=simple
          motor1
          motor2
          motor4"
    output="screen"/>
  <node name="HMI" pkg="esferico" type="hmi.py" />
  <node name="Robot_Esferico" pkg="esferico" type="robot_esferico_mover.py" />
  <node name="Arduino" pkg="esferico" type="arduino.py" />
</launch>

```

Figura 71. modo_mover.launch

Una vez iniciado el espacio de trabajo de ROS, para poder correr el archivo *modo_mover.launch* se debe usar el siguiente comando:

\$ roslaunch my_dynamixel modo_mover.launch

En el anexo B, se puede observar los nodos implementados en Python, se puede verificar las conexiones internas de ROS como se observa en la figura 72. Mediante el siguiente comando de ROS:

\$ rosrund rqt_graph rqt_graph

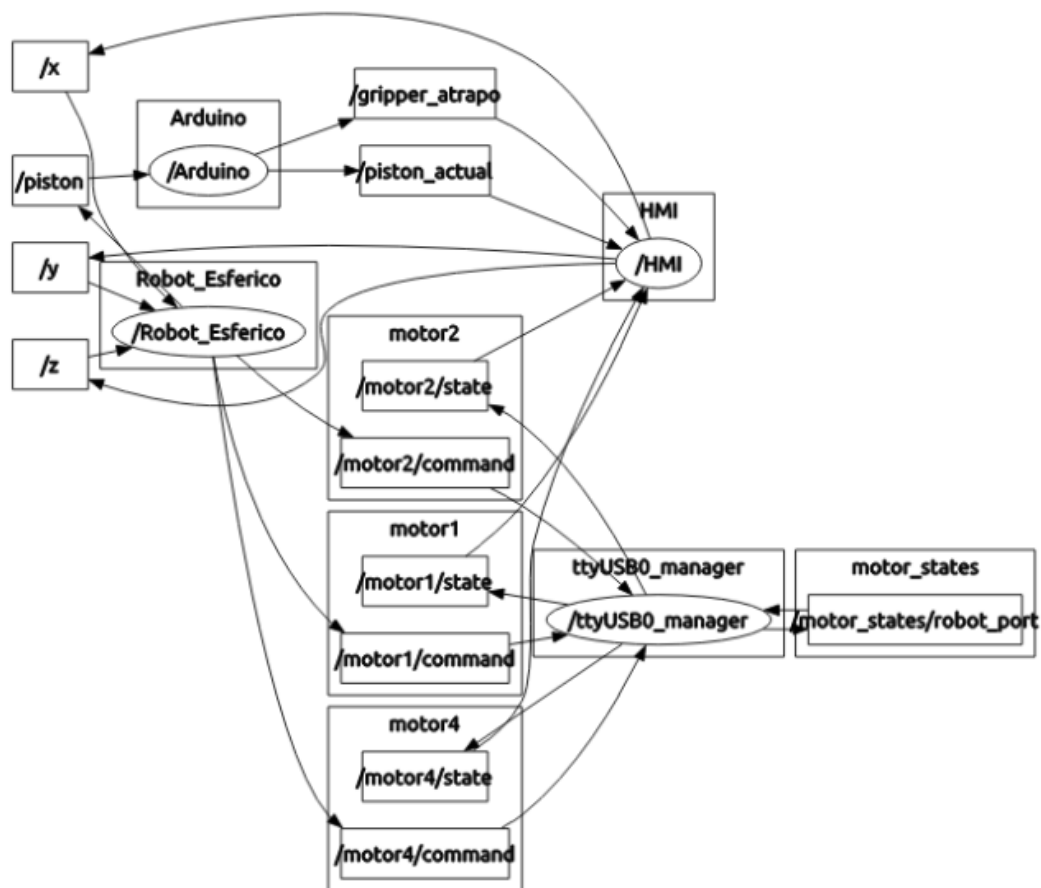


Figura 72. Conexiones internas de ROS

En la figura 73. Se puede apreciar el área de trabajo del manipulador robótico junto a su caja de control y computador los cuales trabajan conjuntamente para ejecutar la aplicación.



Figura 73. Manipulador, caja de control y computador

4.2. Pruebas y funcionamiento

En cuanto a la implementación de un manipulador robótico esférico, se realizaron pruebas para cada avance tanto en construcción como en desarrollo del control. Así, se evalúa el funcionamiento del robot en cuatro etapas. La primera una vez finalizada la construcción de los componentes mecánicos, la segunda el funcionamiento de los mecanismos mediante accionamiento de actuadores, la tercera en cuanto al funcionamiento real de los cálculos de cinemática y la cuarta al manipular el robot mediante la interfaz gráfica.

4.2.1. Primera evaluación

La primera evaluación realizada al manipulador robótico se hizo una vez construidas todas las partes que conformarían el mismo. La cual consistía en verificar las dimensiones, forma y resistencia de las diversas partes, donde se encontró que existía un flejamiento entre dos elementos los cuales son la columna y el plato del tambor. Elemento mecánico que conecta las articulaciones correspondientes a base y hombro, mostrada en la siguiente figura:



Figura 74. Conexión articulaciones base y hombro con flejamiento.

Este problema fue debido al espesor de 0,9mm de TOL con el que se construyó el plato unido a la columna. Por lo cual al someterse a una fuerza perpendicular a la columna, existía un flejamiento notorio.

Resultados

El problema detectado en dicho elementos fue el flejamiento excesivo entre las articulaciones de la base y hombro lo cual ocasionaba vibración al finalizar cada movimiento del manipulador. Se corrigió el problema detectado aumentando el espesor del plato conectado a la columna, el cual pasó a medir 2,9mm. El procedimiento realizado fue construir un refuerzo de 2mm de espesor colocado internamente en el tambor por debajo del plato unido mediante remaches, lo cual logró un excelente resultado.

4.2.2. Segunda evaluación




Esta evaluación tuvo por objetivo el verificar el funcionamiento de los mecanismos diseñados y construidos. Es decir consistía en energizar los actuadores correspondientes a la base y hombro del manipulador para visualizar el funcionamiento de las transmisiones mecánicas, ensamble de componentes, rodamientos y movimiento total del robot. Y también

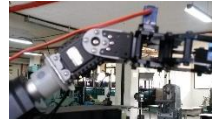
constatar la velocidad rotacional de los motores, de las articulaciones y consecuentemente la velocidad de movimiento del TCP (punto de trabajo).

Resultados

Los resultados de esta prueba fueron satisfactorios ya que los mecanismos funcionaron según lo previsto tanto para la articulación de la base como para el hombro. Hubo que realizar un pequeño ajuste en el rodamiento axial de la articulación de la base para evitar vibraciones, pero no hubo modificaciones significativas. Se han medido los valores de voltajes y corrientes correspondientes a los diversos actuadores para verificar el correcto funcionamiento de los mismos. En el cual se constata que la articulación crítica es la correspondiente al hombro, debido a que soporta más carga que las demás. Sin embargo su desempeño es satisfactorio y cumple con lo previsto:

Tabla 99: Desempeño actuadores del manipulador robótico.

Actuadores	Velocidad	Voltaje	Temperatura
	[rpm]	[V]	[°C]
Motor base	3,33	12,3	55
			
Motor hombro	6,11	12,3	59
			
Pistón eléctrico	$12,7 \frac{mm}{s}$	12,3	-
			
Motor efector final	6,11	12,3	37

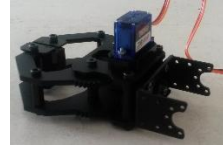


83,3

5,3

-

Gripper



4.2.3. Tercera evaluación

En el capítulo tercero se realizaron los correspondientes cálculos de cinemática tanto directa como inversa para el manipulador robótico esférico. Dichos cálculos permiten conocer la posición del punto de trabajo (TCP) en coordenadas rectangulares, para una determinada posición angular de los actuadores; siendo esto el trabajo de cinemática directa. De igual forma, el poder determinar qué posición angular debe adoptar los actuadores para conseguir un determinado punto en coordenadas rectangulares, para que el TCP se ubique en dicha posición, siendo esto el trabajo correspondiente a la cinemática inversa.

Ambos procedimientos realizados, han sido llevados a la practica en el manipulador para controlar la posición del TCP (cinemática inversa) y para conocer el valor en el cual este se ubica (cinemática directa). Para esta evaluación se ha analizado el desempeño del manipulador para conseguir una posición especificada en coordenadas rectangulares y midiendo la posición real en la cual el TCP se ha ubicado.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas, constatando la efectividad de los procedimientos matemáticos realizados y la funcionalidad del sistema de control.

Tabla 100: Evaluación cinemática directa del manipulador robótico.

Puntos	Articulaciones	Posición deseada	Posición alcanzada	Cálculos de error	Error porcentual
Punto 1	θ_1	180°	179,47°	0,52°	0,29%
	θ_2	47,8°	48,58°	0,78°	1,63%
	d_3	20mm	19,18mm	0,82mm	4,1%
	θ_4	238,12°	237,5°	0,62°	0,26%
Punto 2	θ_1	70,03°	69,68°	0,35°	0,5%
	θ_2	17,4°	17,5°	0,35°	0,57%
	d_3	45mm	44,66mm	0,44mm	0,75%
	θ_4	207,9	207,33°	0,56°	0,27%
Punto 3	θ_1	140,76°	140,23°	0,53°	0,37%
	θ_2	62,17°	62,75°	0,58°	0,94%
	d_3	67mm	64,44mm	2,56mm	3,82%
	θ_4	252,78°	251,9°	0,87°	0,34%

Tabla 101: Evaluación cinemática inversa del manipulador robótico.

Puntos	Articulaciones	Posición deseada	Posición alcanzada	Cálculos de error	Error porcentual
Punto 1	x	56cm	55,6 cm	0,4cm	0,71%
	y	0cm	0cm	0cm	0%
	z	43cm	42,9cm	0,1cm	0,2%

	x	-45cm	-43,9 cm	1,1cm	2,4%
Punto 2	y	30cm	30,5cm	0,5cm	1,6%
	z	56cm	56,2cm	0,2cm	0,36%
	x	-35cm	-36 cm	1cm	2,8%
Punto 3	y	25cm	25,5cm	0,5cm	2%
	z	20cm	19,5cm	0,5cm	2,5%

4.2.4. Cuarta evaluación

Para esta evaluación se analiza el desempeño del manipulador siendo controlado mediante la interfaz gráfica realizada para facilitar la utilización del mismo.

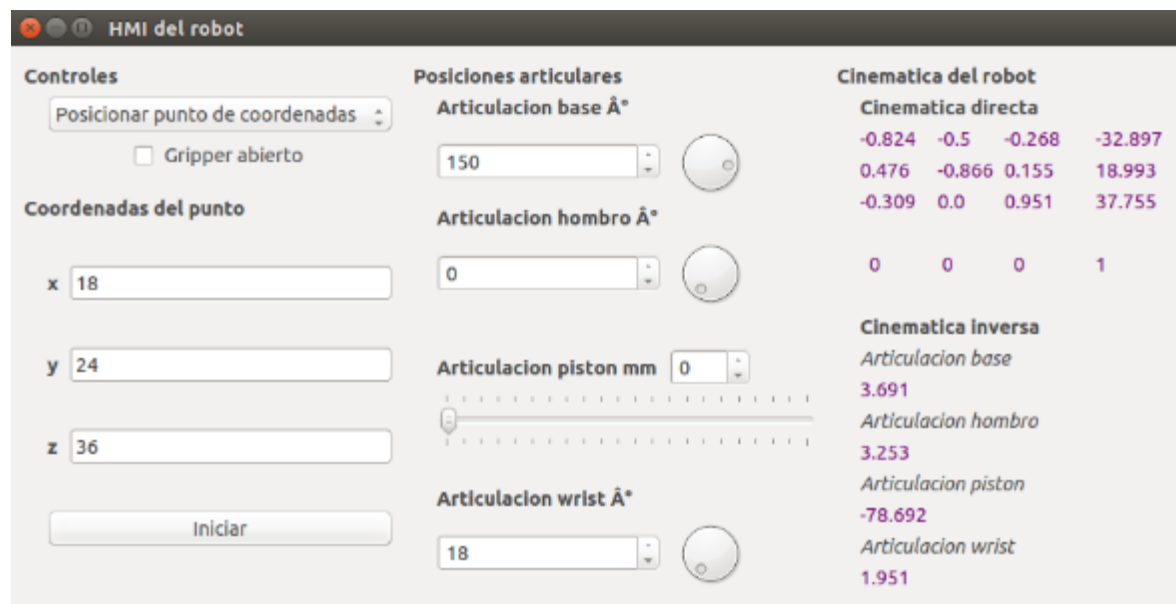


Figura 75. Interfaz gráfica para control del manipulador robótico

La imagen mostrada fue la interfaz realizada previa a una modificación por cuestiones estéticas donde se le incluyó una imagen del brazo robótico. Sin embargo la figura mostrada es de utilidad para explicar el funcionamiento y la evaluación del HMI realizado.

La interfaz puede dividirse en tres partes, que son: el lado izquierdo, el centro de la interfaz y el lado derecho. Del lado izquierdo se visualizan editores de texto para las coordenadas x, y, z .

The image shows a software interface titled "Coordenadas del punto". It contains three text input fields labeled "x", "y", and "z". The "x" field contains the value "18", the "y" field contains "24", and the "z" field contains "36". Below these fields is a button labeled "Iniciar".

Figura 76. Ingreso de valores para posicionamiento mediante cinemática inversa

Esta zona corresponde al ingreso de datos para el cálculo de cinemática inversa. Es decir el usuario ingresará un punto en coordenadas rectangulares, y el control ubicará al TCP del manipulador en esa posición.

The image shows a software interface titled "Posiciones articulares". It contains four control elements:

- "Articulacion base \AA° ": A slider with a value of 150 and a circular knob.
- "Articulacion hombro \AA° ": A slider with a value of 0 and a circular knob.
- "Articulacion piston mm": A linear slider with a value of 0 and a horizontal track.
- "Articulacion wrist \AA° ": A slider with a value of 18 and a circular knob.

Figura 77. Sliders para posicionamiento mediante cinemática directa

En el centro de la pantalla se visualizan 3 sliders rotacionales y 1 lineal. Estos corresponden a los actuadores del manipulador lo cual ejemplifica el trabajo mediante cinemática directa. Es decir con cada Slider se asigna un valor de posición (angular o lineal

según el actuador) y la cinemática directa calcula las coordenadas rectangulares donde se ubicará el TCP.

Resultados

Del lado derecho de la interfaz se muestran los resultados calculados mediante cinemática.

Cinemática del robot			
Cinemática directa			
-0.824	-0.5	-0.268	-32.897
0.476	-0.866	0.155	18.993
-0.309	0.0	0.951	37.755
0	0	0	1
Cinemática inversa			
<i>Articulacion base</i>			
3.691			
<i>Articulacion hombro</i>			
3.253			
<i>Articulacion piston</i>			
-78.692			
<i>Articulacion wrist</i>			
1.951			

Figura 78. Matriz de transformación y resultados para cinemática directa e inversa en el HMI.

En la parte superior derecha se muestran los valores dinámicos que conforman la matriz de transformación. Los cuales se actualizan para cada movimiento realizado por el manipulador. Es decir, cuando se ejecuta un movimiento mediante cinemática directa (moviendo articulación por articulación) en la matriz de transformación se observará el punto en coordenadas rectangulares donde se ubica el TCP. Así mismo cuando se ejecute un movimiento mediante cinemática inversa, la matriz de transformación se actualiza mostrando el punto alcanzado por el TCP.

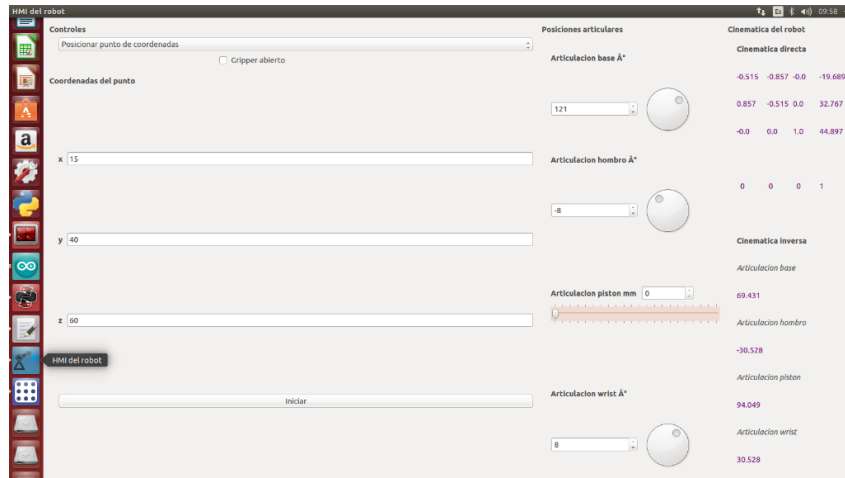


Figura 79. Interfaz gráfica en pantalla completa con ícono de acceso.

4.3. Resumen

Los puntos importantes en el capítulo son:

- La construcción del manipulador robótico esférico se desarrolló en varias etapas. Iniciando con el diseño y posterior manufactura de los diversos elementos mecánicos, continuando con el ensamblaje y acople de actuadores para pasar a la etapa de cableado estructurado y posterior implementación del control por ROS.
- Las pruebas de funcionamiento del manipulador se realizaron en 4 etapas. La primera al finalizar la construcción de las diversas partes que conforman el mismo, la segunda en la cual se verificó el correcto funcionamiento de los mecanismos que permiten la movilidad de todas las articulaciones y además el desempeño de los actuadores, la tercera etapa donde se evaluó el control mediante las estrategias de cinemática directa e inversa visualizando el posicionamiento espacial del punto de trabajo TCP. La cuarta etapa que consiste en operar el manipulador empleando la interfaz gráfica diseñada.

Capítulo 5

5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

En este capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido a partir del trabajo realizado. También, se abordan las futuras líneas de investigación que se podrían realizar sobre el manipulador robótico a partir de este punto.

5.1. Conclusiones

Con la realización del presente trabajo se han extraído las siguientes conclusiones:

- Se diseñó y construyó un manipulador robótico esférico de 4 grados de libertad controlado por ROS, cuyo movimiento es producido por servo motores. El robot es capaz de realizar posicionamiento de su TCP mediante cálculos de cinemática inversa y retroalimentación de las posiciones alcanzadas mediante cinemática directa. El manipulador puede ser operado mediante una interfaz gráfica amigable con el usuario implementado en PyQt4, que es una herramienta para diseño de interfaces gráficas usando el intérprete de Python. Finalmente, el control del manipulador fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS) e integra componentes de tecnología abierta.
- A través del análisis del estado del arte sobre manipuladores robóticos se ha podido comprender conceptos fundamentales aplicados en este proyecto tales como las mejores alternativas en cuanto al diseño mecánico y electrónico. También, se ha recopilado información acerca de la situación actual de la robótica en las universidades de nuestro país y de otras partes del mundo para proyectar el desarrollo de esta tecnología en nuestro país.
- Los grados de libertad del manipulador robótico son 4, correspondientes a las articulaciones denominadas: base, columna, hombro, actuador lineal y efector final. Como resultado del proceso de construcción se obtuvo un manipulador robótico de 4 grados de libertad, cuyo volumen de revoluciones tiene dimensiones de: centro: 41 cm de la base. Superficie exterior de radio 58,8 cm y superficie interior de radio 28cm. Los ángulos de

rotación para cada articulación son: base puede girar 180 grados, el hombro 74 grados, la carrera del actuador lineal es 203 mm y el motor del efector final gira 160 grados.

- El sistema operativo *Robotic Operating System* (ROS) facilita el desarrollo en código abierto, con herramientas necesarias como el *Dynamixel Controller* el cual controla todas las acciones de los actuadores utilizados en el manipulador robótico, cabe recalcar que también se utilizó la herramienta Rospys para poder interactuar con el intérprete de Python y crear los nodos que más convengan en el control.
- La cinemática del robot y todos los cálculos realizados para el control del mismo, permiten que el posicionamiento del TCP en el espacio sea sumamente preciso. En el capítulo 4 se presentó una cuantificación de los errores de posicionamiento, donde prácticamente todos los errores fueron inferiores al 1 %. Esto muestra la eficacia de los métodos de cinemática directa e inversa, y además el hecho de que la planta (parte mecánica del proyecto) funciona correctamente. También cabe recalcar la importancia de emplear las retroalimentaciones propias de los servomotores, ya que el sistema de posicionamiento sumamente útil para alcanzar la precisión deseada.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento considerando algunos puntos a ser evaluados, entre ellos: la resistencia, forma y dimensiones de los elementos mecánicos que conforman el manipulador. El desempeño de los actuadores, tanto servomotores como el actuador lineal. El posicionamiento espacial del TCP, la utilización de la interfaz gráfica amigable con el usuario y la manipulación de un objeto de 100 gramos. Con lo cual se concluye que los objetivos planteados para este proyecto han sido alcanzados ya que los elementos mecánicos construidos y ensamblados funcionan correctamente. Las reducciones mecánicas permiten a los actuadores alcanzar los torques necesarios para mover cada articulación sin mayor dificultad, por lo cual el desempeño de los actuadores es óptimo. El posicionamiento del TCP trabaja correctamente según lo establecido verificando la funcionalidad de los cálculos de cinemática directa e inversa, como se mencionó en el punto anterior. La interfaz gráfica facilita la operación del manipulador robótico, lo cual permite alcanzar el objetivo inicial de manipular objetos con masa de 100 gramos.
- Finalmente, el proyecto desarrollado servirá como iniciativa para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación a realizarse sobre el mismo. Como por ejemplo desarrollar

nuevas estrategias de control, inteligencia artificial; o mejoras en cuanto a la estructura mecánica ya sea añadiendo grados de libertad, modificando el efector final, reemplazándolo por herramientas, etc. En el siguiente ítem, dentro de lo que corresponde a trabajos futuros se explicará más al respecto.

5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- La estructura mecánica del manipulador se fabricó empleando diversos materiales tales como acero, acero galvanizado, plásticos como ABS y duralón, entre otros. Y las juntas mecánicas se dimensionaron y construyeron según la necesidad empleando en algunos casos juntas empernadas, juntas pegadas y juntas remachadas. Para alcanzar mayor robustez de la actual en la estructura mecánica se recomienda realizar un nuevo diseño de junta para el elemento plato giratorio – columna. Ya que, a pesar de trabajar bien, podría reforzarse dicha junta para obtener un resultado de nivel industrial.
- Las transmisiones mecánicas empleadas en el manipulador son engranajes, que fueron construidos en nylon (duralón), el cual se desempeña bastante bien para sistemas de transmisión de potencia. Sin embargo se recomienda para futuros proyectos la fabricación de engranajes en aluminio o acero, para tener un sistema de mayor robustez y capaz de transmitir una mayor potencia.
- El cableado realizado se hizo aprovechando la red *Daisy chain* que los motores Dynamixel posibilitan hacer. Y todo el conjunto de cables se empaquetó en un caucho termo compresible para conseguir una presentación segura, técnica y estética. La recomendación que se puede hacer respecto a este punto es realizar todo el cableado internamente. Es decir a través de la columna y tambor para precautelar aún de mejor manera los circuitos eléctricos del manipulador.
- Actualmente un equipo de ingenieros de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, está desarrollando un sistema de laboratorio virtual sobre el proyecto, que permitirá utilizar el manipulador desde zonas remotas por tele operación.
- El manipulador robótico construido se presta para la investigación en la tecnología robótica como por ejemplo en la combinación con un robot móvil. Y las aplicaciones dentro de este campo son ilimitadas como por ejemplo para la automatización en la industria, domótica, armamento, investigación de terrenos hostiles, etc.

- Para mejorar los prototipos de brazos robóticos se debe realizar investigaciones previas en su defecto incentivar a los desarrolladores independientes de ROS que se involucren en el estudio de la cinemática directa e inversa, debido a que cada vez se hace más popular a nivel académico e industrial.
- Se podría trabajar sobre el proyecto realizado para desarrollo de tecnología robótica. Por ejemplo sería recomendable realizar un control donde se aplique el algoritmo de Levenberg-Marquardt, para que en caso de posicionar al TCP en un punto físicamente inalcanzable, este algoritmo recalculé; posicionando al punto de trabajo en la coordenada más aproximada a la solicitada.

Referencias bibliográficas

- Universidad de los Andes (27 de 02 de 2015). *Sistemas robóticos*. Obtenido de <https://ingenieria.uniandes.edu.co/lab-ingenieria-de-sistemas-y-computacion>
- Barriga, A. (2011). *Fundamentos de robótica*. Mexico.
- Berger, N. (2013). *Boston Dynamics*. Holland.
- Universidad de Brasil, (27 de 02 de 2015). *Sistemas de mecatrónicos*. Obtenido de <http://www.mecatronica.eesc.usp.br/mecatronica/index.php/pt/laboratorios/laboratorio-de-manipulacao-robotica>
- Clausing, H. (2003). *Quality Funtion Deployment (QFD)*. Canadá
- Fowler, B. (2009). *Dinámica problemas de ingeniería*. Italia
- Huaster. (2002). *House of Quality*. Canadá
- Reyes, F(1997). *Fundamentos de Robotica*. España, McGRAW-HILL.
- MIT. (27 de 02 de 2015). *MERS*. Obtenido de <http://groups.csail.mit.edu/mers/>
- MIT. (27 de 02 de 2015). *Touch Lab*. Obtenido de <http://touchlab.mit.edu/>
- Nerg, H. (2015). *The Space Robotics Lab*. Obtenido de <http://www.robotics.com>
- Rallete, C. (29 de 06 de 2015). *RIA, Robotic Industry Association*. Obtenido de www.RoboticIndustryAssociation.com
- Reyes Cortés, F. (2011). *Robótica-Control de robots manipuladores*. España, McGRAW-HILL.
- Robo-control*. (2015). Obtenido de <http://www.sensorsrobotics.com>
- Rodriguez, J. (18 de 11 de 2012). *Manipulador robótico*. Monte Blanco, Mexico.
- Shigley. (2008). *Diseño de ingeniería mecánica*.
- ROS. (2015). *Robotic Operating System*. Obtenido de <http://www.ros.org/>

Tohoku, U. (27 de 02 de 2015). *The Space Robotics Lab*. Obtenido de <http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/e/>

Trossen robotics. (2015). Obtenido de <http://www.trossenrobotics.com>

Ulrich, K. T. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. Lisboa, Portugal.

Anexos