

DISEÑO DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA UTILIZAR EN UN LABORATORIO
DE AUTOMATIZACIÓN

NICOLÁS ALVARADO CARRILLO
YAMIL EDUARDO GUALTEROS MATIZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2.019

DISEÑO DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA UTILIZAR EN UN LABORATORIO
DE AUTOMATIZACIÓN

NICOLÁS ALVARADO CARRILLO
YAMIL EDUARDO GUALTEROS MATIZ

Proyecto integral de grado para optar al título de:
INGENIERO MECÁNICO

Dirección
WILMAR MARTÍNEZ URRUTIA
Ingeniero Electrónico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2.019

Nota de aceptación:

Jurado 1
Ing. Miguel Alfonso Morales Granados

Jurado 2
Ing. Miguel Fernando Jiménez
Jiménez

Bogotá D.C. Junio de 2.019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano General Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

Quiero dedicarle este trabajo primero que todo a mis padres quienes me apoyaron y me guiaron en todo este proceso para convertirme en un gran profesional. También me gustaría agradecerles a todas aquellas personas que conocí en esta etapa de mi vida, las cuales hicieron más amena la estancia en la universidad.

Nicolás Alvarado Carrillo

Dedico este trabajo a mis padres, abuelitos, a mi hermana, y a todas las personas que estuvieron presentes para la realización de este proceso formativo, ya que ellos fueron un gran apoyo para mí.

Yamil Eduardo Gualteros Matiz

Agradecemos de antemano a Dios por guiarnos en nuestra vida, de igual manera a nuestros padres, hermanos, familiares, compañeros, amigos, colegas, los cuales estuvieron presentes en nuestras vidas a lo largo de este proceso de formación. Así mismo queremos agradecerles a los ingenieros Carlos Cartagena, Álvaro Romero, Mauricio Veloza y en especial a nuestro director Wilmar Martínez, quienes mediante sus conocimientos nos aportaron herramientas útiles y claves para el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. ANTECEDENTES	20
1.1 HISTORIA DE LOS BRAZOS ROBOTICOS	20
1.1.1 El robot de Da Vinci	20
1.1.2 El flautista de Vaucanson	21
1.1.3 El Turco	21
1.1.4 Brazo robótico de Pollard	21
1.1.5 Brazo robótico Unimate	22
1.1.6 Brazo de Stanford	23
1.2 ESTADO ACTUAL EN LA ACADEMIA	24
1.3 IMPORTANCIA DEL USO EN LOS LABORATORIOS	25
2. CONCEPTUALIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN	26
2.1 CONCEPTOS CLAVES	26
2.1.1 Mecanismo	26
2.1.2 Grados de libertad	26
2.1.3 Brazo robótico	26
2.1.4 Cinemática	26
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS	26
2.2.1 Según sus grados de libertad	27
2.2.1.1 Robot de propósito general	27
2.2.1.2 Robot redundante	27
2.2.1.3 Robot deficiente	27
2.2.2 Según su espacio geométrico de trabajo	27
2.2.2.1 Robots cartesianos	27
2.2.2.2 Robots cilíndricos	28
2.2.2.3 Robots esféricos	28
2.2.2.4 Robots SCARA	29
2.2.2.5 Robots articulados	29
2.2.2.6 Robots paralelos	30
2.2.3 Según su tecnología motriz	31
2.2.3.1 Neumática	31
2.2.3.2 Hidráulica	31
2.2.3.3 Eléctrica	31
2.3 CINEMÁTICA DE UN BRAZO ROBÓTICO	31
2.3.1 Cinemática directa	32
2.3.2 Cinemática inversa	32
2.3.3 Metodología Denavit Hartenberg	32
2.4 PARTES DE UN BRAZO ROBÓTICO	33
2.4.1 Eslabones	34

2.4.2	Articulaciones	34
2.4.3	Elementos terminales	35
2.4.4	Base	36
2.4.5	Actuadores	36
2.4.5.1	Actuadores neumáticos	36
2.4.5.2	Actuadores hidráulicos	36
2.4.5.3	Actuadores eléctricos	36
2.4.6	Sistemas de control y componentes eléctricos	37
2.5	PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO	37
3.	DISEÑO	39
3.1	METODOLOGÍA SCORING	39
3.1.1	Etapas del scoring	39
3.1.1.1	Meta principal	39
3.1.1.2	Alternativas	39
3.1.1.3	Atributos de decisión y ponderación	41
3.1.1.4	Satisfacción de cada alternativa	41
3.1.1.5	Cálculo y selección de la alternativa	42
3.2	BRAZO ROBÓTICO SCARA	43
3.3	DISEÑO CONCEPTUAL	44
3.3.1	Diseño funcional	45
3.3.1.1	Área de trabajo del brazo robótico	46
3.4	DISEÑO DETALLADO	47
3.4.1	Efector final	48
3.4.1.1	Material de la pinza	48
3.4.1.2	Sistema de engranajes de la pinza	49
3.4.1.3	Fuerza de sujeción	52
3.4.1.4	Fuerzas que actúan sobre el efector final	54
3.4.1.5	Servomotor de la pinza	60
3.4.1.6	Fuerzas que actúan sobre el engrane	61
3.4.2	Eslabón prismático	65
3.4.2.1	Piñón del sistema	66
3.4.2.2	Selección del motor del sistema piñón cremallera	68
3.4.2.3	Comportamiento mecánico del piñón cremallera	70
3.4.3	Eslabones rotacionales	73
3.4.3.1	Eslabón rotacional corto	73
3.4.3.2	Eslabón rotacional largo	80
3.4.4	Soporte de los eslabones	88
3.4.5	Cuña de transmisión del eje	91
3.4.6	Varillas del soporte del servomotor	93
3.4.7	Estructura de soporte	95
3.4.7.1	Verificación de la estructura por el método de los elementos finitos	97
3.4.8	Placa de la estructura	98
3.5	PROGRAMACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO	103
3.5.1	Metodología Denavit Hartenberg	103

3.5.1.1 Matriz de transformación homogénea	107
3.5.2 Sistema de programación	112
3.5.2.1 Arduino	112
3.5.2.2 Librerías	114
3.5.3 Programación del código	115
3.5.4 Manual de operación y montaje	117
4. PROTOTIPO	126
4.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO	126
4.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO	126
4.2.1 Corte láser de madera	126
4.2.2 Prototipado por medio de impresión 3D	127
4.3 Prototipo	130
5. IMPACTO AMBIENTAL	132
5.1 IMPACTO AMBIENTAL EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN	132
5.1.1 Impacto ambiental del funcionamiento del prototipo	133
5.2 DESARROLLO DE LA MATRIZ DE LEOPOLD	133
5.2.1 Análisis de la matriz de Leopold	135
5.3 RECOMENDACIONES PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL	135
6. ESTUDIO FINANCIERO DEL PROYECTO	136
6.1 COSTOS	136
6.1.1 Costos de la ingeniería de diseño	136
6.1.2 Costos de materiales	137
6.1.3 Costos de fabricación	137
6.1.4 Costos del prototipo	138
6.2 ANÁLISIS DE COSTOS	139
7. CONCLUSIONES	140
8. RECOMENDACIONES	141
BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXOS	144

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Modelo del diseño del brazo de Da Vinci	20
Figura 2. El turco	21
Figura 3. Brazo para pintura en spray	22
Figura 4. Robot Unimate	23
Figura 5. Brazo de Stanford	24
Figura 6. Brazo robótico UNAL	25
Figura 7. Robot cartesiano	27
Figura 8. Robot cilíndrico	28
Figura 9. Robot esférico	28
Figura 10. Robot SCARA	29
Figura 11. Robot articulado	30
Figura 12. Robot paralelo	30
Figura 13. Diagrama de relación entre la cinemática directa e inversa	31
Figura 14. Parámetros Denavit Hartenberg	33
Figura 15. Partes de un brazo robótico	34
Figura 16. Articulaciones para robots	35
Figura 17. Pinza robótica	35
Figura 18. Botella de referencia	37
Figura 19. Brazo robótico SCARA Fanuc	44
Figura 20. Diseño funcional del brazo robótico	46
Figura 21. Área de trabajo del brazo robótico	47
Figura 22. Brazo robot SCARA	47
Figura 23. Efecto final	48
Figura 24. Partes de un engrane de dientes rectos	49
Figura 25. Engrane modificado	52
Figura 26. DCL de la botella	53
Figura 27. DCL de la pinza	54
Figura 28. DCL de la pinza con magnitudes	56
Figura 29. DCL del engrane modificado	57
Figura 30. DCL del engranaje con magnitudes	60
Figura 31. Servomotor TowerPro Sg92R	61
Figura 32. Fuerzas que actúan en un engrane	62
Figura 33. Sistema piñón cremallera	65
Figura 34. Piñón	68
Figura 35. Motoreductor 34:1 25D	70
Figura 36. Eslabón rotacional corto	73
Figura 37. TowerPro MG946r	74
Figura 38. Esquema de fuerzas del eslabón rotacional corto	75
Figura 39. DCL del eslabón rotacional corto	76
Figura 40. Cargas básicas con sus respectivas ecuaciones de singularidad	77
Figura 41. Fuerza cortante del eslabón rotacional corto	80

Figura 42. Momento flector del eslabón rotacional corto	80
Figura 43. Eslabón rotacional largo	81
Figura 44. TowerPro MG959	82
Figura 45. Esquema de fuerzas del eslabón rotacional largo	83
Figura 46. DCL del eslabón rotacional largo	84
Figura 47. Fuerza cortante del eslabón rotacional largo	87
Figura 48. Momento flector del eslabón rotacional largo	87
Figura 49. Soporte de los eslabones	88
Figura 50. Esquema del soporte	89
Figura 51. Cuña	91
Figura 52. Varillas de soporte	93
Figura 53. Estructura del brazo	95
Figura 54. Desplazamiento maximo de la estructura	97
Figura 55. Esfuerzo máximo de la estructura	98
Figura 56. Placa estructural	98
Figura 57. Fuerzas de la placa estructural	99
Figura 58. DCL de la placa estructural	102
Figura 59. Esquema cinemático del brazo robótico de 3 GDL	104
Figura 60. Roll, pitch y yaw	112
Figura 61. Placa de Arduino UNO	113
Figura 62. Ejemplo del código de programación para un servomotor	114
Figura 63. Diagrama de flujo de la programación	116
Figura 64. (Continuación)	117
Figura 65. Montaje a la estructura	118
Figura 66. Montaje a la placa servomotor	119
Figura 67. Acople servos	119
Figura 68. Montaje del rodamiento	120
Figura 69. Ensamble de la cuña	120
Figura 70. Ensamble del servomotor Mg 946r	121
Figura 71. Conexión del Arduino	121
Figura 72. Conexión al circuito impreso y L293D	122
Figura 73. Conexión de los servomotores	123
Figura 74. Soldadura	123
Figura 75. Librería de servos	124
Figura 76. Ejecución del programa	125
Figura 77. Corte laser de MDF	127
Figura 78. Eslabón rotacional corto	127
Figura 79. Eslabón rotacional largo	127
Figura 80. Puesto de impresión 3D en la FUA	128
Figura 81. Configuración del prototipado 3D	129
Figura 82. Programación del GCODE en Cura	129
Figura 83. Prototipado del engranaje del efector final	130
Figura 84. Componentes prototipados en PLA	130
Figura 85. Montaje del prototipo	131

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resumen de parámetros de funcionamiento	38
Tabla 2. Atributos de aprobación	41
Tabla 3. Ponderación de satisfacción de alternativas	43
Tabla 4. Puntuación final de cada alternativa	43
Tabla 5. Parámetros DH del brazo robótico	104

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tipos de brazos robóticos morfológicos	39
Cuadro 2. Metodología de diseño	45
Cuadro 3. Parámetros de diseño de un engrane	51
Cuadro 4. Parámetros de diseño del piñon cremallera	66
Cuadro 5. Parámetros de selección del piñon cremallera	68
Cuadro 6. Especificaciones del motorreductor seleccionado	69
Cuadro 7. Recursos ambientales perjudicados	131
Cuadro 8. Ponderación de la afectación del proceso	132
Cuadro 9. Matriz de Leopold	133
Cuadro 10. Acciones de contingencia	134
Cuadro 11. Costos de ingeniería de diseño	136
Cuadro 12. Costos de materiales	137
Cuadro 13. Costos de fabricación	138
Cuadro 14. Costos del prototipo	138
Cuadro 15. Costos totales del proyecto	139

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Catalogo para la selección de los servomotores	145
Anexo B. Catalogo para la selección de los rodamientos	147
Anexo C. Catalogo para lamina de aluminio	149
Anexo D. Catálogo de selección de perfil para la estructura	151
Anexo E. Cotización de mecanizado de piezas	153
Anexo F. Cotización impresión 3D	155
Anexo G. Código de programación	157
Anexo H. Guía de laboratorio	160
Anexo I. Plano eléctrico	176
Anexo J. Datasheet integrado L293D	178
Anexo K. Planos de prototipo	181
Anexo L. Planos	182

RESUMEN

Este proyecto se realizó con el fin de diseñar un brazo robótico cuya principal aplicación fuera su implementación en el proceso de envasado de la celda de manufactura flexible que se encuentra en el laboratorio de automatización de la Universidad de América. Como segunda aplicación, mediante el uso del prototipo se procuró que los estudiantes de Ingeniería Mecánica puedan aplicar los conocimientos obtenidos en áreas como la electrónica, la automatización, la instrumentación y control de procesos, además de darles un panorama de cómo estos dispositivos se están implementado actualmente en todas las industrias alrededor del mundo, incluso en Colombia.

Para lograr este cometido, se inició dando un panorama actual de la robótica a nivel mundial y conceptualizando algunos temas de suma importancia para comprender mejor la incidencia de la robótica en los procesos industriales y académicos.

Posteriormente se establecieron los parámetros de funcionamiento del brazo, los cuales son los grados de libertad a utilizar. También se realizó el diseño detallado del brazo, aquí se estableció la forma de las articulaciones, se calcularon los movimientos y las reacciones en los apoyos correspondientes.

Después del diseño detallado se comenzaron a realizar los planos de cada una de las partes del brazo, así como los planos del prototipado. Una vez realizados los planos se prosiguió a realizar el prototipo de algunas piezas en la impresora 3D de la Universidad de América, así mismo se fabricaron las piezas restantes mediante el corte laser de madera y se compraron otros elementos necesarios para la programación.

También se elaboraron las respectivas guías para las prácticas de laboratorio en las cuales se puede evidenciar el funcionamiento del prototipo del brazo robótico mediante las cuales los estudiantes puedan realizar una práctica en la cual programen movimientos en este.

Por último, se realizó la evaluación financiera del proyecto y el impacto ambiental de la fabricación del prototipo del brazo robótico pudo causar en el medio ambiente y las personas.

PALABRAS CLAVE: Diseño, brazo, robótico

INTRODUCCIÓN

Es de gran importancia realizar el diseño de un brazo robótico, el cual permita que los ingenieros en formación tengan mayor conocimiento en el campo de la robótica y de los procesos industriales, de tal forma que puedan asociar la teoría con la práctica.

La Universidad de América actualmente en su laboratorio de automatización, no cuenta con los equipos necesarios en su totalidad para el óptimo desarrollo de las practicas que se pueden llegar a realizar a partir de los conocimientos adquiridos en diferentes asignaturas como automatización industrial, instrumentación y control de procesos, entre otras, dando el origen del problema.

El objetivo general del proyecto es diseñar un brazo robótico para uso en laboratorio de automatización, de tal manera que se deben desarrollar los siguientes objetivos específicos;

- ✓ Evaluar el estado actual de los brazos robóticos
- ✓ Conceptualizar el proceso de robótica y definir los parámetros de funcionamiento
- ✓ Realizar el diseño detallado del brazo robótico
- ✓ Realizar los planos de fabricación, ensamble y montaje
- ✓ Realizar los planos para el prototipado
- ✓ Prototipar el brazo robótico
- ✓ Elaborar las guías de laboratorio
- ✓ Evaluar el impacto ambiental en la fabricación del prototipo
- ✓ Evaluar financieramente el proyecto

El proyecto tendrá como alcance toda compañía y/o cliente interesado que quiera incursionar, y profundizar temas de robótica, electrónica, instrumentación y control de procesos, y cuyo principal propósito sea el educativo.

Como delimitaciones se tiene que la máquina no será construida, para el diseño se debe tener en cuenta los grados de libertad, que en este caso serán 3, de igual manera estará sujeto al espacio disponible en el laboratorio.

La metodología utilizada es de diseño, investigación y diagnóstico de este tipo de tecnología para el uso académico en especial en los laboratorios de pruebas y prácticas.

La principal aplicación que se le dará a este tipo de herramienta es la implementación en la celda de manufactura flexible en el proceso de envasado del laboratorio de automatización y como segunda aplicación el prototipo se utilizará como modulo didáctico.

1. ANTECEDENTES

1.1 HISTORIA DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS

A lo largo de la historia de la humanidad muchas personas desde científicos hasta artistas, se han interesado en diseñar dispositivos que puedan llegar a suplir una extremidad o que permitan realizar actividades que normalmente solo las puede realizar un ser humano, y gracias a ese interés es que áreas como la robótica han evolucionado de una manera significativa a través del tiempo. Hoy en día son muchos los beneficios que la robótica le brinda a muchos campos como la medicina o la industria de la manufactura gracias a dispositivos que fueron pensados hace muchos años, pero que en ese entonces no se contaba con la tecnología necesaria para construirlos del modo que se quería.

Se describirán algunos de los primeros y más importantes prototipos de brazos robóticos que se han diseñado para diferentes aplicaciones a lo largo del tiempo.

1.1.1 El robot de Da Vinci. Leonardo Da Vinci creía que los movimientos que realizan ciertos seres vivos podían ser emulados por una maquina la cual tuviera una anatomía parecida a estos, fue por eso que en el año de 1.495 diseñó un dispositivo que se asemejaba a un ser humano y el cual poseía dos sistemas independientes. El sistema superior¹ contaba con dos brazos articulados y cuatro grados de libertad en las muñecas, los hombros, los codos y las manos, la parte inferior compuesta por dos piernas, rodillas, tobillos y una cadera, gozaban de tres grados de libertad cada uno.

Figura 1. Modelo del diseño del brazo de Da Vinci



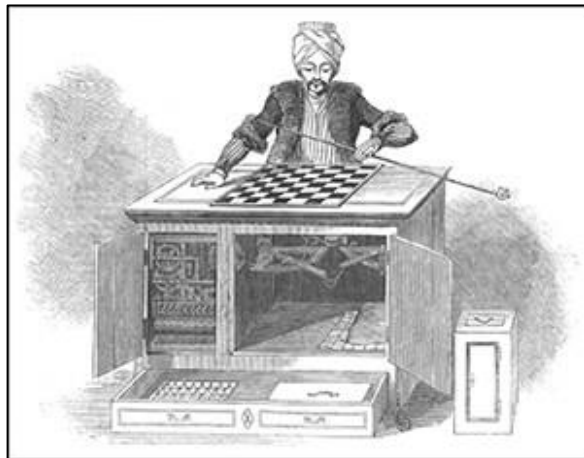
Fuente: NEWS.COM.AU. Key to legendary mechanical lion found in code for Leonardo Da Vinci's robot. Disponible en: <https://www.news.com.au/technology/da-vicinis-robot/news-story/a72faa349b70221263e4ede498d738a8>

¹ MORAN, Michael. Evolution of robotics arms. US National Center for Biotechnology Information [En línea], Mayo 2007. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4247431/>

1.1.2 El flautista de Vaucanson. Alrededor del año 1.738 el ingeniero e inventor francés Jacques de Vaucanson inventó una máquina de madera parecida a un ser² humano, la cual tenía la función de tocar la flauta. Esta tarea era realizada gracias a una serie de conductos los cuales estaban ubicados desde la boca del robot hasta un complejo sistema de eje de manivelas, el cual dependiendo de la presión del aire imprimía una fuerza en los dedos del robot por medio de alambres de acero, haciendo que estos bajaran y subieran causando la impresión que el robot estuviera vivo.

1.1.3 El turco. En 1.769 el inventor húngaro Wolfgang von Kempelen diseñó y fabricó una máquina para jugar ajedrez con la emperatriz de Austria María teresa. La máquina poseía un avanzado sistema de engranajes que permitían que el turco³ moviera su brazo izquierdo y realizara una jugada. El sistema era controlado por una persona ubicada en una recamara abajo del tablero de juego mediante un pantógrafo especial diseñado también por Kempelen. El brazo del autómatas podía moverse arriba y abajo, la muñeca podía rotar hacia los lados y los dedos podían abrir y cerrar para poder tomar la pieza.

Figura 2. El turco



Fuente: GERI WALTON. The Turk: An automaton chess player hoax. Disponible en: www.geriwalt.com/automaton-chess-player-hoax/

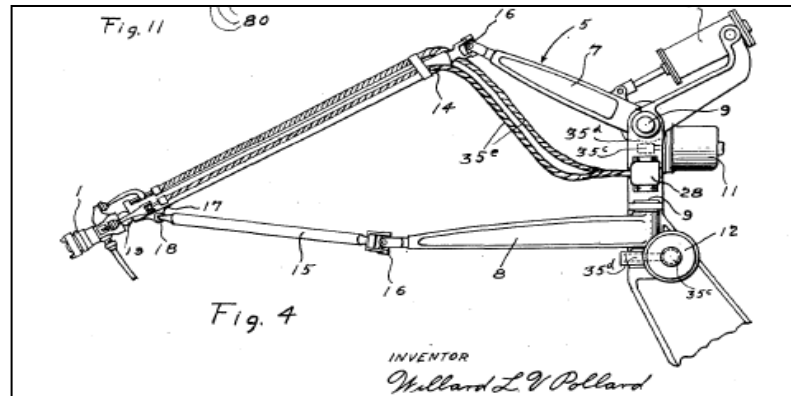
1.1.4 Brazo robótico de Pollard. Ya entrada la era moderna, y con avances significativos en el campo de la electrónica William Pollard patentó en 1.938 un brazo robot de cinco grados de libertad con control eléctrico, este fue considerado

² ESCHNER, Kat. This Eighteenth-Century Robot Actually Used Breathing to Play the Flute [En línea], Febrero 2017. Disponible en: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/>

³ MORAN, Michael. Evolution of robotics arms. US National Center for Biotechnology Information [En línea], Mayo 2007. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4247431/>

como uno de los primeros brazos robóticos con aplicabilidad industrial dado que su principal función era pintar en spray. El brazo nunca fue construido, pero sirvió como base a muchos científicos para futuros diseños debido a que el brazo de Pollard gozaba de un detalle excepcional en su diseño.

Figura 3. Brazo para pintura en spray



Fuente: CIBERNETICZOO. Spray Paint robot patents. Disponible en: cyberneticzoo.com/early-industrial-robots/1934-78-spray-paint-robot-patents-pollard-jr-pollard-roselund-and-devilbiss-comp-american/

1.1.5 Brazo robótico Unimate. En el año 1.959 George Devol y Joseph Engelberger se unieron para darle vida a Unimate, el primer robot industrial en la historia en ser vendido y producido en masa. Su primera prueba en funcionamiento fue realizando un proceso automatizado de fundición⁴ metálica por compresión en una planta de General Motors ubicada en Trenton New Jersey. Posteriormente debido al éxito de la labor de Unimate se produjeron 8.500 unidades de este, que fueron vendidas a distintas compañías. Gracias a los diseños de Devol y a la gran acogida que tuvo Unimate industrialmente, Engelberger estableció Unimation, la primera compañía de robótica del mundo.

⁴ Robotics.org. Unimate the First Industrial Robot [En línea]. Disponible en: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>

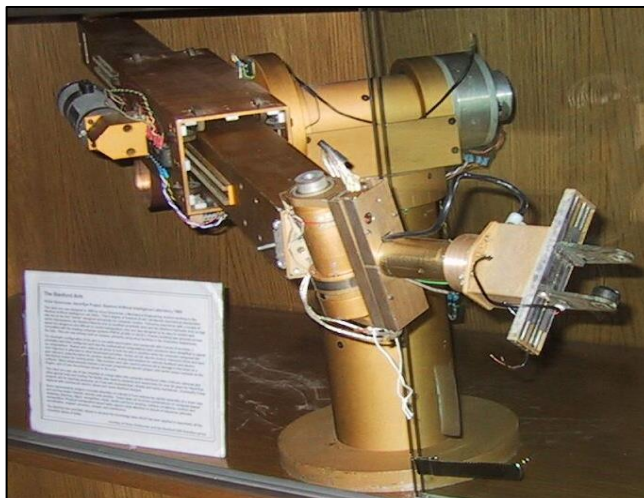
Figura 4. Robot Unimate



Fuente: ROBOTIC INDUSTRIES ASSOCIATION.
Disponible en: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>

1.1.6 Brazo de Stanford. Gracias al gran auge que provocaron los brazos robóticos, muchas entidades académicas comenzaron a investigar más en campos relacionados con la electrónica para desarrollar sus propios modelos y diseños de estos brazos. Tal es el caso de la Universidad de Stanford, quien junto con su investigador Victor Scheinman desarrolló un brazo programable⁵ de seis articulaciones rotacionales que supera por mucho a inventos anteriores gracias a la versatilidad de sus movimientos. Posteriormente en 1.973 Scheinman fundó su propia compañía llamada Vicarm, en la cual creó nuevos diseños que serían vendidos a Unimation.

Figura 5. Brazo de Stanford



Fuente: STANFORD UNIVERSITY INFOLAB.
Disponible en: <http://infolab.stanford.edu>

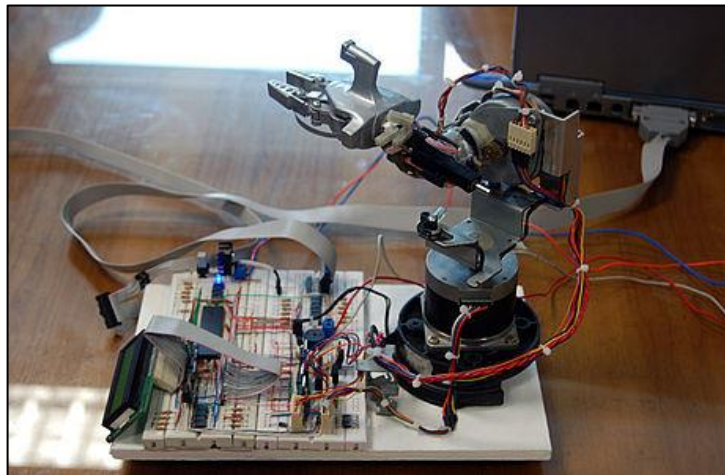
⁵ BAUER, Patricia. Victor Scheinman. Encyclopedia Britannica [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Scheinman-Victor#accordion-article-history>

1.2 ESTADO ACTUAL EN LA ACADEMIA

En la actualidad, debido a la constante evolución de la tecnología aplicada a los procesos industriales y al crecimiento del uso de dispositivos automáticos, es muy importante que los estudiantes de Ingeniería Mecánica aprendan el funcionamiento básico de un brazo robótico mientras están cursando sus materias en la universidad para que al momento de empezar la vida laboral tengan buenas bases acerca de la programación, diseño, y aplicabilidad de un brazo robótico.

En Colombia son varias las instituciones de educación superior que cuentan con un brazo robótico dentro de sus recursos académicos para enseñar conceptos teóricos de diferentes áreas, tal es el caso de la Universidad Nacional sede Medellín en la cual varios estudiantes de distintas Ingenierías diseñaron y construyeron un brazo el cual puede realizar movimientos hacia arriba, hacia abajo, a los lados, abrir y cerrar las pinzas.

Figura 6. Brazo robótico UNAL



Fuente: UNAL Brazo robótico, producto del ingenio de estudiantes UN. Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/brazo-robotico-producto-del-ingenio-de-estudiantes-un.html>

Otra institución que también posee un dispositivo de estos es la Universidad Minuto De Dios, en la cual cuentan con un manipulador robótico de tres grados de libertad, el cual se usa en el laboratorio de electrónica de la universidad con el fin de que los estudiantes realicen prácticas enfocadas principalmente en sistemas de producción, ensamble y manipulación de objetos.

1.3 IMPORTANCIA DEL USO EN LOS LABORATORIOS

No cabe duda que hoy en día el mundo está atravesando por la era de la tecnología, la cual no solo se ha adaptado a la perfección al diario vivir de los seres humanos, sino que también ha encontrado la manera de obtener un protagonismo importante en el ámbito industrial, lo cual se puede corroborar con el crecimiento en el interés de las empresas manufactureras y de servicios en adquirir maquinarias y software de última tecnología para optimizar sus procesos productivos, incrementar la eficiencia y reducir el error humano. Una de estas maquinarias son los brazos robóticos, los cuales son usados ampliamente para trabajos donde se requiere masas de producción muy elevadas.

Por ejemplo, en la industria automotriz son usados para soldar y pintar partes de forma precisa, también se usan para el transporte de pequeñas a grandes cantidades de producto de un punto a otro, entre otras muchas aplicaciones. Una ventaja que posee el uso de un brazo robótico en un laboratorio es la interacción que el estudiante logra con este dispositivo al momento de manipularlo, lo cual puede despertar el interés del estudiante en profundizar más sobre esta temática para que más adelante se puedan tener las herramientas necesarias para realizar trabajos de investigación o trabajos de grado relacionados con campos de aplicación de la robótica.

Por lo dicho anteriormente se hace indispensable que los estudiantes de Ingeniería Mecánica tengan un primer encuentro con un brazo robótico en la universidad de América, en donde puedan apreciar que partes lo conforman, su funcionamiento, su programación y su aplicabilidad, para que así adquieran ciertas destrezas con este tipo de dispositivos que les permitan defenderse y adaptarse más adelante en el ámbito laboral.

2. CONCEPTUALIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN

La robótica es la ciencia encargada de estudiar todo lo relacionado con los robots, como su movimiento, su control, su diseño y su aplicabilidad. En la actualidad la mayoría de procesos industriales de alta producción en masa cuentan con un sistema⁶ robótico, el cual se compone de un manipulador, un sistema de control, una computadora y en ocasiones de un medio de retroalimentación gobernado por sensores. Gracias a todo este conjunto de elementos, el sistema permite generar un mayor control sobre el proceso final.

2.1 CONCEPTOS CLAVES

2.1.1 Mecanismo. Un mecanismo es una cadena cinemática conformada por la unión de varios eslabones a una serie de articulaciones independientes que permiten diferentes tipos de movimientos, pero obligatoriamente una de estas tiene que estar fija.

2.1.2 Grados de libertad. Los grados de libertad (GDL o sus siglas en inglés DOF) son los movimientos independientes que puede realizar cada articulación respecto al eslabón en el que se encuentre.

2.1.3 Brazo robótico. Un brazo robótico es un dispositivo electromecánico diseñado con el fin de mover, agarrar o sostener objetos mediante el control y la automatización de los movimientos de sus articulaciones y eslabones. Industrialmente son ampliamente usados para aumentar la velocidad de producción y reducir el error humano.

2.1.4 Cinemática. Estudia el movimiento de un cuerpo sin tener en cuenta las fuerzas externas que actúan en este para ocasionarlo, además tiene en cuenta variables como la posición, velocidad y aceleración con respecto a un punto específico.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS

Los brazos robóticos pertenecen al grupo de robots estacionarios⁷, debido a que estos siempre realizan su secuencia de movimientos con respecto a una base inmóvil fija. En la industria existen varios tipos de robots estacionarios que se pueden diferenciar por su tamaño, por la configuración de sus articulaciones, por

⁶ TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. p. 17

⁷ CS, Chong. Stationary Robots. CNC Machine tools [En línea], Septiembre 2017, Disponible en: <https://cnc-machine-tools.com/stationary-robots/>

su aplicación, por el método de programación, por sus grados de libertad, entre otras razones.

2.2.1 Según sus grados de libertad⁸. Esta clasificación establece la capacidad que posee un brazo robótico para realizar una tarea según el rango de movimiento y precisión que tengan sus articulaciones.

2.2.1.1 Robot de propósito general. Es un robot que posee exactamente seis grados de libertad, y el cual se puede mover libremente en tres dimensiones.

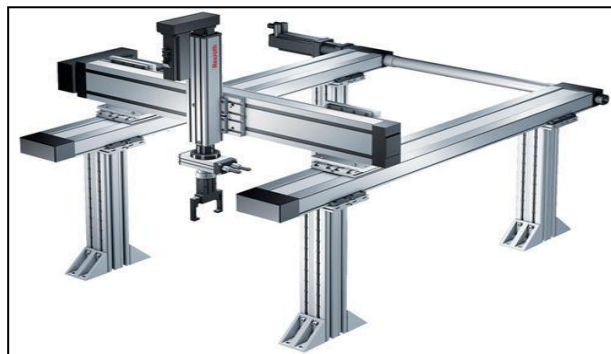
2.2.1.2 Robot redundante. Es un robot que posee más de seis grados de libertad y provee una mayor complejidad en sus movimientos, es requerido para trabajos en espacios reducidos.

2.2.1.3 Robot deficiente. Es un robot que posee menos de seis grados libertad, no es usado para movimientos complejos debido a sus grados de libertad, pero es usado para procesos de ensamble en un solo plano de trabajo.

2.2.2 Según su espacio⁹ geométrico de trabajo. Esta clasificación hace referencia al movimiento geométrico que realiza el brazo robótico, dependiendo de su espacio de trabajo disponible, su diseño y del tipo de articulaciones que utiliza.

2.2.2.1 Robots cartesianos. Los robots cartesianos o también llamados robots de pórtico, son robots que poseen tres articulaciones que se mueven linealmente por medio de rieles ubicados en las posiciones cartesianas X, Y, y Z. También poseen una pinza unida a una muñeca, la cual le permite rotar.

Figura 7. Robot cartesiano



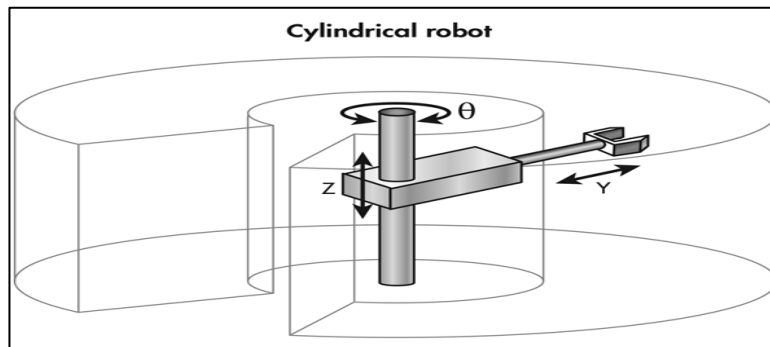
Fuente: INDIAMART. Cartesian robot. Disponible en: www.indiamart.com/product-detail/cartesian-robot-11624833797.html

⁸ TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. p. 19

⁹ Ibid., p. 25

2.2.2.2 Robots cilíndricos. Este tipo de robots cuentan con tres articulaciones de las cuales una puede rotar, mientras las otras dos se mueven linealmente. El brazo realiza su movimiento describiendo una forma cilíndrica en el espacio. Son ampliamente usados para la manipulación y transporte de piezas y para trabajar la soldadura de punto.

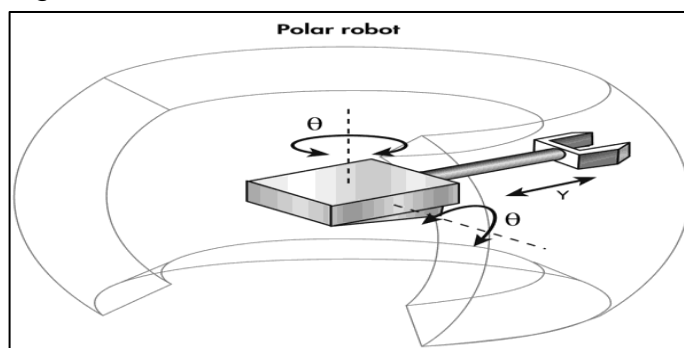
Figura 8. Robot cilíndrico



Fuente: MACHINE DESIGN. What is the difference between industrial robots. Disponible en: www.machinedesign.com/robotics/what-s-differencebotics/what-s-difference-between-industrial-robots

2.2.2.3 Robots esféricos. Los robots esféricos o también llamados robots polares, poseen una configuración un poco más complicada que los anteriores, ya que cuentan con dos articulaciones que pueden realizar rotación y una que se puede mover linealmente. Gracias a esto el brazo se mueve describiendo una forma esférica en el espacio. Entre sus aplicaciones más importantes están la soldadura por arco y por gas, procesos de fundición a presión y procesos de rectificación de piezas.

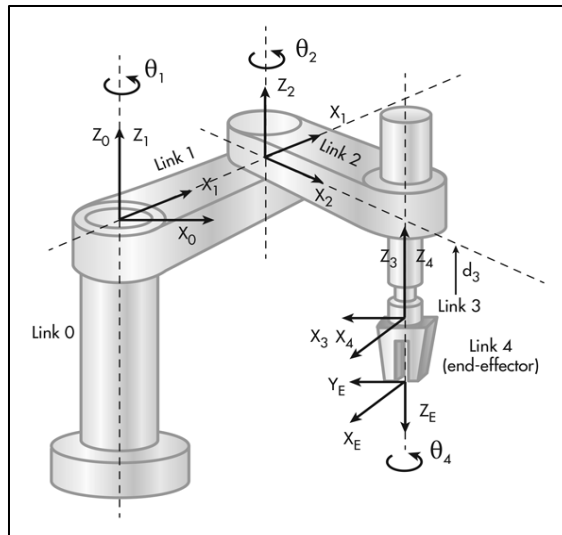
Figura 9. Robot esférico



Fuente: MACHINE DESIGN. What is the Difference between industrial robots. Disponible en: www.machinedesign.com/robotics/what-s-difference-between-industrial-robots

2.2.2.4 Robots SCARA. Esta clase de robots cuya sigla significa (Selective Compliant Articulated Robot Arms), es ampliamente usada en la industria en procesos de ensamble que requieran mucha precisión, ya que su diseño de ejes paralelos les permite realizar movimientos muy limpios horizontalmente a pesar de ser rígidos verticalmente, en su mayoría son de un tamaño pequeño debido a que trabajan a una gran velocidad para grandes cargas de producción. Entre sus principales aplicaciones está el ensamble de piezas pequeñas, manipulación de herramientas para corte o rectificación, embalaje y posicionamiento de piezas a gran velocidad.

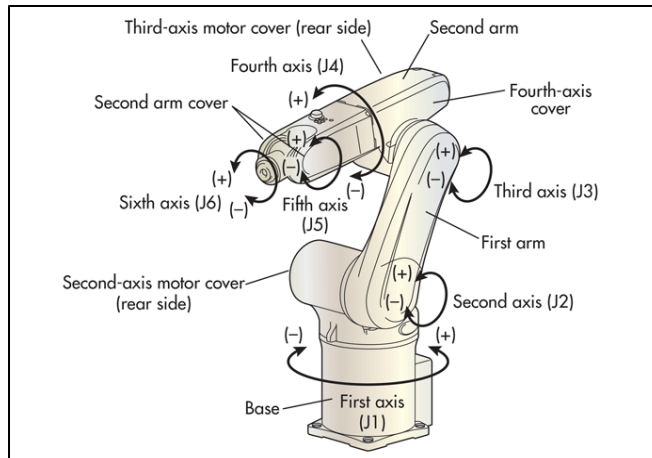
Figura 10. Robot SCARA



Fuente: MACHINE DESIGN. What is the difference between industrial robots. Disponible en: www.machinedesign.com/robotics/what-s-difference-between-industrial-robots

2.2.2.5 Robots articulados. Los robots articulados cuentan con una característica distintiva con respecto a otros tipos de robots, la cual es el número de articulaciones rotatorias que poseen, ya que a diferencia de los mencionados anteriormente estos pueden llegar a tener más de diez de estas. Todo el brazo está conectado a una base que le permite rotar, además cada articulación posee su propio eje, el cual le adiciona un grado de libertad más al brazo. Son usados principalmente para procesos de ensamble y levantamiento de cargas pesadas.

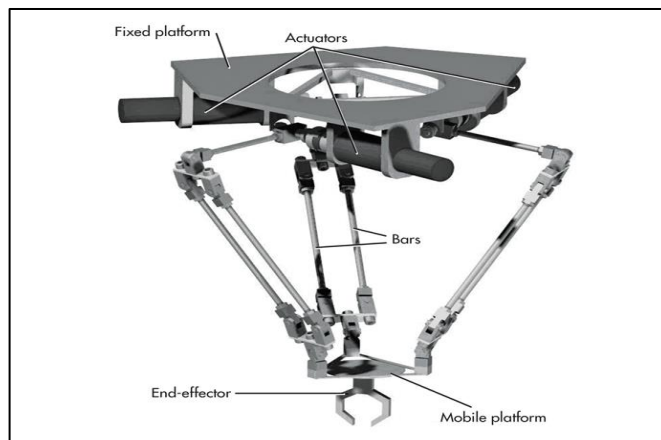
Figura 11. Robot articulado



Fuente: MACHINE DESIGN. What is the Difference between industrial robots. Disponible en: www.machinedesign.com/robotics/what-s-difference-between-industrial-robots

2.2.2.6 Robots paralelos. Este tipo de robots también llamados robots delta¹⁰, están conformados por tres barras idénticas en forma de paralelogramo que se mueven independientemente y están conectadas a una plataforma móvil la cual posee un efector final en forma de pinzas.

Figura 12. Robot paralelo



Fuente: MACHINE DESIGN. What is the Difference between industrial robots. Disponible en: www.machinedesign.com/robotics/what-s-difference-between-industrial-robots

¹⁰ British Automation and Robot Association. Delta Robots [En línea]. Disponible en: <http://www.bara.org.uk/robot-types/delta-robots.html>

2.2.3 Según su tecnología¹¹ motriz. Enuncian el tipo de accionamiento que permite al robot realizar sus movimientos. A continuación, se describirán las tecnologías más usadas para dicho propósito.

2.2.3.1 Neumática. Es la tecnología más limpia y eficaz debido a que el aire permite que los movimientos del robot sean precisos y rápidos, pero en consecuencia a que el aire es un fluido compresible, controlarlo resulta bastante tedioso y costoso.

2.2.3.2 Hidráulica. Es ampliamente utilizada cuando el robot requiere levantar grandes cargas, esto es posible gracias a la fuerza que proporciona el fluido hidráulico que por lo general es un aceite. La desventaja más notoria son las fugas a través de los componentes del robot.

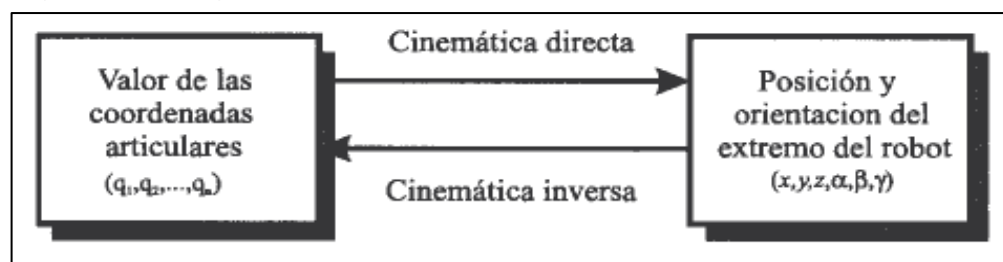
2.2.3.3 Eléctrica. Es la tecnología que usan con mayor frecuencia los brazos robóticos, debido a que sus movimientos se pueden controlar relativamente fácil por medio de servomotores eléctricos.

2.3 CINEMÁTICA DE UN BRAZO ROBÓTICO

La cinemática es una rama de la física que estudia el movimiento del brazo robótico con respecto a su base sin tener en cuenta las fuerzas¹² que este mismo produce, este estudio se interesa por la descripción analítica del espacio en el que se mueve el brazo robótico, teniendo en cuenta parámetros de posición y orientación del elemento final de éste o los valores de las coordenadas articulares.

Se utiliza el álgebra vectorial y matricial para encontrar el posicionamiento de un objeto en un espacio tridimensional con respecto a un objeto de referencia fijo, que por lo general es la base del brazo robótico.

Figura 13. Diagrama de relación entre la cinemática directa e inversa



Fuente: BARRIEROS, Antonio. et al. Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España S. A. 2007. p 94.

¹¹ TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. p. 59

¹² REYES CORTÉS, Fernando. Robótica. Control de robots manipuladores. México.: Alfaomega Grupo Editor S.A. 2011. p. 210

2.3.1 Cinemática directa. Es el estudio del movimiento del brazo robótico mediante relaciones que existen entre el posicionamiento¹³ y orientación de las articulaciones, conocidas, y gracias a matrices de transformaciones se puede encontrar la posición y orientación del efector final, como se aprecia a continuación;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \mathbf{fR}(q)$$

2.3.2 Cinemática inversa. Es un estudio en donde las ecuaciones son no lineales para los valores de las articulaciones, por consiguiente, pueden existir diferentes soluciones, soluciones infinitas o no encontrar solución alguna para el problema en específico, consiste en encontrar mediante matrices¹⁴ de transformación los valores de posicionamiento y orientación de cada una de las articulaciones, conociendo el posicionamiento y la orientación del efector final, como se aprecia a continuación;

$$\mathbf{f}_R^{-1}(x, y, z, \theta, \phi, \psi) = (q)$$

2.3.3 Metodología Denavit Hartenberg. En el año 1.955 Jacques Denavit y Richard Hartenberg idearon un método para determinar el movimiento relativo¹⁵ de un eslabón con respecto a otro eslabón, contenidos dentro de la misma cadena cinemática en un manipulador de n grados de libertad. El método consiste en definir cuatro parámetros y un sistema de coordenadas en cada eslabón, exceptuando la base y el efector final. A continuación, se definirán cada uno de los parámetros.

- ✓ El parámetro (α_i) es el ángulo al que debe girarse al eje Z_{i-1} alrededor del eje X_i para quedar alineado con Z_i
- ✓ El parámetro (θ_i) es el ángulo al que debe girarse al eje X_{i-1} alrededor del eje Z_{i-1} para quedar paralelo con X_i
- ✓ El parámetro (d_i) es la distancia que X_{i-1} se tiene que desplazar en la dirección Z_{i-1} para quedar alineado con X_i

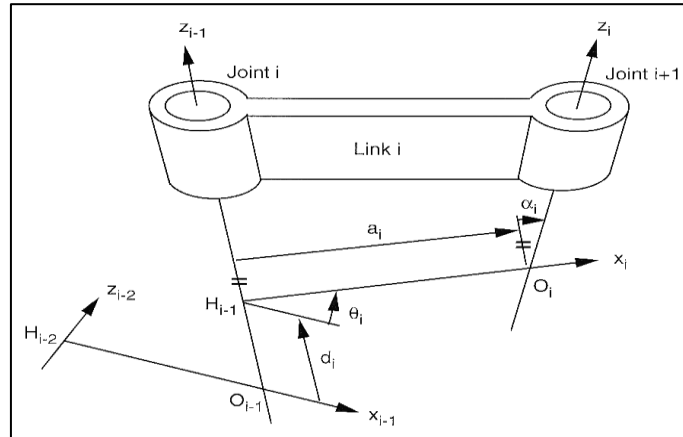
¹³ REYES CORTÉS, Fernando. Robótica. Control de robots manipuladores. México.: Alfaomega Grupo Editor S.A. 2011. p. 211

¹⁴ Ibid., p. 212

¹⁵ TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. p. 59

- ✓ El parámetro (a_i) es la distancia que el sistema Z_{i-1} se tiene que desplazar en la dirección X_i para coincidir con el origen del sistema Z_i

Figura 14. Parámetros Denavit Hartenberg



Fuente: TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. p. 58

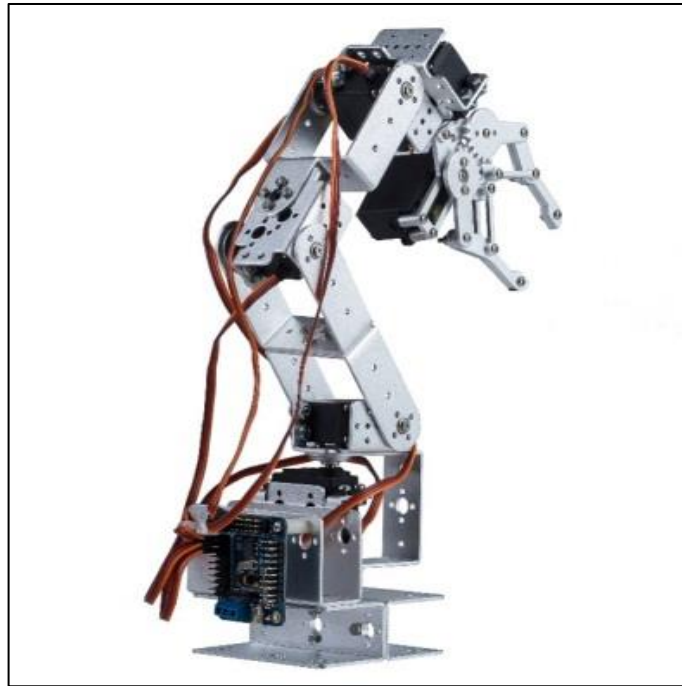
2.4 PARTES DE UN BRAZO ROBÓTICO

Algunos de los elementos del brazo robótico se asemejan a términos como cadera, hombro, codo¹⁶ o muñeca refiriéndose al posicionamiento que tienen cada uno dentro de la morfología del brazo.

Un brazo robótico está conformado por un conjunto de piezas y elementos, que pueden ser mecánicas o eléctricas, las cuales cumplen diferentes funciones establecidas, que se ven limitadas por los requerimientos del usuario que lo utilizara. Cabe aclarar que no todos los brazos requieren de la misma cantidad de partes, ya que estas dependerán de los grados de libertad (GDL o sus siglas en inglés DOF) y de la complejidad del entorno del robot, ya que este determina el tipo de movimiento que se generara para realizar las tareas asignadas.

¹⁶ BARRIEROS, Antonio, *et al.* Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 16

Figura 15. Partes de un brazo robótico



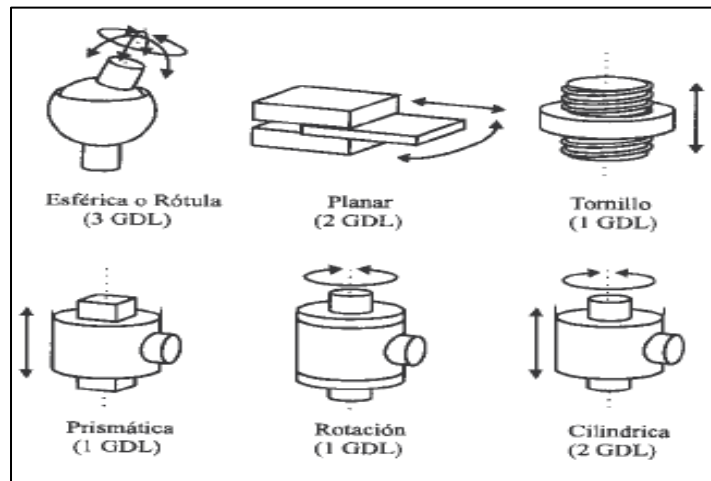
Fuente: ELABPEERS. Robotic arm set.
Disponible en: <https://www.elabpeers.com/robotic-arm.html>

2.4.1 Eslabones. Son elementos rígidos los cuales se diseñan y construyen con diferentes configuraciones geométricas dependiendo de la función que deba realizar, y los cuales se encuentran unidos a juntas o articulaciones.

2.4.2 Articulaciones. También se conocen como juntas, y son elementos que permiten realizar los movimientos relativos¹⁷ entre los eslabones que estén de manera consecutiva. Las articulaciones permiten movimientos de rotación, desplazamiento o ambas. Los grados de libertad (GDL o DOF) son los movimientos independientes que puede realizar cada articulación respecto al eslabón en el que se encuentre.

¹⁷ BARRIEROS, Antonio. *et al.* Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 16

Figura 16. Articulaciones para robots



Fuente: BARRIEROS, Antonio, et al. Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 17

2.4.3 Elementos terminales. También son denominados como efectores¹⁸ finales, y son los elementos que permiten la interacción del brazo robótico con su entorno, dentro de estos elementos se encuentran diferentes tipos de herramientas tales como pinzas soldadoras, dispersores de pintura, cañones de agua a presión, ventosas entre otros, de igual manera se pueden encontrar elementos de aprehensión tales como pinzas o garras.

Figura 17. Pinza robótica



Fuente: TDRobotica. Disponible en: tdrobotica.co/1920boxdefault/pinza-robot-dagu.jpg

¹⁸ BARRIEROS, Antonio. et al. Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 44

2.4.4 Base. Es una estructura diseñada para dar soporte y de esta manera mantener en una posición estable el brazo robótico mientras este ejecuta las diferentes funciones que debe cumplir.

2.4.5 Actuadores. Son los elementos que permiten ejecutar una acción mecánica, mediante una energía que es proporcionada por diferentes tipos de fuentes, y por ende transmitir una fuerza que genera diferentes movimientos¹⁹ en otros elementos del robot. Algunas de las características que se tienen en cuenta al momento de seleccionar los actuadores son la potencia, la controlabilidad, la precisión, la velocidad, el mantenimiento, el coste, el peso y el volumen.

Los actuadores se pueden clasificar dependiendo de la fuente de alimentación que puedan utilizar.

2.4.5.1 Actuadores neumáticos. Son aquellos elementos que se alimentan a partir de una fuente de energía producida por aire comprimido²⁰ mediante sistemas neumáticos que trabajan entre 3 a 10 bar.

Existen dos tipos de estos actuadores, los cilindros neumáticos, que trabajan mediante el desplazamiento del embolo del cilindro debido a la presión generada por el aire donde se pueden estar configurados como simple y doble efecto, estos tipos de actuadores no presentan buena precisión de posicionamiento debido a que se hace solo un control del final de carrera del cilindro, de igual manera se encuentran los motores neumáticos que gracias a la presión de aire y debido a su configuración de aletas rotativas o de pistones axiales, estos generan un movimiento rotativo en un eje; es necesaria una instalación previa de un sistema neumático para su posible funcionamiento.

2.4.5.2 Actuadores hidráulicos. Son aquellos elementos que utilizan aceites minerales²¹ o sintéticos a presiones entre 50 y 100 bar, para alimentar actuadores tales como cilindros tanto de simple y doble efecto, y motores hidráulicos generalmente de aletas o de pistones axiales.

Son actuadores más robustos y que presentan mayores capacidades de carga, presentan mejor control de posicionamiento debido a que se hace un control continuo del actuador.

2.4.5.3 Actuadores eléctricos. Son aquellos elementos que tienen como fuente de energía la corriente eléctrica. Las características que más los destacan son el

¹⁹ BARRIROS, Antonio. *et al.* Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 26

²⁰ Ibid., p. 27

²¹ Ibid.,p. 28

eficiente control²², la precisión de trabajo y la sencillez del sistema, tales como: motores de corriente continua, motores de corriente alterna y motores paso a paso.

2.4.6 Sistemas de control y componentes eléctricos. Son los elementos encargados del sistema de control, la conducción eléctrica entre los demás elementos del brazo robótico. Mediante conexiones entre una placa de control, un ordenador y un codificador, el brazo robótico puede cumplir determinadas funciones preestablecidas.

2.5 PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO

A continuación, se establecerán los parámetros mediante los cuales se podrá realizar el diseño del brazo robótico para su implementación en el laboratorio de automatización con el fin de que este se adapte a la aplicación en el proceso de envasado de la celda de manufactura.

Se ha establecido un área de trabajo para el óptimo funcionamiento del robot de 30 [cm] x 70 [cm], la estructura que sostendrá el brazo robótico tendrá una altura desde el suelo de 103 [cm].

El brazo robótico estará diseñado para realizar una trayectoria de 270° aproximadamente sobre su eje de rotación, y el cual llevará una pequeña botella de plástico con contenido dentro de ella y con tapa, la cual tendrá una altura de 11,345 [cm], con diámetros como el de la boquilla de 2,33 [cm], diámetro de la rosca de 2,73 [cm], diámetro de la barriga de 4,33 [cm] y con un peso de 10 [g], y llegará a la botella con un ataque horizontal hacia la barriga de la botella.

²² BARRIEROS, Antonio. *et al.* Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 29

Figura 18. Botella de referencia



Fuente: elaboración propia

Se puede encontrar de manera más resumida la información antes dada, en la siguiente tabla;

Tabla 1. Resumen de parámetros de funcionamiento

Parámetro	Valor
Altura de la estructura de la base	103 cm
Apertura máxima del efector final	3 cm
Área de soporte de la base	70 cm x 30 cm
Área de trabajo	1463 cm ²
Grados de libertad	3 DOF
Horas de uso máximo	4 h
Peso de la botella	1,4715 N
Peso máximo de carga	3 N

Fuente: elaboración propia

3. DISEÑO

El diseño del brazo robótico contará solo con tres grados de libertad, dado que la aplicación a la cual se adaptará el diseño en el proceso de envasado de la celda de manufactura flexible del laboratorio de automatización, no requiere la implementación de un grado de libertad adicional.

Debido a que existen diferentes tipos de configuración para los brazos robóticos se plantearán diferentes alternativas, y mediante el método de ponderación por Scoring se escogerá la mejor opción para el desarrollo del diseño para el proyecto.

3.1 METODOLOGÍA SCORING

Para evaluar las diferentes alternativas se decidió escoger la metodología de ponderación lineal scoring, la cual le asigna una puntuación numérica a cada una de las alternativas de acuerdo al cumplimiento acertado de unos atributos establecidos con anterioridad.




3.1.1 Etapas del scoring. Esta metodología consta de seis etapas que facilitan su realización las cuales son;

- ✓ Identificar la meta principal del problema
- ✓ Identificar las alternativas
- ✓ Listar los atributos de decisión
- ✓ Asignar una ponderación para cada atributo
- ✓ Establecer la satisfacción de cada alternativa de acuerdo a los atributos
- ✓ Calcular la puntuación más alta y seleccionar la alternativa

3.1.1.1 Meta principal. Seleccionar el diseño de brazo robótico que cumpla de una mejor manera los parámetros establecidos.

3.1.1.2 Alternativas. De acuerdo a los requerimientos y condiciones mencionados en la parametrización, se deben evaluar diferentes configuraciones expuestas en la conceptualización, para el diseño del brazo robótico, en donde se tienen en cuenta características que faciliten su desarrollo. A continuación, se expondrán las alternativas más acertadas y que mejor se acomodan a la necesidad.

Cuadro 1. Tipos de brazos robóticos morfológicos

Alternativa		Características
<p>Brazo robótico antropomórfico de accionamiento mecánico</p>		<p>Movimientos efectuados por mecanismos acoplados a los servomotores de alta potencia, los cuales se encuentran en la base</p> <p>Los efectores finales pueden ser de accionamiento mecánico o neumático</p> <p>Diseño de alto grado de dificultad</p> <p>Permite gran movimiento longitudinal, perdiendo movimiento rotacional</p>
<p>Brazo robótico articulado</p>		<p>Robot de movimientos precisos y complejos</p> <p>Cuenta con un movimiento independiente en cada articulación</p> <p>Diseño de alto grado de dificultad</p> <p>Requiere gran potencia en los servomotores</p>
<p>Brazo robótico SCARA</p>		<p>Diseño de dificultad media</p> <p>Movimientos de grandes velocidades para cargas considerables, gracias a servomotores compactos</p> <p>Se adapta a áreas de trabajo reducidas</p> <p>Movilidad sencilla debido a las diferentes configuraciones de sus articulaciones</p>

Fuente: elaboración propia

3.1.1.3 Atributos de decisión y ponderación. Los atributos, según la metodología reciben una ponderación que se encuentra en un rango de 1 hasta 5 puntos, donde (1 indica muy poca importancia, 2 poca importancia, 3 importancia media, 4 algo de importancia y 5 mucha importancia).

Los atributos expuestos a continuación fueron discutidos y seleccionados con el director del proyecto de acuerdo a los parámetros de diseño establecidos con anterioridad, ya que permitirán escoger de la mejor manera la alternativa.

Tabla 2. Atributos de ponderación

Atributos	Ponderación
Cinemática del brazo robótico	5
Costo de los servomotores	3
Recorrido del brazo robótico	4
Velocidad del brazo robótico	5

Fuente: elaboración propia

- ✓ Cinemática del brazo robótico. Son los cálculos matemáticos implícitos en el diseño del brazo robótico, ya que esta depende de la configuración geométrica de los eslabones y de la tarea a realizar, esta puede ser directa o inversa. Debido a que la aplicación a la cual se va a adaptar el brazo robótico no requiere una gran complejidad en sus movimientos, la cinemática no debe ser compleja
- ✓ Costo de los servomotores. Dado que la aplicación a la cual se adaptará el brazo robótico en el laboratorio no demanda una gran exactitud en los movimientos del dispositivo, los servos no requerirán un funcionamiento especial
- ✓ Recorrido del brazo robótico. El brazo robótico cuenta con un área de trabajo establecida en el laboratorio, por este motivo el recorrido que este realiza, se debe efectuar de la manera más eficiente y sencilla posible
- ✓ Velocidad del brazo robótico. Se debe garantizar que mediante la velocidad con la cual se mueve el brazo robótico no afecte de ningún modo el elemento que se desea desplazar de un punto a otro

3.1.1.4 Satisfacción de cada alternativa. En este paso se le asigna a cada alternativa una puntuación de acuerdo al nivel de satisfacción con en el que dichas alternativas cumplen cada atributo de decisión. La puntuación se encuentra en un rango de 1 hasta 8 puntos, donde (1 indica extra baja satisfacción, 2 muy baja satisfacción, 3 baja satisfacción, 4 poco baja satisfacción, 5 media satisfacción, 6 poco alta satisfacción, 7 alta satisfacción, 8 muy alta satisfacción y 9 extra alta satisfacción).

Tabla 3. Ponderación de satisfacción de alternativas

Atributos	Robot antropomórfico	Robot articulado	Robot Scara
Cinemática del brazo robótico	2	5	7
Costo de los servomotores	3	3	5
Recorrido del brazo robótico	5	7	8
Velocidad del brazo robótico	5	7	8

Fuente: elaboración propia

3.1.1.5 Cálculo y selección de la alternativa. Este es el último paso de la metodología Scoring, aquí se selecciona la mejor alternativa gracias a un simple cálculo, el cual toma el valor de satisfacción de cada alternativa y lo multiplica por la ponderación de importancia de cada criterio. Posteriormente se realiza una sumatoria de cada multiplicación para cada una de las alternativas, y la alternativa que más puntuación tenga será la mejor opción para seleccionar.

Tabla 4. Puntuación final de cada alternativa

Atributos	Ponderación	Robot antropomórfico		Robot articulado		Robot Scara	
Cinemática del brazo robótico	5	2	10	5	25	7	35
Costo de los servomotores	3	3	9	3	9	5	15
Recorrido del brazo robótico	4	5	20	7	28	8	32
Velocidad del brazo robótico	5	5	25	7	35	8	40
Total			64		97		122

Fuente: elaboración propia

Para el caso del robot antropomórfico se establecieron esas ponderaciones debido a que a pesar de que es una alternativa viable, su diseño posee una mayor complejidad debido a sus mecanismos y a su geometría indefinida, además dado que todo su movimiento está ligado a solo uno o dos servomotores este robot ejecuta sus movimientos de una forma lenta e imprecisa. por otro lado, a pesar que su recorrido lineal es muy bueno, su recorrido rotacional es un poco pobre, lo cual lo condiciona de una manera importante para realizar de una manera óptima la tarea requerida en el laboratorio.

Para el caso del robot articulado se establecieron dichas ponderaciones ya que es un robot que dado a sus características cumpliría de una manera eficaz la

aplicación para la cual se solicita, pero debido a que este tipo de robots posee una compleja gama de movimientos dado que posee un grado de libertad por cada articulación, se incurría en más costos por la cantidad de servomotores que se necesitarían, además el cálculo de la cinemática sería más complicado debido a sus movimientos, y lo que se requiere es que la alternativa seleccionada realice la tarea solicitada de la manera más sencilla y eficiente posible.

Para el caso del brazo robótico SCARA se establecieron esas ponderaciones porque es el brazo robótico que mejor se adapta a la necesidad del proyecto gracias a que el diseño mecánico de la cinemática no es complejo, la velocidad de sus movimientos es alta y precisa, por otro lado, gracias a la morfología de sus eslabones en forma de escalera, le permite realizar los movimientos requeridos en diferentes instancias o pasos. Además, este tipo de robots son ideales para trabajos de posicionamiento rápido de objetos en espacios reducidos. Por estas razones y de acuerdo con la ponderación Scoring aplicada, en este proyecto la alternativa que mejor satisface el problema en el laboratorio de acuerdo a los parámetros y atributos establecidos es el brazo robótico tipo SCARA.

3.2 BRAZO ROBÓTICO SCARA

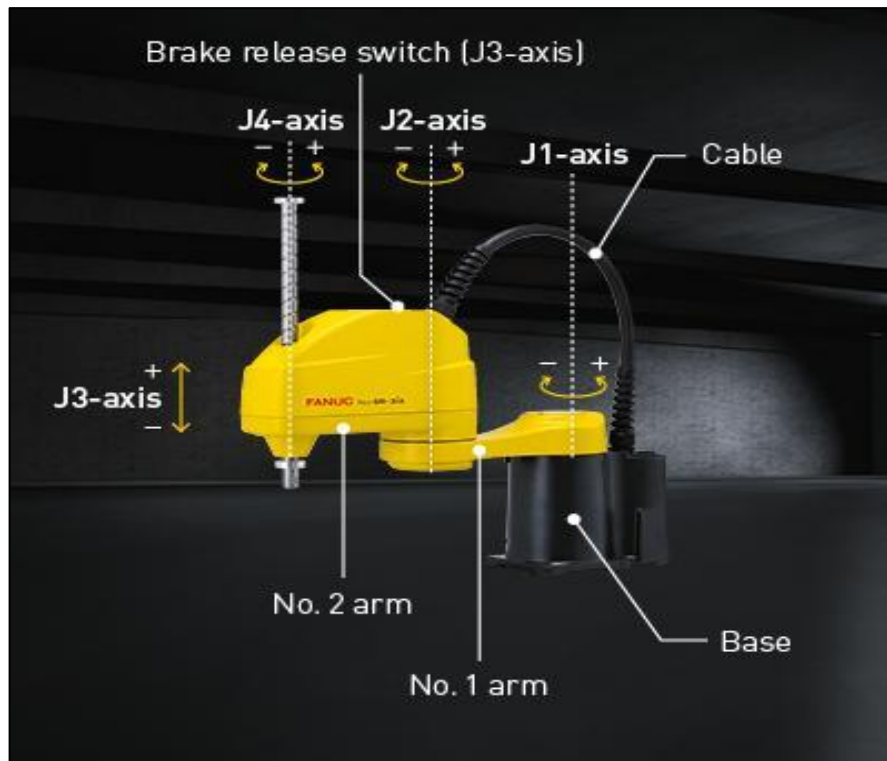
El primer robot SCARA diseñado en el mundo surgió en el laboratorio de robótica de la universidad de Yamanashi en el año 1978 gracias al ingenio del profesor Hiroshi Makino, quien ideó un prototipo de robot que contaba con cuatro ejes de movimiento y una asombrosa simplicidad²³ en su diseño, ya que poseía una limitada movilidad, pero gozaba de una gran precisión y velocidad.

El brazo robótico SCARA es uno de los robots más ampliamente usados industrialmente en el mundo, gracias a su habilidad estrella de tomar una pieza u objeto de una posición inicial y ubicarla en una posición final a gran velocidad. La traducción al español del acrónimo de estos robots es “brazo robótico articulado de obediencia selectiva”, lo cual quiere decir que es obediente²⁴ en cuanto a movimientos se refiere en los ejes X, Y y rígido en el eje Z. Además de su habilidad especial, los robots SCARA son fáciles de diseñar y de fabricar en comparación con otros tipos de robots, debido a que la complejidad de su geometría depende del fabricante y de la aplicación, también los movimientos de sus articulaciones por lo general ya están establecidos debido a que los robots SCARA son robots de cuatro ejes con movimiento en X, Y y rotación en Z.

²³ Carnegie Mellon University. SCARA. Robot Hall of Fame [En línea]. Disponible en: <http://www.robothalloffame.org/inductees/06inductees/scara.html>

²⁴ Fanuc. How to know when a SCARA robot is the right choice for your application [En línea]. Disponible en: <https://www.fanuc.eu/de/en/robots/robot-filter-page/scara-series/selection-support>

Figura 19. Brazo robótico SCARA Fanuc



Fuente: Fanuc. How to know when a SCARA Robot is the right choice for your application. Disponible en: www.fanuc.eu/-de/en/robots/roBot-filter-page/scara-series/selection-upport

3.3 DISEÑO CONCEPTUAL

Por medio del siguiente cuadro se presentarán las especificaciones que se van a tener en cuenta en el desarrollo del diseño del brazo robótico, en las cuales se describirán ordenadamente las tareas a realizar para la metodología de diseño, las tareas a realizar para lograr el funcionamiento óptimo de la máquina y la validación del requerimiento final.

Cuadro 2. Metodología de diseño

Especificaciones de diseño del brazo robótico	
Concepto	Descripción
Metodología de diseño	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Definir el mecanismo y las fuerzas que intervienen en la pinza para la sujeción de la botella, así como el material de fabricación ✓ Diseñar el mecanismo de cremallera para el eslabón que permite movimiento longitudinal ✓ Realizar el diagrama de cuerpo libre para cada eslabón del brazo con todas las fuerzas que intervienen en estos, así como en la estructura ✓ Definir el modo mediante el cual los servomotores transmiten movimiento y potencia a los eslabones
Funcionalidad del brazo robótico	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mediante la metodología denavit – hartenberg se plantean las ecuaciones para el modelo de los movimientos del brazo robótico ✓ Se validarán los movimientos y el diseño del brazo robótico mediante un prototipo a escala ✓ Mediante la programación en una placa arduino, se ejecutara la tarea acordada para el brazo robótico
Requerimiento final	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Una vez realizado el prototipo, este deberá levantar una carga máxima estipulada en los parámetros, trasladándola de un punto inicial a un punto final. De esta forma validará su correcto funcionamiento

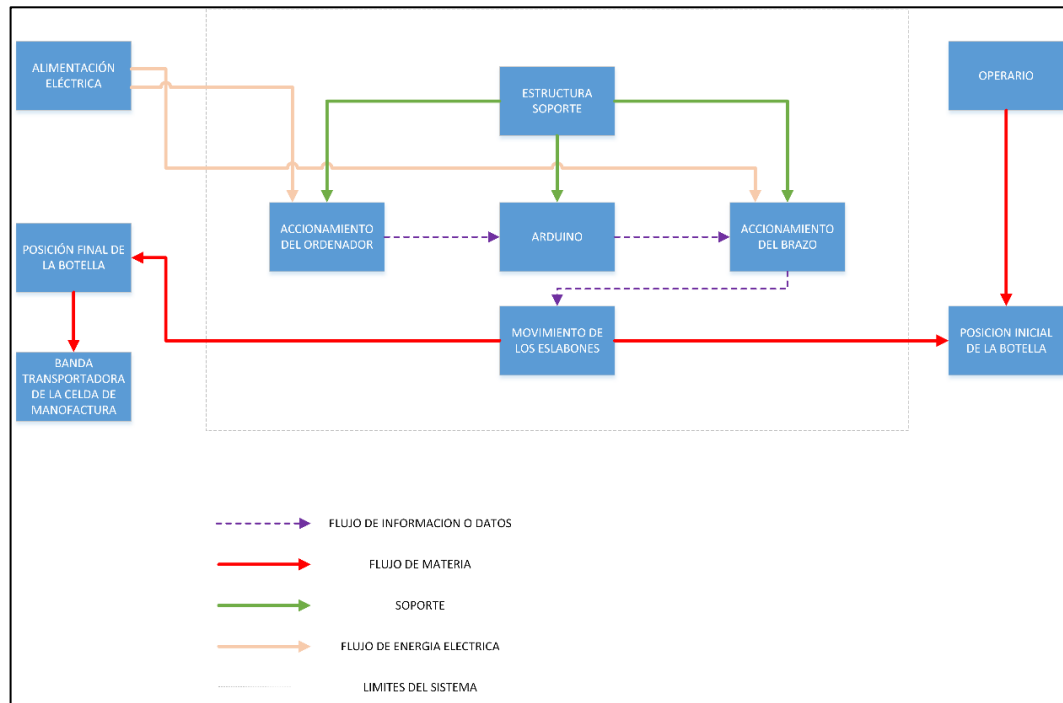
Fuente: elaboración propia

3.3.1 Diseño funcional. En el siguiente esquema se puede observar el papel que juegan diferentes elementos para el correcto funcionamiento del brazo robótico. La alimentación eléctrica de 12 voltios, representada por las líneas de color rosa en el esquema, permitirá darle flujo de energía tanto al ordenador como al brazo robótico para que este comience a moverse; asimismo el ordenador permitirá programar los datos y la información de movimiento en el Arduino, que están representados con líneas punteadas de color morado en el esquema, para que este posteriormente le envíe dicha información por medio de una interfaz al brazo robótico y así poder empezar el movimiento de los eslabones para realizar la tarea.

Por otra parte, con líneas de color rojo está representado el flujo de materia en el sistema, el cual para este caso será el paso de la botella desde una posición inicial

hasta una posición final. Una maquina externa al sistema del brazo robótico posicionará la botella en la posición inicial en cual debe estar para ser agarrada por el brazo, después de realizar el movimiento necesario, el brazo robótico ubicará la botella en la posición final que se encuentra en la banda transportadora de una celda de manufactura. Por último, se cuenta con una base estructural la cual le da un soporte al brazo robótico, al ordenador y al Arduino, para que estos se encuentren cerca uno del otro.

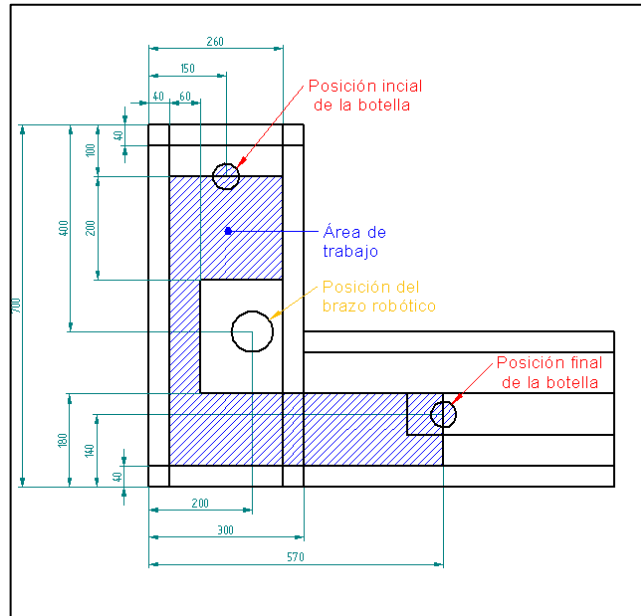
Figura 20. Diseño funcional del brazo robótico



Fuente: elaboración propia

3.3.1.1 Área de trabajo del brazo robótico. A continuación, se puede apreciar un esquema que muestra específicamente el área de trabajo asignada al brazo robótico dentro del laboratorio de automatización para realizar la tarea. Los círculos pequeños indican tanto la posición inicial de agarre de la botella por parte del brazo robótico, como la posición final de la botella. El área del círculo grande indica la posición en cual estará ubicada la base principal del robot dentro de la estructura soporte. El área de color blanco alrededor del círculo grande indica la zona por la cual no pasará la botella. La zona señalada con líneas azules indica la zona de trabajo plena del brazo robótico, es decir la zona por la cual los eslabones moverán la botella desde un punto a otro.

Figura 21. Área de trabajo del brazo robótico

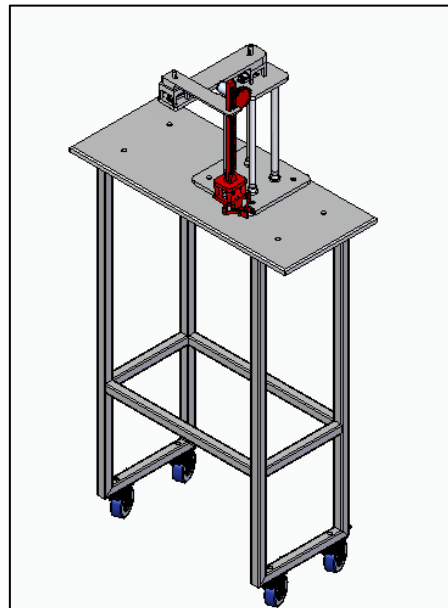


Fuente: elaboración propia

3.4 DISEÑO DETALLADO

Para desarrollar el diseño detallado del brazo robótico se tendrá en cuenta la metodología presentada anteriormente en el Cuadro 2.

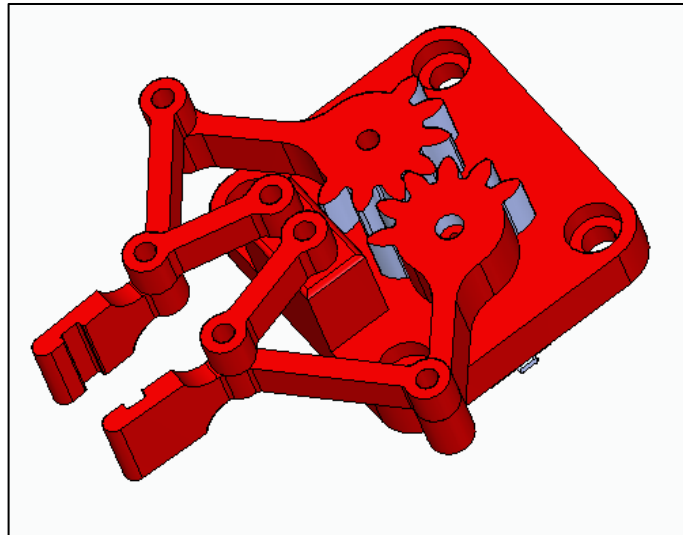
Figura 22. Brazo robot SCARA



Fuente: elaboración propia

3.4.1 Efecto final. Esta herramienta estara encargada de realizar una sujeción al elemento que se va a trasladar de un punto a otro, que en este caso será la botella anteriormente descrita en la parametrización. Se ha establecido una pinza de aprensión por medio de mecanismos de cuatro barras y accionamiento por un conjunto de engranajes de dientes rectos.

Figura 23. Efecto final



Fuente: elaboración propia

3.4.1.1 Material de la pinza. Debido a la aplicación que debe realizar el efecto final este debe soportar bajos esfuerzos, debido a que las cargas son muy pequeñas, de igual manera este debe ser compacto y ligero para no generar grandes esfuerzos a los demás eslabones con los que la pinza este asociado. Se han revisado diferentes tipos de materiales como metales y polímeros para ingeniería, aunque los metales presentan una gran ventaja frente a los polímeros gracias a su gran resistencia a la tensión, estos tienen una mayor densidad, y esto genera un mayor peso para el conjunto de las piezas.

Debido a esto se procede a escoger los polímeros para ingeniería ya que estos poseen gran resistencia al desgaste, una alta rigidez y una buena resistencia a la tensión. Se pueden encontrar polímeros como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el tereftalato de polibuteno (PBT), el tereftalato de polietileno (PET), el nailon y el polipropileno (PP) son los polímeros más utilizados por la industria. Por factores como la manufactura, la maquinabilidad del material y su costo se ha seleccionado el ABS, ya que sus propiedades mecánicas se adaptan de manera acertada a los requerimientos de diseño.

Las propiedades del ABS dependen y varían del modo de fabricación y el modo de empleo. Para la aplicación del efecto final se puede utilizar el ABS de alto

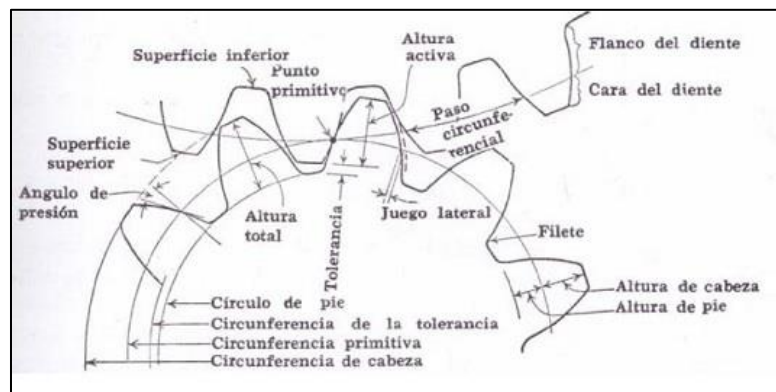
impacto²⁵, con un proceso de fabricación aditiva (impresión 3D), la cual cuenta con las siguientes características;

- ✓ Densidad de (1,024 g/cm³)
- ✓ Resistencia a la tensión (33,9 Mpa)
- ✓ Módulo de tensión (1,72 Gpa)
- ✓ Resistencia IZOD (7,0 pie lb/pulg en muesca)

3.4.1.2 Sistema de engranajes de la pinza. Para poder realizar la sujeción de la pieza con la pinza, es necesario un conjunto de engranajes. Para ello se establecen como parámetros de diseño las siguientes condiciones;

- ✓ Diámetro primitivo (d): 24 mm
- ✓ Número de dientes (z): 12

Figura 24. Partes de un engrane de dientes rectos



Fuente: INGMECÁNICA. Fundamentos por transmisión de engranajes. [En línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut150/fig3tut150.jpg>

El ángulo de presión (α) es 25°, debido a que este no presentaría interferencia, ya que es el utilizado para mínimo 12 dientes en el engranaje. El paso es la distancia que hay entre la cara del diente y la suma del ancho de otro diente, y se obtiene mediante la siguiente ecuación;

²⁵ ULTIMAKER. Ficha de datos técnicos del ABS. 2011. Disponible en: <https://ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf>

$$p = \frac{d \cdot \pi}{z}$$

Donde;

p: Paso diametral en mm

d: Diámetro primitivo de 24 mm

z: Número de dientes de 12

$$p = \frac{(24 \text{ mm})(\pi)}{(12)}$$

$$p = 6,28 \text{ mm}$$

El módulo es la relación el diámetro primitivo y el número²⁶ de dientes, este es importante porque permite conocer las características geométricas faltantes del diente. Para esto se debe hallar con la ecuación que se muestra a continuación;

$$m = \frac{p}{\pi}$$

Donde;

m: Modulo en mm

p: Paso diametral de 6,28 mm

$$m = \frac{6,28 \text{ mm}}{\pi}$$

$$m = 2 \text{ mm}$$

Para el valor del módulo de 2 mm se pueden encontrar otros parámetros geométricos del engranaje debido a que este se encuentra normalizado como lo son;

²⁶ QTCgears. Elements of metric gears technology. [Catalogo informativo]. [En línea]. Disponible en: http://qtcgears.com/tools/catalogs/PDF_Q420/Tech.pdf

Cuadro 3. Parámetros de diseño de un engrane

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidad
Espacio entre dientes		3,14	mm
Espesor del diente		3,14	mm
Altura de la cabeza (h_a)	$h_a = m$	2	mm
Altura del pie (h_f)	$h_f = m \cdot 1,25$	2,5	mm
Diámetro exterior (d_o)	$d_o = d + 2 \cdot m$	28	mm
Diámetro de raíz (d_r)	$d_r = d - 2,5 \cdot m$	19	mm
Diámetro base (d_b)	$d_b = d \cdot \cos \cdot (\alpha)$	21,75	mm
Distancia entre círculos (C)	$C = \frac{m \cdot (Z_1 + Z_2)}{2}$	24	mm

Fuente: elaboración propia

El ancho de la rueda (b) se puede determinar mediante la expresión;

$$b = X \cdot m$$

Donde;

b: ancho de la rueda en mm

X: es un valor adimensional que se encuentra entre tres y diez, y que varía según su aplicación, en este caso será de 5

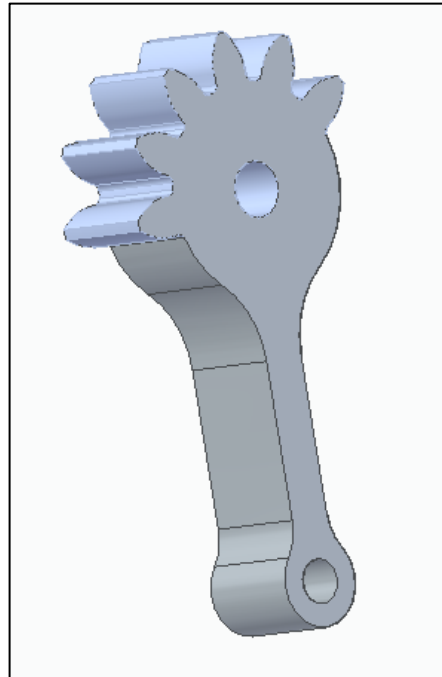
m: es el módulo de 2 mm

$$b = (5) \cdot (2 \text{ mm})$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

Para que el engranaje pueda transmitir la potencia entregada por el servomotor hacia la pinza es necesario modificar la geometría del engranaje, y debido a la aplicación que tiene la pinza de sujeción, se eliminaron dientes haciendo que la pieza perdiera peso, y agregándole un eslabón que va directamente fundido al cuerpo del engranaje con una medida 34,55 mm. De la misma manera se hace un redondeo entre la pieza y el eslabón, ya que esto no permite que surjan fallas por fractura, debido a que existían concentradores de esfuerzo.

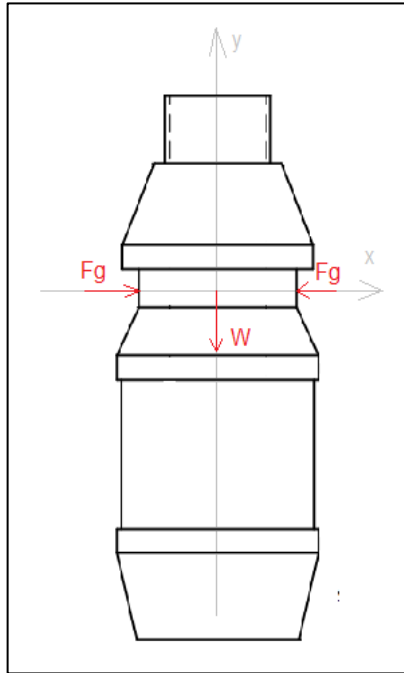
Figura 25. Engrane modificado



Fuente: elaboración propia

3.4.1.3 Fuerza de sujeción. Para calcular la fuerza necesaria que deben realizar la pinza para la sujeción de la botella, se deben tener factores de operación como el coeficiente de fricción del material con el que se construirá la pinza. El siguiente diagrama de cuerpo libre muestra el comportamiento de la pinza al momento de realizar la fuerza de agarre con respecto a la botella

Figura 26. DCL de la botella



Fuente: elaboración propia

Como resultado del diagrama de cuerpo libre se puede obtener la siguiente ecuación;

$$\mu \cdot n_f \cdot F_g = w \cdot g$$

Donde;

μ : El coeficiente de fricción de la superficie de la pinza con respecto a la superficie de la boquilla de la botella con un valor de 0,48²⁷

n_f : Número de dedos que utilizara la pinza, que en este caso serán 2

F_g : Fuerza de sujeción de la pinza en N

w : Peso de la botella, con un valor de 0,0981 N

g : Factor combinado por efecto de la gravedad y la aceleración, este tomara un valor de 2, debido a que la carga esta aplicada en dirección a la fuerza²⁸ de gravedad.

²⁷ GEHR, Plastic engineered by. Delivery programme, Stock Shapes [Catalogo informativo]. [En línea]. Disponible en: https://en.gehr.de/images/pdf/GEHR_Lieferprogramm_EN.pdf

$$(0,48)(2) \cdot F_g = (3 \text{ N})(2)$$

$$F_g = \frac{(3 \text{ N})(2)}{(0,48)(2)}$$

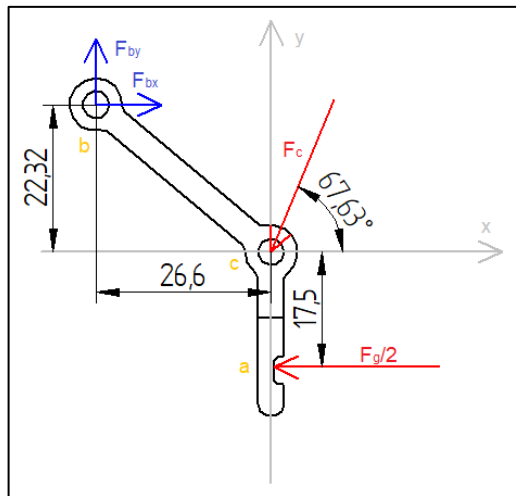
$$F_g = 6,25 \text{ N}$$

Esta fuerza será aplicada por los dos dedos la pinza, por ende, la fuerza aplicada por cada dedo será de 3,125 N.

3.4.1.4 Fuerzas que actúan sobre el mecanismo del efector final. Mediante un diagrama de cuerpo libre se pueden obtener las reacciones y las fuerzas a las que estará sometido el efector final.

El siguiente diagrama de cuerpo libre muestra las fuerzas actuantes en la pinza a partir de la fuerza de sujeción.

Figura 27. DCL de la pinza



Fuente: elaboración propia

Mediante el diagrama de cuerpo libre se establecen las siguientes sumatorias de fuerzas;

- ✓ Sumatoria de fuerzas en X;

²⁸ RAMASAMY, Yasodharan. ME3403 – Robotics and Machine Vision System. [Diapositivas]. [Consultado: 22 de octubre de 2018]. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/yaso4u/-robotics-end-effector>

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-3,125 \text{ N} + F_{bx} - F_c \cdot \cos(67,63^\circ) = 0$$

De la ecuación anterior se puede despejar la F_{bx} dejándola en términos de la F_c , donde se obtiene;

$$F_{bx} = F_c \cdot \cos(67,63^\circ) + 3,125 \text{ N}$$

✓ Sumatoria de fuerzas en Y;

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{by} - F_c \cdot \sin(67,63^\circ) = 0$$

De la ecuación anterior se puede despejar la F_{by} dejándola en términos de la F_c , donde se obtiene;

$$F_{by} = F_c \cdot \sin(67,63^\circ)$$

✓ Sumatoria de momentos en b;

$$\Sigma M_b = 0$$

$$-(F_c \sin(67,63^\circ))(26,6 \text{ mm}) - ((F_c \cos(67,63^\circ))(22,32 \text{ mm}) - (3,125 \text{ N})(39,82 \text{ mm}) = 0$$

De la ecuación anterior se puede despejar la F_c donde se obtiene;

$$-24,5982 \text{ mm } F_c - 8,4947 \text{ mm } F_c - 124,4375 \text{ N mm} = 0$$

$$-33,0929 \text{ mm } F_c = 124,4375 \text{ N mm}$$

$$F_c = \frac{124,4375 \text{ N mm}}{-33,0929 \text{ mm}}$$

$$F_c = -3,7602 \text{ N}$$

Conociendo la magnitud y dirección de F_c , se puede afirmar que el eslabón está sometido a compresión, y de igual manera se puede reemplazar en las ecuaciones resultantes de la sumatoria en X y la sumatoria en Y, obteniendo;

✓ Sumatoria de fuerzas en X;

$$F_{bx} = -3,7602 \text{ N} \cos(67,63^\circ) + 3,125 \text{ N}$$

$$F_{bx} = 1,6939 \text{ N}$$

✓ Sumatoria de fuerzas en Y;

$$F_{by} = -3,7602 \text{ N} \sin(67,63^\circ)$$

$$F_{by} = -1,4311 \text{ N}$$

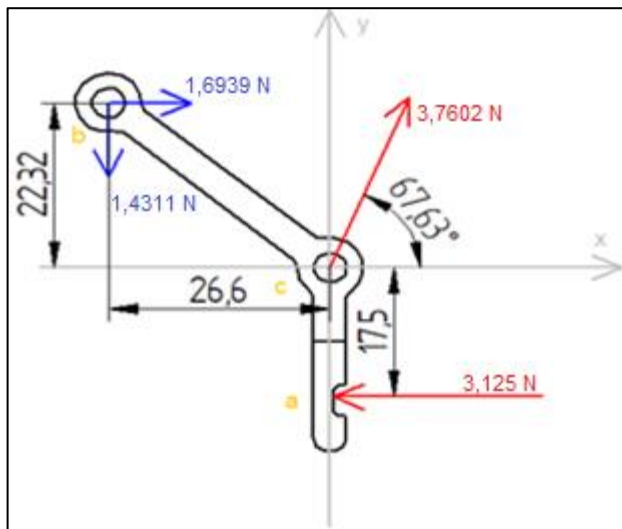
La magnitud de la fuerza en el punto "b" se obtiene a partir de la siguiente ecuación;

$$F_b = \sqrt{(F_{bx})^2 + (F_{by})^2}$$

$$F_b = \sqrt{(1,6939 \text{ N})^2 + (-1,4311 \text{ N})^2}$$

$$F_b = 2,2175 \text{ N}$$

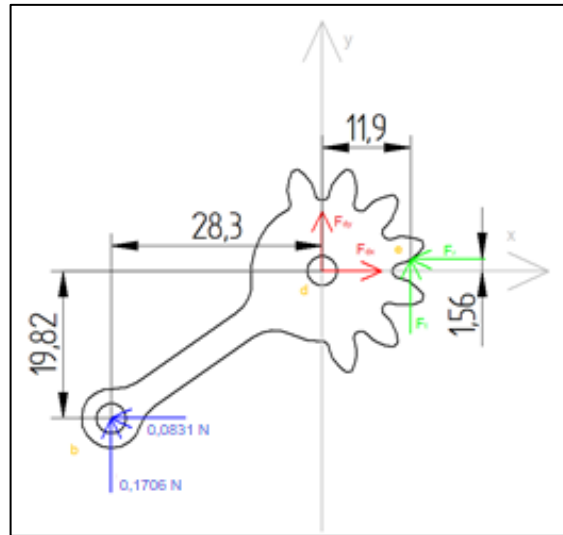
Figura 28. DCL de la pinza con magnitudes



Fuente: elaboración propia

El siguiente diagrama de cuerpo libre muestra las fuerzas actuantes en el engranaje modificado a partir de la fuerza de sujeción, ya que la fuerza es contraria a la que ejerce la pinza.

Figura 29. DCL del engrane modificado



Fuente: elaboración propia

Se pueden obtener del diagrama de cuerpo libre las siguientes sumatorias de fuerzas;

- ✓ Sumatoria de fuerzas en X;

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-1,6939 \text{ N} + F_{dx} - F_r = 0$$

De la ecuación anterior se puede despejar la F_{dx} dejándola en términos de la F_r , donde se obtiene;

$$F_{dx} = F_r + 1,6939 \text{ N}$$

- ✓ Sumatoria de fuerzas en Y;

$$\Sigma F_y = 0$$

$$1,4311 \text{ N} + F_{dy} + F_t = 0$$

De la ecuación anterior se puede despejar la F_{dy} dejándola en términos de la F_t , donde se obtiene;

$$F_{dy} = -F_t - 1,4311 \text{ N}$$

✓ Sumatoria de momentos en d;

$$\Sigma M_d = 0$$

$$-(1,4311 \text{ N})(28,3 \text{ mm}) - (1,6939 \text{ N})(19,82 \text{ mm}) + F_t(11,9 \text{ mm}) + F_r(1,56 \text{ mm}) = 0$$

De la ecuación anterior se puede despejar la F_t donde se obtiene;

$$-74,0732 \text{ N mm} + F_t(11,9 \text{ mm}) + F_r(1,56 \text{ mm}) = 0$$

La fuerza radial F_r a la cual está sometido el diente se puede expresar con la la siguiente ecuación;

$$F_r = F_t \cdot \tan(\alpha)$$

Donde;

F_r : Fuerza radial en N

F_t : Fuerza tangencial en N

α : Ángulo de presión del diente de 25°

$$-74,0732 \text{ N mm} + F_t(11,9 \text{ mm}) + F_t \tan(25^\circ)(1,56 \text{ mm}) = 0$$

$$-74,0732 \text{ N mm} + 12,6274 \text{ mm } F_t = 0$$

$$F_t = \frac{74,0732 \text{ N mm}}{12,6274 \text{ mm}}$$

$$F_t = 5,8661 \text{ N}$$

La fuerza radial F_r se obtiene mediante la siguiente ecuación;

$$F_r = 5,8661 \text{ N } \tan(25^\circ)$$

$$F_r = 2,7354 \text{ N}$$

Mediante la siguiente formula se puede conocer el torque necesario para que se efectuó el movimiento de los engranajes;

$$F_t = \frac{T}{r}$$

Donde;

F_t : fuerza tangencial de 5,8661 N

T : Torque entregado al engranaje en N m

r : Radio primitivo del diente del engranaje de 0,012 m

$$T = (5,8661 \text{ N})(0,012 \text{ m})$$

$$T = 0,0704 \text{ N m}$$

Conocida la fuerza tangencial se pueden encontrar las fuerzas faltantes en las sumatorias de X y Y, de la siguiente manera;

✓ Sumatoria de fuerzas en X;

$$F_{dx} = F_t \cdot \tan(\alpha) + 1,6939 \text{ N}$$

$$F_{dx} = 2,7354 \text{ N} + 1,6939 \text{ N}$$

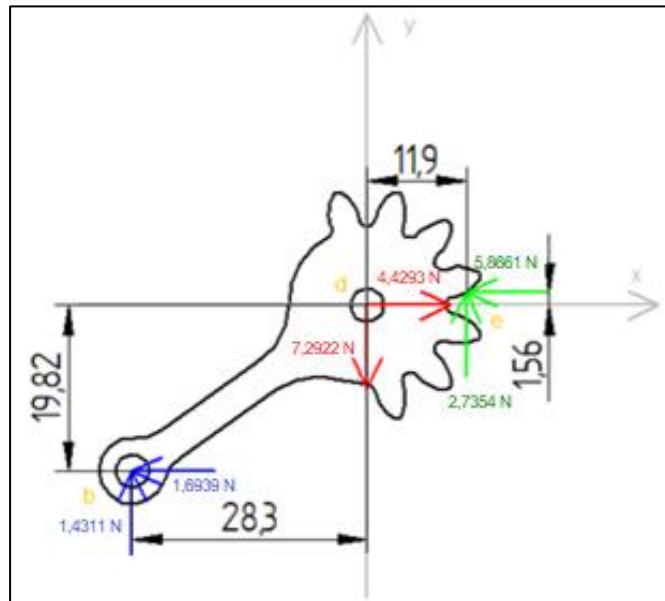
$$F_{dx} = 4,4293 \text{ N}$$

✓ Sumatoria de fuerzas en Y;

$$F_{dy} = -5,8611 \text{ N} - 1,4311 \text{ N}$$

$$F_{dy} = -7,2922 \text{ N}$$

Figura 30. DCL del engranaje con magnitudes



Fuente: elaboración propia

3.4.1.5 Servomotor de la pinza. El servomotor es un componente electrónico, el cual sirve para la transmisión de potencia, que funciona gracias a una fuente de energía eléctrica. Se caracteriza por la entrega de potencia constante a diferentes velocidades con las que trabaje, ya que el torque que entrega es constante y solo varía su velocidad angular debido al voltaje de ingreso.

Se verificó por medio de una demostración de funcionamiento en un brazo robótico con el director del proyecto, que el servomotor de referencia TowerPro Sg92R, cuenta con las características óptimas de funcionamiento para que realice la tarea de sujeción de la botella. Gracias a la información brindada por la página web Servodatabase.com, se han encontrado que el servomotor TowerPro Sg92R cuenta con las siguientes especificaciones;

- ✓ Torque de salida (T): 2,5 Kg cm (0,2452 N m)
- ✓ Velocidad angular (ω): 0,10 s/60° (10,472 rad/s) a 4,8 V. ~ 100 rpm
- ✓ Peso: 9 g
- ✓ Dimensiones: Alto: 27 mm. Ancho: 12,2 mm. Largo: 23 mm
- ✓ Tipo de engranaje: Plástico

Figura 31. Servomotor TowerPro Sg92R



Fuente: TowerPro. Disponible en:
<http://www.towerpro.com.tw/product/sg92r-7/>

La potencia del servomotor se puede hallar mediante la siguiente ecuación;

$$P = T \cdot \omega$$

Donde;

P: Potencia del servomotor en vatios (W)

T: Torque de salida de 0,2452 N m

ω : Velocidad angular de 10,4720 rad/s

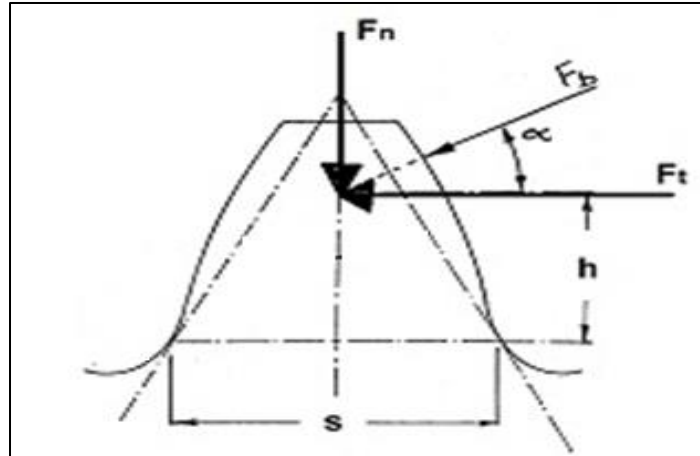
$$P = (0,2452 \text{ N m})(10,4720 \text{ rad/s})$$

$$P = 2,5677 \text{ W}$$

3.4.1.6 Fuerzas que actúan sobre el engranaje. Debido a la transmisión de potencia que proviene del servomotor, los dientes del engranaje están sometidos a una carga, la cual permitirá que el engranaje trabaje en óptimas condiciones y

evitase algún tipo de falla como la fractura²⁹, del material, el proceso de fabricación del mismo, o factores como la temperatura.

Figura 32. Fuerzas que actúan en un engrane



Fuente: INGMECÁNICA. Fundamentos por transmisión de engranajes. [En línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorial-semanal/tutorialn151.html>

La fuerza tangencial se obtiene de la siguiente ecuación;

$$F_t = \frac{T}{r}$$

Donde;

T: Torque entregado al engranaje de 0,2452 N m

r: Radio primitivo del engranaje de 0,012 m

$$F_t = \frac{0,2452 \text{ N m}}{0,012 \text{ m}}$$

$$F_t = 20,4333 \text{ N}$$

Debido a las fuerzas que están aplicadas en los dientes del engranaje al momento de aplicar un torque, estos son sometidos a esfuerzos que pueden generar una falla en el diente produciendo una fractura. Para los engranajes de plástico los

²⁹ Moya, J. Velázquez, J. Cálculo de engranajes plásticos. En: Ingeniería Mecánica. 2007. vol 10, no 3, p 3.

esfuerzos se calculan de diferente manera, para ello existe diferentes métodos ya que los polímeros se comportan de manera diferente a los metales.

El mejor método³⁰ que se puede utilizar el de Faires ya que este presenta de manera más precisa el valor real del esfuerzo. Para solucionar este método se debe iniciar el cálculo de la carga dinámica que estará presente en los dientes del engranaje, como se muestra en la siguiente ecuación;

$$F_d = \frac{(200 + 3,28 V) F_t}{200 + 8,82 V}$$

Donde;

F_d : Carga dinámica en Kg

V : Velocidad angular del engranaje de 7,54 m/min, ya que $V = \omega \cdot r$

F_t : Fuerza tangencial de 20,4333 N

$$F_d = \frac{(200 + 3,28 (7,54 \text{ m/min})) (20,4333 \text{ N})}{200 + 8,82 (7,54 \text{ m/min})}$$

$$F_d = 17,2306 \text{ Kg}$$

Una vez encontrada la fuerza dinámica se pueden calcular el esfuerzo que va a soportar el diente, en la cara donde se encuentra el contacto con el otro diente, pero en la zona más crítica, que sería en la punta del diente, y se puede obtener mediante la siguiente ecuación;

$$F_s = \frac{S \cdot b \cdot Y \cdot m}{10}$$

Donde;

F_s : Carga aplicada y se puede igualar con la carga dinámica³¹ en donde $F_s = F_d$, y tiene un valor de 17,2306 Kg

S : Esfuerzo de cálculo en en Kg/cm²

b : Ancho del engranaje de 1 cm

³⁰ Moya, J. Velázquez, J. Cálculo de engranajes plásticos. En: Ingeniería Mecánica. 2007.vol 10, no 3, p 8.

³¹ Ibid., p 8.

Y: Factor de Lewis³² de 0,276 para un engranaje de 12 dientes con un ángulo de presión (α) de 25°

m: Modulo de 2 mm

$$S = \frac{(17,2306 \text{ Kg}) (10)}{(1 \text{ cm}) (0,276) (2 \text{ mm})}$$

$$S = 312,14 \text{ Kg/cm}^2$$

El esfuerzo también se puede expresar en megapascales, y tomaría el valor de 30,6104 Mpa.

Para que el diseño sea confiable se evalúan por medio de una relación del esfuerzo admisible del material y el esfuerzo calculado del diseño, a partir del método del factor de seguridad, mediante la siguiente ecuación;

$$F_s = \frac{\sigma_u}{\sigma_{\text{real}}}$$

Donde;

σ_{adm} : Esfuerzo ultimo del material de 33,9 Mpa

σ : Esfuerzo calculado de 30,6104 Mpa

$$F_s = \frac{33,9 \text{ Mpa}}{30,6104 \text{ Mpa}}$$

$$F_s = 1,2$$

El diseño se encuentra dentro de un término de excepcionalmente³³ confiable, debido a que el factor de seguridad debe estar en el rango de $1,25 \leq F_s \leq 1,50$.

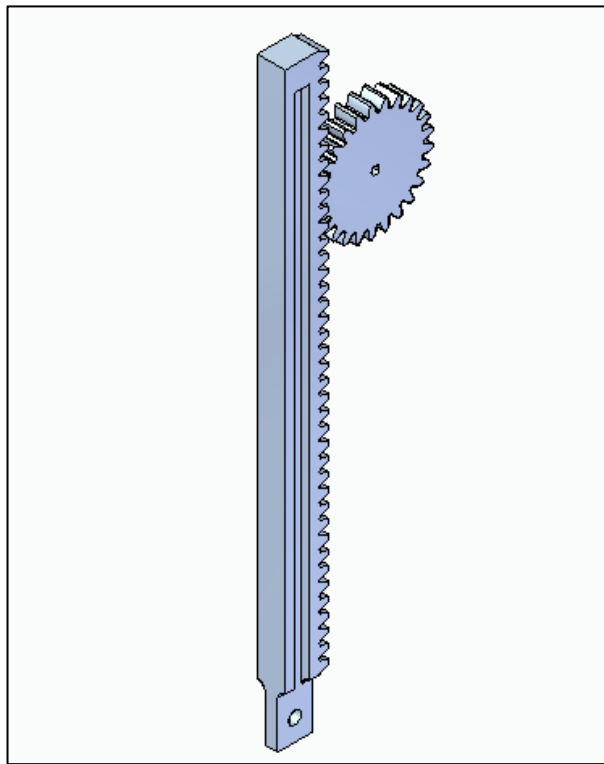
³² TECNUN. Engranajes rectos. Elementos de máquinas. Campus tecnológico, Universidad de Navarra. [Online], Noviembre 15 2018. Disponible en: https://www.academia.edu/35470739/-ENGRANAJES_RECTOS

³³ RIVERA CASADIEGO, Edwin <edwin.rivera@profesores.uamerica.edu.co>. "Principles of mechanical design" [Correo electrónico]. 30 enero 2017. Enviado a ingmecanica61@gmail.com

3.4.2 Eslabón prismático. Para el funcionamiento de este eslabón se utilizará un sistema piñón cremallera, el cual es un conjunto mecánico compuesto por dos elementos, un piñón y una barra dentada llamada cremallera o engrane ³⁴lineal.

Este par es ampliamente usado en aplicaciones en las cuales se requiera levantar una carga mediante la transformación de un movimiento rotacional o circular en un movimiento netamente lineal o viceversa. Esta transformación del movimiento es posible gracias a que el piñón le entrega una fuerza tangencial por medio de sus dientes a la cremallera, la cual gracias a la transferencia de esta fuerza hacia sus dientes se empieza a mover de forma longitudinal.

Figura 33. Sistema piñón cremallera



Fuente: “Elaboración propia”

El tipo de geometría que principalmente se encuentra en el mercado para este sistema, son configuraciones de dientes rectos o de dientes helicoidales, dependiendo de la carga a mover y de la precisión que se requiera en el proceso se escogerá el indicado.

³⁴ COLLINS, Danielle. Rack and pinion systems-designs and applications. Linear motion tips [Online], Febrero 28 2018. Disponible en: <https://www.linearmotiontips.com/gallery-rack-and-pinion-systems-designs-and-applications/>

La velocidad con la cual se mueve la cremallera, estrictamente deberá ser igual a la velocidad de la línea de paso del piñón, además es ³⁵crítico que el círculo de paso de este sea tangente a la línea de paso de la cremallera para que pueda haber movimiento relativo entre ambos elementos.

3.4.2.1 Piñón del sistema Para poder realizar la sujeción de la pieza con la pinza, es necesario un conjunto de engranajes. Para ello se establecen como parámetros de diseño las siguientes condiciones;

- ✓ Diámetro primitivo (d): 50 mm
- ✓ Número de dientes (z): 25

El ángulo de presión (α) es 20° , debido a que este no presentaría interferencia, ya que es el utilizado para mínimo 18 dientes en el engranaje.

El paso es la distancia que hay entre la cara del diente y la suma del ancho de otro diente, y se obtiene mediante la siguiente ecuación;

$$p = \frac{d \cdot \pi}{z}$$

Donde;

p: Paso diametral en mm

d: Diámetro primitivo de 50 mm

z: Número de dientes de 25

$$p = \frac{(50 \text{ mm})(\pi)}{(25)}$$

$$p = 6,28 \text{ mm}$$

El módulo es la relación el diámetro primitivo y el número³⁶ de dientes, este es importante porque permite conocer las características geométricas faltantes del diente. Para esto se debe hallar con la ecuación que se muestra a continuación;

³⁵ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p. 328

³⁶ QTCgears. Elements of metric gears technology. [Catalogo informativo]. [En línea]. Disponible en: http://qtcgears.com/tools/catalogs/PDF_Q420/Tech.pdf

$$m = \frac{p}{\pi}$$

Donde;

m: Modulo en mm

p: Paso diametral de 6,28 mm

$$m = \frac{6,28 \text{ mm}}{\pi}$$

$$m = 2 \text{ mm}$$

Para el valor del módulo de 2 mm se pueden encontrar otros parámetros geométricos del engranaje debido a que este se encuentra normalizado como lo son;

Cuadro 4. Parámetros de diseño del piñón cremallera

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidad
Espacio entre dientes		3,14	mm
Espesor del diente		3,14	mm
Altura de la cabeza (h_a)	$h_a = m$	2	mm
Altura del pie (h_f)	$h_f = m \cdot 1,25$	2,5	mm
Diámetro exterior (d_o)	$d_o = d + 2 \cdot m$	54	mm
Diámetro de raiz (d_r)	$d_r = d - 2,5 \cdot m$	45	mm
Diámetro base (d_b)	$d_b = d \cdot \cos \cdot (\alpha)$	46,98	mm
Recorrido de la cremallera (l)		250	mm

Fuente: elaboración propia

El ancho de la rueda (b) se puede determinar mediante la expresión;

$$b = X \cdot m$$

Donde;

b: ancho de la rueda en mm

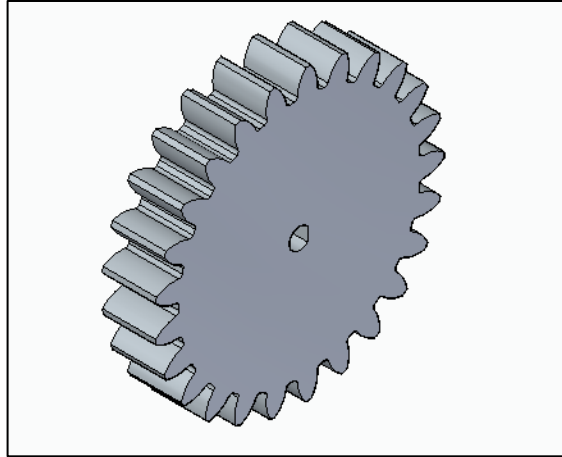
X: es un valor adimensional que varía según su aplicación, en este caso será de 5

m: es el módulo de 2 mm

$$b = (5) \cdot (2 \text{ mm})$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

Figura. 34. Piñón



Fuente: elaboración propia

Las propiedades del ABS dependen y varían del modo de fabricación y el modo de empleo. Para la aplicación del efector final se puede utilizar el ABS de alto impacto³⁷, con un proceso de fabricación aditiva (impresión 3D), la cual cuenta con las siguientes características;

- ✓ Densidad de (1,024 g/cm³)
- ✓ Resistencia a la tensión (33,9 Mpa)
- ✓ Módulo de tensión (1,72 Gpa)
- ✓ Resistencia IZOD (7,0 pie lb/pulg en muesca)

3.4.2.2 Selección del motor del sistema piñón cremallera. Se prosigue con la selección del tipo de motor que transmitirá la potencia necesaria para que el piñón pueda dar movimiento a la cremallera.

En el siguiente cuadro se exponen las posibles opciones que se estudiaron junto con el director del proyecto para seleccionar el tipo de motor que se requiere para entregar la potencia al tornillo, además se listan los principales aspectos que se tuvieron en cuenta para la selección de este.

³⁷ ULTIMAKER. Ficha de datos técnicos del ABS. 2011. Disponible en: <https://ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf>

Cuadro 5. Parámetros de selección del motor del piñón cremallera

Motor	Torque	Velocidad	Costo	Tamaño (L x AL x AN)
Servomotor MG 92B	0,3432 N m	76,92 rpm	36.000 COP	(22,8 x 12,2 x 31) mm
Motoreductor 20,4:1 25D	0,1569 N m	175 rpm	40.000 COP	(Ø25 x 50) mm
Motoreductor 34:1 25D	0,2256 N m	105 rpm	40.000 COP	(Ø25 x 50) mm

Fuente: elaboración propia

Se decidió que los aspectos anteriormente mencionados en el cuadro, tomados de la página web tdrobotica.co, iban a ser los que más peso tendrían para seleccionar el motor. A continuación, se explicarán los motivos;

- ✓ Torque: El torque que se requiere para hacer que la carga suba es relativamente pequeño, es necesario que el motor seleccionado entregue un torque alto garantice que el peso del sistema del gripper, de la botella y del mismo piñón cremallera sea soportado
- ✓ Velocidad: Es necesario que la velocidad a la cual trabaja el motor no sea tan elevada para poder tener un mejor control sobre los movimientos del brazo robótico
- ✓ Tamaño: El tamaño del motor no debe ser tan grande para que no ejerza un peso excesivo sobre la estructura y los eslabones, además se quiere evitar que este, por su tamaño interfiera con el correcto movimiento del brazo robótico

Acorde con los aspectos anteriores, se tomó la decisión de escoger el motoreductor 34:1 25D, debido a que cumple con los dos factores de selección más importantes, una baja velocidad y un alto torque, además otro aspecto relevante en cuanto a este motoreductor es que permite que su eje gire continuamente, así que no posee restricción de movimiento, en cambio el servomotor solo permite 360° de giro, es decir que cuando el eje del servomotor rote la cantidad de grados permitidos, este no va a continuar moviéndose, lo cual es desfavorable para el movimiento del tornillo ya que este podría no alcanzar a llegar a la posición deseada.

A continuación, se presentará un cuadro con más especificaciones técnicas del motoreductor seleccionado, tomadas de la página web tdrobotica.co.

Cuadro 6. Especificaciones del motoreductor seleccionado

Variable	Especificación
Voltaje de operación	6 Voltios
Diámetro del eje	4 mm
Relación de engranes	34:1
Peso	0,085 Kg
Velocidad	105 rpm
Consumo máximo de corriente	500 mA
Par torsor	2,3 Kg cm (0,2256 N m)

Fuente: elaboración propia

La elección de este motoreductor garantiza que el tornillo de potencia se va a desplazar longitudinalmente hacia arriba y hacia abajo sin ningún problema hasta donde sea requerido, así mismo gracias a su baja velocidad la transmisión de potencia por bandas desde el motoreductor hasta la tuerca del tornillo se puede realizar de manera controlada.

Figura 35. Motoreductor 34:1 25D



Fuente: tdrobotica.co [En línea]. Disponible en: <http://tdrobotica.co/motoreductor-341-25dx50l23-kg-cm105-rpm/1091.html>

3.4.2.3 Comportamiento mecánico del piñón cremallera.

$$F_t = \frac{T}{r}$$

Donde;

T: Torque entregado al engranaje de 0,08336 N m

r: Radio primitivo del engranaje de 0,05 m

$$F_t = \frac{0,2256 \text{ N m}}{0,05 \text{ m}}$$

$$F_t = 4,5120 \text{ N}$$

Debido a las fuerzas que están aplicadas en los dientes del engranaje al momento de aplicar un torque, estos son sometidos a esfuerzos que pueden generar una falla en el diente produciendo una fractura. Para los engranajes de plástico los esfuerzos se calculan de diferente manera, para ello existe diferentes métodos ya que los polímeros se comportan de manera diferente a los metales.

El mejor método³⁸ que se puede utilizar el de Faires ya que este presenta de manera más precisa el valor real del esfuerzo. Para solucionar este método se debe iniciar el cálculo de la carga dinámica que estará presente en los dientes del engranaje, como se muestra en la siguiente ecuación;

$$F_d = \frac{(200 + 3,28 V) F_t}{200 + 8,82 V}$$

Donde;

F_d : Carga dinámica en Kg

V: Velocidad angular del engranaje de 32,988 m/min

F_t : Fuerza tangencial de 4,5120 N

$$F_d = \frac{(200 + 3,28 (32,988 \text{ m/min})) (4,5120 \text{ N})}{200 + 8,82 (32,988 \text{ m/min})}$$

$$F_d = 2,8324 \text{ Kg}$$

Una vez encontrada la fuerza dinámica se pueden calcular el esfuerzo que va a soportar el diente, en la cara donde se encuentra el contacto con el otro diente, pero en la zona más crítica, que sería en la punta del diente, y se puede obtener mediante la siguiente ecuación;

$$F_s = \frac{S \cdot b \cdot Y \cdot m}{10}$$

³⁸ Moya, J. Velázquez, J. Cálculo de engranajes plásticos. En: Ingeniería Mecánica. 2007.vol 10, no 3, p 8.

Donde;

F_s : Carga aplicada y se puede igualar con la carga dinámica³⁹ en donde $F_s = F_d$, y tiene un valor de 2,8324 Kg

S : Esfuerzo de cálculo en en Kg/cm²

b : Ancho del engranaje de 1 cm

Y : Factor de Lewis⁴⁰ de 0,33518 para un engranaje de 25 dientes con un ángulo de presión (α) de 20°

m : Modulo de 2 mm

$$S = \frac{(2,8324 \text{ Kg}) (10)}{(1 \text{ cm}) (0,33518) (2 \text{ mm})}$$

$$S = 42,2519 \text{ Kg/cm}^2$$

El esfuerzo también se puede expresar en megapascales, y tomaría el valor de 4,1435 Mpa.

Para que el diseño sea confiable se evalúan por medio de una relación del esfuerzo admisible del material y el esfuerzo calculado del diseño, a partir del método del factor de seguridad, mediante la siguiente ecuación;

$$F_s = \frac{\sigma_u}{\sigma_{\text{real}}}$$

Donde;

σ_{adm} : Esfuerzo ultimo del material de 33,9 Mpa

σ : Esfuerzo calculado de 4,1435 Mpa

$$F_s = \frac{33,9 \text{ Mpa}}{4,1435 \text{ Mpa}}$$

$$F_s = 8,18$$

³⁹ Moya, J. Velázquez, J. Cálculo de engranajes plásticos. En: Ingeniería Mecánica. 2007.vol 10, no 3, p 8.

⁴⁰ TECNUN. Engranajes rectos. Elementos de máquinas. Campus tecnológico, Universidad de Navarra. [Online], Noviembre 15 2018. Disponible en: https://www.academia.edu/35470739/-ENGRANAJES_RECTOS

Este servomotor debe mover los conjuntos de piezas que pesan 500 g, lo que es equivalente a 4,905 N. Se utilizará un factor de seguridad de 5 debido a que las aplicaciones a las cuales estará sometido el brazo robótico pueden variar. Con ello se conoce que la fuerza necesaria para poder realizar el movimiento debe ser de 24,5250 N.

$$F_t = \frac{T}{r}$$

$$T = F_t \cdot r$$

$$T = 24,5250 \text{ N} \cdot 0,01 \text{ m}$$

$$T = 0,2453 \text{ N m}$$

Figura 37. TowerPro MG946r



Fuente: RaceRC. Disponible en: <https://www.racerc.gr/products/towerpro-mg946r-metal-gear-digital-high-torque-servo-55g>

El servomotor TowerPro MG946r cuenta con las siguientes especificaciones;

- ✓ Torque de salida (T): 13 Kg cm (1,2749 N m)
- ✓ Velocidad angular (ω): 0,17 s/60° a 6 V. ~ 100 rpm
- ✓ Peso: 55 g

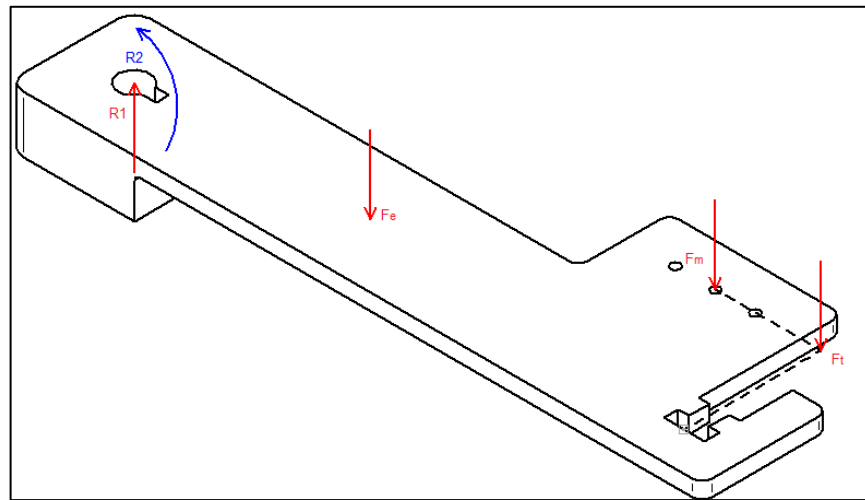
✓ Dimensiones: Alto: 42,9 mm. Ancho: 19,7 mm. Largo: 40,7 mm

✓ Tipo de engranaje: Metálico

Mediante el análisis mecánico de la pieza del eslabón rotacional corto se pueden encontrar las fuerzas actuantes en este, y se puede comprobar si existe una deflexión en este causados por dichas fuerzas.

El eslabón se analiza como una viga en voladizo, las fuerzas que actúan sobre este eslabón son las generadas por la masa del mismo ($F_e = 1,7658 \text{ N}$), el subsistema del motoreductor ($F_m = 0,981 \text{ N}$) y el subsistema del conjunto del piñón cremallera y el subsistema del efector final ($F_t = 20,4333 \text{ N}$).

Figura 38. Esquema de fuerzas del eslabón rotacional corto



Fuente: elaboración propia

Se pueden obtener del diagrama de cuerpo libre las siguientes sumatorias de fuerzas;

✓ Sumatoria de fuerzas en Y;

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_1 - F_m - F_e - F_t = 0$$

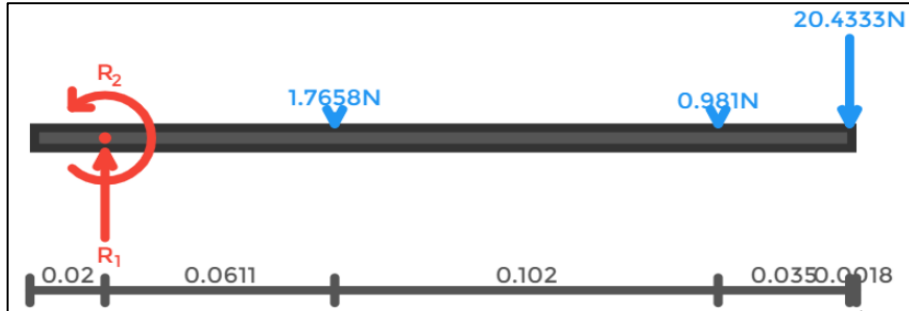
De la ecuación anterior se puede despejar la R_1 , donde se obtiene;

$$R_1 = F_e + F_m + F_t$$

$$R_1 = 1,7658 \text{ N} + 0,981 \text{ N} + 20,4333 \text{ N}$$

$$R_1 = 23,1801 \text{ N}$$

Figura 39. DCL del eslabón rotacional corto



Fuente: elaboración propia

- ✓ Sumatoria de momentos en R;

$$\Sigma M_R = 0$$

$$R_2 - F_e (0,06114 \text{ m}) - F_m (0,16318 \text{ m}) - F_t (0,19818 \text{ m}) = 0$$

$$R_2 = 0,1080 \text{ N m} + 0,1601 \text{ N m} + 4,0495 \text{ N m}$$

$$M_a = 4,3176 \text{ N m}$$

Mediante las ecuaciones de singularidad⁴² se puede encontrar el comportamiento del eslabón con respecto a la fuerza cortante y al momento flector, este método utiliza las siguientes ecuaciones y diagramas;

- ✓ La fuerza cortante se expresa mediante la siguiente función;

$$\frac{dM}{dx} = V(x)$$

La siguiente ecuación representa la fuerza cortante mediante el método de singularidad;

$$V(x) = R_1 - F_m \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^0 - F_e \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^0 - F_t \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^0$$

- ✓ El momento flector es expresado mediante la siguiente función;

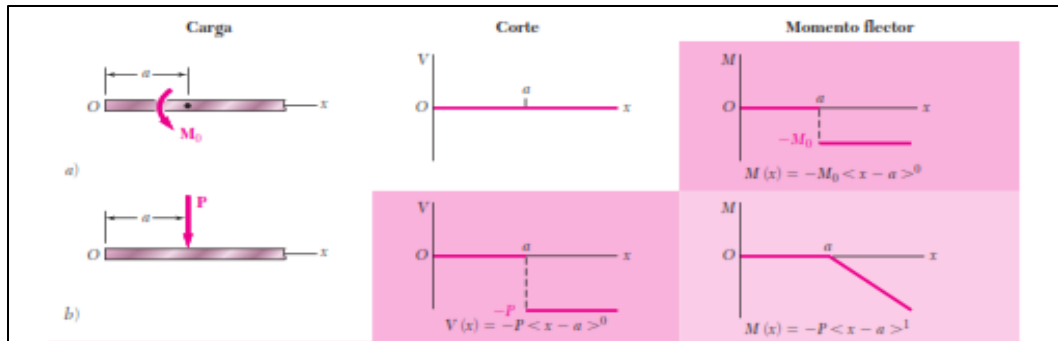
$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)$$

⁴² Beer, Ferdinand, *et al.* Mecánica de materiales. 5 ed. México.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A. 2010. p 345.

La siguiente ecuación representa el momento flector mediante el método de singularidad;

$$M(x) = -R_1x - F_m \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^1 - F_e \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^1 - F_t \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^1 - R_2 \langle x - 0 \rangle^0$$

Figura 40. Cargas básicas con sus respectivas ecuaciones de singularidad



Beer, Ferdinand. et al. Mecánica de materiales. 5 ed. México.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A. 2010. p 346.

Mediante el método de doble integración se puede resolver la función del momento flector, con la cual se podrán determinar los valores de las constantes de integración y de esta manera poder conocer la deflexión a lo largo de la geometría;

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -R_1x - F_m \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^1 - F_e \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^1 - F_t \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^1 - R_2 \langle x - 0 \rangle^0$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{-R_1}{2} x^2 - \frac{F_m}{2} \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^2 - \frac{F_e}{2} \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^2 - \frac{F_t}{2} \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^2 - R_2 \langle x - 0 \rangle^1 + C_1$$

$$EI y = \frac{-R_1}{6} x^3 - \frac{F_m}{6} \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_e}{6} \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_t}{6} \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^3 - \frac{R_2}{2} \langle x - 0 \rangle^2 + C_1 x + C_2$$

Las constantes de integración se encuentran a partir de las condiciones de borde de la "viga";

$$\checkmark x = 0, y = 0]$$

$$EI (0) = \frac{-R_1}{6} (0)^3 - \frac{F_m}{6} \langle (0) - 0,06114 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_e}{6} \langle (0) - 0,16318 \text{ m} \rangle^3$$

$$-\frac{F_t}{6} \langle (0) - 0,19818\text{m} \rangle^3 - \frac{R_2}{2} \langle (0) - 0 \rangle^2 + C_1(0) + C_2$$

Dando como resultado

$$C_2 = 0$$

La otra condición de borde se puede encontrar mediante la siguiente ecuación,

$$\checkmark [x = 0, y' = 0]$$

$$EI(0) = \frac{-R_1}{2}(0)^2 - \frac{F_m}{2} \langle (0) - 0,06114 \text{ m} \rangle^2 - \frac{F_e}{2} \langle (0) - 0,16318 \text{ m} \rangle^2 - \frac{F_t}{2} \langle (0) - 0,19818\text{m} \rangle^2 - R_2 \langle (0) - 0 \rangle^1 + C_1$$

Dando como resultado

$$C_1 = 0$$

La deflexión máxima que puede llegar a soportar el eslabón se puede obtener mediante la siguiente ecuación ya que esta se tomó en voladizo⁴³;

$$y_{\max} = \frac{-Pa^2}{6EI} (3L - a)$$

Donde:

y_{\max} es la deflexión máxima en

P es la carga aplicada en un punto de 20,4333 N

a es la distancia que hay entre el empotramiento hasta donde se encuentra la fuerza aplica de 198,18 mm

E es el módulo de elasticidad del material de 69 GPa

I es el momento de inercia de la sección transversal del eslabón de 717,1875 mm⁴

L es la longitud total de la "viga" desde el empotramiento de 220 mm

⁴³ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p. A-21

$$y_{\max} = \frac{-(20,4333 \text{ N})(198,18 \text{ mm})^2}{6(69000 \frac{\text{N}}{\text{mm}})(717,1875 \text{ mm}^4)} (3(220 \text{ mm}) - (198,18 \text{ mm}))$$

Obteniendo como resultado una deflexión máxima de;

$$y_{\max} = -1,2482 \text{ mm}$$

Desarrollando las ecuaciones de singularidad se pueden encontrar las ecuaciones para poder conocer los diagramas de fuerza cortante y momento flector a las que está sometido el eslabón;

$$V(x) = R_1 - F_m \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^0 - F_e \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^0 - F_t \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^0$$

$$M(x) = -R_1 x - F_m \langle x - 0,06114 \text{ m} \rangle^1 - F_e \langle x - 0,16318 \text{ m} \rangle^1 - F_t \langle x - 0,19818 \text{ m} \rangle^1 - R_2 \langle x - 0 \rangle^0$$

✓ Es de vital importancia tener en cuenta que para poder utilizar las ecuaciones de singularidad se debe tener en cuenta la siguiente regla⁴⁴;

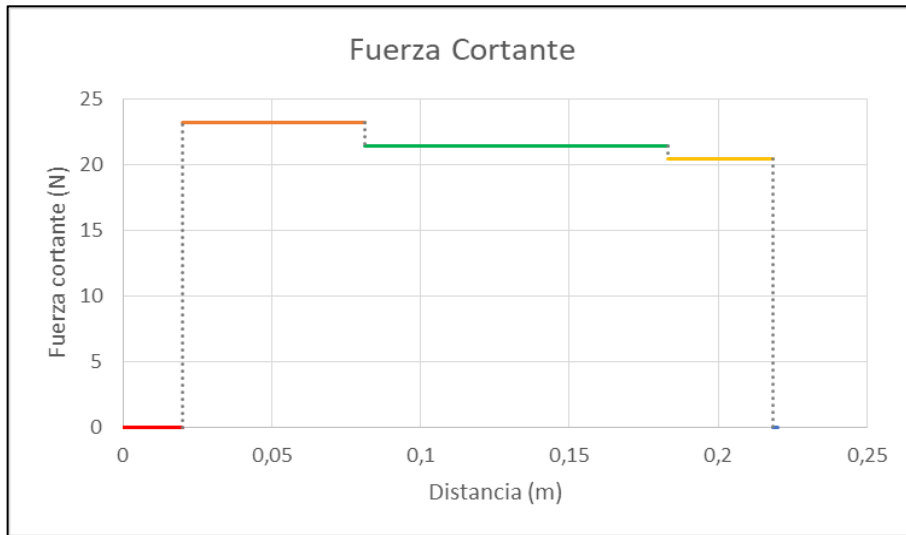
$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} (x - a)^n & \text{cuando } x \geq a \\ 0 & \text{cuando } x < a \end{cases}$$

y

$$\langle x - a \rangle^0 = \begin{cases} 1 & \text{cuando } x \geq a \\ 0 & \text{cuando } x < a \end{cases}$$

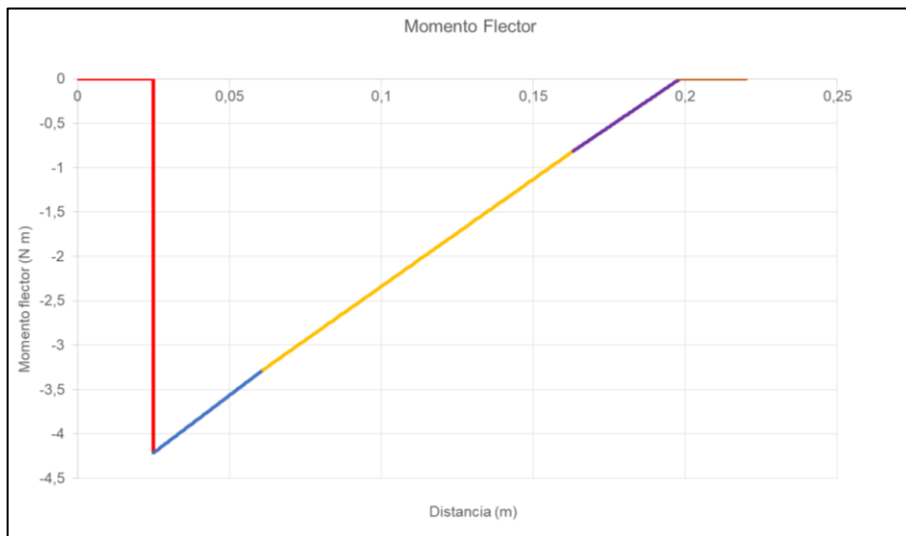
⁴⁴ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p 344

Figura 41. Fuerza cortante del eslabón rotacional corto



Fuente: elaboración propia

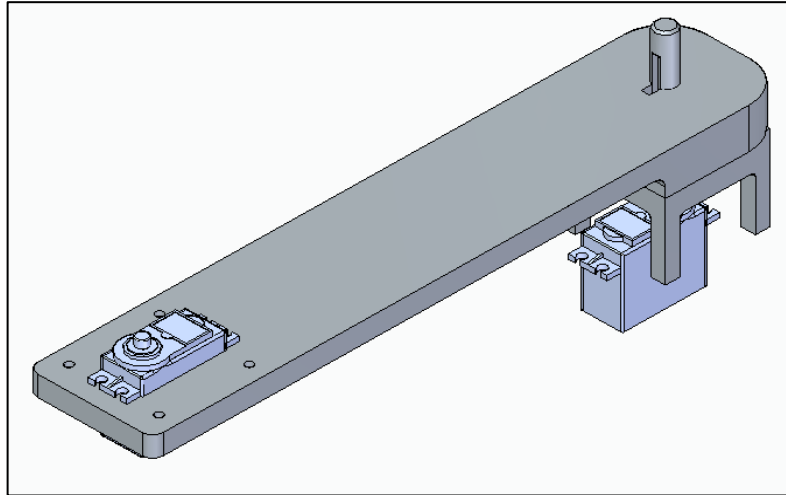
Figura 42. Momento flector del eslabón rotacional corto



Fuente: elaboración propia

3.4.3.2 Eslabón rotacional largo. Es el eslabón encargado de dar soporte y movimiento a todo el sistema en general en donde se encuentran los subsistemas del eslabón rotacional corto, el piñón cremallera y el efector final.

Figura 43. Eslabón rotacional largo



Fuente: elaboración propia

El conjunto de piezas de los subsistemas tienen un peso 1,5 Kg (14,7150 N). Se utilizará un factor de seguridad de 5 debido a que las aplicaciones a las cuales estará sometido el brazo robótico pueden variar. Con ello se conoce que la fuerza necesaria para poder realizar el movimiento debe ser de 73,5750 N.

$$F_t = \frac{T}{r}$$
$$T = F_t \cdot r$$

$$T = 73,5750 \text{ N} \cdot 0,01 \text{ m}$$

$$T = 0,7358 \text{ N m}$$

Figura 44. TowerPro MG959



Fuente: Hobby King. Disponible en: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-tm-mg959-v2-alloy-dg-mg-servo-30kg-0-15sec-78g

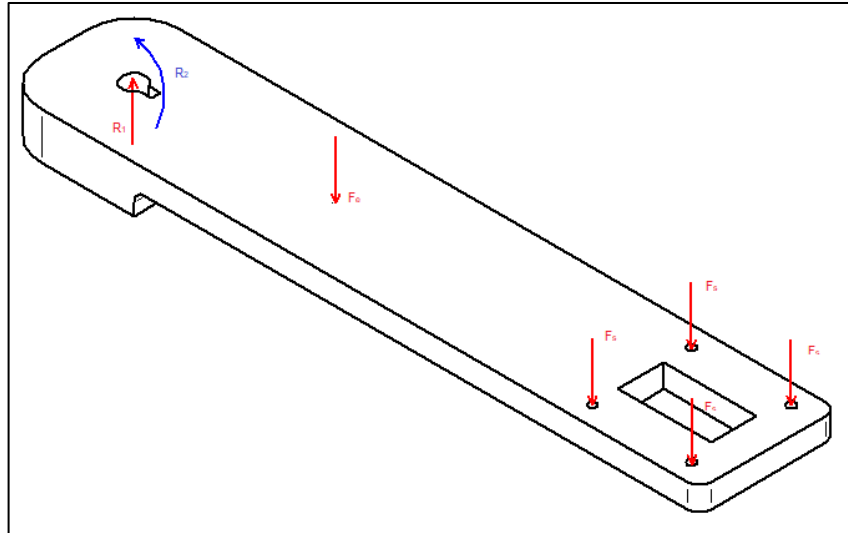
El servomotor TowerPro MG959 cuenta con las siguientes especificaciones;

- ✓ Torque de salida (T): 32 Kg cm (3,1381 N m)
- ✓ Velocidad angular (ω): 0,14 s/60° a 6 V. ~ 100 rpm
- ✓ Peso: 78 g
- ✓ Dimensiones: Alto: 42,9 mm. Ancho: 19,7 mm. Largo: 40,7 mm
- ✓ Tipo de engranaje: Metálico

Mediante el análisis mecánico de la pieza del eslabón rotacional corto se pueden encontrar las fuerzas actuantes en este, y se puede comprobar si existe una deflexión en este causados por dichas fuerzas.

El eslabón se analiza como una viga en voladizo, las fuerzas que actúan sobre este eslabón son las generadas por la masa del mismo ($F_e = 5,3563$ N) y los subsistemas montados en el eslabón ($F_s = 14,7150$ N).

Figura 45. Esquema de fuerzas del eslabón rotacional largo



Fuente: elaboración propia

Se pueden obtener del diagrama de cuerpo libre las siguientes sumatorias de fuerzas;

✓ Sumatoria de fuerzas en Y;

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_1 - F_e - \frac{F_s}{2} - \frac{F_s}{2} = 0$$

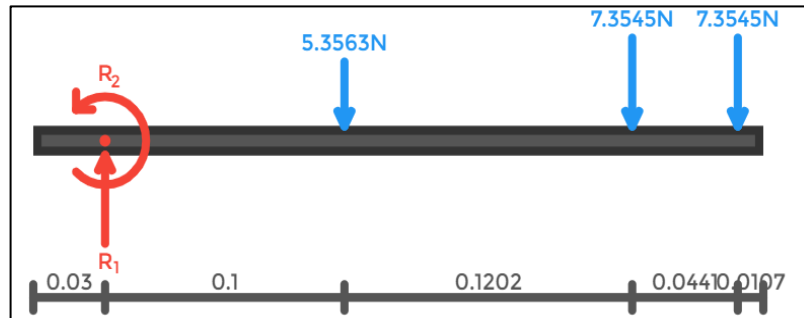
De la ecuación anterior se puede despejar la R_1 , donde se obtiene;

$$R_1 = F_e + F_s$$

$$R_1 = 5,3563 + 14,7150 \text{ N}$$

$$R_1 = 20,0513 \text{ N}$$

Figura 46. DCL del eslabón rotacional largo



Fuente: elaboración propia

- ✓ Sumatoria de momentos en R;

$$\Sigma M_R = 0$$

$$R_2 - F_e (0,1 \text{ m}) - \frac{F_s}{2} (0,22023 \text{ m}) - \frac{F_s}{2} (0,26341 \text{ m}) = 0$$

$$R_2 = 0,5356 \text{ N m} + 1,6203 \text{ N m} + 1,9380 \text{ N m}$$

$$M_a = 4,0939 \text{ N m}$$

Mediante las ecuaciones de singularidad⁴⁵ se puede encontrar el comportamiento del eslabón con respecto a la fuerza cortante y al momento flector, este método utiliza las siguientes ecuaciones y diagramas;

- ✓ La fuerza cortante se expresa mediante la siguiente función;

$$\frac{dM}{dx} = V(x)$$

La siguiente ecuación representa la fuerza cortante mediante el método de singularidad;

$$V(x) = R_1 - F_e \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^0 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^0 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^0$$

- ✓ El momento flector es expresado mediante la siguiente función;

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)$$

⁴⁵ Beer, Ferdinand, *et al.* Mecánica de materiales. 5 ed. México.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A. 2010. p 345.

La siguiente ecuación representa el momento flector mediante el método de singularidad;

$$M(x) = -R_1x - F_e \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^1 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^1 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^1 - R_2 \langle x - 0 \rangle^0$$

Mediante el método de doble integración se puede resolver la función del momento flector, con la cual se podrán determinar los valores de las constantes de integración y de esta manera poder conocer la deflexión a lo largo de la geometría;

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -R_1x - F_m \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^1 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^1 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^1 - R_2 \langle x - 0 \rangle^0$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{-R_1}{2} x^2 - \frac{F_e}{2} \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^2 - \frac{F_s}{4} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^2 - \frac{F_s}{4} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^2 - R_2 \langle x - 0 \rangle^1 + C_1$$

$$EI y = \frac{-R_1}{6} x^3 - \frac{F_s}{6} \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_e}{18} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_t}{18} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^3 - \frac{R_2}{2} \langle x - 0 \rangle^2 + C_1x + C_2$$

Las constantes de integración se encuentran a partir de las condiciones de borde de la "viga";

$$\checkmark x = 0, y = 0]$$

$$EI (0) = \frac{-R_1}{6} (0)^3 - \frac{F_s}{6} \langle (0) - 0,1 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_e}{18} \langle (0) - 0,22023 \text{ m} \rangle^3 - \frac{F_t}{18} \langle (0) - 0,26341 \text{ m} \rangle^3 - \frac{R_2}{2} \langle (0) - 0 \rangle^2 + C_1x + C_2$$

Dando como resultado

$$C_2 = 0$$

La otra condición de borde se puede encontrar mediante la siguiente ecuación,

$$\checkmark [x = 0, y' = 0]$$

$$EI(0) = \frac{-R_1}{2}(0) - \frac{F_e}{2}((0) - 0,1 \text{ m})^2 - \frac{F_s}{4}((0) - 0,22023 \text{ m})^2 - \frac{F_s}{4}((0) - 0,26341 \text{ m})^2 - R_2((0) - 0)^1 + C_1$$

Dando como resultado

$$C_1 = 0$$

La deflexión máxima que puede llegar a soportar el eslabón se puede obtener mediante la siguiente ecuación ya que esta se tomó en voladizo⁴⁶;

$$y_{\max} = \frac{-Pa^2}{6EI}(3L - a)$$

Donde:

y_{\max} es la deflexión máxima en

P es la carga aplicada en un punto de 7,3575 N

a es la distancia que hay entre el empotramiento hasta donde se encuentra la fuerza aplica de 263,41 mm

E es el módulo de elasticidad del material de 69 GPa

I es el momento de inercia de la sección transversal del eslabón de 5000 mm⁴

L es la longitud total de la “viga” desde el empotramiento de 275 mm

$$y_{\max} = \frac{-(7,3575 \text{ N})(263,41 \text{ mm})^2}{6(69000 \frac{\text{N}}{\text{mm}})(5000 \text{ mm}^4)}(3(275 \text{ mm}) - (263,41 \text{ mm}))$$

Obteniendo como resultado una deflexión máxima de;

$$y_{\max} = -0,1385 \text{ mm}$$

Desarrollando las ecuaciones de singularidad se pueden encontrar las ecuaciones para poder conocer los diagramas de fuerza cortante y momento flector a las que está sometido el eslabón;

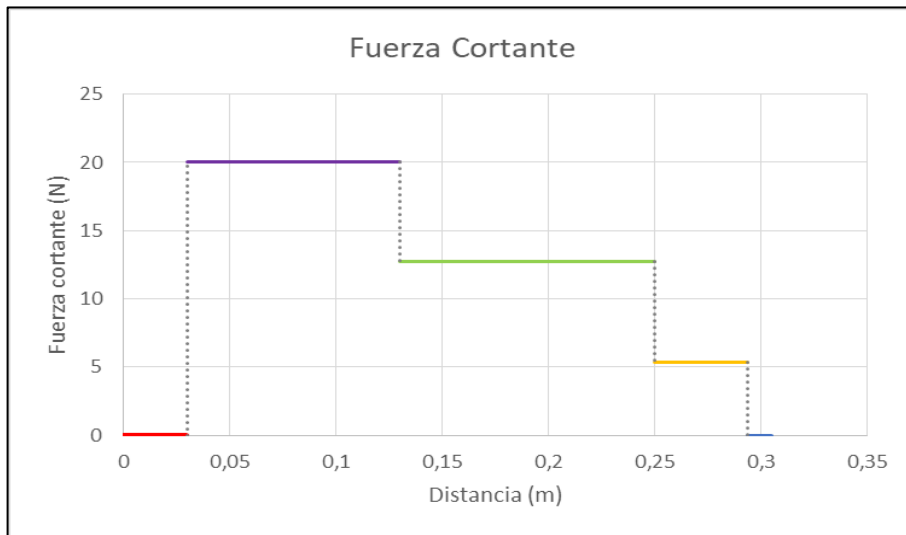
⁴⁶ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p. A-21

$$V(x) = R_1 - F_e \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^0 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^0 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^0$$

$$M(x) = -R_1 x - F_e \langle x - 0,1 \text{ m} \rangle^1 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,22023 \text{ m} \rangle^1 - \frac{F_s}{2} \langle x - 0,26341 \text{ m} \rangle^1 - R_2 \langle x - 0 \rangle^0$$

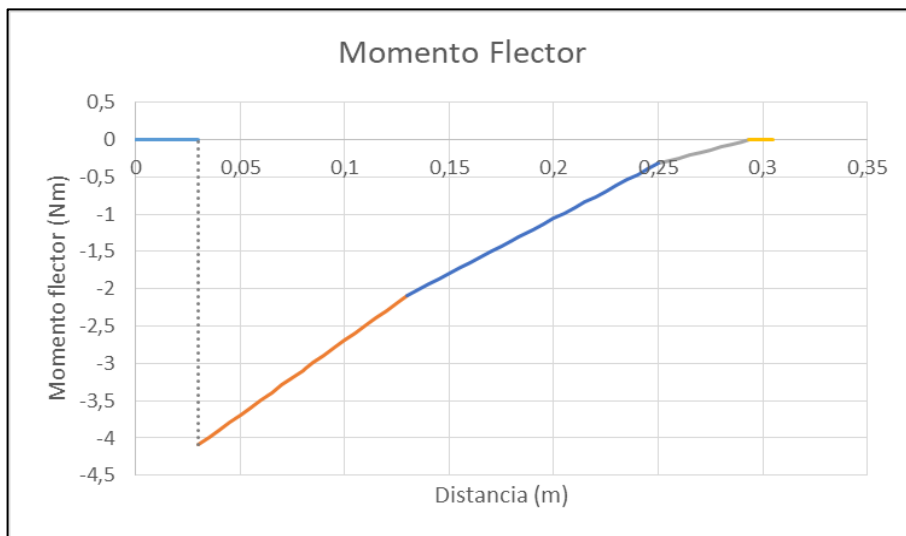
Obteniendo los siguientes diagramas de fuerza cortante y momento flector;

Figura 47. Fuerza cortante del eslabón rotacional largo



Fuente: elaboración propia

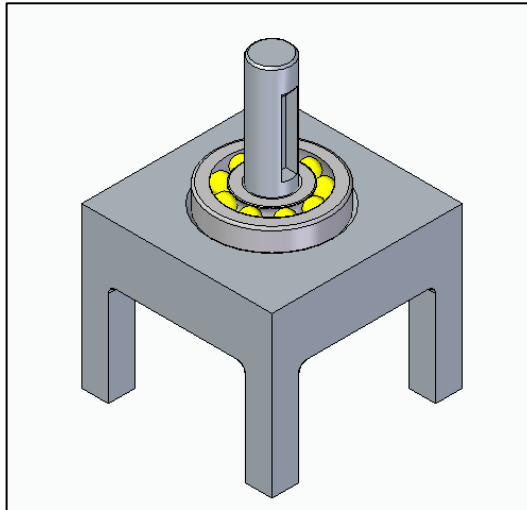
Figura 48. Momento flector del eslabón rotacional largo



Fuente: elaboración propia

3.4.4 Soporte de los eslabones. Esta pequeña estructura es la encargada de soportar las cargas generadas por los eslabones, que llevan consigo los demás subsistemas del brazo robótico. Este soporte estará fabricado en aluminio 6061 T6.

Figura 49. Soporte de los eslabones



Fuente: elaboración propia

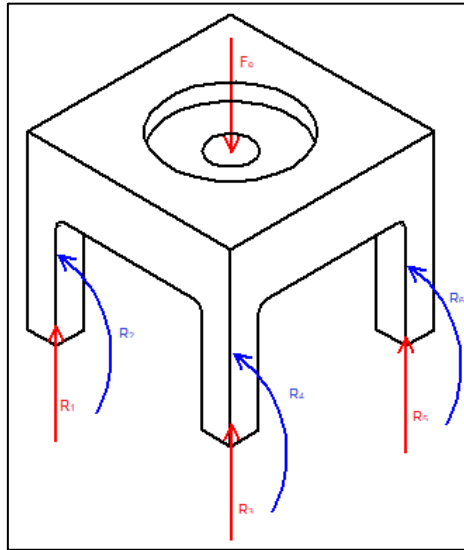
En este también estará montado un rodamiento de bolas de doble hilera de referencia SKF ET 1200, el cual ayudará el movimiento del eje, y la configuración presentada soluciona problemas de deflexión que puedan presentar los eslabones.

Este soporte debido a que este soporte va a ir sujeto a en sus apoyos mediante tornillos, este se comporta como un empotramiento, por este motivo se generarían ocho reacciones de fuerzas normales y momentos, generando un caso hiperestático.

Para poder solucionar este tipo de casos se debe trabajar con el método de superposición de vigas para poder encontrar dichas reacciones, así que se ha decidió solo trabajar las “patas” del soporte mediante un chequeo por esbeltez, de tal manera se pueda verificar que estas son capaces de soportar las cargas a las cuales sean sometidas. Se realizará el análisis con las cargas desde los subsistemas del eslabón rotacional largo, ya que este genera la máxima carga en el soporte

El conjunto de piezas desde el efector final hasta el eslabón rotacional tiene una masa de 2 Kg, que equivalen a 19,62 N.

Figura 50. Esquema del soporte



Fuente: elaboración propia

El chequeo por esbeltez⁴⁷ se puede desarrollar de la siguiente manera:

✓ Se encuentra la relación de esbeltez con la siguiente ecuación;

$$\frac{KL}{r}$$

Donde;

K = Factor de longitud efectiva real que depende de los apoyos de la columna, que en este caso esta empotrada - empotrada y tiene un valor de 0,65

L = Longitud del elemento de 27 mm

r = Radio de giro mínimo de 2,0207 mm

$$Re = \frac{(0,65)(27 \text{ mm})}{(2,0207 \text{ mm})}$$

$$Re = 8,6851$$

⁴⁷ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p. 234

- ✓ Se debe encontrar la relación de esbeltez de transición con la siguiente ecuación;

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}}$$

Donde;

C_c = Relación de esbeltez de transición

E = Modulo elástico del aluminio 6061 T6 de 69 GPa

S_y = Resistencia a la fluencia del aluminio 6061 T6 de 214 MPa

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 69000 \text{ MPa}}{214 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 79,7779$$

- ✓ Como $KL/r < C_c$ la columna es corta y se utiliza la ecuación de Johnson para calcular la carga crítica;

$$P_{cr} = A S_y \left[1 - \frac{S_y \left(\frac{KL}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

Donde;

P_{cr} = Carga critica del elemento

E = Modulo elástico del aluminio 6061 T6 de 69 GPa

S_y = Resistencia a la fluencia del aluminio 6061 T6 de 214 MPa

A = Área transversal del elemento de 49 mm²

KL/r = relación de esbeltez de 8,6851

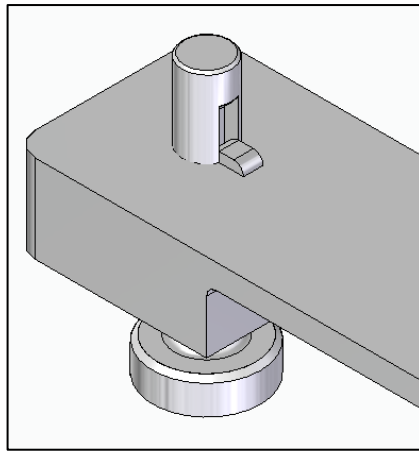
$$P_{cr} = 49 \text{ mm}^2 214 \text{ MPa} \left[1 - \frac{214 \text{ MPa} (8,6851)^2}{4\pi^2 69000 \text{ MPa}} \right]$$

$$P_{cr} = 10,4239 \text{ KN}$$

Los soportes son capaces de soportar las cargas de los eslabones, sin generar ningún tipo de falla por flexión.

3.4.5 Cuña de transmisión del eje. Esta cuña es la que permite que el eje que proviene de cualquier servomotor pueda brindar movimiento a los eslabones. Esta estará fabricada en aluminio 6061 T6.

Figura 51. Cuña



Fuente: elaboración propia

Debido al torque generado por el eje, la cuña puede llegar a fallar debido al esfuerzo cortante⁴⁸ que este genera

$$F = \frac{T}{r}$$

Donde;

F = Fuerza cortante en N

T = Torque generado por el servomotor de 3,1381 N m

r = Radio del eje de 0,01 m

$$F = \frac{3,1381 \text{ N m}}{0,01 \text{ m}}$$

⁴⁸ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p.499

$$F = 313,81 \text{ N}$$

El esfuerzo cortante se expresa de la siguiente manera;

$$\tau = \frac{T}{r W L}$$

Donde;

τ = Esfuerzo cortante en MPa

T = Torque generado por el servomotor de 3,1381 N m

r = Radio del eje de 0,01 m

W = Ancho de la cara de la cuña de 0,004 m

L = Longitud de la cuña de 0,012 m

$$\tau = \frac{3,1381 \text{ N m}}{(0,01 \text{ m})(0,004 \text{ m})(0,012 \text{ m})}$$

$$\tau = 6,5277 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante máximo se puede conocer mediante la siguiente ecuación;

$$\tau_d = \frac{0,5 S_y}{N}$$

Donde;

τ = Esfuerzo cortante en MPa

S_y = Resistencia a la fluencia del aluminio 6061 T6 de 214 MPa

N = Factor de seguridad de 3

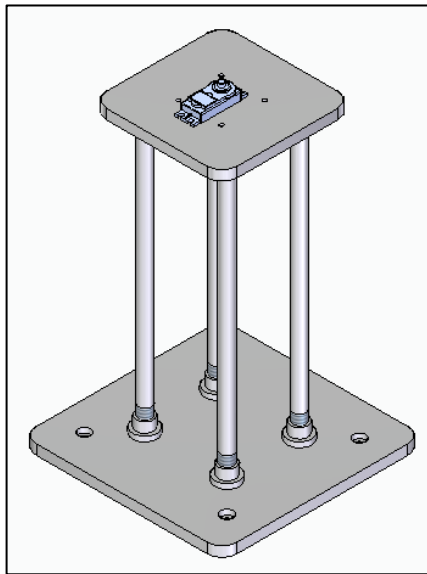
$$\tau_d = \frac{0,5 \cdot 214 \text{ MPa}}{3}$$

$$\tau_d = 35,6667 \text{ MPa}$$

La cuña no falla por esfuerzo cortante, debido a que el esfuerzo generado por el eje es menor al del esfuerzo cortante máximo que puede resistir el material

3.4.6 Varillas del soporte del servomotor. Estas varillas serán las encargadas de soportar la carga generada por todo el conjunto de los subsistemas de los eslabones y actuadores que pesan 3 Kg. Se seleccionó el acero inoxidable 310 como material de fabricación ya que este ofrece mayor resistencia que el aluminio, pero su peso no aumenta considerablemente.

Figura 52. Varillas de soporte



Fuente: elaboración propia

Estas varillas también se analizarán por medio del chequeo por esbeltez⁴⁹ y se puede desarrollar de la siguiente manera:

✓ Se encuentra la relación de esbeltez con la siguiente ecuación;

$$\frac{KL}{r}$$

Donde;

K = Factor de longitud efectiva real que depende de los apoyos de la columna, que en este caso está empotrada - empotrada y tiene un valor de 0,65

L = Longitud del elemento de 280 mm

r = Radio de giro mínimo de 12,7 mm

⁴⁹ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p. 234

$$Re = \frac{(0,65)(280 \text{ mm})}{(12,7 \text{ mm})}$$

$$Re = 14.3307$$

- ✓ Se debe encontrar la relación de esbeltez de transición con la siguiente ecuación;

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}}$$

Donde;

C_c = Relación de esbeltez de transición

E = Modulo elástico del acero inoxidable 310 de 200 GPa

S_y = Resistencia a la fluencia del acero inoxidable 310 de 310 MPa

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 200000 \text{ MPa}}{310 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 112,8493$$

- ✓ Como $KL/r < C_c$ la columna es corta y se utiliza la ecuación de Johnson para calcular la carga crítica;

$$P_{cr} = A S_y \left[1 - \frac{S_y \left(\frac{KL}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

Donde;

P_{cr} = Carga crítica del elemento

E = Modulo elástico del acero inoxidable 310 de 200 GPa

S_y = Resistencia a la fluencia del acero inoxidable 310 de 310 MPa

A = Área transversal del elemento de 126,6769 mm²

KL/r = relación de esbeltez de 14,3307

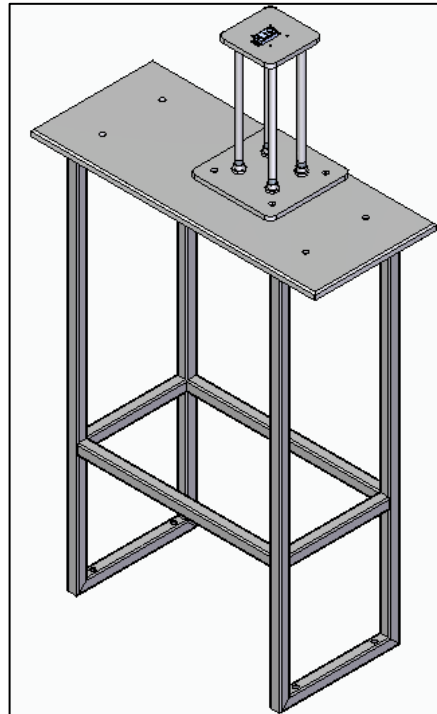
$$P_{cr} = 126,6769 \text{ mm}^2 \cdot 310 \text{ MPa} \left[1 - \frac{310 \text{ MPa}(14,3307)^2}{4\pi^2 \cdot 200000 \text{ MPa}} \right]$$

$$P_{cr} = 38,9532 \text{ KN}$$

Las varillas son capaces de soportar todas las cargas generadas por los subsistemas de los eslabones y actuadores del brazo robótico.

3.4.7 Estructura de soporte. Es la estructura encargada de soportar todo el conjunto del brazo robótico que pesa 15 Kg, se seleccionó el acero estructural A242,

Figura 53. Estructura del brazo



Fuente: elaboración propia

✓ Se encuentra la relación de esbeltez con la siguiente ecuación;

$$\frac{KL}{r}$$

Donde;

K = Factor de longitud efectiva real que depende de los apoyos de la columna, que en este caso esta empotrada - empotrada y tiene un valor de 0,65

L = Longitud del elemento de 918,8 mm

r = Radio de giro mínimo de 9,5 mm

$$Re = \frac{(0,65)(918,8 \text{ mm})}{(9,5 \text{ mm})}$$

$$Re = 62,8653$$

✓ Se debe encontrar la relación de esbeltez de transición con la siguiente ecuación;

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{s_y}}$$

Donde;

C_c = Relación de esbeltez de transición

E = Modulo elástico del acero estructural A242 de 200 GPa

s_y = Resistencia a la fluencia del acero estructural A242 de 345 MPa

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 200000 \text{ MPa}}{345 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 106,9721$$

✓ Como $KL/r < C_c$ la columna es corta y se utiliza la ecuación de Johnson para calcular la carga critica;

$$P_{cr} = A s_y \left[1 - \frac{s_y \left(\frac{KL}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

Donde;

P_{cr} = Carga critica del elemento

E = Modulo elástico del acero estructural A242 de 200 GPa

S_y = Resistencia a la fluencia del acero estructural A242 de 345 MPa

A = Área transversal del elemento de 135 mm²

KL/r = relación de esbeltez de 62,8653

$$P_{cr} = 135 \text{ mm}^2 \cdot 345 \text{ MPa} \left[1 - \frac{345 \text{ MPa}(62,8653)^2}{4\pi^2 \cdot 200000 \text{ MPa}} \right]$$

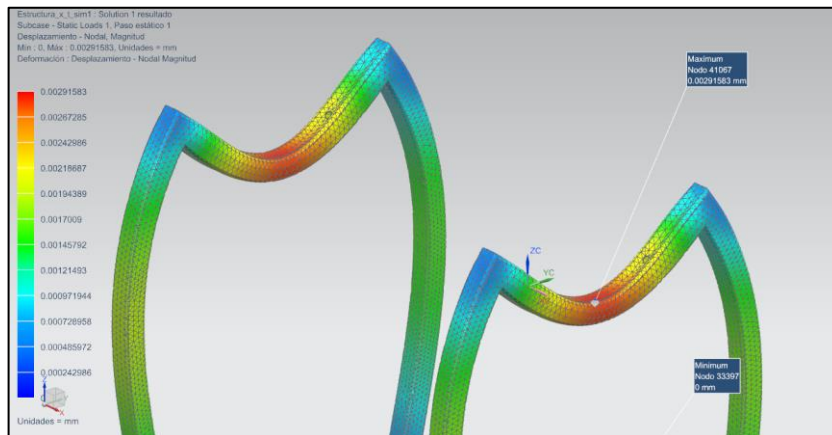
$$P_{cr} = 38,5323 \text{ KN}$$

La estructura es capaz de soportar las cargas generadas por el brazo robótico, de igual se seleccionaron unos rodachines los cuales cuentan con frenos, que ayudan a la movilidad de la estructura dentro del laboratorio.

3.4.7.1 Verificación de la estructura por el método de los elementos finitos. Mediante un software especializado como lo es el NX Siemens, se puede comprobar el comportamiento aproximado del elemento.

Las condiciones iniciales del modelo son un tamaño de elemento establecido por el programa de 9,18 mm, el cual da una cantidad de elementos de más de 200.000, por consiguiente no se procede a realizar un refinamiento de malla. Los resultados obtenidos mediante la simulación, fueron que para los travesaños de la estructura en los cuales estará soportada la carga tendrán una deflexión máxima de 0,0021 mm mientras que las “columnas” no sufrirán de alguna deformación.

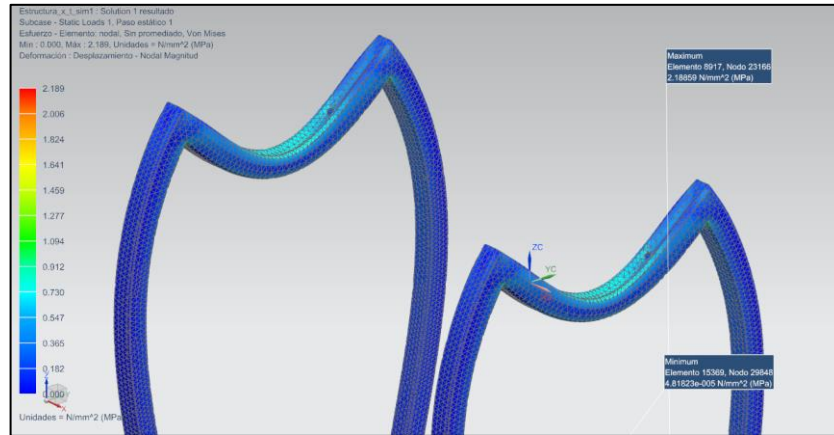
Figura 54. Desplazamiento maximo de la estructura



Fuente: elaboración propia

De igual manera se comprobó que los travesaños de la estructura sufrirán un esfuerzo máximo de 2,189 MPa, mientras que las columnas conforme aumenta su altura aumenta el esfuerzo a los cuales estará sometido, y que toman valores entre 0,0002 MPa hasta 0,1 Mpa.

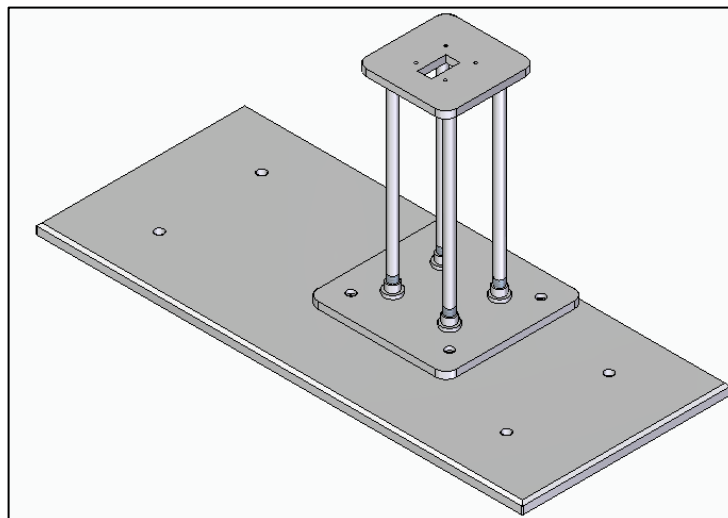
Figura 55. Esfuerzo máximo de la estructura



Fuente: elaboración propia

3.4.8 Placa de la estructura. Esta placa será la encargada de soportar las cargas generadas por todo el sistema del brazo robótico, esta será fabricada a partir de una lámina de duraluminio 7075 T6, debido a que este aporta una buena resistencia mecánica con un bajo peso. Esta estará sujeta a la estructura, por este motivo las reacciones en los apoyos son empotramientos, debido a que se tienen cuatro empotramientos y solo una carga aplicada, la placa será analizada como un elemento hiperestático.

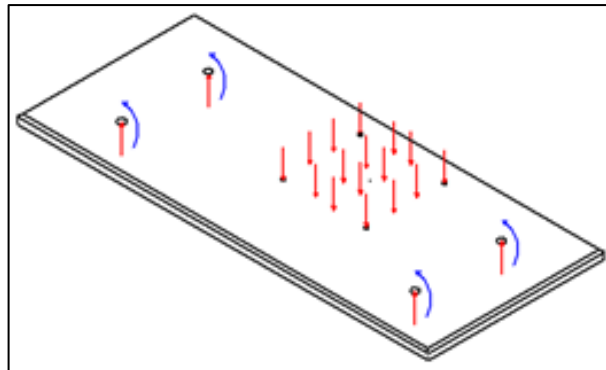
Figura 56. Placa estructural



Fuente: elaboración propia

Se analizara la placa como un elemento con apoyo en los extremos, debido a que no se encuentra el metodo apropiado para el analisis mecanico de este, para ello se utilizaran las siguientes ecuaciones⁵⁰, con las cuales se pueden determinar las reacciones en los apoyos, los momentos generados y la deflexion presente en la placa;

Figura 57. Fuerzas de la placa estructural



Fuente: elaboración propia

✓ Reacciones en los apoyos

Reacción en el apoyo R_1 :

$$R_1 = \frac{Pb^2}{L^3} (3a + b)$$

Donde;

R_1 = Reacción en el apoyo

P = Carga del elemento de 68 N

a = Distancia entre R_1 hasta la carga de 0,295 m

b = Distancia entre R_2 hasta la carga de 0,205 m

L = Longitud entre los apoyos de 0,5 m

$$R_1 = \frac{68 \text{ N } (0,205 \text{ m})^2}{(0,5 \text{ m})^3} (3(0,295 \text{ m}) + (0,205 \text{ m}))$$

⁵⁰ MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson educación de México, S. A. 2006. p. A24

$$R_1 = 24,9191 \text{ N}$$

Reacción en el apoyo R₂:

$$R_2 = \frac{Pa^2}{L^3} (3b + a)$$

Donde;

R₂ = Reacción en el apoyo

P = Carga del elemento de 68 N

a = Distancia entre R₁ hasta la carga de 0,295 m

b = Distancia entre R₂ hasta la carga de 0,205 m

L = Longitud entre los apoyos de 0,5 m

$$R_2 = \frac{68 \text{ N} (0,295 \text{ m})^2}{(0,5 \text{ m})^3} (3(0,205 \text{ m}) + (0,295 \text{ m}))$$

$$R_2 = 43,0809 \text{ N}$$

✓ Momentos

Momento M_a

$$M_a = \frac{-Pab^2}{L^2}$$

Donde;

M_a = Momento generado en R₁

P = Carga del elemento de 68 N

a = Distancia entre R₁ hasta la carga de 0,295 m

b = Distancia entre R₂ hasta la carga de 0,205 m

L = Longitud entre los apoyos de 0,5 m

$$M_a = \frac{-(68 \text{ N})(0,295 \text{ m})(0,205 \text{ m})^2}{(0,5 \text{ m})^2}$$

$$M_a = 3,3721 \text{ N m}$$

Momento M_b

$$M_b = \frac{2Pa^2b^2}{L^2}$$

Donde;

M_b = Momento generado en la carga

P = Carga del elemento de 68 N

a = Distancia entre R_1 hasta la carga de 0,295 m

b = Distancia entre R_2 hasta la carga de 0,205 m

L = Longitud entre los apoyos de 0,5 m

$$M_b = \frac{2(68 \text{ N})(0,295 \text{ m})^2(0,205 \text{ m})^2}{(0,5 \text{ m})^2}$$

$$M_b = 1,9895 \text{ N m}$$

Momento M_c

$$M_c = \frac{-Pa^2b}{L^2}$$

Donde;

M_c = Momento generado en la carga

P = Carga del elemento de 68 N

a = Distancia entre R_1 hasta la carga de 0,295 m

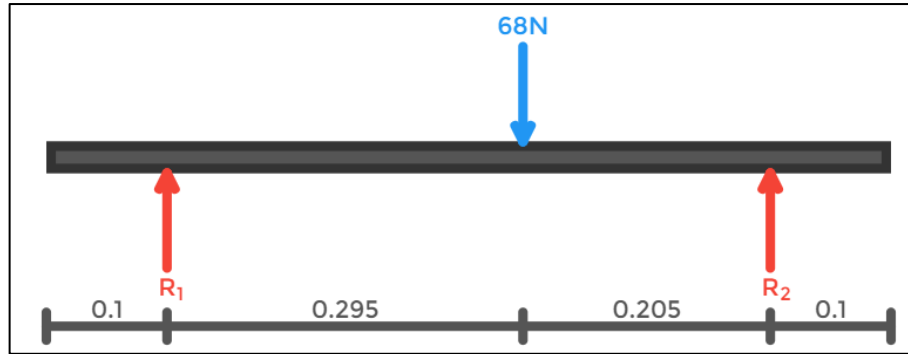
b = Distancia entre R_2 hasta la carga de 0,205 m

L = Longitud entre los apoyos de 0,5 m

$$M_c = \frac{-(68 \text{ N})(0,295 \text{ m})^2(0,205 \text{ m})}{(0,5 \text{ m})^2}$$

$$M_c = -4,8525 \text{ N m}$$

Figura 58. DCL de la placa estructural



Fuente: elaboración propia

✓ Deflexión

$$y_b = \frac{-Pa^3b^2}{3EIL^3}$$

Donde;

y_b = Deflexión máxima en la placa

P = Carga del elemento de 68 N

a = Distancia entre R_1 hasta la carga de 0,295 m

b = Distancia entre R_2 hasta la carga de 0,205 m

L = Longitud entre los apoyos de 0,5 m

I = Momento de inercia de la placa de 0,000000084 m⁴

E = Modulo elástico del aluminio 7075 T6 de 72 GPa

$$y_b = \frac{-(68 \text{ N})(0,295 \text{ m})^3(0,205 \text{ m})^2}{3(72.000 \text{ MPa})(0,000000084 \text{ m}^4)(0,5 \text{ m})^3}$$

$$y_b = -0,03234 \text{ m}$$

3.5 PROGRAMACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO.

Para que el brazo robótico pueda cumplir correctamente con su función, es necesario programar los servomotores para que a su vez estos permitan el movimiento del brazo. Para lograr esto es necesario recurrir a una metodología que se mencionó anteriormente en la parametrización, la cual es la metodología Denavit Hartenberg, esta metodología permite determinar la posición o coordenada final en la cual se desea que el brazo se ubique en los respectivos ejes X, Y y Z. Es importante aclarar que la metodología se trabajará mediante la cinemática directa y no mediante la inversa, debido a que lo que se requiere es encontrar la coordenada final del efector estableciendo parámetros de entrada que serán dos ángulos y una longitud vertical, y no mediante las coordenadas llegar a los parámetros. A continuación, se explicará detalladamente como se halla esta coordenada y como trabaja esta metodología.

3.5.1 Metodología Denavit Hartenberg. Este método, creado en el año de 1955 por Jacques Denavit y Richard Hartenberg, permite determinar el movimiento relativo de un eslabón respecto a otro si estos se encuentran en la misma cadena cinemática. Es importante determinar el movimiento relativo entre eslabones, ya que dichos movimientos permiten establecer la posición final del efector del brazo.

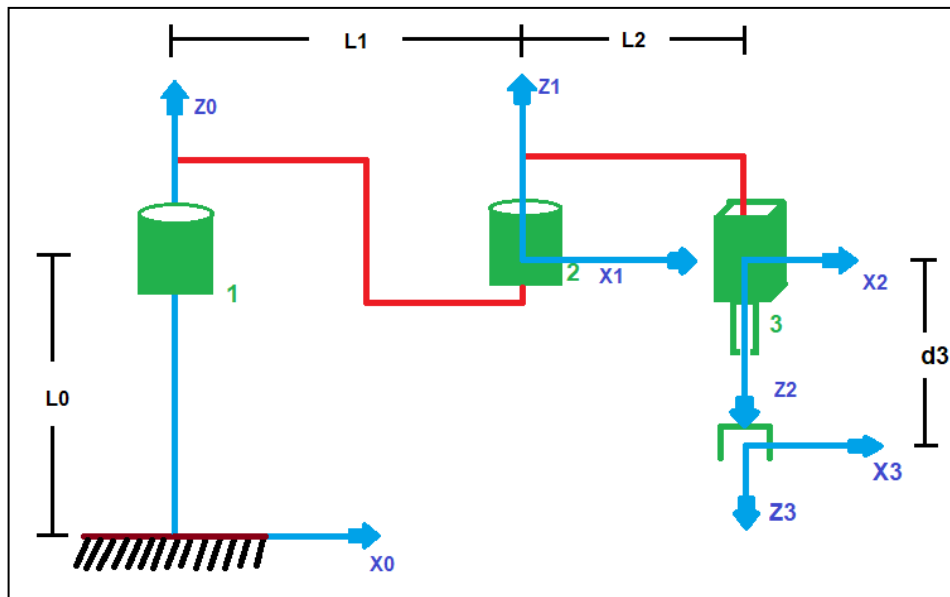
Para poder determinar el movimiento relativo entre eslabones, esta metodología emplea dos factores muy importantes, el primero es una serie de parámetros geométricos que ayudan a comprender la movilidad del robot en el espacio, el segundo son las matrices de transformación homogéneas, que se explicaran más adelante. Los parámetros geométricos se detallaron en la parametrización, pero aquí se explicarán de nuevo.

Es importante recordar que para determinar los parámetros DH del robot es necesario establecer un sistema de coordenadas en cada articulación, dichos parámetros son los siguientes;

- ✓ El parámetro (α_i) es el ángulo al que debe girarse al eje Z_{i-1} alrededor del eje X_i para quedar alineado con Z_i
- ✓ El parámetro (θ_i) es el ángulo al que debe girarse al eje X_{i-1} alrededor del eje Z_i para quedar paralelo con X_i
- ✓ El parámetro (d_i) es la distancia que X_{i-1} se tiene que desplazar en la dirección Z_{i-1} para quedar alineado con X_i
- ✓ El parámetro (a_i) es la distancia que el sistema de coordenadas S_{i-1} se tiene que desplazar en la dirección X_i para coincidir con el origen del sistema S_i

Para entender de una mejor manera los parámetros descritos por Denavit y Hartenberg, a continuación, se muestra el dibujo esquemático de un robot de tres grados de libertad, el cual describe correctamente el robot de este proyecto ya que posee los mismos grados de libertad, además a partir de este esquema se explicarán cómo se hallan los parámetros DH.

Figura 59. Esquema cinemático del brazo robótico de 3 GDL



Fuente: elaboración propia, basado en SANZ, Wilmer Cinemática directa robot SCARA [En línea], Marzo 2014. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=b3dINxuqLm0>

En el esquema se puede apreciar de color verde las articulaciones del brazo robótico, siendo las articulaciones número 1 y 2 rotacionales, es decir que permiten rotar a los eslabones unidos a estas. La articulación número 3 es prismática, lo cual significa que esta se puede desplazar de arriba hacia abajo y viceversa., para el caso del robot de este proyecto, dicha articulación trabajará mediante el mecanismo de piñón cremallera.

Los ejes de color azul presentes en el esquema son los sistemas de coordenadas que se deben establecer para cada articulación del manipulador, siguiendo el método de DH, estos sistemas son la base principal para poder determinar los parámetros antes mencionados. Es importante aclarar que el sistema de coordenadas ubicado en el centro de la garra hace las veces del sistema enésimo de coordenadas, es decir sirve como referencia para establecer los parámetros de la articulación prismática.

A partir del esquema anterior, el parámetro (α_i) hace referencia al grado al cual se debe girar el eje Z alrededor del eje X de una articulación para que este quede

alineado con el eje Z de la articulación inmediatamente siguiente en la cadena cinemática, esto quiere decir en términos del método DH, que la articulación que se está analizando recibe el subíndice (i-1) y la articulación posterior a la que está siendo analizada recibe el subíndice (i), esta connotación aplica para todos los parámetros.

El parámetro (θ_i), hace referencia al ángulo al cual se debe girar el eje X alrededor del eje Z de una articulación para que este quede alineado con el eje X de la articulación inmediatamente siguiente en la cadena cinemática.

El parámetro (d_i), hace referencia a la distancia a la cual se debe desplazar el eje X en la dirección del eje Z de una articulación para que este quede alineado con el eje X de la articulación inmediatamente siguiente en la cadena cinemática.

El parámetro (a_i), hace referencia a la distancia a la cual se debe desplazar al sistema de coordenadas en la dirección del eje X de una articulación, para que su origen coincida con el sistema de coordenadas de la articulación inmediatamente siguiente en la cadena cinemática.

El método DH establece que se debe crear una tabla en la cual se especifiquen los parámetros para cada articulación del robot, a continuación, se expone dicha tabla con los parámetros específicos para el robot de este proyecto.

Tabla 5. Parámetros DH del brazo robótico

Articulación	Θ	D	A	A
1	θ_1	35	25	0
2	θ_2	0	20	180°
3	0	d_3	0	0

Fuente: elaboración propia

Los parámetros DH pueden ser variables o constantes, esto depende del tipo de articulación, ya que por ejemplo una articulación prismática no puede rotar, por lo tanto, los parámetros DH angulares para esta articulación tendrían un valor constante de cero.

La articulación número uno (1) del brazo robótico de este proyecto es una articulación de tipo rotacional y gira gracias a la activación del servomotor seleccionado en el diseño. Esta articulación posee tres parámetros constantes y un parámetro variable. El parámetro (θ_1) puede tomar distintos valores angulares para que el eje X de esta articulación quede alineado con el eje X de la siguiente, este valor dependerá de la posición de la botella, es decir que este parámetro es variable. El parámetro (d) es un parámetro constante, ya que este depende de la altura del eslabón que va desde la base a la primera articulación y corresponde a

la distancia (L_0) que para el robot de este proyecto es igual a 35cm, ya que como dice la definición es la distancia que se debe desplazar el eje X en la dirección Z de la articulación para que quede alineado con el eje X de la siguiente articulación.

El parámetro (a) es constante y corresponde a la distancia (L_1) que es igual a 25cm, ya que es la distancia que se debe desplazar el sistema de coordenadas en la dirección del eje X de esta articulación para que su origen coincida con el origen del sistema de coordenadas de la siguiente. El parámetro (α) también es constante y toma un valor de cero, ya que es el ángulo al cual se debe girar el eje Z de la articulación alrededor del eje X de esta para que quede alineado con el eje Z de la siguiente articulación, pero como el eje Z de la articulación (1) se encuentra en la misma dirección del eje Z de la articulación (2) el valor de este parámetro es cero.

La articulación número dos (2) del brazo robótico, también es una articulación de tipo rotacional y gira gracias a la activación del servomotor seleccionado en el diseño. Esta articulación, al igual que la anterior también posee tres parámetros constantes y un parámetro variable. El parámetro (θ_2) también es variable por la misma razón que es variable en la articulación (1), además se suma que también depende del desplazamiento angular que tendrá la articulación (1) al momento de rotar. El parámetro (d) es constante para esta articulación, y corresponde a cero, ya que el eje X de la articulación (2) ya se encuentra alineado con el eje X de la siguiente articulación (3).

El parámetro (a) también es constante y corresponde a la distancia (L_2) que es igual a 20cm, ya que es la distancia que se debe desplazar el sistema de coordenadas en la dirección del eje X de esta articulación para que su origen coincida con el origen del sistema de coordenadas de la siguiente. El parámetro (α) también es constante y toma un valor de 180° para esta articulación, ya que si se observa el esquema, esta es la distancia angular que debe girar el eje Z_1 alrededor de X_1 para quedar alineado con Z_2 .

La articulación número tres (3) del brazo robótico es una articulación de tipo prismática y consta de un mecanismo piñón cremallera, este se desplaza de arriba hacia abajo gracias a la activación del motoreductor seleccionado en el diseño. Esta articulación, al igual que las dos anteriores posee tres parámetros constantes y un parámetro variable, el parámetro (θ) es igual a cero, ya que esta articulación solo puede desplazarse linealmente, mas no rotar. El parámetro (d_3) es un parámetro variable para este caso, ya que depende del desplazamiento longitudinal que debe realizar esta articulación para que el eje X_2 de esta quede alineado con el eje X_3 .

El parámetro (a) es constante para esta articulación y es igual a cero, debido a que el sistema de coordenadas de esta articulación ya está alineado con el

sistema de coordenadas de la pinza. El parámetro (α) también es constante y toma un valor de cero, puesto que el eje Z_2 ya se encuentra alineado con el eje Z_3 , por ende no hay que rotarlo nada.

Según lo descrito anteriormente se puede observar que cada articulación posee un parámetro que es variable, respectivamente son (θ_1) para la articulación 1, (θ_2) para la articulación 2 y (d_3) para la articulación 3, estos tres parámetros serán aquellos que permitan ubicar el efector final en las coordenadas deseadas mediante la variación de su valor numérico.

3.5.1.1 Matriz de transformación homogénea. Esta matriz es utilizada en la metodología de Denavit y Hartenberg para obtener la coordenada final en la cual se ubica el efector final del brazo robótico o manipulador al finalizar todo su recorrido.

En esta matriz se encuentran los cuatro parámetros anteriormente descritos, acompañados de las expresiones geométricas de seno y coseno.

La matriz de transformación homogénea de Denavit y Hartenberg es la siguiente;

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

La matriz anterior se obtiene mediante la multiplicación de cada matriz especificada para cada parámetro según la metodología DH, dicha multiplicación está dada por la siguiente ⁵¹expresión;

$${}^{i-1}A_i = T(z, d)T(z, \theta)T(x, a)T(x, \alpha)$$

Donde;

$$\checkmark T(z, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\checkmark T(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

⁵¹ TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. p. 61

$$\checkmark T(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & ai \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\checkmark T(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{sen}\alpha & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El resultado de multiplicar las cuatro matrices anteriores da como resultado la matriz de transformación de Denavit y Hartenberg, la cual se enunció al principio de este subcapítulo.

Una vez explicada la matriz de transformación DH, el siguiente paso para obtener la coordenada final del efector es establecer las matrices de transformación para cada articulación del brazo robótico. Esto se logra reemplazando los valores de cada uno de los parámetros definidos para cada una de las articulaciones en la matriz principal de transformación DH, obteniendo los siguientes resultados;

- ✓ Matriz de transformación de la articulación 1 con respecto a la base

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 & 0 & L1 \cos\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & L1 \text{sen}\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & L0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- ✓ Matriz de transformación de la articulación 2 con respecto a la articulación 1

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \text{sen}\theta_2 & 0 & L2 \cos\theta_2 \\ \text{sen}\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & L2 \text{sen}\theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- ✓ Matriz de transformación de la articulación 3 con respecto a la articulación 2

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Una vez definidas las matrices para cada articulación, se procede a multiplicar las tres matrices mediante un procedimiento normal de multiplicación matricial, primero se multiplican las matrices 0A_1 y 1A_2 , obteniendo el siguiente resultado;

$${}^0A_1 X {}^1A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2 & C\theta_1 S\theta_2 + S\theta_1 C\theta_2 & 0 & L_2(C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) + L_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 C\theta_2 + C\theta_1 S\theta_2 & S\theta_1 S\theta_2 - C\theta_1 C\theta_2 & 0 & L_2(C\theta_2 S\theta_1 + S\theta_2 C\theta_1) + L_1 S\theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde;

- ✓ $S\theta_1$: Seno de θ_1
- ✓ $S\theta_2$: Seno de θ_2
- ✓ $C\theta_1$: Coseno de θ_1
- ✓ $C\theta_2$: Coseno de θ_2

Después se multiplica la matriz anterior con la matriz 2A_3 , obteniendo la matriz de transformación del brazo robótico, la cual se muestra a continuación;

$$T = \begin{bmatrix} C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2 & C\theta_1 S\theta_2 + S\theta_1 C\theta_2 & 0 & L_2(C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) + L_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 C\theta_2 + C\theta_1 S\theta_2 & S\theta_1 S\theta_2 - C\theta_1 C\theta_2 & 0 & L_2(C\theta_2 S\theta_1 + S\theta_2 C\theta_1) + L_1 S\theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & (L_0 - d_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde;

- ✓ $S\theta_1$: Seno de θ_1
- ✓ $S\theta_2$: Seno de θ_2
- ✓ $C\theta_1$: Coseno de θ_1
- ✓ $C\theta_2$: Coseno de θ_2

La matriz obtenida anteriormente no solo permite determinar las coordenadas cartesianas en las cuales se requiere ubicar el efector final del brazo robótico, también permite conocer la posición y orientación de cualquier eslabón con respecto a la base fija, estableciendo previamente los ángulos θ_1 , θ_2 y la distancia d_3 .

Para entender mejor cada uno de los datos que componen la matriz de transformación DH y saber cuáles de esos datos son los relevantes para establecer la coordenada de posición final del efector del brazo robótico, es importante comprender el significado de cada dato expuesto en ella, para eso es necesario explicar la siguiente matriz;

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz expuesta anteriormente, expresa la posición y orientación de un sistema de referencia⁵², con respecto a un sistema fijo. Esta matriz enuncia la orientación y posición de un eslabón cualquiera de un manipulador con respecto a su base fija.

Cada uno de los elementos que componen esta matriz describen cuatro vectores diferentes (n, o, a y p) de los cuales los tres primeros, llamados terna ortonormal⁵³ hacen referencia a la rotación y el último a la posición. Estos vectores se encuentran implícitos en la matriz de transformación principal DH del robot en forma de expresiones matemáticas, las cuales, al momento de resolverse, representan las coordenadas de rotación y posición de cualquier eslabón con respecto a la base. Dichas expresiones son las siguientes para el caso del brazo robótico de este proyecto;

- ✓ El vector (n) está compuesto por los siguientes términos;

$$n_x = \text{Cos}\theta_1 \text{Cos}\theta_2 - \text{Sen}\theta_1 \text{Sen}\theta_2$$

$$n_y = \text{Sen}\theta_1 \text{Cos}\theta_2 + \text{Cos}\theta_1 \text{Sen}\theta_2$$

$$n_z = 0$$

- ✓ El vector (o) está compuesto por los siguientes términos;

$$o_x = \text{Cos}\theta_1 \text{Sen}\theta_2 + \text{Sen}\theta_1 \text{Cos}\theta_2$$

$$o_y = \text{Sen}\theta_1 \text{Sen}\theta_2 - \text{Cos}\theta_1 \text{Cos}\theta_2$$

$$o_z = 0$$

- ✓ El vector (a) está compuesto por los siguientes términos;

$$a_x = 0$$

$$a_y = 0$$

$$a_z = -1$$

⁵² BARRIEROS, Antonio. *et al.* Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 74

⁵³ *Ibid.*, p. 74

- ✓ El vector (p) está compuesto por los siguientes términos;

$$p_x = L2(\text{Cos}\theta_1\text{Cos}\theta_2 - \text{S}\theta_1\text{S}\theta_2) + L1 \text{Cos}\theta_1$$

$$p_y = L2(\text{Cos}\theta_2\text{Sen}\theta_1 + \text{Sen}\theta_2\text{Cos}\theta_1) + L1 \text{Sen}\theta_1$$

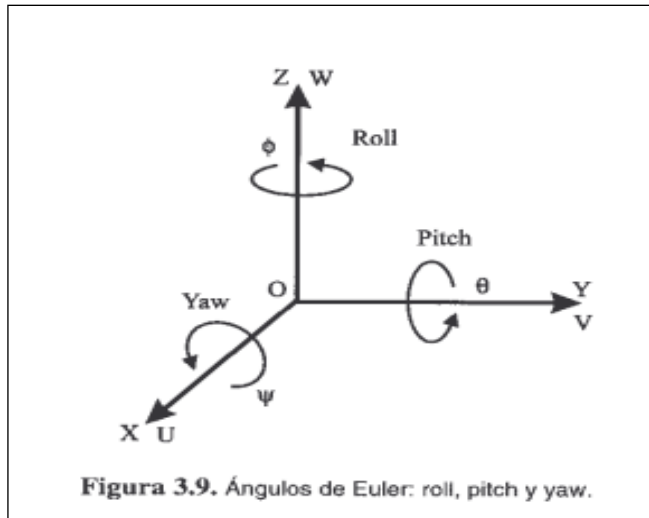
$$p_z = (L0 - d3)$$

Los vectores (n, o, a y p), están estrictamente relacionados con los ángulos de Euler, los cuales describen la orientación de cada eje del sistema de coordenadas ubicado en cualquier elemento de un manipulador robótico mediante una rotación sucesiva de dicho sistema con respecto al sistema de coordenadas de su base fija. Estos ángulos comprenden una gran importancia en el diseño de robots ya que a partir de la modificación de estos se puede obtener un mejor control del Roll, Pitch y Yaw del robot.

Según estableció Antonio Barrieros en la página 59 de su libro Fundamentos de la robótica, el significado de Roll, Pitch y Yaw es el siguiente;

- ✓ Roll: Cuando se gira el sistema OUVW un ángulo ϕ con respecto al eje OZ, se denomina roll o alabeo
- ✓ Pitch: Cuando se gira el sistema OUVW un ángulo θ con respecto al eje OY, se denomina pitch o cabeceo
- ✓ Yaw: Cuando se gira el sistema OUVW un ángulo Ψ con respecto al eje OX, se denomina yaw o guiñada

Figura 60. Roll, pitch y yaw.



Fuente: BARRIEROS, Antonio, et al. Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. 2007. p. 60

Estos tres factores se estudian principalmente para mejorar variables en los efectores finales de los brazos robóticos, tales como la aceleración, el modo como el efector se acerca a la pieza a sujetar, entre otros, y dependen directamente de los vectores (n , o y a), pero esto no es materia de interés de este proyecto ya que este solo se enfoca en el estudio del vector (p), del cual resultan las coordenadas necesarias para que la pinza agarre la botella en la posición deseada al momento de resolver las tres ecuaciones de P_x , P_y y P_z .

3.5.2 Sistema de programación. Los servomotores que permiten el movimiento de los eslabones serán programados mediante una placa electrónica de Arduino, de igual modo, los códigos de programación también serán realizados mediante un software libre de Arduino llamado librerías, las cuales se explicarán más adelante.

3.5.2.1 Arduino. Un Arduino es una herramienta digital de código⁵⁴ abierto, es decir que cualquier persona puede hacer uso de esta. Funciona mediante la detección de variables de entrada por medio de sensores o por la ejecución de órdenes mediante un programa, las cuales se transforman en señales que se usan para controlar diferentes dispositivos. Existen diferentes tipos de placas o tarjetas de Arduino y dependiendo de la cantidad de dispositivos que se requieran controlar y la complejidad de la tarea, se recurre a implementar placas con diferente número de entradas y salidas o con elementos insertos extras.

⁵⁴ Arduino. What is Arduino? [En línea]. Disponible en: <https://www.Arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Para el caso de este proyecto, se decidió junto con el director usar una placa de Arduino UNO ya que esta placa posee los elementos necesarios para un óptimo control del brazo robótico. Además, es la placa de Arduino que más se usa para proyectos principiantes en electrónica.

Figura 61. Placa de Arduino UNO



Fuente: Arduino. Arduino UNO REV. Disponible en: <https://store.Arduino.cc/usa/Arduino-uno-rev3>

En la imagen anterior se puede observar una placa de Arduino UNO con sus respectivos componentes, de los cuales los más importantes son descritos a continuación.

Los puertos del número (0) al (13) corresponden simultáneamente a las entradas y salidas digitales, mientras que los puertos designados desde (A0) hasta (A5), corresponden a las entradas análogas. Los puertos marcados con las letras (GND) permiten aterrizar el Arduino, los puertos 3.3V y 5V son salidas que entregan respectivamente este voltaje. El botón ubicado en la esquina superior izquierda del Arduino corresponde al reset de este, es decir que, al presionarlo el código que haya sido cargado al Arduino se repetirá, en otras palabras las tareas u órdenes que hayan sido ejecutadas mediante el programa se volverán a repetir. El puerto rectangular de color plata ubicado abajo del botón de reset corresponde al puerto de alimentación del Arduino mediante cable USB, de igual modo, el puerto de color negro ubicado en la esquina inferior izquierda de la placa también corresponde a una entrada de alimentación, pero esta es de tipo Jack de alimentación DC.

El dispositivo negro en forma de rectángulo corresponde al circuito integrado principal de todo el Arduino, mientras que el dispositivo ubicado justo arriba de la entrada de alimentación Barrel Jack corresponde al regulador de voltaje.

3.5.2.2 Librerías. La programación básicamente consiste en la creación de una librería de Arduino, la cual se compone de una secuencia lógica de códigos que se registran en la placa y posteriormente se traducen en ordenes que ejecutan los dispositivos asociados al programa, como servomotores, luces, motores paso a paso, pantallas, etc. Existen librerías específicas para cada uno de estos dispositivos en las cuales se definen líneas de códigos que solo pueden ser ejecutadas por un dispositivo en particular.

Las librerías bien se pueden descargar directamente de internet con la programación de los códigos ya establecida, o también se pueden crear desde cero, esto depende de lo que desee hacer el usuario.

La librería más importante para este proyecto será la que permite controlar servomotores, ya que estos dispositivos son los que más posee el brazo robótico. Por medio de esta librería se puede programar el ángulo de giro al cual se desea que gire el eje del servomotor, por lo general está comprendido entre⁵⁵ 0° y 180°. También permite programar un tiempo estimado en el cual se quiere que el servomotor alcance el ángulo establecido.

Figura 62. Ejemplo del código de programación para un servomotor

```
Servo myservo; // create servo object to control a servo
// twelve servo objects can be created on most boards

int pos = 0;    // variable to store the servo position

void setup() {
  myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
}

void loop() {
  for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) { // goes from 0 degrees to 180 degrees
    // in steps of 1 degree
    myservo.write(pos);                // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(15);                          // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
  for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) { // goes from 180 degrees to 0 degrees
    myservo.write(pos);                // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(15);                          // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
}
```

Fuente: Arduino. Sweep. [En línea]. Disponible en: <https://www.Arduino.cc/en/Tutorial/Sweep>

En la imagen anterior se puede observar cómo se realiza la programación de un servomotor mediante una librería de servos Arduino. Primero se le debe crear un nombre al programa en el cual se guarden todas las tareas por ejecutar, en el caso del ejemplo el nombre del programa es my servo. La función Int permite almacenar una variable de tipo entera, que en el caso del ejemplo anterior es una

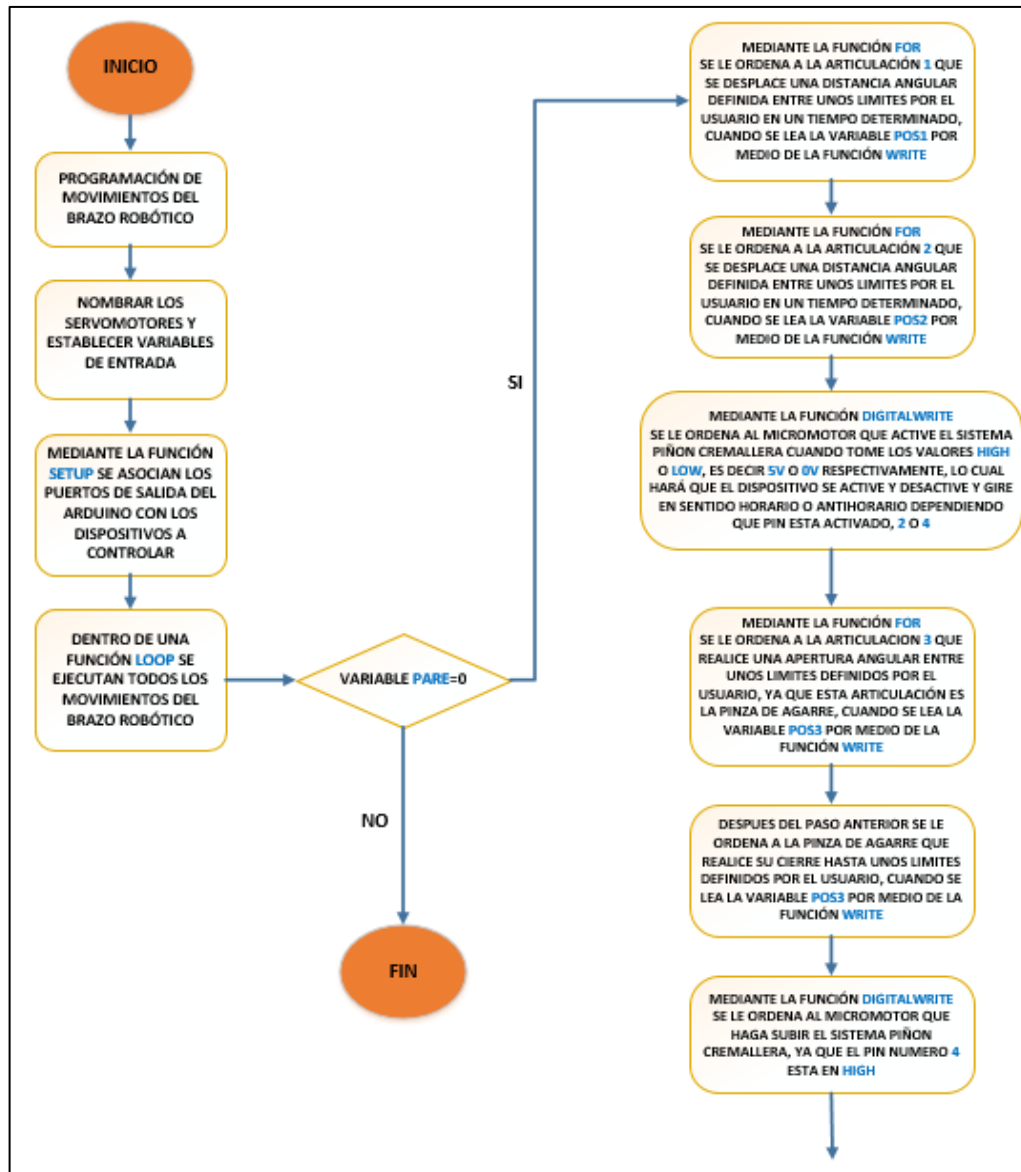
⁵⁵ Arduino. Servo library [En línea]. Disponible en: <https://www.Arduino.cc/en/Reference/Servo>

posición angular cualquiera del servomotor. La función attach permite relacionar el servomotor con el pin en el cual fue conectado en el Arduino, en la imagen se puede observar que el servomotor se conectó en el pin 9. La función write () permite que el servomotor lea la variable entera que ha sido definida con anterioridad mediante la función Int. La función delay le ordena al programa que ejecute la orden establecida con un retardo de tiempo definido por el usuario en milisegundos.

La función setup () se implementa cada vez que se empieza a programar una librería, es decir es la función que establece o les da inicio a otras variables. La función void es utilizada únicamente para declarar funciones de las cuales al momento de ejecutarse no se espera ninguna señal de respuesta. La función for se utiliza cuando se necesita crear una o concatenar varias operaciones que sean repetitivas. Por otro lado, la función loop se utiliza para repetir indefinidamente una orden que se halla establecido mediante una función setup (), esta función permite tener un control activo del programa.

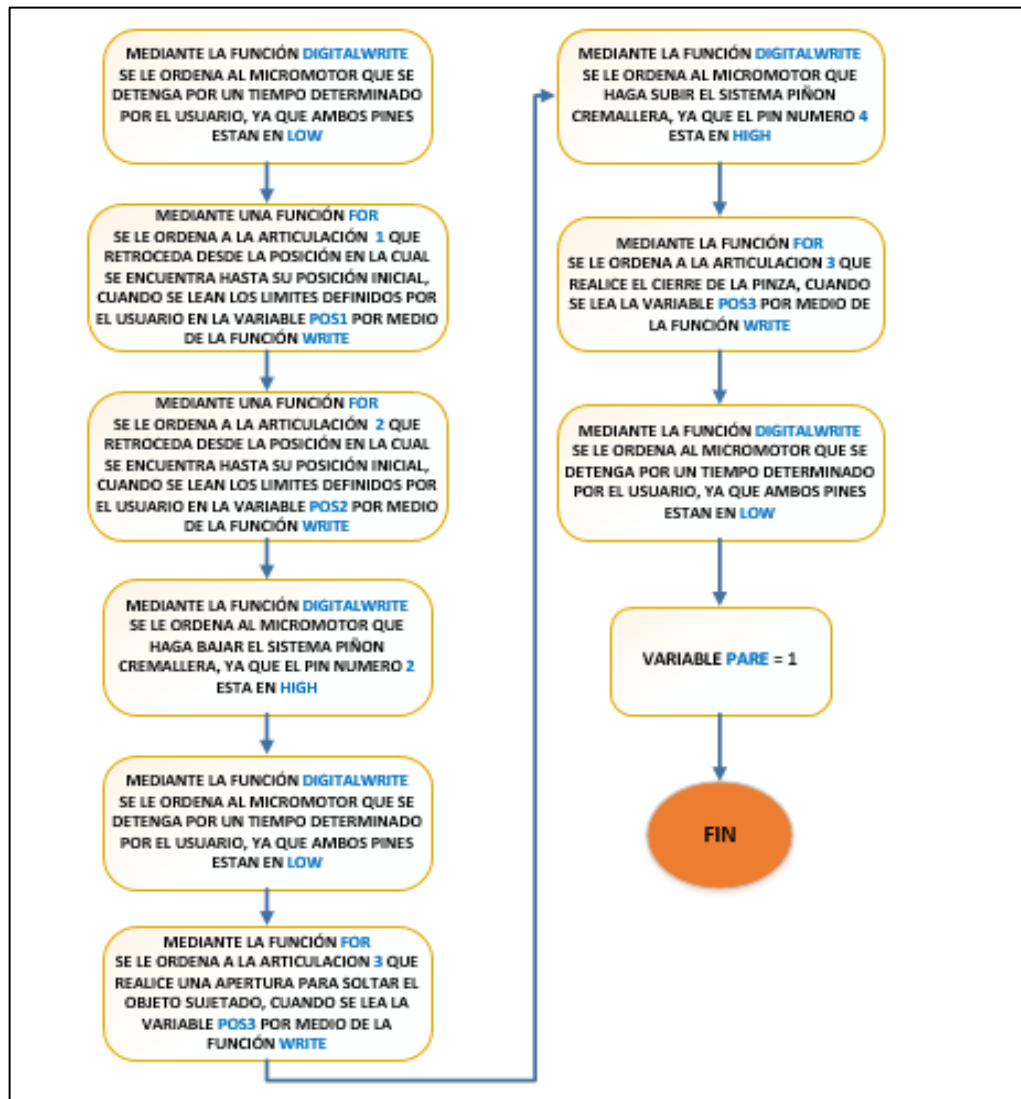
3.5.3 Programación del código. A través de un diagrama de flujo se explicará paso a paso cómo se realizó el código de programación que permite ejecutar los movimientos del brazo robótico, en el diagrama se podrá encontrar las diferentes funciones utilizadas en su respectivo orden lógico para que el robot realice la tarea requerida correctamente. Es importante resaltar que las líneas de código resultantes para los movimientos del brazo robótico se pueden encontrar en los anexos de este documento.

Figura 63. Diagrama de flujo de la programación



Fuente: elaboración propia

Figura 64. (Continuación)



Fuente: elaboración propia

Es importante aclarar que tanto el inicio como el fin del desplazamiento del robot se pueden redefinir solamente cambiando los ángulos en la programación y no es necesario redefinir el diseño ni las longitudes de los eslabones, ya que las posiciones de inicio y fin dependen de otro sistema de alimentación ajeno a este proyecto. Por otro lado, si se requiere que el movimiento del brazo robótico sea continuo lo único que se debe modificar en el programa es eliminar la variable $pare=1$ que se encuentra al final del código, pero si se requiere que solo lo haga una vez es necesario dejar la variable.

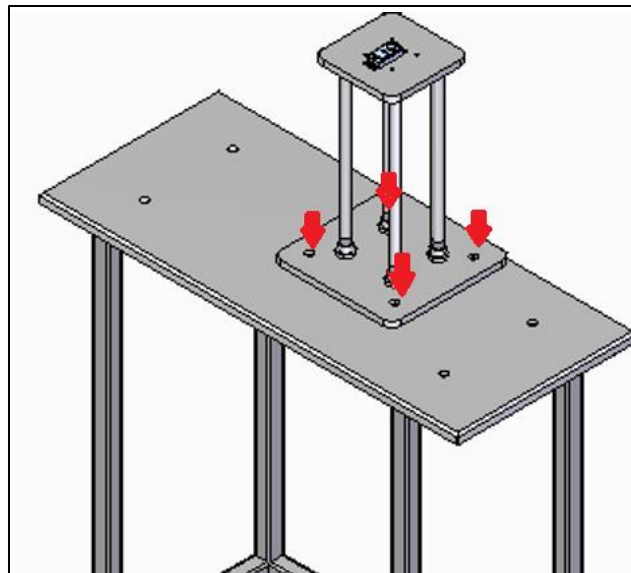
3.5.4 Manual de operación y montaje. En este apartado del documento se procederá a realizar un manual de operación y montaje, en donde se detallarán los

diferentes pasos necesarios para que el brazo robótico ejecute la tarea programada de una forma correcta.

Paso 1. En el primer paso para el funcionamiento del robot se requiere el ensamble de las diferentes piezas que lo conforman, a continuación, mediante una serie de imágenes se explica cómo se realiza esta tarea.

- ✓ Mediante cuatro tornillos M8 se ajusta la placa base a la estructura del brazo robótico;

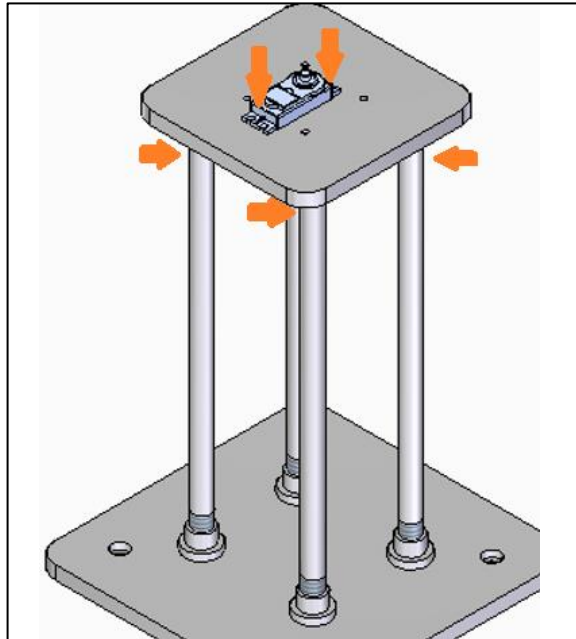
Figura 65. Montaje a la estructura



Fuente: elaboración propia

- ✓ Posteriormente se procede a roscar las cuatro varillas soporte a la placa servomotor, después se ajusta el servomotor MG 959 a esta misma placa por medio de los tornillos especiales que vienen en conjunto con el servomotor;

Figura 66. Montaje a la placa servomotor



Fuente: elaboración propia

- ✓ Después de la tarea anterior se procede a acoplar mediante 4 tornillos M3 el eje de transmisión de potencia al servomotor, esto se hace mediante la implementación de un acople especial, el cual es indicado para este tipo de servomotores para una mejor transmisión de potencia, para acoplar el servomotor al acople, este último se encaja en la piñonera de salida del servomotor y se ajusta mediante un tornillo especial que viene incluido con este dispositivo. Cabe aclarar que este procedimiento es el mismo para ambos ejes;

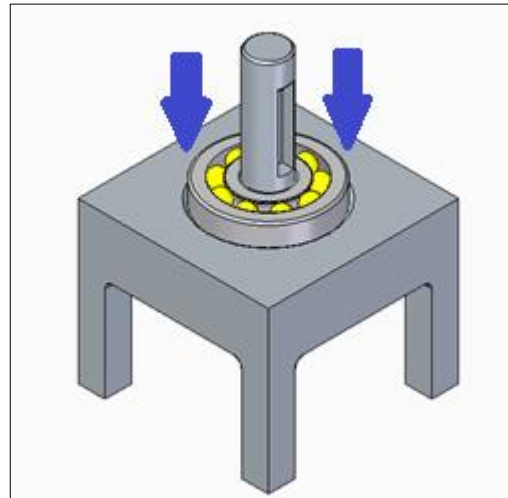
Figura 67. Acople servos



Fuente: Acople metálico para servomotor.
Disponible en: www.bigtronica.com/-centro/motores/servomotor/396-acople-metalico-para-servomotor-5053212003-968.html

- ✓ Una vez realizada la tarea anterior se procede a acoplar el eje en su respectivo soporte, posteriormente se inserta el rodamiento que ayudara a soportar la carga en el eje hasta que descansa en el espacio destinado para este en el soporte;

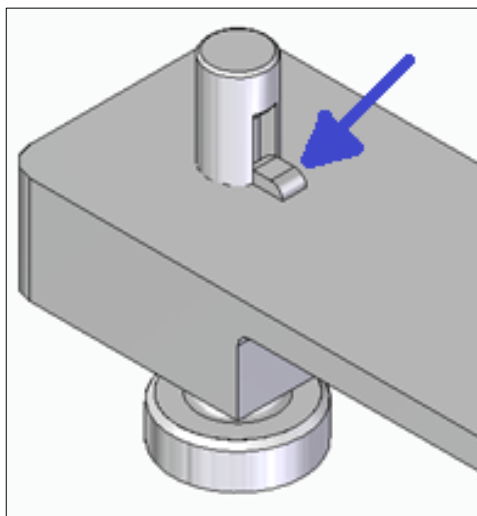
Figura 68. Montaje del rodamiento



Fuente: elaboración propia

- ✓ Una vez acoplado el servomotor al acople y al eje y estos al soporte, se procede a ensamblar el eje a su respectivo eslabón, posteriormente una vez ensamblados el eje y el eslabón se continúa posicionando la cuña en sentido vertical para permitir la transmisión de potencia como se evidencia a continuación;

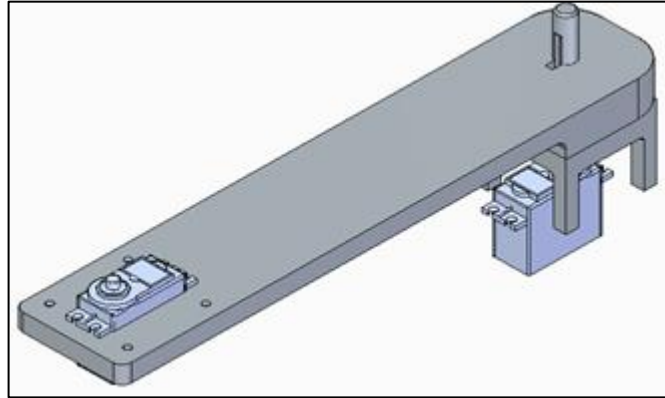
Figura 69. Ensamble de la cuña



Fuente: elaboración propia

- ✓ Posteriormente se procede a ensamblar el servomotor MG 946r al eslabón largo, y después se realizan los pasos anteriores de la forma;

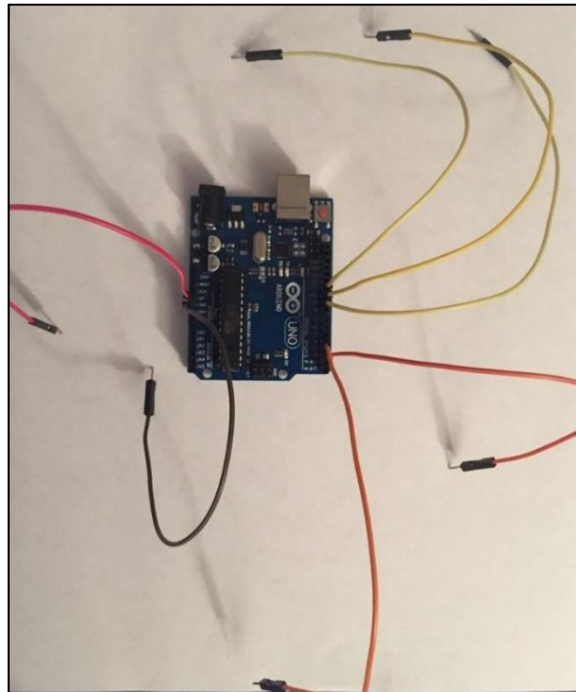
Figura 70. Ensamble del servomotor Mg 946r



Fuente: elaboración propia

Paso 2. Lo segundo que se debe asegurar para que el brazo robótico funcione correctamente es que el sistema de conexiones eléctricas que se derivan de la maquina hacia el Arduino y hacia las fuentes de energía estén debidamente conectadas, a continuación, se muestra una serie de imágenes en las cuales se detalla este procedimiento.

Figura 71 Conexión del Arduino



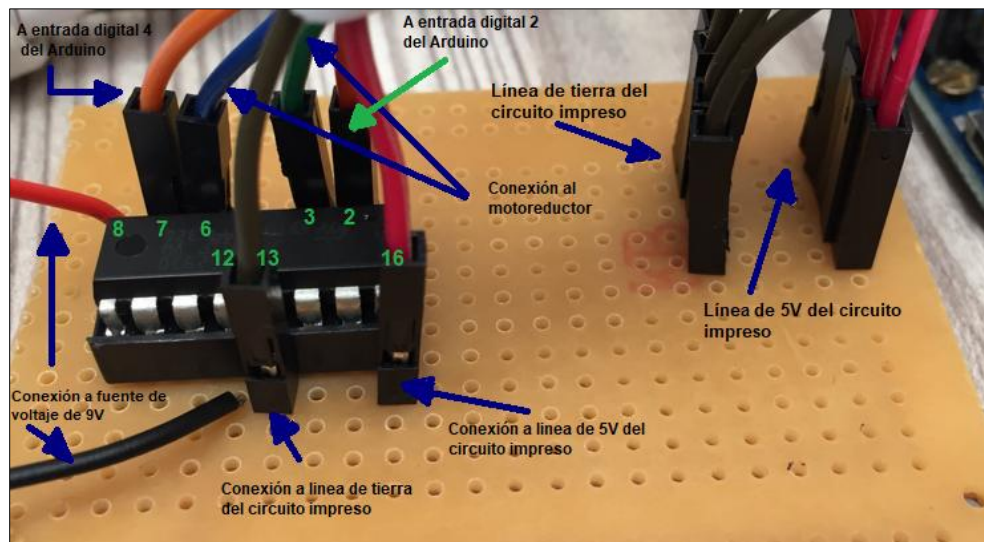
Fuente: elaboración propia

En la imagen anterior se pueden observar siete cables de diferentes colores, de los cuales los tres cables amarillos se conectan desde las terminales PWM número 9, 10 y 11 con las terminales de entrada de color amarillo de los servomotores, donde la terminal 9 del Arduino se conecta con el servomotor MG 959, la terminal 10 con el servomotor MG 946r y la terminal 11 con el servomotor SG 92r de la pinza.

Los dos cables de color naranja se conectan desde las terminales de salida digital del Arduino número 2 y 4 hasta los puertos número 2 y 7 del circuito integrado L293D respectivamente, este circuito es utilizado para poder generar la rotación en sentido horario y anti horario del micromotor y se encuentra inserto en un circuito impreso para facilitar las conexiones. Por último, los cables de color rojo y café indican las salidas de 5V y 0V o tierra del Arduino respectivamente, estas dos se conectan hasta dos entradas cualesquiera del circuito impreso para que una línea de entradas de este quede energizada con 5V y otra quede como tierra, esto con el fin de conectar todos los servos directamente al circuito impreso y no al Arduino, ya que la placa no cuenta con muchas entradas 5V y tierra.

A continuación, se presentan una serie de imágenes que ayudaran a comprender mejor lo explicado anteriormente.

Figura 72. Conexión al circuito impreso y L293D



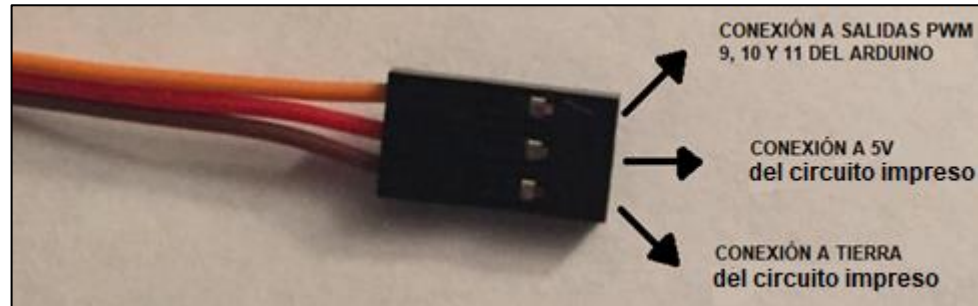
Fuente: elaboración propia

Los cables que salen de los puertos 8 y 12 se conectan a una fuente de voltaje variable para que alimente al motoreductor que se encuentra asociado al circuito integrado, el cable café que se deriva del puerto 13 se conecta a la línea de tierra del circuito impreso para poder aterrizar el integrado, de igual manera el cable rojo

del puerto 16 también se conecta a la línea de 5V del circuito impreso para energizar al circuito.

Dado que todos los servomotores poseen los mismos colores de en sus terminales de salida, por medio de la siguiente imagen se explicará cómo se conectan con el Arduino y con el circuito impreso.

Figura 73. Conexión de los servomotores



Fuente: elaboración propia

También es importante resaltar que todos los cables que se conectan al circuito impreso deben ir soldados por la parte posterior de este para lograr una unión sólida y permanente, la soldadura se debe realizar con un cauto de punta fina para evitar que se toquen diferentes líneas. A continuación, se muestra una imagen detallando la soldadura final.

Figura 74. Soldadura



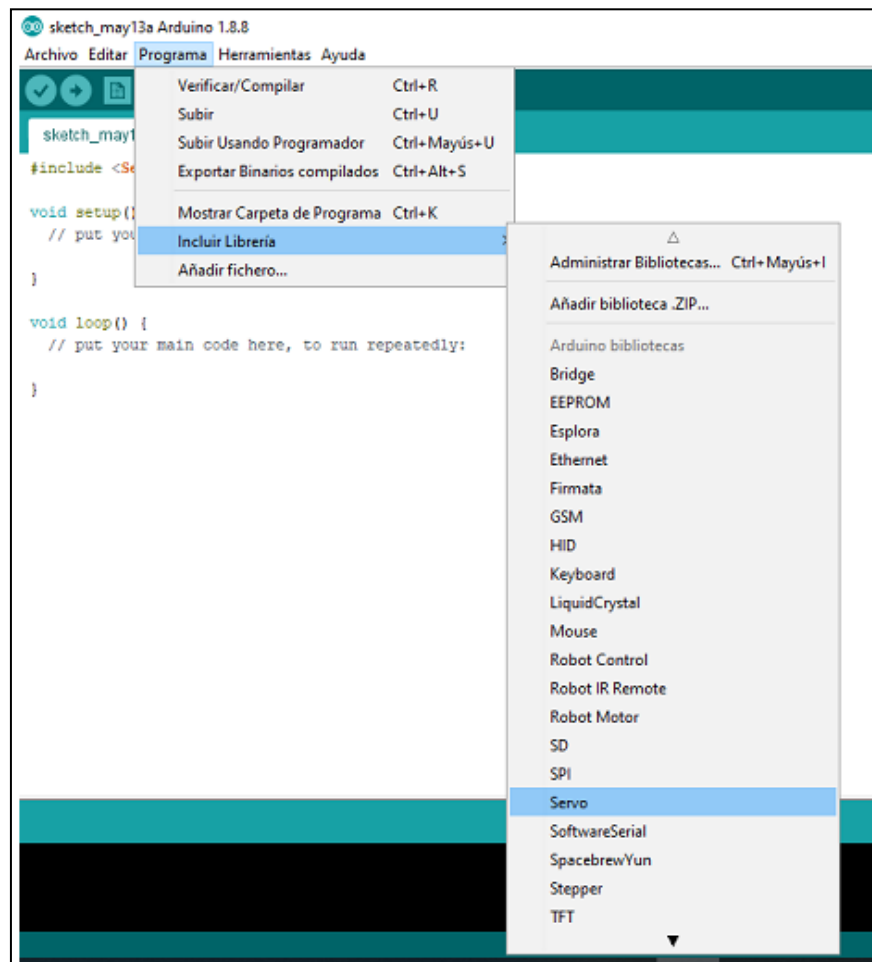
Fuente: elaboración propia

Es importante mencionar que en los anexos se puede encontrar el plano eléctrico del brazo robótico, en el cual se podrá comprender más a fondo todas las conexiones que se mencionaron anteriormente.

Paso 3. El último paso a tener en cuenta, una vez revisado el montaje del brazo robótico y sus conexiones, es ejecutar el código de programación para que el robot empiece a realizar sus movimientos, esto se hace de la siguiente forma;

- ✓ Para poder programar el código en el Arduino, lo primero que se debe hacer es descargar la aplicación disponible en la página de Arduino. Una vez este descargado el programa se procede a abrir la librería de servos como se muestra en la siguiente imagen

Figura 75. Librería de servos

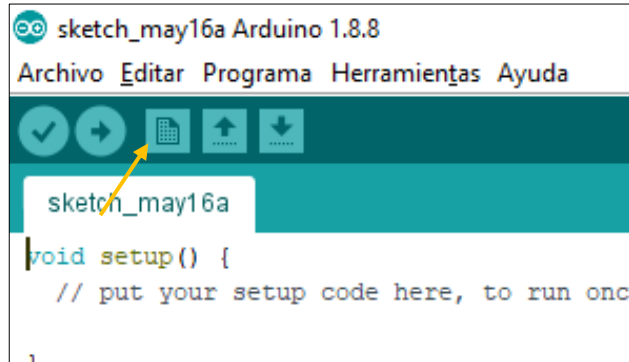


Fuente: Arduino. Disponible en: <https://www.Arduino.cc/en/Reference/Servo>

- ✓ Una vez incluida la librería de servomotores se prosigue a copiar el programa para el brazo robótico el cual se encuentra en los anexos de este trabajo,

posteriormente se procede a enviar el código al ordenador a través de un cable de conexión USB, oprimiendo el botón mostrado en la siguiente imagen;

Figura 76. Ejecución del programa



Fuente: elaboración propia

4. PROTOTIPO

En este capítulo se describirán los procesos mediante los cuales se fabricaron las piezas del prototipo, además se mostrará un registro fotográfico donde se evidencie el ensamble final de este. Por otro lado, se mostrará cómo se programaron los movimientos en el prototipo mediante la metodología Denavit Hartenberg.

4.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

El prototipo del brazo robótico de este proyecto se realizó con el fin de validar que efectivamente se cumpliera con la aplicación para la cual fue destinado en la celda de manufactura, la cual es posicionar una botella desde una posición inicial hasta una posición final. Se exceptuaron algunos elementos que por cuestión de costos no se pueden incluir, pero los cuales no influyen en el desarrollo de la actividad.

Junto con el director del proyecto se decidió escalar todas las medidas del diseño a la mitad, ya que, si se escalaba al tamaño real, los costos de la fabricación aumentarían considerablemente, y hacía a una escala más pequeña, algunas piezas no podrían cumplir con su función correctamente, y si se

4.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

Para fabricar las diferentes piezas del prototipo, fue necesario recurrir a distintos procesos de fabricación, dado que algunas requerían de un mejor acabado que otras, además se tenía que escoger aquellos procesos que no fueran demasiado costosos. A continuación, se explicará a detalle cuales fueron estos.

4.2.1 Corte láser de madera. Es el proceso mediante el cual diferentes tipos de madera son modificados a partir de un corte mediante la acción de un láser (plasma).

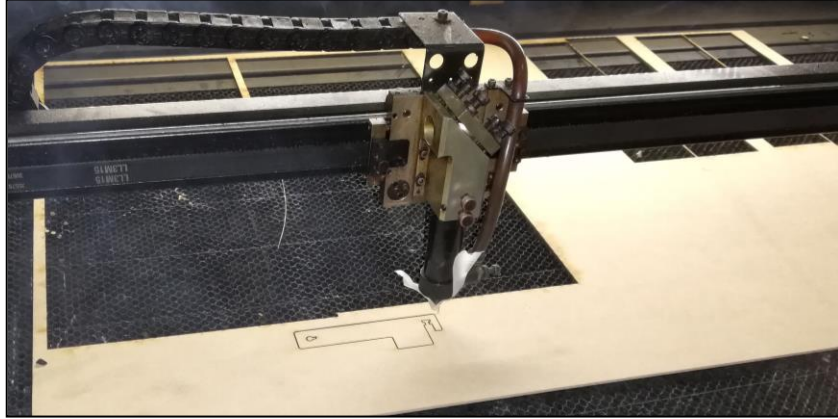
Se utilizó un conglomerado de madera denominado MDF (Medium Density Fibreboard), la cual se compone de varias fibras⁵⁶ de maderas como cedro y principalmente pino que son compactadas bajo presión y se le añaden agentes químicos como resinas y ceras para aumentar la densidad del producto final.

Mediante este proceso se fabricaron las piezas para el prototipo como los dos eslabones y los soportes de estos. Debido a que es un proceso muy rápido y con buen acabado superficial se logró obtener las piezas en muy poco tiempo y con buenas características.

⁵⁶ Maderas Santana. Características de los tableros o madera MDF [En línea], Abril de 2015. Disponible en: <https://www.maderasantana.com/caracteristicas-tableros-madera-mdf/>

A continuación, se muestran algunas imágenes del proceso de corte láser y las piezas obtenidas;

Figura 77. Corte laser de MDF



Fuente: elaboración propia

Figura 78. Eslabón rotacional corto



Fuente: elaboración propia

Figura 79. Eslabón rotacional largo

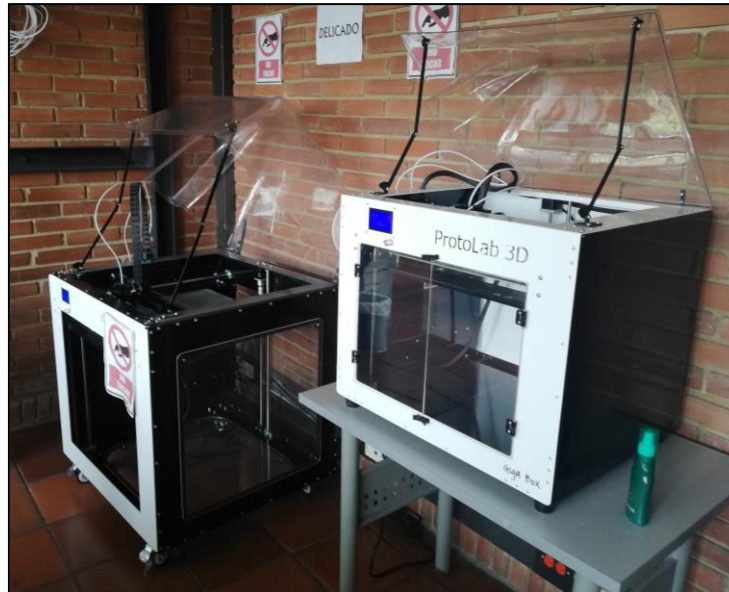


Fuente: elaboración propia

4.2.2 Prototipado por medio de impresión 3D. Este proceso de fabricación aditiva el cual se encarga de crear modelos físicos por medio de la superposición de capas de un material.

El modelado por disposición fundida (MDF) es el proceso mediante el cual un filamento polimérico⁵⁷ es extruido mediante una boquilla precalentada, y que por medio de un patrón se pueden generar geometrías con gran cantidad de detalle.

Figura 80. Puesto de impresión 3D en la FUA



Fuente: elaboración propia

La mayoría de piezas obtenidas mediante impresión 3D se fabricaron con la ayuda de las máquinas de prototipado con las que cuenta la Universidad de América. Este proceso se utilizó para prototipar las piezas que requerían un mayor grado de detalle, por tal motivo piezas tales como los ejes, el sistema piñón cremallera y todo el sistema del efector final.

El polímero utilizado para este proceso debido a las ventajas que presenta fue el PLA, ya que no necesita elevadas temperaturas para su fundición, da un buen acabado superficial y el tiempo de impresión es menor que otros filamentos poliméricos.

Fue necesario preestablecer algunos parámetros en las máquinas de impresión 3D, para llevar a cabo el proceso. Fue necesario que la boquilla 1 se calentara hasta una temperatura promedio de 210 °C para que el PLA se pudiera fundir y de esta manera se pudiese extrudir, por otro lado la plataforma se preestablece una

⁵⁷ GOODSHIP. Vanessa, BETHANY. Ruth. Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality - Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing - 5.3 Additive Manufacturing Processes and Materials. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010SMSZ3/design-manufacture-plastic/multifunct-additive-manufacturing>

temperatura de 60 °C, el ventilador que posee la máquina para refrigerar el proceso se encendió automáticamente,

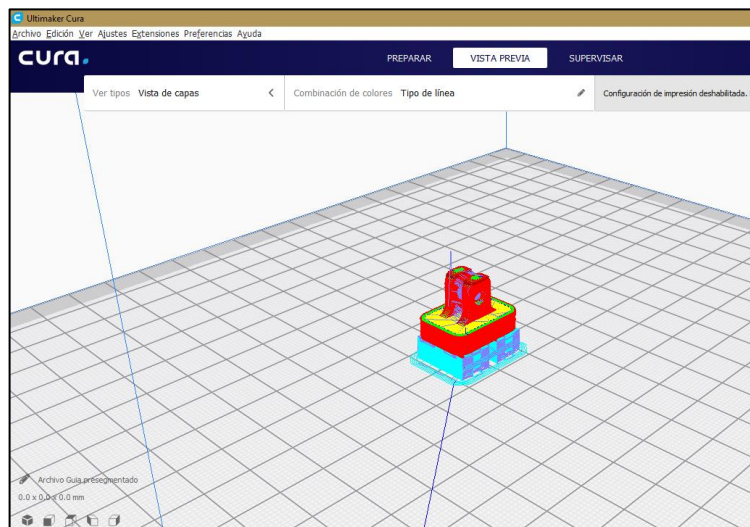
Figura 81. Configuración del prototipado 3D



Fuente: elaboración propia

Mediante un software de código abierto, se pudieron establecer los parámetros para la impresión, y de esta manera se generó un archivo en formato GCODE, el cual contiene la información que se le suministrara a la máquina y de ese modo comenzar con el proceso.

Figura 82. Programación del GCODE en Cura



Fuente: elaboración propia

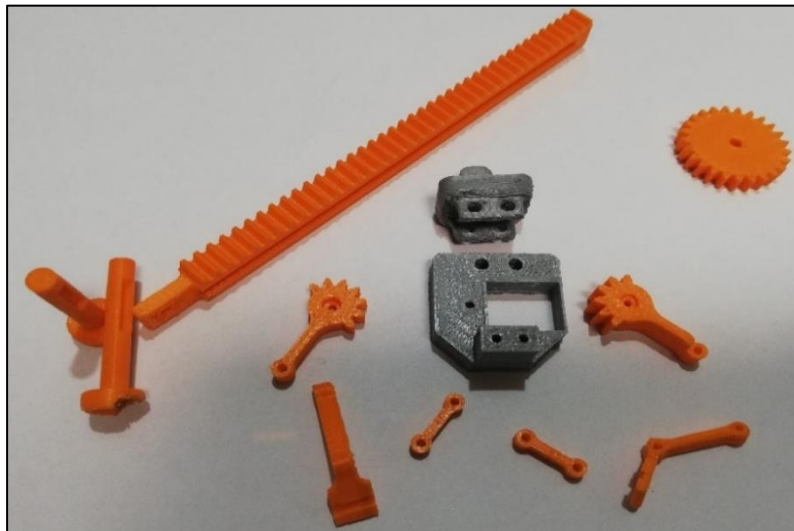
A continuación, se muestran algunas imágenes del proceso de impresión 3D y las piezas obtenidas;

Figura 83. Prototipado del engranaje del efector final



Fuente: elaboración propia

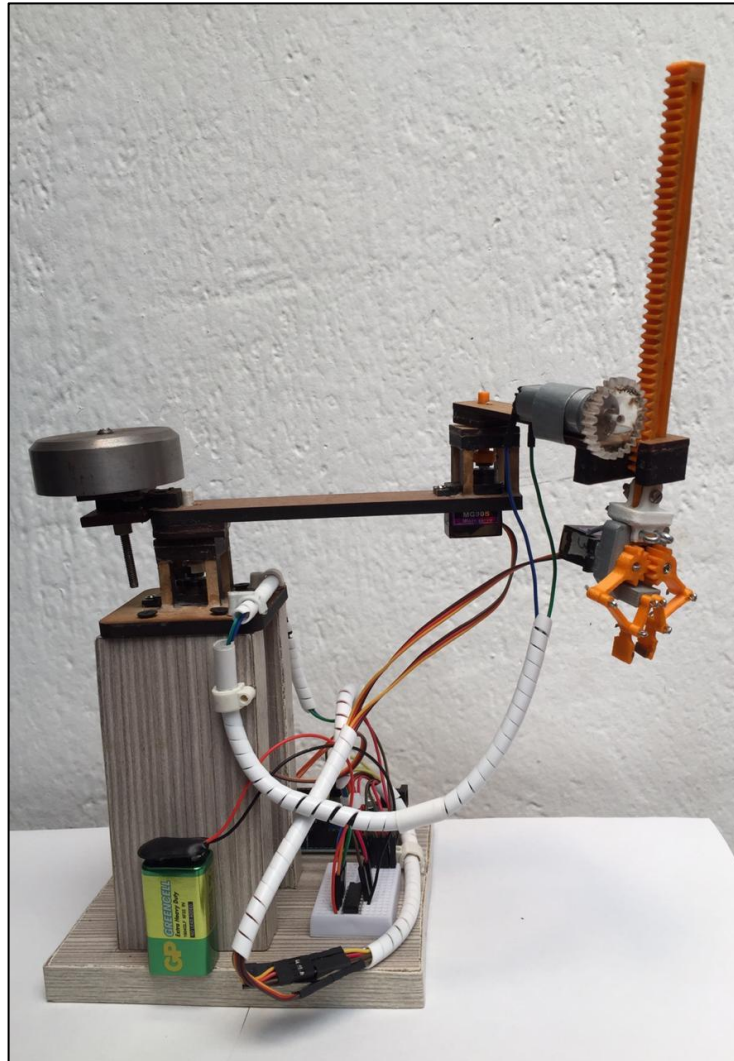
Figura 84. Componentes prototipados en PLA



Fuente: elaboración propia

4.3 Prototipo. Para la programación del prototipo y las conexiones eléctricas que este debe tener, se deben utilizar las propuestas anteriormente en la parte del diseño, no se debe alterar ningún parámetro, ya que la diferencia entre el diseño y el prototipo son los tamaños de los actuadores.

Figura 85. Montaje del prototipo



Fuente: elaboración propia

5. IMPACTO AMBIENTAL

En este capítulo se evaluarán los posibles daños causados al medio ambiente al momento de realizar la fabricación de las piezas del prototipo del brazo robótico, así mismo se evaluará el impacto ambiental en el que incurre el brazo robótico cuando está en funcionamiento, además se plantearán una serie de recomendaciones que ayudarán a reducir los efectos negativos de la fabricación del prototipo. La evaluación se realizará con la ayuda del método de Leopold, la cual es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar el impacto ambiental que genera una empresa al entorno y a la sociedad al momento de realizar algún proyecto en un determinado lugar. El método se fundamenta principalmente en la elaboración de una matriz⁵⁸ en la cual se listan las actividades a realizar del proyecto, y estas se cruzan con una serie de causas y efectos que se pueden derivar en posibles daños al medio ambiente.

5.1 IMPACTO AMBIENTAL EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN

A continuación, se presentará un cuadro en el cual se listan las principales repercusiones ambientales causadas por la fabricación del prototipo.

Cuadro 7. Recursos ambientales perjudicados

Proceso de fabricación	Impacto ambiental
Impresión 3D	La impresión 3D al ser un proceso de fabricación de plástico, está generando residuos de este material hacia el medio ambiente, también al ser un proceso lento, la impresora 3D requiere un gran consumo energía eléctrica para realizar su trabajo.
Corte laser de madera	Este proceso genera residuos en forma de partículas como el aserrín las cuales pueden causar afecciones respiratorias a las personas..
Mecanizado de piezas	Al igual que los procesos anteriores, este proceso también genera desperdicios plásticos resultantes del arranque de viruta, además el trabajo de la máquina herramienta puede generar contaminación auditiva en el lugar de trabajo y sus alrededores.
Ensamble prototipo	Al momento de realizar el ensamble de todas las piezas del prototipo, se necesita probar que el brazo robótico realiza los movimientos establecidos, para lo cual se requiere el consumo de energía eléctrica.

Fuente: elaboración propia

⁵⁸ Río Negro Universidad Nacional. Evaluación del impacto ambiental. [En línea]. 2013. Disponible en: <http://unrn.edu.ar/blogs/matematica1/files/2013/04/5%C2%B0-Matriz-de-Leopold-con-plantilla.pdf>

5.1.1. Impacto ambiental del funcionamiento del prototipo. A pesar que el prototipo del brazo robótico no va a realizar actividades o tareas que tengan un impacto ambiental relevante, es importante explicar cuál va a ser su función dentro del laboratorio y que recursos naturales o energéticos necesita para realizarla.

La función principal del prototipo será agarrar una botella plástica vacía y desplazarla desde una posición inicial hasta una posición final, para ello el prototipo no requiere del uso de ningún tipo de combustible que pueda generar emisiones hacia el aire, tampoco requiere el uso de agua o de ningún otro líquido para su funcionamiento, el único recurso que se necesita para realizar su función es el consumo de energía eléctrica.

5.2 DESARROLLO DE LA MATRIZ DE LEOPOLD

Para diseñar la matriz de Leopold es necesario determinar cuáles van a ser los recursos naturales que se verán mayormente afectados por la fabricación del prototipo, para ello, según el tipo de procesos que se utilizaron para dicho propósito los recursos más afectados son los siguientes;

- ✓ Contaminación del agua
- ✓ Contaminación del aire
- ✓ Contaminación del suelo
- ✓ Contaminación auditiva
- ✓ Afectación a la fauna y flora
- ✓ Generación de residuos solidos

Una vez establecidos los recursos que se ven mayormente afectados, se procede a asignar una ponderación numérica a cada proceso, la cual determina el grado de afectación de este hacia cada recurso, como se muestra a continuación;

Cuadro 8. Ponderación de la afectación del proceso

Ponderación	Grado de afectación
1	Leve
2	Moderado
3	Significativo
4	Grave
5	Desastroso

Fuente: elaboración propia

Cuadro 9. Matriz de Leopold

Proceso de fabricación	Contaminación del agua	Contaminación del aire	Contaminación del suelo	Fauna y flora	Contaminación auditiva	Generación de residuos sólidos	Total
Impresión 3D	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve(1)	Moderado (2)	7
Corte laser de plástico	Leve (1)	Moderado (2)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Significativo (3)	9
Mecanizado de piezas	Moderado (2)	Leve (1)	Moderado (2)	Leve (1)	Moderado (2)	Significativo (3)	11
Ensamble de prototipo	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	6
Funcionamiento del prototipo	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	Leve (1)	6

Fuente: elaboración propia

5.2.1 Análisis de la matriz de Leopold. Después de obtener los resultados de la matriz, se establecen las medidas que se pueden aplicar para reducir o eliminar el impacto ambiental causado, estas medidas se determinan de acuerdo al total de puntos obtenidos por cada proceso y se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 10. Acciones de contingencia

Total	Acción a realizar
1 – 15	Mantener el proceso actual
16 – 30	Realizar actividades que reduzcan el impacto ambiental del proceso.
30 – 50	Cambiar el proceso actual

Fuente: elaboración propia

De la matriz de Leopold aplicada para este proyecto se puede aseverar que ninguno de los procesos de fabricación utilizados para elaborar el prototipo causan un daño grave ni severo en contra del medio ambiente, por tal motivo no es necesario cambiar ningún proceso de fabricación.

5.3 RECOMENDACIONES PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL

Para concluir este capítulo, es pertinente realizar una serie de recomendaciones finales que permitan disminuir el impacto ambiental causado por cada uno de los procesos de fabricación utilizados en el prototipo. Dichas recomendaciones se enuncian a continuación;

- ✓ Dado que las maquinas utilizadas para fabricar el prototipo requieren de una alta cantidad de energía eléctrica, se recomienda no usarlas por largos periodos de tiempo para ahorrar energía
- ✓ Otro factor que ayudaría a reducir la contaminación sería recoger todos los residuos plásticos generados en el prototipado 3D y en el mecanizado, para poderlos desechar de una manera adecuada, o dado el caso poderlos reciclar
- ✓ Dado que la madera que se utilizó para los eslabones del prototipo (MDF), utiliza algunos químicos como resinas y aglomerantes en su fabricación, al momento de ser cortadas por láser se generan algunos gases nocivos para el operario y para el medio ambiente, por lo cual se recomienda utilizar un tapabocas industrial en el proceso y contar con un extractor de gases o un ventilador
- ✓ Por último, se recomienda que las maquinas operen a una hora en la cual el ruido producido por estas no sea molesto para las personas que se encuentran cerca al sitio de trabajo

6. ESTUDIO FINANCIERO DEL PROYECTO

En este capítulo se realizará un análisis de costos para conocer cuál fue el precio total de la fabricación, materiales y mano de obra del diseño del brazo robótico, así mismo se detallarán cuáles fueron los costos implícitos en la elaboración de la ingeniería de diseño. Por otra parte, ya que este proyecto requirió la elaboración de un prototipo, es necesario mostrar cuales fueron los costos totales de su fabricación.

El análisis financiero no requerirá de un estudio de factibilidad en el cual se calculen factores como la TIR, el VPN o una relación beneficio costo, debido a que el proyecto no está enfocado a tomar la decisión si se fabrica o no la maquina con base a los resultados de estos factores aplicados a los costos implícitos en el diseño, además el proyecto no cuenta con una empresa soporte la cual proporcione una inversión, una tasa de oportunidad y un horizonte del proyecto.

6.1 COSTOS

6.1.1 Costos de la ingeniería de diseño. A continuación, se muestra un cuadro donde se encuentran especificados todos los costos relacionados con la ingeniería de diseño, dentro de los cuales se encuentran la cantidad de horas invertidas por el director del proyecto, los orientadores y los proponentes, entre otros.

Cuadro 11. Costos de ingeniería de diseño

Ítem	Unidad	Cantidad	\$/Unidad	Total	Fuente de financiación
Talento humano					
Proponentes (2)	H-H	920	\$ 7.000	\$ 6.440.000	Proponentes
Orientadores (5)	H-H	35	\$ 15.000	\$ 525.000	U. América
Director	H-H	55	\$ 15.000	\$ 825.000	U. América
Total Talento Humano				\$ 7.790.000	
Gastos de maquinaria y equipo					
Computadora	Uni	2	\$ 1.600.000	\$ 3.200.000	Proponentes
Software Nx	Horas	12	\$ 7.000	\$ 84.000	Proponentes
Software Solid Edge	Horas	90	\$ 271	\$ 24.390	Proponentes
Total Maquinaria y Equipo				\$ 3.308.390	
Fungibles					
Libros	Uni	3	\$ 80.000	\$ 240.000	Proponentes
Papel	Resma	2	\$ 11.500	\$ 23.000	Proponentes
Tinta	Tonner	3	\$ 65.000	\$ 195.000	Proponentes
Total fungibles				\$ 458.000	
Otros gastos					
Transporte	COP	20	\$ 2.100	\$ 42.000	Proponentes
Total otros gastos				\$ 42.000	
Total antes de imprevistos	\$		11.598.390		
Imprevistos (5%)	\$		579.920		
Costo total del proyecto	\$		12.178.310		

Fuente: elaboración propia

Es importante mencionar que el precio que se tomó como referencia para las horas de uso del software Solid Edge se consultó en la página oficial de Siemens, donde se muestra que el precio de la licencia básica tiene un costo de 60 USD mensuales, convertidos a pesos colombianos da 194.850 COP, este valor dividido 720 horas que tiene un mes arroja el valor de una hora de uso del software, el cual se especificó en el cuadro anterior.

6.1.2 Costos de materiales. Para la fabricación del brazo robótico fue necesario la selección de una serie de materiales los cuales se escogieron debido a que eran los que mejor se adaptaban al diseño del brazo robótico. A continuación, se muestra un cuadro en donde se detallan los costos implícitos en la selección de los materiales;

Cuadro 12. Costos de materiales

Costos de materiales				
Ítem	Unidad	Cantidad	\$/Unidad	Total
Servomotor MG 959	UND	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Servomotor MG 946r	UND	1	\$ 128.000	\$ 128.000
Servomotor SG 92r	UND	1	\$ 14.000	\$ 14.000
Motoreductor 34:1 25D	UND	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Rodamientos SKF ET 1200	UND	2	\$ 70.000	\$ 140.000
Kit Arduino	UND	1	\$ 90.000	\$ 90.000
Lamina de aluminio 6061 T6	UND	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Lamina acero estructural cold roll	UND	1	\$ 79.968	\$ 79.968
Perfil cuadrado de 1" X 1" X 6m	UND	1	\$ 19.500	\$ 19.500
Rodachines	UND	4	\$ 14.500	\$ 58.000
Total				\$ 919.468

Fuente: elaboración propia

La mayoría de los precios expuestos en el cuadro se encuentran respaldados en los anexos, el precio de los servomotores y sus características se explican en el capítulo de diseño. Es de gran importancia aclarar que, si en algún momento se decide llevar a cabo la fabricación del diseño del proyecto, se puede remitir a los proveedores que se consultaron para dicho propósito, pero no es estrictamente necesario utilizar los mismos proveedores, ya que si a futuro se consiguen materiales un poco más económicos en sitios diferentes también será viable la realización del proyecto.

6.1.3 Costos de fabricación. A continuación, se presenta un cuadro en donde se muestran los costos de los distintos procesos de fabricación que se requirieron para fabricar las piezas y el ensamble del brazo robótico.

Cuadro 13. Costos de fabricación

Costos de fabricación	
Ítem	Total
Impresión 3D	\$ 268.405
Mecanizado de aluminio	\$ 1.740.000
Mecanizado de acero	\$ 350.000
Mano de obra	\$ 200.000
Soldadura	\$ 250.000
Total	\$ 2.808.405

Fuente: elaboración propia

Para los costos implícitos en los procesos de fabricación se tuvo en cuenta el mecanizado de la materia prima como el aluminio y el acero, el proceso de unión por soldadura para los perfiles de la estructura y la impresión 3D, proceso el cual se cotizó en Auros copias con un costo de 2000 COP por cada centímetro cúbico de impresión y sabiendo que todas las piezas que se fabricarán mediante este medio suman en total 134,22 centímetros cúbicos, se estableció un costo aproximado de este proceso en el anterior cuadro.

6.1.4 Costos del prototipo. Para la elaboración del prototipo se generaron una serie de costos relacionados con el proceso de fabricación de las piezas y la compra de dispositivos varios necesarios para el funcionamiento del prototipo. A continuación, se presenta un cuadro donde se exponen dichos costos detalladamente.

Cuadro 14. Costos del prototipo

Costos prototipo				
Ítem	Cantidad	\$/Unidad	Total	Fuente de financiación
Servomotor TP MG 90S	3	\$ 15.000	\$ 45.000	Proponentes
Motoreductor 2 Kg	1	\$ 22.000	\$ 22.000	Proponentes
Placa Arduino	1	\$ 105.000	\$ 105.000	Proponentes
Rodamientos	2	\$ 2.000	\$ 4.000	Proponentes
Corte láser de madera	-	\$ 20.000	\$ 20.000	Proponentes
Circuito integrado 293D	1	\$ 6.500	\$ 6.500	Proponentes
Pila 9V	1	\$ 3.500	\$ 3.500	Proponentes
Total			\$ 206.000	

Fuente: elaboración propia

Los costos para el prototipo fueron soportados en su mayoría por los proponentes del proyecto, pero es de suma importancia resaltar que por medio de las máquinas de prototipado 3D de la Universidad de América fue posible fabricar algunas piezas que el prototipo requería, lo cual permitió ahorrar un costo adicional correspondiente a imprimir en 3D en otro sitio diferente.

6.2 ANÁLISIS DE COSTOS

Después de exponer todos los costos que estuvieron implícitos para llevar a cabo la fabricación del proyecto se realizó la sumatoria final de estos, arrojando el siguiente resultado.

Cuadro 15. Costos totales del proyecto

Costos totales de proyecto	
Ítem	Total
Costos ingeniería de diseño	\$ 12.178.310
Costos materiales	\$ 919.468
Costos de fabricación	\$ 2.808.405
Total	\$ 15.906.183

Fuente: elaboración propia

Según todos los costos expuestos anteriormente, se puede aseverar que la realización del proyecto es viable, debido a que los costos implícitos en el diseño del brazo robótico no son excesivos exceptuando los costos de la ingeniería de diseño, además es importante destacar que, si la Universidad decide fabricar la máquina, no solo se adaptaría a su principal aplicación en la celda de manufactura, sino que también serviría para realizar prácticas de laboratorio en distintas asignaturas de ingeniería.

7. CONCLUSIONES

- ✓ El objetivo principal de este proyecto el cual consistía en diseñar un brazo robótico para uso en un laboratorio de automatización se cumplió satisfactoriamente, además se comprobó mediante un prototipo a escala su funcionalidad.
- ✓ El tipo de brazo robótico (SCARA) seleccionado para el diseño presentó unas ventajas significativas con respecto a otras alternativas contempladas, ya que las características de este tipo de robot se ajustaban de una manera adecuada a la aplicación solicitada, las más significativas fueron su diseño poco complejo y su gran movilidad en áreas de trabajo reducidas.
- ✓ A medida que se fue avanzando en el proyecto se evaluó otra alternativa para el mecanismo del eslabón prismático, el cual era el tornillo de potencia, pero esta alternativa fue descartada debido a que la implementación de este mecanismo requería el uso de componentes adicionales para la transmisión de potencia como correas y poleas especiales, lo cual no era un gran problema para el diseño como tal, pero si para el prototipo debido que al momento de escalar estos componentes se presentaban muchos inconvenientes en el ensamble final.
- ✓ Gracias a los conocimientos y herramientas adquiridas a lo largo de la carrera, fue posible comprender de una manera óptima la metodología de Denavit y Hartenberg, la cual es un algoritmo complejo compuesto por diferentes matrices y fue necesaria para desarrollar la programación y diseño del brazo robótico.
- ✓ Se concluyó que la herramienta Arduino es un método práctico para programar los distintos movimientos que requirió el brazo robótico, ya que además de ser un software libre y de código abierto, fue sencillo comprender como se utilizan sus funciones.
- ✓ Se evaluó mediante la matriz de Leopold el impacto ambiental que pudo ocasionar la fabricación del prototipo, arrojando como resultado que ningún proceso de fabricación tiene un impacto significativo hacia el medio ambiente y la sociedad, sin embargo, se realizaron algunas recomendaciones para mitigar algunos aspectos negativos de dichos procesos.
- ✓ Se calculó mediante el método de singularidad que ambos eslabones del brazo robótico sufrirán una deflexión máxima, dichas deflexiones no representan una deformación significativa al momento que el robot realice su movimiento, es decir que el material seleccionado soporta de una manera satisfactoria las cargas presentes.

8. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda diseñar un sistema de alimentación o dosificación que posicione la botella en el lugar inicial en el cual el brazo robótico empieza a realizar su movimiento.
- ✓ Revisar periódicamente el estado de las articulaciones para observar el estado en el que se encuentran.
- ✓ Se recomienda que el docente encargado de la práctica de laboratorio en la cual será empleado el brazo robótico este pendiente de la correcta manipulación de este por parte de los estudiantes para evitar posibles accidentes y daños en el funcionamiento del mismo.
- ✓ Se recomienda diseñar un control de velocidad y un control de posición, para que tanto el brazo robótico como el efector final realicen su movimiento con un mayor grado de precisión.
- ✓ Diseñar diferentes tipos de efectores finales tal como una ventosa, una pequeña sierra de corte, o un sistema de inyección, los cuales se puedan adaptar al brazo robótico para que este pueda ser utilizado en diferentes aplicaciones.
- ✓ Profundizar la teoría y definición de los ángulos de Euler y la relación que existe entre estos y los vectores de orientación, para poder realizar un estudio más detallado del pitch, roll y yaw aplicado al brazo robótico de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

BARRIEROS, Antonio, et al. Fundamentos de la robótica. 2 ed. España.: McGraw-Hill/Interame-ricana de España, S. A. 2007. p. 316

BAUER, Patricia. Victor Scheinman. Encyclopedia Britannica [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Scheinman-Victor#accordion-article-history>.

BHANDARI, VB. Design of machine elements. 3 ed. India. Tata McGraw-Hill Education Private Limited, India 1994. 944p.

British Automation and Robot Association. Delta Robots [En línea]. Disponible en: <http://www.bara.org.uk/robot-types/delta-robots.html>.

Carnegie Mellon University. SCARA. Robot Hall of Fame [En línea]. Disponible en: <http://www.robothalloffame.org/inductees/06inductees/scara.html>.

CS, Chong. Stationary Robots. CNC Machine tools [En línea], Septiembre 2017, Disponible en: <https://cnc-machine-tools.com/stationary-robots>.

ESCHNER, Kat. This Eighteenth-Century Robot Actually Used Breathing to Play the Flute [En línea], Febrero 2017. Disponible en: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/>.

Fanuc. How to know when a SCARA robot is the right choice for your application [En línea]. Disponible en: <https://www.fanuc.eu/de/en/robots/robot-filter-page/scara-series/selection-support>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

LARSON, Andy. 6-Axis vs. SCARA vs. Delta vs. Collaborative - A Robot Cage Match. Cross Robotics and Machine Automation [En línea], Febrero 11 de 2013. Disponible en: <https://www.crossco.com/blog/6-axis-vs-scara-vs-delta-vs-collaborative-robot-cage-match>.

MACHINE DESIGN. What is the Difference between industrial robots [En línea] Disponible en: www.machinedesign.com/robotics/what-s-difference-between-industrial-robots.

MORAN, Michael. Evolution of robotics arms. US National Center for Biotechnology Information [En línea], Mayo 2007. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4247431/>.

MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México. Pearson educación, México 2006. 944p.

REYES CORTÉS, Fernando. Robótica. Control de robots manipuladores. México.: Alfaomega Grupo Editor S.A. 2011. p. 592

Robotics.org. Unimate the First Industrial Robot [En línea]. Disponible en: <https://www.robotics.-org/joseph-engelberger/unimate.cfm>.

SANZ, Wilmer Cinemática directa robot SCARA [En línea], Marzo 2014. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=b3dINxuqLm0>.

TSAI, Lung-Wen. Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Estados Unidos: John Wiley & Sons INC, 1999. 520p.

UNAL Brazo robótico, producto del ingenio de estudiantes UN. [En línea], Mayo 2006 Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/brazo-robotico-producto-del-ingenio-de-estudiantes-un.html>.

ANEXOS

ANEXO A
CATALOGO PARA LA SELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES

ANEXO B
CATALOGO PARA LA SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS

ANEXO C
CATALOGO PARA LAMINA DE ALUMINIO

ANEXO D

CATALOGO DE SELECCIÓN DE PERFIL PARA LA ESTRUCTURA

ANEXO E
COTIZACIÓN DE MECANIZADO DE PIEZAS

ANEXO F
COTIZACIÓN IMPRESIÓN 3D

ANEXO G
CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

```
#include <Servo.h>

Servo articulacion1;
Servo articulacion2;
Servo articulacion3;

int pos1 = 0;
int pos2 = 0;
int pos3= 0;
int pare = 0;

void setup() {

  articulacion1.attach(9);
  articulacion2.attach(10);
  articulacion3.attach(11);
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(4,OUTPUT);
}

void loop() {

  if (pare == 0){

    for (pos1 = 0; pos1 <=175; pos1 +=10) {
      articulacion1.write(pos1);
      delay(200); }

    for (pos2 = 90; pos2 <=180; pos2 +=10) {
      articulacion2.write(pos2);
      delay(200); }

    digitalWrite(4,HIGH);
    digitalWrite(2,LOW);
    delay(1400);

    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(2000);

    for (pos3 = 10; pos3 <=40; pos3 +=10) {
      articulacion3.write(pos3);
      delay(200); }
```

```

for (pos3 = 40; pos3 >=10; pos3 -=10) {
    articulacion3.write(pos3);
    delay(200); }

digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(2,HIGH);
delay(1400);

for (pos1 = 175; pos1 >=10; pos1 -=10) {
    articulacion1.write(pos1);
    delay(200); }

for (pos2 = 180; pos2 >=90; pos2 -=10) {
    articulacion2.write(pos2);
    delay(200); }

digitalWrite(4,HIGH);
digitalWrite(2,LOW);
delay(1400);

digitalWrite(2,LOW);
digitalWrite(4,LOW);
delay(1000);

for (pos3 = 10; pos3 <=40; pos3 +=10) {
    articulacion3.write(pos3);
    delay(200); }

digitalWrite(2,HIGH);
digitalWrite(4,LOW);
delay(1400);

for (pos3 = 40; pos3 >=20; pos3 -=10) {
    articulacion3.write(pos3);
    delay(200); }

digitalWrite(2,LOW);
digitalWrite(4,LOW);
delay(1000);
|
}
}

```

ANEXO H
GUÍA DE LABORATORIO

ANEXO I
PLANO ELÉCTRICO

ANEXO J
DATASHEET INTEGRADO L293D

ANEXO K
PLANOS DE PROTOTIPO
(Ver CD – Rom)

ANEXO L
PLANOS
(Ver CD – Rom)