



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE GOMA CON UN
ACTUADOR GIRATORIO Y UN BRAZO ROBÓTICO INTEGRADO PARA POSICIONAR Y
ENGOMAR LATILLAS DE BAMBÚ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingenieros en Mecatrónica

AUTORES: SANTIAGO ANDRÉS AGUILAR SILVA

JUAN DAVID BENAVIDES ÁVILA

TUTOR: CARMEN JOHANNA CELI SÁNCHEZ

Quito – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Santiago Andrés Aguilar Silva** con documento de identificación N° 1723683783 y **Juan David Benavides Ávila** con documento de identificación N° 1754363255; manifestamos que:

Somos autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

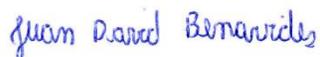
Quito, 15 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Santiago Andrés Aguilar Silva

1723683783



Juan David Benavides Ávila

1754363255

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Santiago Andrés Aguilar Silva** con documento de identificación N° 1723683783 y **Juan David Benavides Ávila** con documento de identificación N° 1754363255, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Dispositivo tecnológico: “Diseño y construcción de un sistema de inyección de goma con un actuador giratorio y un brazo robótico integrado para posicionar y engomar latillas de bambú”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

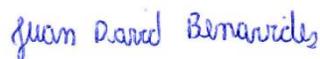
Quito, 15 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Santiago Andrés Aguilar Silva

1723683783



Juan David Benavides Ávila

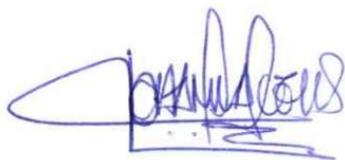
1754363255

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carmen Johanna Celi Sánchez con documento de identificación N° 1717437808, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE GOMA CON UN ACTUADOR GIRATORIO Y UN BRAZO ROBÓTICO INTEGRADO PARA POSICIONAR Y ENGOMAR LATILLAS DE BAMBÚ, realizado por **Santiago Andrés Aguilar Silva** con documento de identificación N° 1723683783 y **Juan David Benavides Ávila** con documento de identificación N° 1754363255, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de un Dispositivo tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Carmen Johanna Celi Sánchez, MGTR.

1717437808

DEDICATORIA

A mis amados padres, Margarita Silva y Sergio Aguilar, quienes me han inculcado valores los cuales han formado como persona. Son mi mayor fuente de inspiración y un ejemplo de perseverancia y esfuerzo. Agradezco por sus constantes palabras de aliento y por estar siempre a mi lado. También a mi querida hermana Aylén que alegra mis días con sus locuras. Les dedico el presente trabajo de titulación con toda mi gratitud por que este logro, también es suyo.

A mi querida abuelita María Susana, quien ya no está físicamente presente, pero su influencia perdura en cada aspecto de mi vida y siempre tengo presentes su amor, su recuerdo y sus valiosas enseñanzas.

A la Universidad Politécnica Salesiana por permitirme ser parte de su comunidad académica y por de su proceso educativo.

A los docentes que me han apoyado a lo largo de mi carrera, especialmente a mi tutora de proyectos de Titulación, MSc. Johanna Celi. Agradezco su invaluable tiempo y dedicación, su guía durante todo el proceso y por todos los conocimientos compartidos.

A mi compañero Juan Benavides, por su paciencia y por brindarme sus conocimientos para la elaboración del presente proyecto.

Por último, agradezco a mi familia, mis amigos, compañeros y todas las personas que han sido parte de mi vida académica y personal. Sus momentos inolvidables, palabras de aliento y experiencias únicas me han ayudado a crecer como persona.

Santiago Andrés Aguilar Silva

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mis padres, Lorena Ávila y Eloy Benavides por brindarme los recursos necesarios para alcanzar mis metas, por darme su apoyo incondicional, por estar a mi lado y por ser parte de mi vida, por formar mi moral y por darme las fuerzas para no rendirme.

Agradezco especialmente a mi padre, por compartir sus conocimientos técnicos durante mi niñez, adolescencia y adultez. Agradezco a la empresa BHLEM-PAC por brindarme de los recursos económicos, maquinaria, herramientas y espacios de trabajo.

Le agradezco a mi compañero de estudios y amigo Santiago Aguilar, por su esfuerzo en la elaboración de este proyecto.

Agradezco a la prestigiosa Universidad Politécnica Salesiana por abrirme sus puertas y prepararme para la vida y a mi tutora, Carmen Johanna Celi Sánchez por guiarme en este trabajo de titulación.

Juan David Benavides Ávila

ÍNDICE DE CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	I
Problema de estudio	I
JUSTIFICACIÓN.....	II
OBJETIVOS.....	III
Objetivo general	III
Objetivos específicos.....	III
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	III
CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	1
1.1 Estado actual de las empresas	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Antecedentes Generales	3
1.3.1 La Automatización y la Robótica	3
1.3.2 Robot industrial	4
1.3.3 Brazo robot	4
1.3.4 Robot manipulador	5
1.3.5 Automatización y envases.....	5
1.3.6 Fabricación envases.....	5
1.3.7 Bambú	6
1.3.8 Envases de bambú	6
1.3.9 Pegamento, adhesivo o goma	7
1.3.10 Cola blanca.....	7

1.3.11	Actuador	7
1.3.12	Motor paso.....	8
1.3.13	Driver DM556.....	8
1.3.14	Cilindro neumático	8
1.3.15	Sensor	8
1.3.16	Sensor fotoeléctrico.....	8
1.3.17	Final de carrera.....	9
1.4	Propiedades de los materiales empleados.	9
1.4.1	Acero de transmisión (Norma ASTM A36).	10
1.4.2	Duraluminio (Aleación de aluminio 2024).	10
1.4.3	Aluminio (Norma AW6061).....	11
1.4.4	Acero inoxidable (Norma AISI 304).....	12
1.4.5	Acrílico.....	13
1.5	Perfil de velocidad trapezoidal.....	13
1.5.1	Coefficientes de fricción para diversos materiales.	14
1.6	Cinemática de un robot	15
1.6.1	Cinemática Directa.....	15
1.7	Fórmulas y ecuaciones	15
1.7.1	Matriz de rotación x, y o z.....	15
1.7.2	Matriz de traslación.....	16
1.7.3	Factor de seguridad	16
1.7.4	Esfuerzo en Juntas soldadas sometidas a flexión.	17
1.7.5	Esfuerzo máximo.....	17

1.7.6	Distancia entre centros para las correas.	18
1.7.7	Esfuerzos permisibles (para diseño).....	18
1.7.8	Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete	19
CAPÍTULO 2		20
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS		20
1.8	Análisis y necesidades para la elaboración de la máquina.....	20
2.1	Brazo Robot.....	20
2.1.1	Alternativa de diseño 1	21
2.1.2	Alternativa de diseño 2.....	21
2.1.3	Alternativa de diseño 3.....	21
2.2	Engomadora	22
2.2.1	Alternativa de diseño 1	22
2.2.2	Alternativa de diseño 2.....	22
2.2.3	Alternativa de diseño 3.....	23
2.3	Análisis Cuantitativo	23
2.3.1	Parámetros de calificación	23
2.3.2	Rangos de calificación para análisis cuantitativo del brazo robot	24
2.3.3	Análisis cuantitativo con calificación simple para el brazo robótico.....	24
2.4	Especificaciones técnicas del prototipo simulado.....	26
2.4.1	Grados de libertad.	26
2.4.2	Elección del Brazo Robot.....	26
2.4.3	Elección de la engomadora.	27
2.4.4	Selección del actuador giratorio.....	27

CAPÍTULO 3	28
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	28
3.1 Modelado Brazo Robot	28
3.1.1 Brazo pieza 1	28
3.1.2 Brazo pieza 2.....	29
3.1.3 Brazo pieza 13.....	29
3.1.4 Brazo pieza 14.....	29
3.1.5 Brazo pieza 15.....	30
3.1.6 Brazo pieza 16.....	30
3.1.7 Brazo pieza 24.....	30
3.1.8 Pasadores y Separadores	30
3.2 Actuador giratorio	30
3.2.1 Sistema giratorio pieza 1	31
3.2.2 Sistema giratorio pieza 2.....	31
3.2.3 Sistema giratorio pieza 3	31
3.2.4 Sistema giratorio pieza 4.....	32
3.2.5 Sistema giratorio pieza 5.....	32
3.3 Sistema dispensador de latillas.....	32
3.3.1 Cargador de latilla pieza 1	33
3.3.2 Cargador de latilla pieza 2.....	33
3.3.3 Cargador de latilla pieza 3.....	33
3.3.4 Cargador de latilla pieza 4.....	33
3.3.5 Cargador de latilla pieza 5.....	33

3.3.6	Cargador de latilla pieza 6.....	33
3.3.7	Bases.....	34
3.3.8	Varilla	34
3.4	Peso total de los elementos que conforman la máquina.....	34
3.5	Análisis de cargas en la base del brazo robot.....	34
3.6	Cálculos para selección del patín de bolas sobre raíles.....	36
3.7	Selección de riel	39
3.8	Cálculos para selección del motor y la banda inferior que desplazan el brazo robot. ...	40
3.8.1	Cálculo para la selección del motor que desplaza el brazo robot.....	42
3.8.2	Potencia del motor que desplazan el brazo robot.....	44
3.8.3	Velocidad angular mínima y máxima para el engrane con diámetro de 48 mm.	44
3.9	Elección del paso de la correa.....	45
3.10	Distancia entre centros para la correa de la base.....	47
3.11	Cálculo de fuerzas que actúan sobre los eslabones y las juntas del brazo robot.	49
3.11.1	Fuerzas cortantes.....	51
3.11.2	Momentos flectores.....	51
3.12	Eslabón hombro.....	52
3.13	Selección de rodamientos para la junta del hombro.....	55
3.13.1	Selección rodamiento en la junta A.	56
3.13.2	Selección rodamiento la junta B.	57
3.13.3	Selección rodamiento la junta C.	58
3.14	Cálculo para el perno central del hombro.....	59
3.15	Cálculo de la soldadura en el punto crítico en el eslabón del hombro.....	61

3.16	Selección de actuadores (motores).....	63
3.16.1	Par máximo requerido.	63
3.17	Radio de acción y área de trabajo.....	66
3.17.1	Cálculo del área o volumen de trabajo.	67
3.18	Cálculo de la fuerza de trabajo del pistón.	68
3.19	Controlador.....	69
3.19.1	PLC FP-XHC60PD (PNP)	69
3.20	Cinemática del brazo robot	72
3.21	Cinemática directa.....	72
3.21.1	Método Denavit-Hartenberg.....	74
3.22	Implementación.....	76
3.22.1	Proceso de obtener la materia prima.	76
3.22.2	Manufactura de piezas.....	76
3.22.3	Ensamble mecánico.....	80
3.22.4	Ensamble final del dispensador de latillas.	80
3.22.5	Ensamble final del actuador giratorio.	81
3.22.6	Ensamble final del manipulado (Brazo robot).	82
3.22.7	Ensamblaje del sistema eléctrico.....	83
3.23	Desarrollo del sistema de control.....	85
3.24	Manual de operación de la máquina.....	88
3.24.1	Botón de control manual	89
3.24.2	Botón de control numérico	89
3.24.3	Botón “Reseteo de Variables”	90

3.24.4	Botón Cinemática Directa	90
3.24.5	Botón de “Engomado”	90
3.24.6	Uso de botones externos (físicos).....	92
3.25	Mantenimiento de la máquina:	93
3.25.1	Mantenimiento periódico (diario):	93
3.25.2	Mantenimiento anual.....	93
3.26	Diagrama de funcionamiento de la máquina.....	94
CAPÍTULO 4		96
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....		96
4.1	Pruebas de elaboración artesanal.....	96
4.2	Pruebas de trabajo sin carga	98
4.3	Pruebas de trabajo funcionales	99
4.4	Pruebas de precisión.....	100
4.5	Costos	103
CONCLUSIONES		106
RECOMENDACIONES		108
REFERENCIAS		109
ANEXOS.....		114

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Sensor fotoeléctrico tipo relé Riko R3jk-du100a3 [24].	9
Figura 2. Perfil de velocidad trapezoidal [29].	14
Figura 3. Esfuerzos permisibles (Código AISC, por sus siglas en inglés) [31].	18
Figura 4. Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete [31].	19
Figura 5. Alternativas de construcción para el brazo robot.	22
Figura 6. Alternativas de construcción para la engomadora.	23
Figura 7. Prototipo del brazo robot elegido.	26
Figura 8. Prototipo de engomadora elegida.	27
Figura 9. Prototipo de actuador giratorio elegido.	27
Figura 10. Piezas modeladas para el brazo robot.	28
Figura 11. Modelado de las piezas para el brazo robot.	29
Figura 12. Modelado de las piezas para el actuador giratorio.	31
Figura 13. Modelado de las piezas para el actuador giratorio.	32
Figura 14. Elementos que actúan sobre la base del brazo robot.	34
Figura 15. Diagrama simplificado del peso total que actúa sobre la base.	35
Figura 16. Diagrama de fuerzas que actúan sobre cada patín de bolas.	37
Figura 17. Dimensiones, clasificación de cargas y pares del patín de bolas HGH15CA [33].	38
Figura 18. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el patín de bolas.	38
Figura 19. Selección de riel [33].	39
Figura 20. Características del riel HGR15R4000H [33].	40
Figura 21. Dimensiones de las poleas existente utilizada para desplazar el brazo robot.	40
Figura 22. Elemento de sujeción y guía para la polea dentada.	41

Figura 23. Diámetros de poleas dentadas para correas de tiempo [32].	41
Figura 24. Diagrama de fuerzas que actúan sobre la polea (POLEA_PIEZA_1).	42
Figura 25. Factor de servicio para máquinas [32].	45
Figura 26. Distancia entre centros aproximada mediante el software CAD (SolidWorks).	47
Figura 27. Correas dentadas de tiempo [32].	48
Figura 28. Diagrama de cargas que se ejercen sobre el brazo en función del peso.	49
Figura 29. División de tramos para el brazo robot.	49
Figura 30. Diagrama de fuerzas para el tramo A.	50
Figura 31. Diagrama de cargas del eslabón hombro-codo simulado como viga con apoyo fijo y pasador.	50
Figura 32. Diagrama de fuerzas del eslabón hombro-codo.	51
Figura 33. Diagrama de momentos flectores del eslabón hombro-codo.	51
Figura 34. Fuerzas ingresadas hallar las reacciones en los pasadores.	51
Figura 35. Reacciones obtenidas en Ay-By mediante MDSolids 4.0.	52
Figura 36. Eslabón hombro.	52
Figura 37. Especificaciones de tubo mecánico cuadrado [35].	53
Figura 38. Simulación del esfuerzo Von Mises del eslabón correspondiente al hombro.	54
Figura 39. Simulación de los desplazamientos del eslabón correspondiente al hombro.	54
Figura 40. Simulación del factor de seguridad del eslabón correspondiente al hombro.	55
Figura 41. Diagrama hombro-codo-muñeca.	55
Figura 42. Rodamientos disponibles SKF para la sección A, junta del hombro [37].	56
Figura 43. Datos técnicos del rodamiento elegido 63000-2RS [37].	56
Figura 44. Rodamientos disponibles SKF para la sección B, junta del codo [38].	57
Figura 45. Datos técnicos del rodamiento elegido 6001-RSL [38].	57

Figura 46. Rodamientos disponibles SKF para la sección C, junta de la muñeca [39].	58
Figura 47. Datos técnicos del rodamiento elegido W 61902 R [39].	58
Figura 48. Ubicación del perno central (eje del hombro).	59
Figura 49. Diagrama de unión atornillada en la junta del hombro.	59
Figura 50. Diagrama eslabón-hombro para soldadura.	61
Figura 51. Parámetros modificados en el script drawrobot3d6.	63
Figura 52. Posición crítica simulada y real del brazo robot.	64
Figura 53. Interfaz del programa “selmotor6” configurado acorde a las necesidades de trabajo.	64
Figura 54. Par pico (cursor 1) y par nominal (cursor 2) del programa selmotor6.	65
Figura 55. Dimensiones de las posiciones de trabajo del brazo robot.	66
Figura 56. Dimensiones del brazo robot en su máxima altura.	67
Figura 57. Diagrama de entradas y salidas del PLC FP-XHC60PD [40].	70
Figura 58. Sistema de referencias asignadas al brazo robot.	72
Figura 59. Sistema de referencias básico del brazo robot.	73
Figura 60. Plano de medidas para hallar la matriz de Denavit-Hartenberg.	73
Figura 61. Proceso de soldado de piezas.	76
Figura 62. Proceso de fresado.	77
Figura 63. Proceso de perforado	77
Figura 64. Proceso de doblado.	78
Figura 65. Proceso de torneado.	78
Figura 66. Procesos de corte.	79
Figura 67. Proceso de fundición.	79
Figura 68. Proceso de corte laser.	79

Figura 69. Componentes del dispensador de latillas.	80
Figura 70. Componentes de la engomadora.	80
Figura 71. Ensamble final del módulo dispensador de latillas.	81
Figura 72. Componentes del actuador giratorio.	82
Figura 73. Ensamblaje final del módulo correspondiente al actuador giratorio.	82
Figura 74. Componentes del brazo robot.	83
Figura 75. Ensamble final del brazo robótico.	83
Figura 76. Circuito de potencia de la máquina.	84
Figura 77. Circuito de control de la máquina.	84
Figura 78. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 1.	86
Figura 79. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 2.	86
Figura 80. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 3.	87
Figura 81. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 4.	87
Figura 82. Bloque "PulseOutputStop" y "PulseOutputContinue".....	87
Figura 83. Bloque "PulseControl_ElapsedValueReset" y "ElapsedValueContinue".	88
Figura 84. Bloque de salida de pulsos para controlar los motores.	88
Figura 85. Ventana principal del HMI.	88
Figura 86. Ventanas secundarias de la pantalla principal.	93
Figura 87. Diagrama de flujo del funcionamiento parte 1.	94
Figura 88. Diagrama de flujo del funcionamiento parte 2.	94
Figura 89. Diagrama de flujo del funcionamiento parte 3.	95
Figura 90. Procedimiento para elaboración de envases de forma tradicional.	97
Figura 91. Envases elaborados mediante la máquina.	100

Figura 92. Precisión en los eslabones del brazo robot en la muestra 3.	101
Figura 93. Precisión en los eslabones del brazo robot en la muestra 6.	101
Figura 94. Precisión en los eslabones del brazo robot en la muestra 10.	102
Figura 95. Diagrama de conexión neumática.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Porcentajes aproximados de los materiales más usados para envases [2].	2
Tabla 2: Porcentaje en uso de los productos de envasado a nivel global [2].	2
Tabla 3: Composición química del acero ASTM A36 [25].	10
Tabla 4: Propiedades técnicas del acero ASTM A36 [25].	10
Tabla 5: Composición química del Duraluminio aleación 2024 [26].	11
Tabla 6: Propiedades técnicas del duraluminio aleación 2024 [26].	11
Tabla 7: Composición química del aluminio AW 6061 [27].	12
Tabla 8: Propiedades técnicas del aluminio AW 6061 [27].	12
Tabla 9: Composición química del acero AISI 304 [28].	13
Tabla 10: Propiedades técnicas del acero AISI 304 [28].	13
Tabla 11: Coeficientes de fricción entre materiales.	14
Tabla 12: Necesidades para selección de alternativas de la máquina.	20
Tabla 13: Rangos y parámetros de calificación.	24
Tabla 14: Análisis cuantitativo con calificación simple para el brazo robótico	25
Tabla 15: Análisis cuantitativo con calificación ponderada para el brazo robótico	25
Tabla 16: Coeficiente de fricción de las guías de movimiento lineal [34].	42
Tabla 17: Resistencia de sello [34].	43
Tabla 18: Selección del paso para transmisiones de tiempo [32].	46

Tabla 19: Datos obtenidos a partir del software Matlab para la selección de los motores.....	65
Tabla 20: Entradas del PLC para señales recibidas de los botones físicos.....	70
Tabla 21: Conexión de salidas del PLC.....	71
Tabla 22: Canales utilizados en el PLC para el control de los drivers de los motores.....	71
Tabla 23: Entradas del PLC para señales recibidas de los finales de carrera y el sensor.	71
Tabla 24: Tabla Denavit-Hartenberg.	74
Tabla 25: Tiempos empleados en la elaboración de envases de forma tradicional.	97
Tabla 26: Tiempo de pruebas elaboradas sin carga (simuladas).	98
Tabla 27: Tiempo de proceso reales.	99
Tabla 28: Comparativa entre el tiempo de elaboración de envases.....	100
Tabla 29: Suministros ferreteros.....	103
Tabla 30: Material eléctrico.....	104
Tabla 31:Costos de construcción.....	104
Tabla 32: Material neumático.....	105
Tabla 33:Costo total.	105

RESUMEN

El presente trabajo de titulación se enfoca en el desarrollo de una máquina que pueda posicionar y aplicar pegamento en latillas de bambú, con el fin de elaborar recipientes cilíndricos capaces de contener productos. El brazo robótico es el componente principal de esta máquina, y uno de los objetivos principales es implementar esta tecnología para optimizar la eficiencia en la producción de envases.

El proceso parte con un análisis de los requerimientos de las tareas que la máquina debe realizar, se considera aspectos como el alcance, la precisión, la velocidad y seguridad. A continuación, se desarrolla un diseño sólido mediante software CAD, donde se crean modelos 3D y se realizan simulaciones para probar y evaluar el funcionamiento de la máquina antes de la construcción física.

Una vez finalizado el diseño, se seleccionan los componentes adecuados como son los motores, sensores, controladores y actuadores. Se procede a fabricar las piezas mecánicas y a integrar los componentes electrónicos y de control. Posteriormente se programa el software en consonancia del controlador seleccionado y se calibran los sensores y actuadores para asegurar la precisión y optimización de los parámetros para maximizar el rendimiento.

Finalmente, se realizan pruebas exhaustivas para garantizar que la máquina satisface las exigencias de diseño. Estas pruebas permiten demostrar la funcionalidad y la eficiencia en la elaboración de envases de bambú. Una vez comprobada la efectividad de la máquina, se analizan los resultados obtenidos y se exploran posibles adaptaciones que puedan ser implementadas en otras áreas dentro de la empresa.

Palabras clave: Brazo robot, calibrar, latillas de bambú, programación.

ABSTRACT

The present degree work focuses on the development of a machine that can position and apply glue on bamboo cans, to make cylindrical containers capable of containing products. The robotic arm is the main component of this machine, and one of the main objectives is to implement this technology to optimize efficiency in packaging production.

The process starts with an analysis of the requirements of the tasks that the machine must perform, considering aspects such as scope, precision, speed and safety. Next, a solid design is developed using CAD software, where 3D models are created and simulations are performed to test and evaluate the operation of the machine before physical construction.

Once the design is complete, the appropriate components such as motors, sensors, controllers and actuators are selected. The mechanical parts are manufactured and the electronic and control components are integrated. Subsequently, the software is programmed in accordance with the selected controller and the sensors and actuators are calibrated to ensure the precision and optimization of the parameters to maximize performance.

Finally, extensive testing is carried out to ensure that the machine meets the design requirements. These tests allow us to demonstrate the functionality and efficiency in the production of bamboo containers. Once the effectiveness of the machine has been verified, the results obtained are analyzed and possible adaptations that can be implemented in other automation areas within the same company are explored.

Keywords: Robot arm, calibrating, bamboo strips, programming.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problema de estudio

La empresa BHLEM-PAC, Ecuador, busca iniciar su actividad comercial en el mercado de producción de envases para almacenar o contener productos. A diferencia de otras empresas dedicadas a la elaboración de recipientes similares, BHLEM-PAC no cuenta con procesos o herramientas semiautomáticas que faciliten la elaboración de estos. Por lo tanto, la empresa requiere una máquina automatizada que sea accesible, asegure la calidad, la eficacia al igual que aumente y agilice la producción.

Actualmente, el proceso se lo realiza mediante personal cualificado. El proceso inicia al cortar la materia prima (bambú) acorde al tamaño del envase deseado. Posteriormente, se lijan las latillas mediante una máquina para eliminar imperfecciones, se cortan angularmente los bordes y se da forma trapezoidal, luego se aplica goma en los bordes de cada latilla y se las posiciona individualmente en un molde con forma de cilindro cónico de tal forma que encajen de manera equitativa. Una vez el pegamento ha secado, se corrige los posibles defectos que hayan surgido en el proceso de unión. A continuación, se graba el logotipo de la empresa y de ser necesario, puede incluir un diseño personalizado. Finalmente se aplica una capa de barniz para proteger y sellar el recipiente.

El desafío principal se centra en la posición y el engomado preciso de las latillas de bambú, tareas que requieren de precisión y repetitividad. Además, la empresa se enfrenta al reto de incrementar la producción para competir con empresas de rubros similares. Estas dificultades pueden generar fatiga y limitar la capacidad de los operadores para realizar estas tareas de manera eficiente.

Ante el problema identificado, se realiza el diseño y construcción de un sistema de inyección de goma con un actuador giratorio y un brazo robótico integrado para posicionar y engomar latillas de bambú. Este enfoque busca abordar los desafíos que existen en la producción de envases artesanales de bambú, los cuales incluyen la mejora en la eficiencia y la productividad, optimizar las condiciones de trabajo de los operadores y fomentar la interacción entre humano y máquinas para optimizar el proceso.

JUSTIFICACIÓN

Implementar la automatización en un proceso productivo tiene varios beneficios. Por un lado, puede aumentar la eficiencia y productividad al permitir que las máquinas y sistemas automatizados trabajen más rápido y sin errores humanos, acelerando la producción y reduciendo los tiempos de entrega. Además, la automatización posibilita reducir los costos asociados con el proceso, como los salarios de los trabajadores y los costos de capacitación, también reduce los costos de mantenimiento al ser menos propensos a fallas.

Otro beneficio para tener en cuenta es la mejora en la calidad del producto al reducir los errores humanos y garantizar que se sigan procesos iguales y estándares en cada ciclo de producción. También posibilita que las empresas se adecuen a las fluctuaciones en la demanda del mercado, permitiéndoles ser más flexibles y reactivos. Además, reduce los riesgos de seguridad al reemplazar trabajos peligrosos o que requieren manipulación de productos químicos por máquinas automatizadas que funcionan de manera segura y controlada.

Automatizar un proceso, es una respuesta a varios problemas productivos que pueden afectar a una empresa, ya sea, por el manejo deficiente del tiempo productivo, error de precisión humano, espacio de trabajo, desperdicio o falta de material necesario para la correcta fijación de los envases, etc. Varios de los problemas mencionados, alteran de manera significativa a la empresa, donde destaca la capacidad de ajustarse a las variaciones en la demanda del mercado por lo que, en esta situación en particular se decidió automatizar el proceso de engomado mediante la creación de una máquina capaz de realizar las labores de posicionamiento e inyección de pegamento en latillas de bambú, lo que permite disminuir los tiempos elevados de producción por unidad y eliminar principalmente los riesgos ergonómicos y el exceso de mano de obra. Como resultado, los empleados encargados de dichos procedimientos podrán ser derivados a otra área de producción en la empresa.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar y construir un sistema de inyección de goma con un actuador giratorio y un brazo robótico integrado para posicionar y engomar latillas de bambú.

Objetivos específicos

- Diseñar el sistema de inyección de goma, un brazo robótico y un actuador giratorio mediante software para identificar los materiales apropiados en la construcción de la máquina, satisfaciendo las exigencias mecánicas, propiedades, resistencia de los materiales, dimensiones y circuitos eléctricos requeridos.
- Construir la máquina inyectora integrando el brazo robótico y el actuador giratorio para ser controlados por un microprocesador/PLC, capaz de cumplir las tareas de automatización en función de la velocidad de aplicación de la goma y el posicionamiento de las latillas.
- Realizar las pruebas de funcionamiento del software y hardware para la validación de los resultados obtenidos.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La propuesta planteada consiste en diseñar y construir una máquina que utilice un brazo robótico el cual permita posicionar, orientar y facilitar la inyección de goma en latillas de bambú para la elaboración de envases. El brazo robótico se encargará de trasladar las latillas, desde su punto de almacenamiento hacia la etapa de engomado, donde mediante inyección neumática, se aplicará el adhesivo de manera controlada. Una vez engomada, las latillas serán posicionadas en el actuador giratorio para darles la forma final del recipiente.

El diseño y simulación mediante software CAD, permite crear un modelo digital que representa el sistema físico y facilita el análisis del comportamiento de la máquina antes de su implementación. El material se selecciona acorde al entorno de trabajo y al presupuesto estimado por la empresa. Se ha determinado que la estructura principal debe ser fabricada con acero inoxidable y aluminio debido a sus características anticorrosivas, resistencia y peso.

En la fase de implementación, se integra las piezas elaboradas junto a los componentes eléctricos, electrónicos y de control.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El presente capítulo aborda antecedentes históricos que precedieron a la aparición de la robótica industrial, desde sus primeras formas hasta la actualidad. Además, se plantean conceptos básicos y necesarios para comprender el funcionamiento de la máquina propuesta.

1.1 Estado actual de las empresas

Actualmente, las empresas buscan automatizar sus operaciones industriales para ampliar sus objetivos e incluir la capacidad de adaptación rápida a los cambios del mercado y flexibilidad en la producción. Históricamente, la automatización se ha centrado en reducir costos, asegurar la calidad óptima de los artículos comerciales y los servicios, además de salvaguardar al ser humano de tareas peligrosas, monótonas y nocivas para la salud puesto que consiste en incorporar dispositivos tecnológicos que aseguren el buen funcionamiento del proceso. La microelectrónica y los computadores permiten una mayor integración entre el sistema productivo y la selección adecuada de decisiones empresariales [1].

1.2 Antecedentes

A lo largo de los años, las máquinas industriales han evolucionado significativamente para satisfacer las exigentes demandas del mercado actual. Dentro de las dificultades más significativas que afronta la industria es la escasez de empresas especializadas en la fabricación artesanal de envases de madera para usos diversos, la contención, conservación y manipulación de productos durante su proceso productivo, distributivo o de venta son algunos de ellos. Esto se debe principalmente a que el mercado de envases está actualmente dominado por materiales más accesibles y fáciles de producir, como el plástico, papel y cartón, vidrio y metal. Como resultado, la demanda de envases de madera es baja. Este problema puede ser abordado mediante la incorporación de prácticas sostenibles y ecológicas en la industria del envase y a través de la educación de los consumidores sobre los beneficios ambientales de los envases de madera y la promoción de su uso como una alternativa más responsable [2].

Los productos relacionados con alimentos son responsables de más del 50% de la producción de envases, seguidos por las bebidas, productos farmacéuticos y cosméticos. Sin embargo, la madera como material de envasado y conservación de alimentos es poco utilizada, lo que se traduce en una

baja demanda de trabajos artesanales en esta industria. Por lo tanto, existe la necesidad de fomentar el uso de elementos o materiales sustentables y promover la producción de envases artesanales para atender la estricta demanda del mercado y el cuidado ambiental [2].

La industria de la manufactura de envases experimenta un crecimiento constante tanto a nivel global como en el mercado ecuatoriano. Esta industria tiene un impacto significativo en el crecimiento y el equilibrio de los países, su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) mundial oscila alrededor del 1% al 2%. Además de su impacto económico, la industria de envases también genera una inmensa cantidad de empleos, lo que beneficia a la sociedad [2].

La Tabla 1, muestra los porcentajes de los materiales más usados como envases.

Tabla 1: Porcentajes aproximados de los materiales más usados para envases [2].

Material	Porcentaje (%)
Papel y cartón	35%
Plásticos	37%
Metal y aluminio	14%
Vidrio	12%
Otros productos	2%

La Tabla 2, representa el porcentaje de los productos que se envasan a nivel mundial.

Tabla 2: Porcentaje en uso de los productos de envasado a nivel global [2].

Productos	Porcentaje de uso (%)
Envasados relacionados a alimentos	51%
Bebidas	18%
Farmacéuticos	6%
Cosméticos	5%
Otros	20%

1.3 Antecedentes Generales

La robótica y la automatización son términos de gran relevancia puesto que tienen un gran impacto en la producción industrial y en el mercado laboral. Ostenta un amplio margen de aplicaciones que van desde ámbitos cotidianos hasta exploraciones no tripuladas en ambientes hostiles.

1.3.1 La Automatización y la Robótica

Automatizar alude a la competencia de un proceso o sistema con el propósito de ejecutar tareas sin la intervención humana directa. Esto implica utilizar herramientas, tecnologías y sistemas de control para realizar tareas repetitivas y complejas de forma eficiente, rápida y precisa. Además, es posible integrar sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales para cumplir con estos requerimientos [3]. Algunos de los sistemas más implementados son:

- Suministro en líneas de transferencia con instrumentación.
- HMI (Interfaz Hombre – Máquina).
- Sistemas de control SCADA
- Máquinas CNC (Control Numérico Computarizado) y robots.

Por consiguiente, se puede decir que la robótica es un estilo de automatización industrial y de esta destacan tres tipos los cuales se muestran a continuación.

La automatización fija es aquella donde los instrumentos y la maquinaria están diseñados para ejecutar una tarea específica y no pueden ser reprogramados para otra tarea. Se utilizan cuando fabricación de productos tiene un gran volumen y en procesos industriales con un elevado rendimiento y altos índices de producción estandarizados [1].

La automatización programable es aquella donde la maquinaria y el equipo pueden ser reprogramados para realizar diferentes tareas, esto permite una mayor flexibilidad en la producción y se utiliza en la fabricación de productos con una amplia diversidad o a su vez en productos personalizados con un volumen de producción bajo [1].

La automatización flexible es aquella que se incorpora dentro de los sistemas de fabricación flexible (FMS, por sus siglas en inglés) puesto que permite una mayor adaptabilidad y flexibilidad fabricación de productos y prestación de servicios, se basa en la programación de equipos que pueden ser reconfigurados para adaptarse a diferentes tareas o procesos de producción. Utiliza

tecnologías avanzadas de control de procesos y robótica, esto permite que las empresas puedan responder rápidamente a las necesidades de los consumidores y como resultado, pueden mejorar la eficiencia y productividad de sus operaciones [1].

De los tres tipos mencionados, la robótica se acerca más al concepto de automatización programable.

En la actualidad, la robótica se ha convertido en un campo que engloba varias disciplinas (mecánica, electrónica, ciencias de la computación) convirtiéndose en una expresión de la tecnología, la cual hoy en día se extiende a contextos de la vida cotidiana y la industria. Abarca el diseño, construcción, operación y programación de robots, es decir, máquinas capaces de cumplir con las tareas asignadas de manera semiautónoma o autónomas en diferentes entornos con el objetivo facilitar y mejorar actividades que desempeña el ser humano. También plantea desafíos éticos y sociales, relacionados con la seguridad, la privacidad y el empleo [4].

1.3.2 Robot industrial

Máquina programable de manipulación automática multifuncional, cuenta con más de tres ejes, es capaz orientar y posicionar diversos materiales, componentes, instrumentos o dispositivos para cumplir con los diversos trabajos en las distintas fases de la manufactura industrial [5].

1.3.3 Brazo robot

Puede definirse como un dispositivo mecánico programable que se utiliza para realizar tareas repetitivas, peligrosas, con movimientos precisos y autónomos. Consiste en una serie de enlaces articulados que imitan la estructura del brazo humano, pueden moverse en varias direcciones mediante el uso de actuadores, sensores, un controlador y un sistema de retroalimentación, que trabajan juntos para permitir el movimiento del brazo [6].

En los últimos años, los brazos robots se han vuelto más asequibles y accesibles gracias a la disminución en los costos de fabricación y el desarrollo de tecnologías disruptivas como los sensores, la inteligencia artificial y el aprendizaje autónomo. Como resultado, están siendo convertidos en una herramienta cada vez más común. Además, son utilizados en diversas aplicaciones industriales, como la soldadura, el ensamblaje, la pintura, la manipulación de materiales, agricultura y educación. También en la medicina, para realizar cirugías y

procedimientos médicos de alta precisión, en general para realizar tareas en ambientes hostiles y peligrosos [7].

1.3.4 Robot manipulador

Mecanismo similar a un brazo robot, formada por eslabones y articulaciones, de tal forma que, puedan controlar un efecto final, posee una herramienta que le permite realizar las operaciones de manipulación. El máximo de grados de libertad que puede poseer es de seis, lo que corresponde a tres a la posición y tres a la orientación. Debido a la flexibilidad en cuanto a ser controlados, pueden resolver numerosos problemas frente a la automatización tradicional. Poseen diferentes cadenas cinemáticas, abierta, cerrada, en serie y en paralelo (es necesario conocer los grados de conectividad para identificar las diferentes cadenas) [8].

1.3.5 Automatización y envases

Actualmente, la elaboración de envases y la automatización de procesos están experimentando un continuo progreso impulsado por el avance tecnológico y la incorporación de nuevas herramientas digitales. Esta tendencia es relevante en la industria moderna, puesto que implica la digitalización de los procesos productivos, la integración de sistemas inteligentes y la automatización en la fabricación de artículos. En este contexto, se están desarrollando soluciones de automatización de procesos industriales basadas en robotización, Internet de las Cosas e Inteligencia Artificial [9].

En cuanto a la elaboración de envases, se utilizan tecnologías innovadoras como la impresión 3D, que permite crear envases personalizados o adaptados a las necesidades específicas del cliente. Además, se están desarrollando materiales sostenibles o biodegradables para los envases, con el fin de minimizar el impacto en el entorno natural y construir una marca solida como estrategia para atraer al público en general [10].

1.3.6 Fabricación envases

La fabricación de envases es una industria que se ha desarrollado a lo largo de muchos años. Desde los primeros envases hechos de arcilla y madera hasta los modernos elaborados de plástico, vidrio y metal, esta industria ha evolucionado con el objetivo de cumplir con las expectativas y requerimientos tanto de las empresas como de los consumidores.

La elaboración de envases ha experimentado avances significativos gracias a la invención de equipos de producción en masa. "Can Seamer" fue inventada en 1904 para sellar herméticamente

los envases de lata, lo que permitió una producción más rápida y eficiente. En las décadas siguientes, se desarrollaron otros dispositivos para la fabricación de envases, como las máquinas sopladoras para envases de vidrio y equipos de moldeo por inyección para envases de plástico [11].

Los equipos modernos para la elaboración de envases utilizan tecnologías avanzadas como la visión artificial y el aprendizaje autónomo, con el objetivo de mejorar y optimizar la calidad de los recipientes, reducir los costos de producción y el desperdicio de residuos [12].

Actualmente, las industrias dedicadas a la fabricación de envases se enfrentan a desafíos como la reducción del impacto ambiental que generan y la satisfacción de las exigencias del consumidor en términos de diseño, funcionalidad y sostenibilidad. Se espera que el desarrollo continuo de estas tecnologías continúe siendo un factor importante en la evolución de la industria en el futuro [13].

1.3.7 Bambú

Bambú es el término vernáculo o común para los miembros de un grupo taxonómico particular de gramíneas leñosas (subfamilia Bambusoideae, familia Andropogoneae / Poaceae), dentro de la cual es considerada una de las más numerosas y diversas. Se han catalogado y registrado alrededor de 90 géneros y 1,500 especies a nivel mundial [14].

El bambú puede representar un medio que permite fomentar las economías locales, un mercado sustentable y el desarrollo de autogestión por las prestaciones que este brinda, se destaca su crecimiento rápido, resistencia a fuerzas mecánicas, es un gran aislante, no es sensible a la humedad, la madera es muy dura, flexible, etc. Además, es fácil de cultivar y no requiere de químicos o fertilizantes, lo que lo hace una opción ecológica, ya que muchos de los productos elaborados a partir de este material, son biodegradables [15].

1.3.8 Envases de bambú

El bambú es un material renovable y sostenible que ha sido utilizado durante siglos en diversas culturas para la fabricación de productos y estructuras. En los últimos tiempos, el bambú ha ganado popularidad como alternativa ecológica y sostenible para la fabricación de envases.

En relación con otros materiales como el plástico, los envases de bambú son biodegradables y no contaminan el medio ambiente. Además, el bambú es un material ligero y resistente, lo que lo convierte en una alternativa confiable para transportar y resguardar alimentos y productos.

También, tienen propiedades antimicrobianas naturales que pueden ayudar a preservar la frescura de los alimentos [16].

Al elegir envases de bambú, no solo se contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también se apoya la generación de empleo y oportunidades de ingresos para las comunidades locales donde se produce [17]. A pesar de sus ventajas, el uso de este como material para envases también presenta algunos desafíos. La producción en masa de estos requiere una infraestructura y tecnología adecuadas, lo que puede ser costoso y limitar su disponibilidad. Además, es importante asegurarse de que el bambú utilizado provenga de fuentes sostenibles y se cultive de manera responsable [18].

1.3.9 Pegamento, adhesivo o goma

Material que posibilita la unión entre dos o más superficies mediante la interacción de dos fuerzas fundamentales: adhesión y cohesión, refiriéndose a la adhesión como la fuerza de unión entre el adhesivo y la superficie, mientras que la cohesión se relaciona con la resistencia interna del pegamento. Generalmente se clasifican en dos categorías: los pegamentos basados en solventes que se caracterizan por su alta resistencia y su capacidad para unir superficies difíciles de pegar y los pegamentos basados en agua considerados más suaves y fáciles de aplicar [19].

Es importante tener en cuenta aspectos como la adhesión, adherencia, cohesión, coherencia, energía superficial y humectación, independiente de la ocasión, debido a que dichos aspectos son los encargados de marcar el resultado final [20].

1.3.10 Cola blanca

Este adhesivo, también conocido como cola de carpintero, es una sustancia no tóxica y a base de agua que ha ganado popularidad gracias a su facilidad de uso, capacidad de secado rápido y la habilidad de unir una gran variedad de materiales [19]. Elaborado a partir de homopolímeros de acetato de polivinilo (PVA) y aditivos especiales, este pegamento ofrece una excelente resistencia al agua y su flexibilidad al secarse, lo que le permite soportar la expansión y contracción de los materiales que une [20]. Es ideal para superficies de madera, cartón, papel y materiales porosos, su finalidad es mantener adheridas dos o más superficies mediante principios de unión mecánica [21].

1.3.11 Actuador

Componente mecánico o electromecánico utilizado para convertir una señal de control en un movimiento físico, el cual a su vez puede ser lineal, rotativo o de fuerza. Hay diferentes tipos de

actuadores disponibles en el mercado, estos incluyen los actuadores eléctricos, hidráulicos y neumáticos, cada uno con sus propias ventajas y desventajas en términos de rendimiento, coste y complejidad de instalación, además, son componentes clave en la automatización y la robótica, son esenciales para la operación de muchos sistemas modernos y avanzados [22].

1.3.12 Motor paso

Es un tipo de motor eléctrico empleado para convertir pulsos eléctricos en movimientos mecánicos precisos y controlados. No requieren escobillas, lo que implica que son más confiables y tienen una mayor vida útil en comparación a otros tipos de motores. Funcionan mediante la activación secuencial de una serie de bobinas electromagnéticas dispuestas en una secuencia determinada, lo que produce un campo magnético que atrae el rotor hacia la siguiente posición [22].

1.3.13 Driver DM556

Controlador de motor paso de alta tensión, opera mediante tecnología de procesamiento de señales digitales, lo cual lo convierte en una solución rápida y flexible para el control de motores paso. Este controlador está equipado con tecnología anti-resonancia para minimizar las vibraciones. Ofrece un control preciso de corriente con una capacidad de hasta 5.6 A [23]. Las especificaciones técnicas del controlador a utilizar se lo pueden observar en el Anexo E.

1.3.14 Cilindro neumático

Dispositivo mecánico que utiliza aire comprimido para producir movimiento lineal o rotativo. Consiste en un tubo cilíndrico que alberga un pistón móvil que está conectado a un eje o varilla. Cuando se introduce aire comprimido en una cámara detrás del pistón a través de una válvula, la presión empuja el pistón hacia delante o hacia atrás, generando movimiento en la varilla [22].

Las características del cilindro a utilizar en la maquina se lo puede observar en el Anexo D.

1.3.15 Sensor

Dispositivo electrónico o mecánico que responde a estímulos físicos o químicos, convirtiéndolo en señales eléctricas o mecánicas [22].

1.3.16 Sensor fotoeléctrico

Dispositivo óptico que detecta la presencia o ausencia de un elemento mediante el uso de luz. Este tipo de sensor tiene la capacidad de emitir un haz luminoso hacia el área de detección. Dependiendo

de la configuración elegida (modelo reflectivo, modelo de barrera o modelo retro reflectivo) el sensor es capaz de detectar un objeto cuando entra en su campo de detección, interrumpe o refleja el haz de luz, lo que provoca que esta regrese al receptor del sensor y por medio del controlador, receptar la señal [24].



Figura 1. Sensor fotoeléctrico tipo relé Riko R3jk-du100a3 [24].

El sensor mostrado en la Figura 1, es el utilizado para detectar la posición de la latilla cuando es entregada por el dispensador de latillas.

Características:

- Tipo: difuso
- Distancia de sensado: 100 cm
- Voltaje de alimentación: 24vdc / 90-260vac
- Salida: tipo relé 2.5 - 250v

1.3.17 Final de carrera

Contacto eléctrico que se ubica en posiciones estratégicas para detectar la posición o movimiento de un elemento. Está diseñado para activarse de manera mecánica cuando se alcanza un determinado límite, lo que permite que las placas internas se cierran o abran según la configuración.

1.4 Propiedades de los materiales empleados.

Los materiales para emplear en la construcción de la máquina se eligen considerando tanto la disponibilidad de la materia prima en el almacén de la empresa como la existencia de piezas y elementos previamente construidos. Esta elección, busca optimizar recursos y minimizar costos.

1.4.1 Acero de transmisión (Norma ASTM A36).

Acero estructural de baja aleación reconocido por su elevada resistencia y ductilidad. El principal atributo radica en su versatilidad, puesto que puede ser fácilmente soldado, cortado, doblado y conformado en diferentes formas y tamaños. Además, presenta una notable capacidad de resistencia tanto a la tracción como a los impactos.

La Tabla 3, especifica los límites aproximados de contenido de cada elemento químico presente en acero ASTM A36. Estos valores consideran un margen de error que puede variar en función de las propiedades de la norma y especificaciones de fabricación.

Tabla 3: Composición química del acero ASTM A36 [25].

Composición Química (%)						
C. Max.	Mn. Max.	Si. Max	P. Max.	S. Max.	T1. Nb.	T2. V.
0.23	1.35	0.4	0.04	0.05	0.005-0.05	0.01-0.15

Las propiedades mecánicas son características y comportamientos relacionados a la forma en la que el material responde a las fuerzas y cargas aplicadas sobre él. Las propiedades más destacadas del acero ASTM A36 se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Propiedades técnicas del acero ASTM A36 [25].

Propiedades Técnicas		
Propiedades	Unidades	AISI A36
Límite de fluencia	MPa	250
Resistencia a la tracción	MPa	400 - 550
Módulo de elasticidad	GPa	200
Módulo de corte	GPa	79.3
Dureza Brinell	HBW	119 - 162

1.4.2 Duraluminio (Aleación de aluminio 2024).

Aleación de aluminio que se caracteriza por su alta resistencia y una buena relación resistencia-peso. La adición de cobre, magnesio y silicio mejora las propiedades del material, destacando su

resistencia a la fatiga y su capacidad para resistir la corrosión. Estas características lo hacen adecuado para aplicaciones de alto rendimiento sometidas a cargas dinámicas bajas.

La Tabla 5, especifica los límites aproximados de contenido de cada elemento químico presente en la aleación de aluminio 2024. Estos valores consideran un margen de error que puede variar en función de las propiedades de la norma y especificaciones de fabricación.

Tabla 5: Composición química del Duraluminio aleación 2024 [26].

Composición Química (%)										
Elem.	Si.	Fe.	Cu.	Mn.	Mg.	Cr.	Zn.	Ti.	Ti+Zr	Otros
Min.	-	-	3.8	0.3	1.2	-	-	-	-	-
Max.	0.5	0.5	4.9	0.9	1.8	0.1	0.25	0.15	0.2	0.15

Las propiedades mecánicas son características y comportamientos relacionados a la forma en la que el material responde a las fuerzas y cargas aplicadas sobre él. Las propiedades más destacadas de la aleación de aluminio 2024 se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Propiedades técnicas del duraluminio aleación 2024 [26].

Propiedades Técnicas		
Propiedades	Unidades	Aleación 2024
Límite de fluencia	MPa	240 - 470
Resistencia a la tracción	MPa	450
Elongación		12% - 20%
Módulo de elasticidad	GPa	76
Dureza Brinell	HBW	120

1.4.3 Aluminio (Norma AW6061).

Material ligero y resistente (aleación de aluminio con silicio y magnesio), el cual ofrece gran resistencia oxidación y a la corrosión. Su uso es común en la fabricación de elementos de maquinaria y productos de ingeniería que ameriten alta resistencia, así como una buena capacidad de conformación y soldadura. Además, su resistencia a la fatiga y capacidad de soportar cargas

pesadas, junto con su facilidad de mecanizado, la posibilidad de pulirlo y anodizarlo para mejorar su apariencia y protección contra la corrosión, lo hace un material altamente versátil.

La Tabla 7, especifica los límites aproximados de contenido de cada elemento químico presente en el aluminio AW 6061. Estos valores consideran un margen de error que puede variar en función de las propiedades de la norma y especificaciones de fabricación.

Tabla 7: Composición química del aluminio AW 6061 [27].

Composición Química (%)								
	Mg.	Mn.	Fe.	Si.	Cu.	Zn.	Cr.	Ti.
Max.	0.8 – 1.2	≤ 0.15	≤ 0.7	0.4 – 0.8	0.15 – 0.40	≤ 0.25	0.04 – 0.35	≤ 0.15

Las propiedades mecánicas son características y comportamientos relacionados a la forma en la que el material responde a las fuerzas y cargas aplicadas sobre él. Las propiedades más destacadas del aluminio AW 6061 se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Propiedades técnicas del aluminio AW 6061 [27].

Propiedades Mecánicas		
Propiedades	Unidades	AW6061
Densidad	g/cm^3	2.70
Resistencia a la tracción	Ksi	38
Porcentaje de alargamiento		8% - 10%
Módulo de elasticidad	Ksi	10000
Resistencia a la fatiga	MPa	96.5
Dureza Brinell		95

1.4.4 Acero inoxidable (Norma AISI 304).

Material aleado con cromo y níquel es altamente resistente a la corrosión intergranular y a las condiciones del ambiente. Su capacidad para resistir la corrosión en agua, ácidos y soluciones alcalinas es notable, especialmente cuando se presenta con una superficie pulida a espejo.

La Tabla 9, especifica los límites aproximados de contenido de cada elemento químico presente en el acero inoxidable norma AISI 304. Estos valores consideran un margen de error que puede variar en función de las propiedades de la norma y especificaciones de fabricación.

Tabla 9: Composición química del acero AISI 304 [28].

Composición Química (%)							
	C.	Si.	Mn.	P.	S.	Ni.	Cr.
Max.	0.08	1	2	0.04	0.03	8 – 10.5	18 - 20

Las propiedades mecánicas son características y comportamientos relacionados a la forma en la que el material responde a las fuerzas y cargas aplicadas sobre él. Las propiedades más destacadas del acero inoxidable norma AISI 304 se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Propiedades técnicas del acero AISI 304 [28].

Propiedades Mecánicas						
Resistencia Mecánica		Punto de Fluencia		Elongación	Pruebas de Dureza	
<i>Kg/mm²</i>	<i>Psi</i>	<i>Kg/mm²</i>	<i>Psi</i>	% Min.	Rockwell	Vickers
49	69500	18	25500	40	81.7	160

1.4.5 Acrílico

Polímero termoplástico sintético que se utiliza comúnmente como sustituto del vidrio por su alta transparencia, resistencia y facilidad de moldeo. También es conocido por su nombre comercial "Plexiglas" o "Polimetilmetacrilato" (PMMA, por sus siglas en inglés).

El acrílico es un material liviano y resistente a los impactos, aproximadamente 10 veces más resistente que el vidrio, lo cual lo convierte en una alternativa óptima para aplicaciones que precisan alta resistencia a la rotura y a la intemperie. Además, tiene una alta resistencia a la abrasión y a la radiación ultravioleta. Otra ventaja del acrílico es su facilidad de moldeo, ya que se puede dar forma mediante procesos como el moldeo por inyección, termoformado y corte por láser, lo que permite una amplia variedad de formas y diseños. Su dureza es similar al aluminio.

1.5 Perfil de velocidad trapezoidal.

Puede definirse como un patrón de movimiento que se utiliza para el control de sistemas dinámicos. Está compuesto por tres etapas: aceleración, velocidad constante y desaceleración [29], este perfil se puede interpretar de mejor manera al observar la Figura 2.

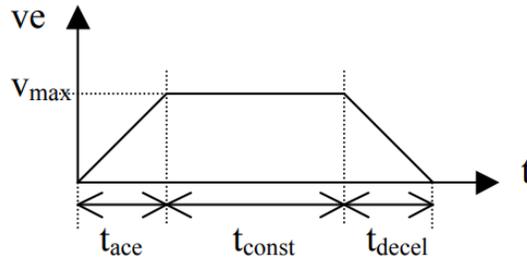


Figura 2. Perfil de velocidad trapezoidal [29].

Durante la fase de aceleración, aumenta linealmente la velocidad hasta alcanzar un valor máximo. A continuación, se mantiene constante durante la fase de velocidad antes de disminuir linealmente durante la fase de desaceleración [29].

Por lo general este perfil se emplea para lograr movimientos controlados y suaves, permitiendo un control preciso de velocidad y posición.

1.5.1 Coeficientes de fricción para diversos materiales.

La fricción se considera como una fuerza que se opone al movimiento de un elemento, se presenta como una resistencia al deslizamiento. Se caracteriza por actuar de manera tangencial y en paralelo a la superficie de contacto. Se divide en dos tipos: la fricción estática, que se manifiesta cuando un cuerpo está en reposo y se opone al deslizamiento sobre otra superficie; y la fricción dinámica, que posee una magnitud similar a la necesaria para mantener un cuerpo deslizándose a una velocidad constante sobre otra superficie. En la Tabla 11 se observa los coeficientes de fricción típicos entre los materiales más utilizados en la industria.

Tabla 11: Coeficientes de fricción entre materiales.

Materiales	Coefficiente de fricción estático μ_e	Coefficiente de fricción dinámico μ_d
Acero – Acero	0.74	0.57
Aluminio – Acero	0.61	0.47
Cobre – Acero	0.53	0.36
Latón – Acero	0.51	0.44
Madera – Madera	0.25 – 0.5	0.2
Hielo – Hielo	0.1	0.03
Teflón – Teflón	0.04	0.04

1.6 Cinemática de un robot

Hace referencia al estudio del movimiento y posición de los elementos que componen un robot en función a un sistema de referencia. La cinemática es una parte fundamental de la robótica, puesto que proporciona el movimiento espacial del robot a través de una descripción analítica y en función del tiempo. Este estudio permite comprender y analizar las trayectorias y configuraciones del robot, lo que proporciona datos primordiales para el control y programación eficiente de este.

La cinemática de un brazo robot se sustenta en el análisis de los movimientos que ocurren en las articulaciones y en las diferentes partes que componen el brazo. Para ello, se utilizan diferentes herramientas y conceptos matemáticos, como las ecuaciones de transformación homogénea y la trigonometría [30].

1.6.1 Cinemática Directa

Se aplica para estimar la orientación y la posición del extremo del autómatas en función de las variables de control de las articulaciones [30]. Las matrices de rotación alrededor de los ejes (x, y o z), se pueden apreciar en la Ecuación (1), Ecuación (2) y Ecuación (3) respectivamente, mientras que la matriz de traslación en los ejes (x, y o z), se pueden observar en la Ecuación (4).

1.7 Fórmulas y ecuaciones

En esta sección se enumera las fórmulas y ecuaciones relevantes utilizadas en el texto para facilitar la comprensión de los cálculos elaborados.

1.7.1 Matriz de rotación x, y o z.

Matrices utilizadas para representar las transformaciones de rotación en un sistema de coordenadas tridimensional.

La representación general que se observa en la Ecuación (1), se utiliza para describir una rotación alrededor del eje x de un sistema de coordenadas [30].

$$R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La representación general que se observa en la Ecuación (2), se utiliza para describir una rotación alrededor del eje z de un sistema de coordenadas [30].

$$R(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La representación general que se observa en la Ecuación (3), se utiliza para describir una rotación alrededor del eje z de un sistema de coordenadas [30].

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.7.2 Matriz de traslación

La Ecuación (4), se muestra la matriz de traslación utilizada para representar una transformación de desplazamiento de un sistema de coordenadas en tres dimensiones. Permite mover puntos en el espacio sin alterar la orientación y el tamaño. Px, Py y Pz representan los desplazamientos en los ejes x, y o z respectivamente [30].

$$T(x, y, z; \alpha, \beta, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Px \\ 0 & 1 & 0 & Py \\ 0 & 0 & 1 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.7.3 Factor de seguridad

Valor numérico que se representa a partir de la relación entre el esfuerzo resultante de las cargas aplicadas y el esfuerzo permisible [31].

$$F.S = \frac{\sigma_{falla}}{\sigma_{perm}} \quad (5)$$

$$F.S = \frac{\tau_{falla}}{\tau_{perm}} \quad (6)$$

Donde:

F.S: Factor de seguridad

σ_{falla} : Esfuerzo de falla

σ_{perm} : Esfuerzo de falla permisible

τ_{falla} : Esfuerzo cortante

τ_{perm} : Esfuerzo cortante permisible

1.7.4 Esfuerzo en Juntas soldadas sometidas a flexión.

Este esfuerzo hace referencia a las tensiones y fuerzas que actúan sobre la unión soldada cuando se somete a cargas que provocan flexión en la estructura. Estas cargas generan tensiones tanto en la zona soldada como en sus áreas adyacentes [31].

$$\tau' = \frac{V}{A} \quad (7)$$

$$\tau'' = \frac{Mc}{I} \quad (8)$$

$$\tau = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} \quad (9)$$

Donde:

τ' : Esfuerzo cortante vertical (primaria).

V : Reacción de viga cortante.

A : Área de la garganta

τ'' : Esfuerzo cortante horizontal (secundaria).

M : Momento flector aplicado.

I : Momento de inercia.

τ : Esfuerzo cortante total.

1.7.5 Esfuerzo máximo

Esfuerzo máximo en una sección transversal de un objeto sometido a un momento flector. Este esfuerzo permite determinar la máxima tensión experimentada en la sección debido a flexión [31].

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (10)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (11)$$

$$S = \frac{M}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

Donde:

M : Momento flector aplicado.

c : Distancia desde el punto medio de la sección transversal hasta la fibra más alejada.

I : Momento de inercia.

1.7.6 Distancia entre centros para las correas.

Ecuación para el cálculo de longitud de correas especiales que no se encuentran predeterminadas en catálogos [32].

$$L_p = 2C + 1,57(D + d) + \frac{(D + d)^2}{4C} \quad (13)$$

1.7.7 Esfuerzos permisibles (para diseño)

La Figura 3, muestra los valores de esfuerzo permisible necesarios para el diseño de elementos a tensión, cojinetes, doblamiento, compresión simple, entre otros. Dependiendo del tipo de carga, es necesario añadir un factor de seguridad que se multiplica por el esfuerzo permisible para el diseño de los componentes [31].

Type of Loading	Type of Weld	Permissible Stress	n^*
Tension	Butt	$0.60S_y$	1.67
Bearing	Butt	$0.90S_y$	1.11
Bending	Butt	$0.60-0.66S_y$	1.52-1.67
Simple compression	Butt	$0.60S_y$	1.67
Shear	Butt or fillet	$0.30S_{ut}^{\dagger}$	

Figura 3. Esfuerzos permisibles (Código AISC, por sus siglas en inglés) [31].

1.7.8 Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete

Las propiedades flexionantes de las soldaduras hacen referencia a la capacidad de estas uniones para resistir las fuerzas que generan flexión. Para calcular los esfuerzos involucrados, se considera el área de la garganta, que es la sección crítica de la soldadura, el primer momento de inercia, que determina la posición del centroide con respecto al eje, y el segundo momento de inercia, que indica la resistencia de la soldadura ante fuerzas de flexión. Estas consideraciones permiten evaluar la resistencia y la distribución de tensiones en la soldadura cuando se somete a cargas externas. En la Figura 4, se muestra las características mencionadas [31].

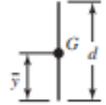
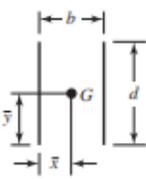
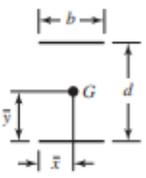
Weld	Throat Area	Location of G	Unit Second Moment of Area
1. 	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
2. 	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
3. 	$A = 1.414hb$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$

Figura 4. Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete [31].

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

El presente capítulo analiza las diferentes opciones de alternativas considerando los elementos necesarios para la construcción de la máquina de engomado. Además, se presenta una descripción detallada de los materiales a utilizar, teniendo en cuenta la disponibilidad de estos en la empresa.

El objetivo principal del análisis de alternativas es elegir la mejor opción acorde a las necesidades de la empresa. Para ello, se identificaron diversas opciones de diseño y se recopiló información relevante para cada una, en base a criterios establecidos los cuales se pueden ver en la Tabla 12 y Tabla 13.

1.8 Análisis y necesidades para la elaboración de la máquina.

La evaluación de cada opción implica la comparación entre ellas. Se identifica las fortalezas y debilidades de cada alternativa. Posteriormente, se selecciona la opción que demuestra ser la más favorable frente a los estándares establecidos. Los estándares establecidos se pueden observar en la Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 12: Necesidades para selección de alternativas de la máquina.

Necesidad	Análisis o deducción
Bajo costo	Accesible para la empresa. Reutilizar elementos que ya se posea.
Flexible	Adaptable a diferentes tareas.
Mejora en la producción	Aumento de eficiencia y precisión en la elaboración de recipientes de bambú. Velocidad adaptable.
Fácil operación	Interacción intuitiva del software y hardware con los operadores
Fácil mantenimiento	El mantenimiento se puede realizar por los operadores. Reducción de costos en mantenimiento. Reducir el tiempo de inactividad.

2.1 Brazo Robot

A continuación, se describen varias de las alternativas de diseño realizadas mediante software CAD para seleccionar la mejor opción para la construcción del brazo robot.

2.1.1 Alternativa de diseño 1

Se muestra en la Figura 5, literal A1. Esta alternativa está diseñada a partir de materiales disponibles en stock y se basa principalmente en acero y aluminio, lo que garantiza su durabilidad a largo plazo. Además, cuenta con 6 grados de libertad y utiliza un sistema de transmisión de movimiento a través de poleas, bandas, motores paso a paso y cajas reductoras de velocidad, lo cual permite un movimiento preciso y controlable. El actuador final (ventosa) funciona mediante sistema neumático.

Entre las desventajas, se puede mencionar que el peso de los materiales utilizados es un factor limitante en ciertas aplicaciones y la transmisión a través de poleas y bandas representa pérdidas de energía y reducción de la eficiencia en comparación con otras opciones de transmisión directa.

2.1.2 Alternativa de diseño 2

En la Figura 5, literal A2, se presenta una alternativa más simple, lo que puede facilitar su construcción y mantenimiento. Además, presenta restricciones en cuanto a su movimiento debido a que en ciertas posiciones los elementos tienen a chocarse y por tal motivo, afecta la precisión y eficiencia de la máquina. El HDPE y el aluminio son los materiales predominantes y estos permiten una vida útil promedio y un desgaste considerable de los componentes. También ayudan a que el sistema sea más liviano y fácil de transportar. Este diseño cuenta con 5 grados de libertad y su movimiento es controlado exclusivamente a través de motores paso a paso. La ventosa ubicada en el extremo final del brazo funciona mediante sistema neumático. El uso de materiales que tienden a desgastarse fácilmente puede requerir reemplazos frecuentes y aumentar los costos de mantenimiento a largo plazo.

2.1.3 Alternativa de diseño 3

La Figura 5, literal A3, muestra un diseño sencillo, lo que puede facilitar su construcción y mantenimiento. El material predominante es el plástico HDPE, el cual permite que el sistema sea más liviano y fácil de transportar. Presenta una vida útil promedio y con alto índice de desgaste en los elementos, cuenta con 3 grados de libertad y su movimiento se logra mediante servomotores y engranes. La pinza ubicada en el extremo del brazo funciona mediante un sistema de engranes.

Entre las desventajas, se encuentra su rango de movimiento, los grados de libertad que presenta y el sistema de sujeción, ya que no es el adecuado para el propósito requerido. Además, el uso de

materiales que tienden a desgastarse fácilmente puede requerir reemplazos frecuentes y aumentar los costos de mantenimiento a largo plazo. También hay que tomar en cuenta que los servomotores industriales tienen un costo elevado.

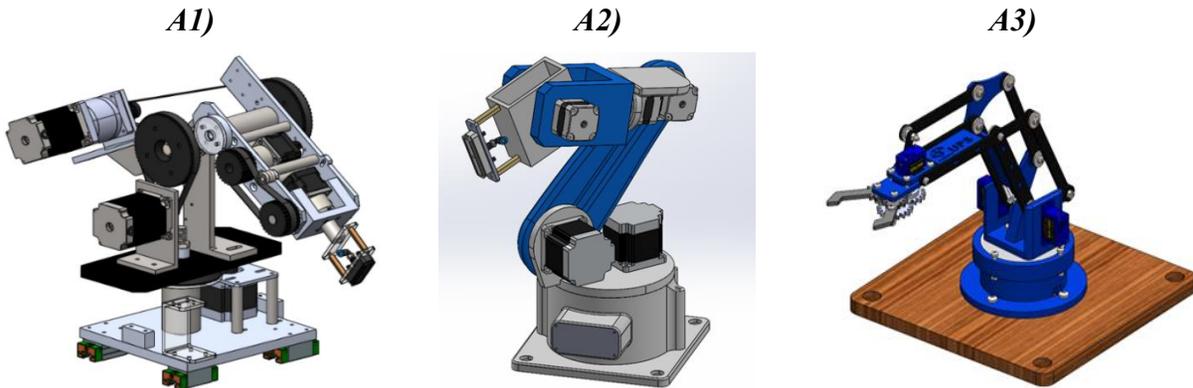


Figura 5. Alternativas de construcción para el brazo robot.

2.2 Engomadora

A continuación, se describen varias de las alternativas de diseño realizadas mediante software CAD para seleccionar la mejor opción en cuanto a la construcción de la engomadora.

2.2.1 Alternativa de diseño 1

En la Figura 6 literal B1, se observa que el diseño cuenta dos grados de libertad y presenta limitaciones en cuanto a sus movimientos. Los materiales principales para utilizar en su construcción son el aluminio y el acero, lo que garantiza una larga vida útil. Con el empleo de rodamientos y rodajas, se disminuye considerablemente el desgaste entre elementos. El mecanismo de movimiento está controlado por motores paso y tornillos de potencia permitiendo un control preciso y uniforme. El proceso requiere que la latilla permanezca estática, lo que puede limitar la eficiencia y velocidad de la producción.

2.2.2 Alternativa de diseño 2

La Figura 6 literal B2, muestra el diseño de engomadora con dos 2 grados de libertad, está limitado el movimiento en el eje x, los materiales predominantes son el aluminio y acero. Al poseer rodamientos y rodajas entre cada eje, se disminuye considerablemente el desgaste de los elementos por lo que esta alternativa presenta una larga vida útil. El mecanismo de movimiento es mediante motores paso y tornillo de potencia para el eje z y banda para el desplazamiento en el eje y.

2.2.3 Alternativa de diseño 3

La Figura 6 literal B3, muestra un diseño simple y sencillo de ensamblar, lo que permite una combinación ideal entre las estaciones propuestas para construir. El material predominante es el acero inoxidable.

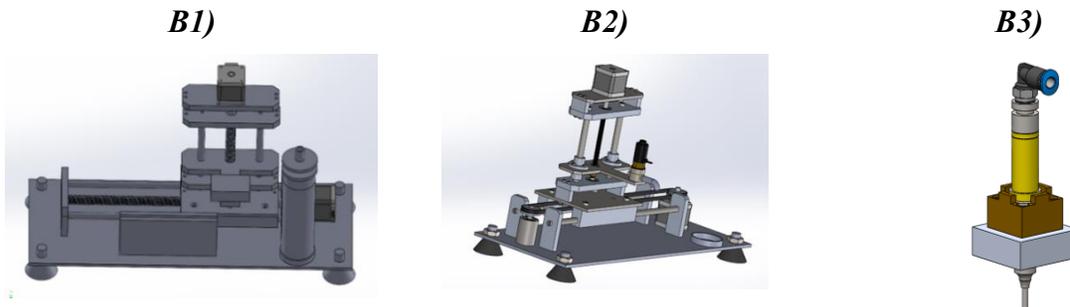


Figura 6. Alternativas de construcción para la engomadora.

Para todas las alternativas mencionadas se puede considerar el uso de materiales ligeros como son la fibra de vidrio o el carbono para disminuir el peso y mejorar la eficiencia en la transmisión del movimiento. Además, en lugar de poleas y bandas, se podría utilizar una transmisión directa para reducir costos y pérdida de energía. Se puede considerar como alternativa adicional la implementación de sistemas de control avanzado, como la IA (inteligencia artificial) y el aprendizaje automático, lo que permitiría un control preciso y adaptable del sistema.

2.3 Análisis Cuantitativo

Metodología empleada para estudiar y medir fenómenos mediante datos numéricos. Implica recopilar información objetiva y precisa, utilizando técnicas estadísticas y matemáticas, para realizar mediciones, comparaciones y establecer relaciones cuantitativas. Además, permite obtener resultados cuantificables y reproducibles, lo que favorece a la toma de decisiones y el descubrimiento de tendencias en los datos.

2.3.1 Parámetros de calificación

Para elegir la mejor alternativa, se toma en cuenta parámetros que engloban consideraciones económicas, técnicas, operativas y estéticas, con el objetivo de seleccionar la opción que cumpla con los estándares establecidos y se ajuste a las necesidades del proyecto. A continuación, se muestran los criterios a tomar en cuenta para la construcción de la máquina.

- A. Costo
- B. Facilidad de operación
- C. Existencia de materiales en el mercado
- D. Facilidad de montaje
- E. Seguridad
- F. Vida útil de producto
- G. Estética del producto

2.3.2 Rangos de calificación para análisis cuantitativo del brazo robot

Los criterios y rangos mostrados en la Tabla 13, se emplean para evaluar y calificar de manera cuantitativa las alternativas de construcción. En este proceso, los puntajes o rangos más altos corresponden a las características con un alto índice de aceptación y que son favorables respecto a los aspectos de costos, disponibilidad y rendimiento de la máquina.

Tabla 13: Rangos y parámetros de calificación

Rango	Parámetros
0 – 3	<ul style="list-style-type: none"> • Caro • Difícil de encontrar • Piezas difíciles de mecanizar • No existe el elemento en el mercado • Mecanismo deficiente o de bajo rendimiento
4 – 7	<ul style="list-style-type: none"> • Costo moderado • Medianamente de encontrar • Piezas de mecanizado moderado • Puede encontrarse en el mercado • Mecanismo de eficiencia media o medio rendimiento
8 – 10	<ul style="list-style-type: none"> • Costo bajo • Fácil de encontrar • Fácil de encontrar en el mercado • Mecanismo de alta eficiencia o alto Rendimiento

2.3.3 Análisis cuantitativo con calificación simple para el brazo robótico.

El análisis cuantitativo simple empleado en la Tabla 14, es un enfoque para evaluar y comparar las características de las alternativas propuestas para el brazo robótico. En esta metodología, se asigna

una valoración a cada aspecto a evaluar, en este caso se asigna una calificación de 0 a 10 con el objetivo de cuantificar y comparar de manera objetiva las opciones disponibles. Donde 0 corresponde al valor menos favorable y 10 al valor más aceptable.

Tabla 14: Análisis cuantitativo con calificación simple para el brazo robótico

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
A	Costo	8	10	10
B	Facilidad de operación	10	10	10
C	Existencia de material en el mercado	10	10	10
D	Facilidad de montaje	9	10	10
E	Seguridad	9	5	3
F	Vida útil del producto	9	5	5
G	Estética del producto	8	5	3
Total		63	55	51

A partir del análisis cuantitativo de calificación simple que se detalla en la Tabla 14 se determina que el diseño óptimo en cuanto a los parámetros preestablecidos es la alternativa 1 para el brazo robótico puesto que, este cuenta con elevados niveles de seguridad, amplia vida útil, materiales de calidad, entre otros. Los cuales son factores determinantes para la construcción de la máquina.

Tabla 15: Análisis cuantitativo con calificación ponderada para el brazo robótico

		%	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3			
A	Costo	20	8	1,6	10	2	10	2
B	Facilidad de operación	10	10	1	10	1	10	1
C	Existencia de material en el mercado	20	10	2	10	2	10	2
D	Facilidad de montaje	10	9	0,9	10	1	10	1
E	Seguridad	20	9	1,8	5	1	3	0,6
F	Vida útil del producto	10	9	0,9	5	0,5	5	0,5
G	Estética del producto	10	8	0,8	5	0,5	3	0,3
Calificación Total		100	9		8		7,4	

El análisis cuantitativo con calificación ponderada que se muestra en la Tabla 15, es un enfoque que se utiliza para evaluar y comparar las características del brazo robot. En esta metodología, se asignan pesos relativos a cada criterio evaluado (0 – 100%), el cual refleja su importancia en la

toma de decisiones. Se califica cada criterio en una escala numérica según su desempeño, en este caso de 0 a 10. Donde 0 corresponde al valor menos favorable y 10 al valor más aceptable.

Mediante el análisis cuantitativo de calificación ponderada que se detalla en la Tabla 15, se sustenta el análisis de la Tabla 14 y se selecciona como diseño principal la alternativa 1 con una calificación ponderada de 9 para el brazo robot. Este método puntúa acorde a la importancia de los parámetros preestablecidos con una relevancia del 10% – 20% entonces, se selecciona esta alternativa por la disponibilidad previa de varios elementos y materiales, lo cual permite reducir los costos asociados.

2.4 Especificaciones técnicas del prototipo simulado.

Conjunto de criterios que deben cumplirse de manera clara y precisa para garantizar que el prototipo cumpla con los objetivos establecidos y con los requisitos del empleador.

2.4.1 Grados de libertad.

Alude a la cantidad de movimientos independientes que el brazo robótico puede realizar. Un mayor número de grados de libertad permite que el brazo tenga una mayor flexibilidad y capacidad de movimiento.

2.4.2 Elección del Brazo Robot.

Para el prototipo propuesto, se ha elegido diseñar un brazo robot antropomórfico con 6 grados de libertad, ya que permite llevar a cabo las tareas de trasladar y posicionar las láminas de bambú de manera efectiva como se observa en la Figura 7.

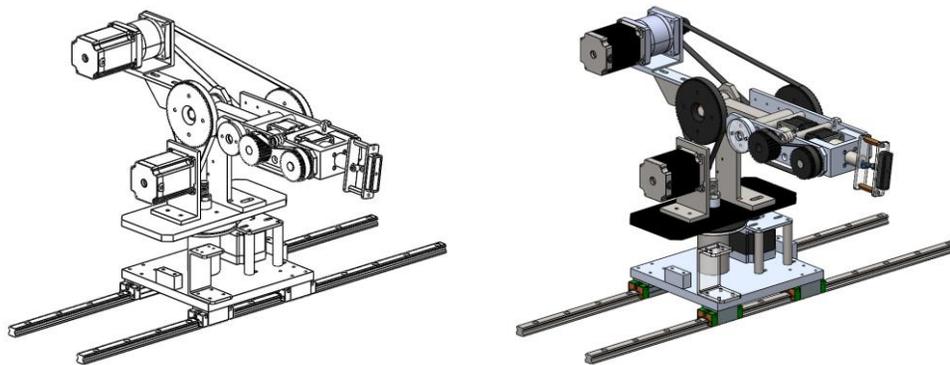


Figura 7. Prototipo del brazo robot elegido.

A continuación, se describen los movimientos del brazo robot.

- Desplazamiento longitudinal de la base 1.

- Giro rotativo de la base 2 respecto a la base 1.
- Giro rotativo del brazo 1 respecto a la guía de la base 2.
- Giro rotativo del brazo 2 respecto al brazo 1.
- Giro rotativo de la muñeca respecto al brazo 2.
- Giro rotativo de la ventosa.

2.4.3 Elección de la engomadora.

Para el prototipo seleccionado, se ha decidido desarrollar una engomadora simple sin grados de libertad como se visualiza en la Figura 8, ya que el brazo robot es responsable de posicionar y mover la lámina de guadua para que se pueda aplicar el pegamento de manera correcta.

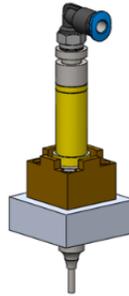


Figura 8. Prototipo de engomadora elegida.

Al no poseer grados de libertad la engomadora tiene un posicionamiento estático.

2.4.4 Selección del actuador giratorio.

Cuenta con un grado de libertad que le permite rotar para que el brazo posicione la latilla engomada en el lugar correspondiente, el diseño se puede observar en la Figura 9.

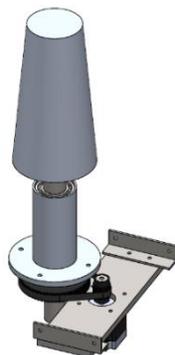


Figura 9. Prototipo de actuador giratorio elegido.

El grado de libertad que posee el actuador giratorio es el giro rotativo de la base.

CAPÍTULO 3

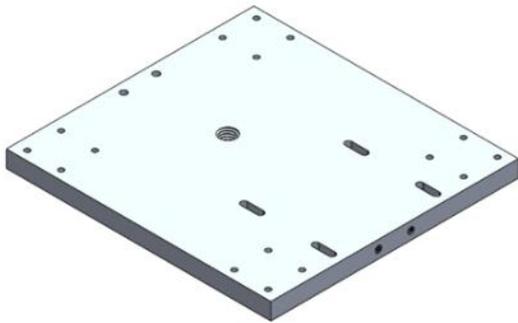
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El presente capítulo detalla los análisis realizados para corroborar la selección de los componentes utilizados en la construcción de la máquina.

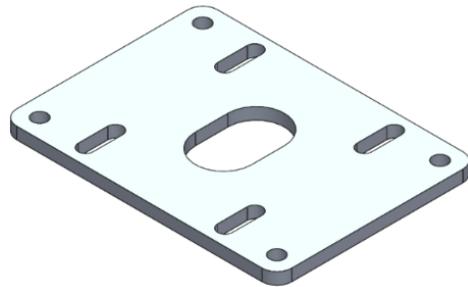
3.1 Modelado Brazo Robot

En la Figura 10 y Figura 11, se muestra el diseño de los elementos más importantes dentro de la construcción del brazo robot.

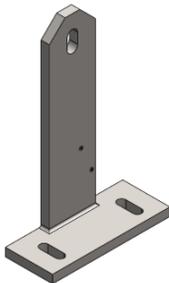
C1)



C2)



C3)



C4)

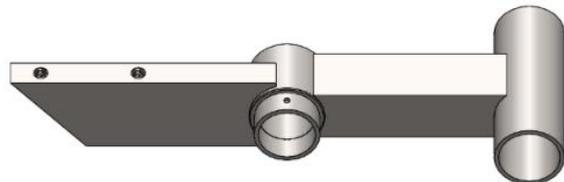


Figura 10. Piezas modeladas para el brazo robot.

3.1.1 Brazo pieza 1

El modelado de la base se ha realizado a partir de una extrusión del perfil, los ranurados que se observan permiten ajustar la distancia de los ejes que sostienen al motor, los cuatro orificios en cada esquina del elemento permiten montarlo sobre cada guía de desplazamiento. El objetivo principal de la forma de la pieza es permitir la manipulación directa y fácil acceso a los componentes y conducir de forma cómoda el cableado, el modelado final puede observarse en la Figura 10, literal C1.

3.1.2 Brazo pieza 2

El modelado de este elemento se lo realizó a través de una extrusión del perfil dibujado, esta pieza sirve principalmente para sostener el motor en conjunto a los separadores. Las ranuras que se pueden observar sirven para mover el motor de tal forma que este temple la polea que transmite el movimiento, el modelado final puede observarse en la Figura 10, literal C2.

3.1.3 Brazo pieza 13

El modelado de este elemento esta hecho a partir de dos extrusiones del perfil, los ranurados que se observan en la base, permite ajustar la distancia ente los engranes que mueven el siguiente eslabón, alineándolos de tal forma que la banda quede completamente recta, la ranura superior sirve para ajustar la banda y para colocar el perno que sujetará los eslabones siguientes hasta la ventosa de sujeción, el modelado final puede observarse en la Figura 10, literal C3.

3.1.4 Brazo pieza 14

Este elemento no fue diseñado puesto que la empresa ya disponía de esta pieza. Para evitar el desperdicio de material, se decidió utilizarla y se realizó una pequeña modificación, la cual consiste en cortar angularmente la parte recta del perfil, para evitar que este choque con la base (Brazo pieza 14), también se realizó dos orificios en la parte superior la cual permite sujetar la pieza que soporta el motor, el modelado final puede observarse en la Figura 10, literal C4.

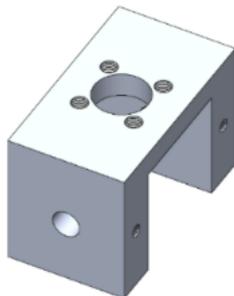
D1)



D2)



D3)



D4)

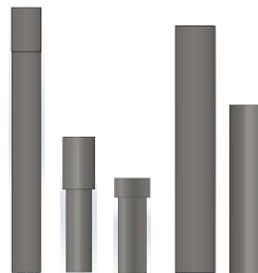


Figura 11. Modelado de las piezas para el brazo robot.

3.1.5 Brazo pieza 15

Está modelado para que en conjunto a (Brazo pieza 16) conforme el eslabón o brazo que conecta el codo y la muñeca, los agujeros mostrados son para colocar los pilares o ejes que separaran las piezas entre sí, ajustar la posición del motor y posicionar los rodamientos en conjunto a sus ejes, el modelado final puede observarse en la Figura 11, literal D1.

3.1.6 Brazo pieza 16

El concepto es el mismo indicado en “Brazo pieza 15”, el modelado final puede observarse en la Figura 11, literal D2.

3.1.7 Brazo pieza 24

El modelado de este elemento se asemeja a la muñeca del brazo robot ya que en conjunto al motor y los engranes, simula tal movimiento, los orificios en la parte superior son para centrar y ajustar el motor. Los orificios laterales están conformados de tal forma que sirva de guía para los ejes que conectan esta pieza con relación al brazo inferior (Brazo pieza 15 y Brazo pieza 16), el modelado final puede observarse en la Figura 11, literal D3.

3.1.8 Pasadores y Separadores

Se modelaron pasadores cilíndricos sencillos los cuales se van a utilizar en los motores y engranes con el fin de unir las piezas en la máquina y permitir un giro relativo entre ellas, para ello se puede realizar una revolución o extrusión del perfil dibujado.

El modelado de los separadores se realizó a partir de una revolución de un dibujo simple, estos sirven principalmente para brindar un espaciado entre las piezas, se las utilizará principalmente entre el brazo inferior, para separar la pieza que sostiene el motor y la base principal. También se las utilizará en los elementos finales de la muñeca para dejar una separación entre la ventosa y la pieza rotatoria que la conforman, el modelado final puede observarse en la Figura 11, literal D4.

3.2 Actuador giratorio

En la Figura 12, se presenta el diseño de los elementos clave, correspondientes al lugar donde se dispondrán las latillas de bambú para dar forma a los envases.

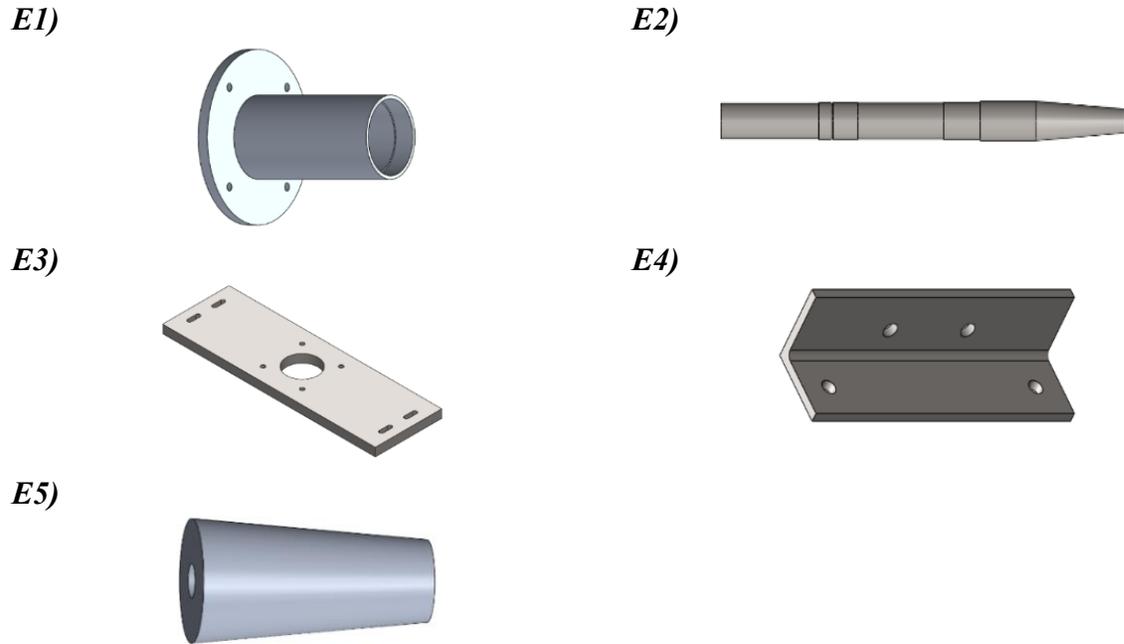


Figura 12. Modelado de las piezas para el actuador giratorio.

3.2.1 Sistema giratorio pieza 1

Este elemento se encuentra modelado a partir de una revolución del dibujo y es fundamental dentro del sistema giratorio puesto que constituye base de dicho sistema. En su interior, presenta circunferencias escalonadas o bocines que permiten colocar y posicionar los rodamientos. Además, cuenta con agujeros para fijarlo a la mesa a través de pernos, el modelado final puede observarse en la Figura 12, literal E1.

3.2.2 Sistema giratorio pieza 2

El modelado de la siguiente pieza es esencial dentro del sistema rotatorio, puesto que es el eje de este, su forma con diferentes radios permite encajar de manera perfecta con la base y los rodamientos que conforman esta parte de la máquina. El diseño del elemento puede ser mediante una revolución o varias extrusiones del dibujo, el modelado final puede observarse en la Figura 12, literal E2.

3.2.3 Sistema giratorio pieza 3

Esta placa es la encargada de guiar y soportar al motor del sistema en conjunto al ángulo (Sistema giratorio pieza 4). Para el diseño de esta pieza basta con realizar una extrusión del plano o dibujo elaborado, el modelado final puede observarse en la Figura 12, literal E3.

3.2.4 Sistema giratorio pieza 4

Esta pieza es la encargada de sujetar la placa (Sistema giratorio pieza 3) a la mesa. Para el modelado de esta pieza se puede realizar una extrusión del perfil en, el modelado final puede observarse en la Figura 12, literal E4.

3.2.5 Sistema giratorio pieza 5

Esta pieza es la encargada de soportar y guiar la posición de las latillas para que estas formen el recipiente con forma cónica, el agujero que se puede observar en el modelo encaja con la punta cónica de Sistema giratorio pieza 2 permitiendo la rotación con la misma.

El diseño de esta se realiza mediante una revolución o la extrusión y corte de los planos dibujados, la forma cónica es a 5°, el modelado final puede observarse en la Figura 12, literal E5.

3.3 Sistema dispensador de latillas

El diseño de los elementos más importantes dentro de la construcción del sistema proveedor de latillas, se muestra en la Figura 13.

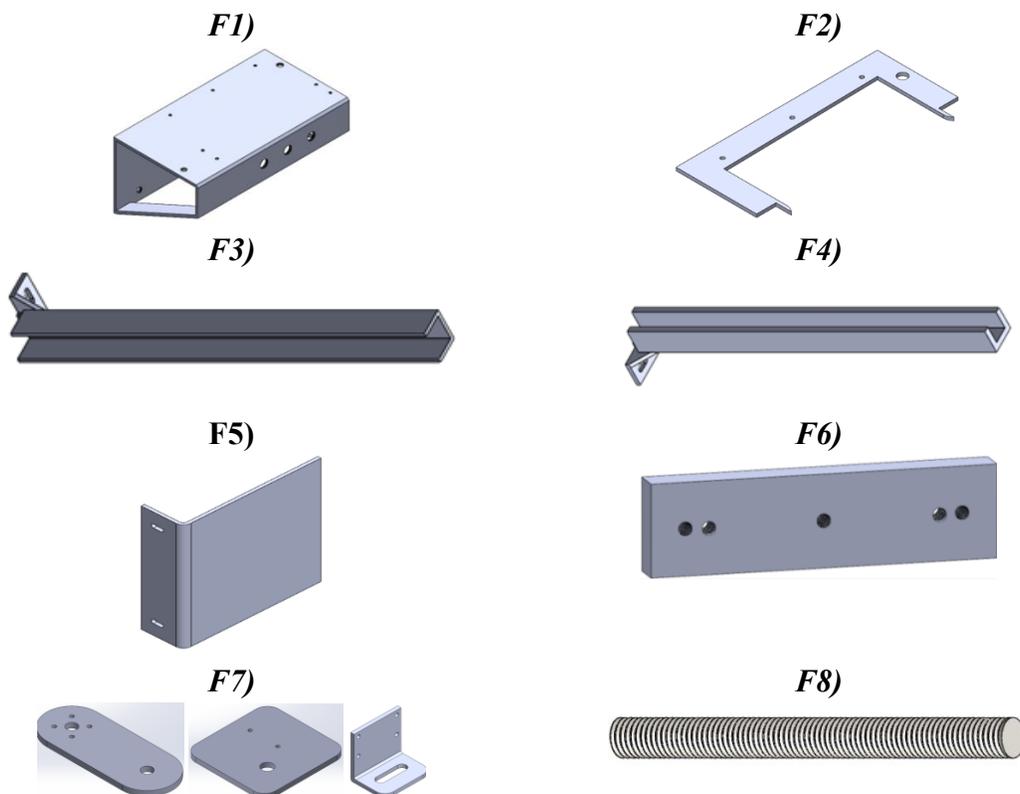


Figura 13. Modelado de las piezas para el actuador giratorio.

3.3.1 Cargador de latilla pieza 1

El modelado de esta pieza se realiza a partir de varias extrusiones en diferentes planos, los agujeros sirven de guía para los demás componentes. Además, es la base para el dispensador de latillas, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F1.

3.3.2 Cargador de latilla pieza 2

El modelado de este elemento se lo realiza a partir de una extrusión del perfil dibujado, su función es acomodar la latilla una vez sea empujada por el pistón, en la figura (b) se puede observar que el perfil interno es asimétrico dado que este fue diseñado de tal forma que la latilla se acople de manera perfecta y no se mueva de tal forma que el brazo robot pueda tomarlo a través de la ventosa, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F2.

3.3.3 Cargador de latilla pieza 3

El diseño de esta pieza se ha llevado a cabo de manera que, en conjunto al (Cargador de latilla pieza 4), forme un sistema “poka yoke”. Esto garantiza que la máquina este diseñada para que la latilla sea colocada en una sola dirección y así evitar posicionarla de forma incorrecta, para su diseño se debe extruir varios planos, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F3.

3.3.4 Cargador de latilla pieza 4

El concepto para este apartado es el mismo que el mencionado en (Cargador de latilla pieza 3). La diferencia de la pieza anterior radica en que su perfil es más ancho por lo que el lado delgado de la latilla debe ir en este sentido, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F4.

3.3.5 Cargador de latilla pieza 5

El modelado de esta pieza se lo realiza mediante la extrusión de un perfil en L, la función de esta es empujar linealmente la latilla de las guías antes mencionadas mediante el pistón neumático y en conjunto al (Cargador de latilla pieza 2), posicionarla para que el brazo pueda recogerla mediante la ventosa, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F5.

3.3.6 Cargador de latilla pieza 6

El modelado de esta pieza se lo ha realizado mediante una extrusión del perfil dibujado, sus orificios sirven para unir el (Cargador de latilla pieza 5) y los ejes guías en conjunto al cilindro neumático. La función principal de este elemento es mantener recta a la pieza mencionada

anteriormente para que esta se desplace con facilidad, empujando la latilla minimizando el esfuerzo que realiza el cilindro neumático para accionar las piezas en conjunto, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F6.

3.3.7 Bases

Las piezas que se muestran a continuación son elementos simples que se encargan de sujetar los sensores y su modelado es a partir de extrusiones del perfil dibujado, el modelado final puede observarse en la Figura 13, literal F7.

3.3.8 Varilla

Es el tornillo donde se sujetarán las bases antes mencionadas y no se ha modelado debido a que cuenta con medidas estándar de mercado, se puede observar en la Figura 13, literal F8.

3.4 Peso total de los elementos que conforman la máquina.

El peso total obtenido de la máquina es de 120,20 kg y este puede obtenerse mediante la sumatoria de los pesos individuales mostrados en el Anexo A.

3.5 Análisis de cargas en la base del brazo robot.

Para garantizar un diseño confiable y eficiente del brazo robot, es necesario realizar un análisis de las cargas que actúan en su base. Para ello se tiene en cuenta el peso total de todos los elementos que conforman el brazo (W). En la Figura 14 se observa el prototipo simulado, mientras que en la Figura 15 se presenta el diagrama que representa el peso combinado de todos los componentes que actúan sobre esta.

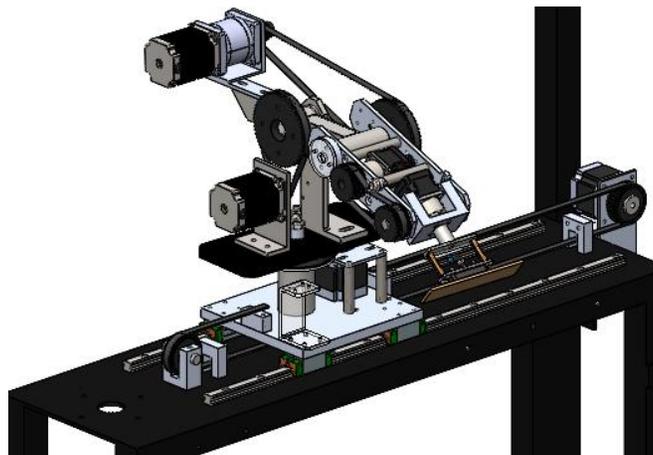


Figura 14. Elementos que actúan sobre la base del brazo robot.

De manera inicial se determina la masa total del brazo robot, incluyendo todos los elementos diseñados mediante software CAD (SolidWorks). A través de este procedimiento se obtiene los pesos individuales de cada elemento, de manera alternativa, es posible obtener estos pesos tomando los valores proporcionados en el Anexo A, o a su vez a través de una balanza, posteriormente se calcula la masa total que actúa sobre la base del brazo. Para el diseño de los componentes, es necesario aplicar un valor en exceso el cual contempla la aplicación de fuerzas externas no previstas, la incorporación de elementos adicionales posteriores a los cálculos iniciales, entre otros factores. De este modo se asegura un margen de seguridad adicional durante la ejecución de los procedimientos.

Datos:

Masa del brazo robot estimada mediante software CAD (SolidWorks):

$$W = 14\,496\text{ gr} \approx 14,496\text{ kg}.$$

Sobredimensionamiento = 40%.

m_T = Masa total que actúa sobre la base del brazo.

m = Masa total de los elementos que actúan sobre la base

% S = Porcentaje de sobredimensionamiento

$$m_T = m * \% S \quad (14)$$

$$m_T = 14,496\text{ kg} * 40\% = 20,29\text{ kg} \approx 21\text{ kg}$$

A continuación, se elabora un diagrama simplificado basado en la Figura 14 con el objetivo de hallar las fuerzas que actúan sobre los ejes de las abscisas y ordenadas.

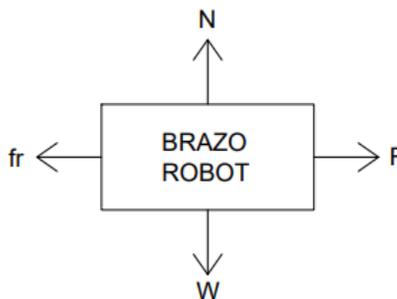


Figura 15. Diagrama simplificado del peso total que actúa sobre la base.

$$+\uparrow \sum Fy = w$$

$$N = W = mg \quad (15)$$

$$N = 21 \text{ kg} * 9,81 \text{ N}$$

$$N = 206,01 \text{ N}$$

$$+\rightarrow \sum Fx = ma$$

$$F - fr = m(0)$$

$$F = fr$$

$$F = \mu N \quad (16)$$

De la Ecuación (16), obtenida en el eje de las abscisas y los coeficientes de rozamiento (μ_d y μ_e) obtenidos de la Tabla 11, se determinan las fuerzas que actúan sobre la base del brazo robot cuando este se encuentra en reposo y en movimiento.

$$F_{estático} = \mu_e * W = 0,74(206,01 \text{ N}) \quad (17)$$

$$F_{estático} = 152,4474 \text{ N}$$

$$F_{diámico} = \mu_d * W = 0,57(206,01 \text{ N}) \quad (18)$$

$$F_{dinámico} = 117,4257 \text{ N}$$

La fuerza estática, es la mayor entre las dos fuerzas calculadas Ecuación (17) y Ecuación (18), por lo que los cálculos se efectuaran a partir de esta para determinar la banda necesaria que permita desplazar todos los elementos que conforman el brazo robot a lo largo del eje longitudinal garantizando un movimiento eficiente y que no presente problemas en el sistema.

3.6 Cálculos para selección del patín de bolas sobre raíles.

Las fuerzas que actúan sobre cada patín de bola corresponden a la fuerza total que actúa sobre la placa (W) dividido entre cuatro, para determinar esta fuerza, se emplea la Ecuación (20).

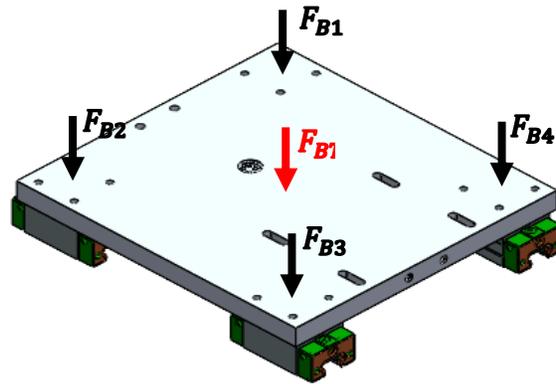


Figura 16. Diagrama de fuerzas que actúan sobre cada patín de bolas.

El cálculo se efectúa tomando la fuerza que se obtiene de la Ecuación (15).

$$F_{BT} = N = 206,01 \text{ N}$$

$$F_{BT} = F_{B1} + F_{B2} + F_{B3} + F_{B4} \quad (19)$$

$$F_{B1} = \frac{F_{BT}}{4} \quad (20)$$

$$F_{BT} = \frac{206,01 \text{ N}}{4} = 51,525 \text{ N}$$

Donde:

F_{BT} = Fuerza total del brazo sobre la base.

$F_{B1} = F_{B2} = F_{B3} = F_{B4}$ = Fuerza que cae sobre cada patín de bolas.

La selección del patín de bolas se realizó a través de un catálogo, considerando la fuerza que se ejerce sobre cada uno de ellos (F_{B1}). También se considera la opción de seleccionar el patín en función del peso que debería soportar. Es importante tomar en cuenta la disponibilidad de estos elementos en el mercado puesto que existen opciones más simples capaces de soportar la misma fuerza aplicada. Sin embargo, la disponibilidad de estos patines en el país es limitada.

En base a estos criterios, se optó por adquirir los elementos disponibles en el mercado y se corroboró su capacidad de resistencia mediante el cálculo del factor de seguridad.

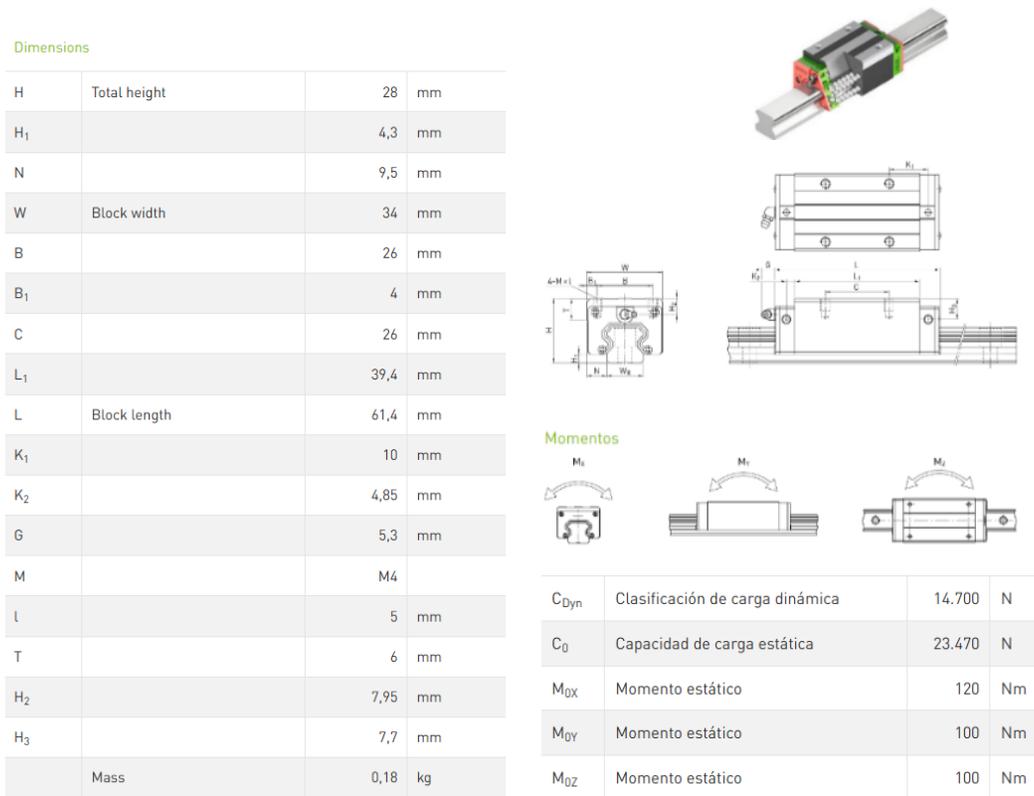


Figura 17. Dimensiones, clasificación de cargas y pares del patín de bolas HGH15CA [33].

El patín de bolas elegido es un HGH15CA y de la Figura 17 se observa que la capacidad de carga estática (C_0) del patín de bolas es de 23 470 N y la capacidad de carga dinámica (C) es de 14 700 N. La carga que actúa sobre cada patín de bolas es de 51,525 N, lo que indica que estos patines son capaces de soportar la fuerza aplicada sobre la base y desplazar la carga sin problema.

Las fuerzas que actúan sobre cada perno (M4) se obtiene dividiendo la fuerza total que actúa sobre el patín de bolas entre cuatro tal como se visualiza en la Figura 18.

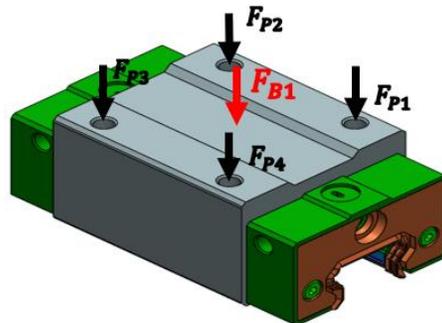


Figura 18. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el patín de bolas.

Para el cálculo de la fuerza “ F_{P1} ”, se emplea la Ecuación (21).

$$F_{P1} = \frac{F_{B1}}{4} \quad (21)$$

$$F_{P1} = \frac{51,525 \text{ N}}{4} = 12,88125 \text{ N} \approx 13 \text{ N}$$

$$\tau_{P1} = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} * d^2} \quad (22)$$

$$\tau_{P1} = \frac{13 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} * (4 \text{ mm})^2} = 1,0345 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \approx 1,0345 \text{ MPa}$$

Donde:

$F_{P1} = F_{P2} = F_{P3} = F_{P4} = \text{Fuerza que cae sobre cada perno M4.}$

El cálculo del factor de seguridad Ecuación (6), se realiza considerando el esfuerzo de fluencia del acero AISI 304, el cual se obtiene de la Tabla 10.

$$F.S. = \frac{0,6 * 175,81 \text{ Mpa}}{1,035 \text{ Mpa}} = 101,918 \approx 102 \quad (23)$$

El factor de seguridad respecto a la fuerza distribuida en el patín de bolas a través de los pernos (M4) es de 102. Esto indica que el elemento seleccionado esta sobredimensionado, tanto por motivos estéticos como debido a la disponibilidad en el mercado de estos elementos.

3.7 Selección de riel

De manera general, el patín de bolas viene junto con su respectivo riel. No obstante, es posible optar por el tipo de riel que mejor se adapte a la aplicación deseada, en la Figura 19, se observa las distintas opciones de carrilera a elegir en función del patín de bolas seleccionado.

Nombre	Número de artículo	Descripción
HGR15R4000H	> 5-001920	Profilschiene
HGR15R4000C	> 5-001952	Profilschiene

Figura 19. Selección de riel [33].

La selección del riel guía se efectúa mediante la disponibilidad del mercado al igual que el patín de bolas, el riel seleccionado es el HGR15R4000H [33], puesto que es compatible para el patín de bolas elegido y cumple con los requisitos necesarios. En la Figura 20, se puede identificar las características del riel seleccionado.

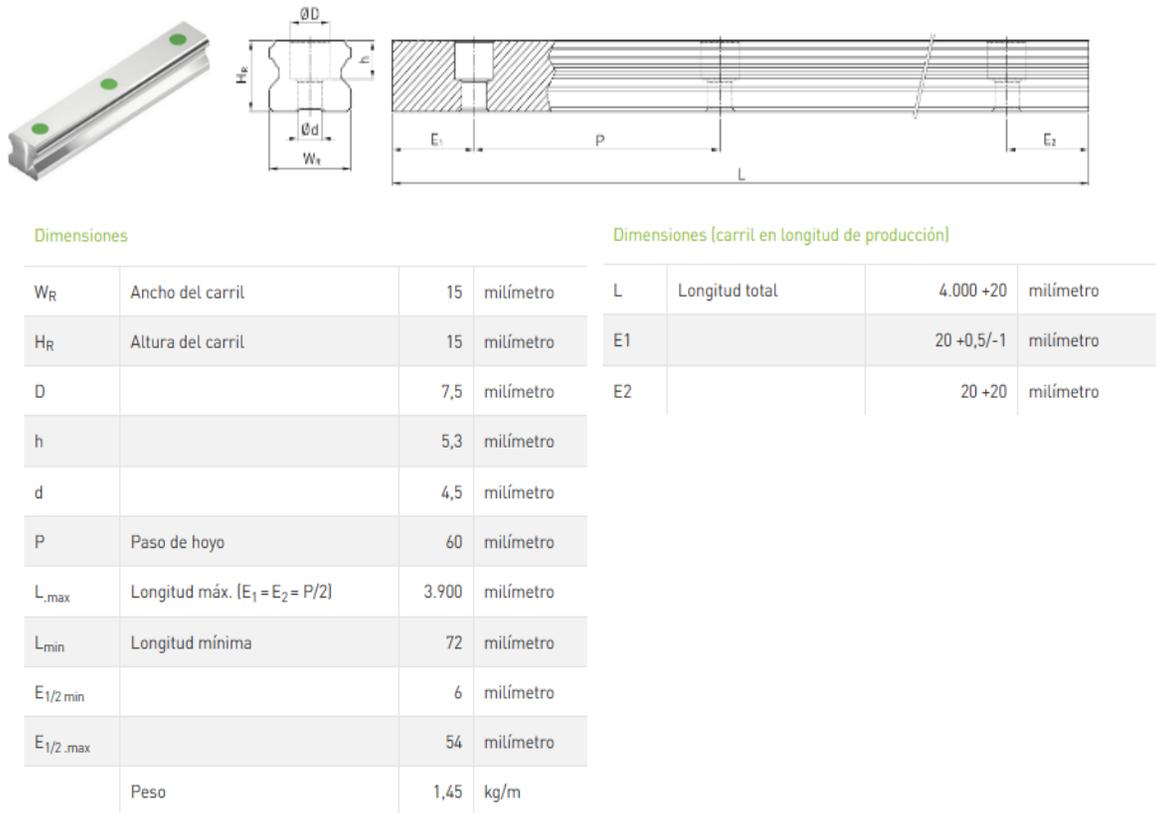


Figura 20. Características del riel HGR15R4000H [33].

3.8 Cálculos para selección del motor y la banda inferior que desplazan el brazo robot.

Los engranes y poleas dentadas, utilizados en la construcción de la máquina, fueron seleccionados a partir de elementos disponibles en la empresa.

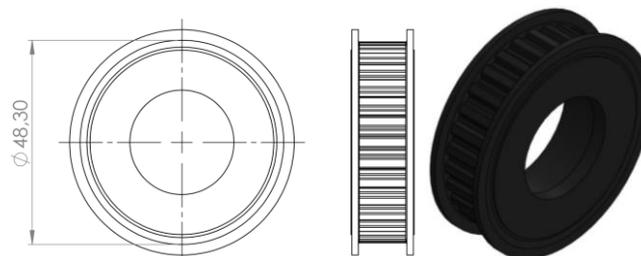


Figura 21. Dimensiones de las poleas existente utilizada para desplazar el brazo robot.

La Figura 21, muestra la polea a utilizar para seleccionar la banda inferior. Se considera las dimensiones de este elemento para verificar el paso de la polea, tal como se observa en la Figura 23.

Datos:

Número de dientes (n) = 30

Diámetro exterior (D) = 48,30 mm \approx 48 mm \approx 0,048 m

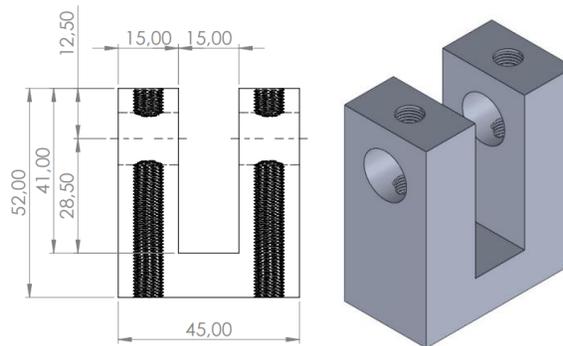


Figura 22. Elemento de sujeción y guía para la polea dentada.

En el plano mostrado en la Figura 22 se puede identificar la altura interna máxima de la guía, la cual mide 28,5 mm desde el centro del eje hasta la base interna. Por tal motivo es importante que el radio máximo de la polea no exceda esta medida pues, de ser mayor, no encajaría correctamente.



TABLA DE DIÁMETROS DE POLEAS DENTADAS PARA CORREAS DE TIEMPO

Dientes	Diámetro exterior en milímetros				
	XL Paso 1/5"	L Paso 3/8"	H Paso 1/2"	XH Paso 7/8"	XXH Paso 1-1/4"
28	44,8	84,1	111,8	195,3	279,8
29	46,4	87,2	115,8	202,4	289,9
30	48,0	90,2	119,9	209,4	300,0
31	49,6	93,2	124,0	216,5	310,1
32	51,2	96,3	128,0	223,6	320,2
33	52,9	99,3	132,0	230,7	330,3

Dientes	Diámetro Exterior en milímetros				
	XL Paso 1/5"	L Paso 3/8"	H Paso 1/2"	XH Paso 7/8"	XXH Paso 1-1/4"
73	117,5	220,6	293,7	513,6	734,6
74	119,2	223,6	297,8	520,7	744,7
75	120,8	226,6	301,8	527,8	754,8
76	122,4	229,7	305,9	534,9	764,9
77	124,0	232,7	309,9	541,9	775,0
78	125,6	235,2	313,9	549,0	785,1

Figura 23. Diámetros de poleas dentadas para correas de tiempo [32].

En la Figura 23 se puede observar que la polea dentada cumple con el número de dientes y el diámetro exterior respectivo a la polea física proporcionada. El paso de la polea es $XL = 1/5'' = 5,08$ mm.

La fuerza requerida por el motor se distribuye a lo largo de los patines de bola, ya que el peso a desplazar se apoya en la base y se reparte entre cuatro de ellos. Esta distribución de fuerza también se extiende a las dos carrileras.

3.8.1 Cálculo para la selección del motor que desplaza el brazo robot.

Para calcular la fuerza necesaria para superar la inercia y desplazar el peso total del brazo robot, se utiliza el diagrama de la Figura 15 y se emplea la Ecuación Figura 17(16).

El coeficiente de rozamiento para las guías de movimiento lineal seleccionadas se encuentra en la Tabla 16.

Tabla 16: Coeficiente de fricción de las guías de movimiento lineal [34].

Tipo de sistema de movimiento lineal	Modelos	Coefficiente de fricción
Guía de movimiento lineal	SR, HSR, HRW, RSR, SSR, SHW, SRS, SHS	0.002 – 0.003
Guía lineal de riel compacto	FBW	0.002 – 0.003

La Figura 24, muestra el diagrama a utilizar para calcular la fuerza tangencial que actúa sobre la polea de la Figura 21.

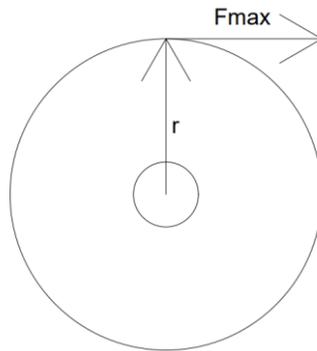


Figura 24. Diagrama de fuerzas que actúan sobre la polea (POLEA_PIEZA_1).

Datos:

Fuerza necesaria para desplazar el brazo (F_{max}).

Fuerza de propulsión (F_{pr}).

Peso ($W = N$) = 21 kg.

Coefficiente de fricción (μ).

Radio de la polea (r) = 24 mm \approx 0,024 m.

Resistencia intrínseca polea (I) = 2.

Entonces:

$$F_{max} = \mu N = 0,003 * 21 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,6180 \text{ N} \quad (24)$$

$$F_{max} = 0,6180 \text{ N}$$

El torque necesario para mover esta fuerza está determinado por:

$$T_n = F_{max} * r \quad (25)$$

$$T_n = 0,6180 \text{ N} * 0,024 \text{ m} = 0,014 \text{ Nm}$$

Dado que la relación de transmisión de velocidad de las poleas dentadas es 1:1 el torque transmitido es el mismo y, por tanto:

$$T_{motor} = T_{nominal} * Relación_{polea} \quad (26)$$

$$T_{motor} = 1,1 \text{ Nm} * 1$$

$$T_{motor} = 1,1 \text{ Nm}$$

Mediante los datos recopilados, se puede concluir que el par necesario para desplazar el peso conjunto del brazo robot es de 0.014 Nm y el torque brindado por el motor es de 1,1 Nm por lo que $T_{motor} > T_n$, resultando en un sobredimensionamiento, lo que permite a futuro una mayor capacidad de carga, evitar calentamientos excesivos, una mayor vida útil, entre otros factores.

Tabla 17: Resistencia de sello [34].

Caged Ball		Convencional	
Modelo	Número Sello Resistencia (N)	Modelo	Número Sello Resistencia (N)
SHS	4.5	HSR 15	2.0
SHS	7.0	HSH 20	2.5

Para el cálculo de la fuerza de propulsión se toma la formula del catálogo THK [34] y la resistencia de sello HAR 15 de la Tabla 17, para un patín de bolas similar al utilizado (HSR 15).

$$F_{propulsión} = \mu N + I \quad (27)$$

$$F_{propulsión} = 0.003 * \left(21 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + 2(4) = 8,618 \text{ N}$$

3.8.2 Potencia del motor que desplazan el brazo robot.

La potencia de funcionamiento del motor se determina al calcular el producto del voltaje aplicado y la corriente, en este caso, la configurada en el controlador del motor.

Datos:

Voltaje motor (V) = 24 V.

Corriente de trabajo del motor (I) = 2,8 A.

$$P = v * i \quad (28)$$

$$P = 24 \text{ V} * 2,8 \text{ A} = 8,96 \text{ W} \approx 67,2 \text{ W} \approx 0,09 \text{ HP}$$

3.8.3 Velocidad angular mínima y máxima para el engrane con diámetro de 48 mm.

La velocidad angular mínima y máxima se establecen de manera experimental a través de la frecuencia que se envía a los controladores de los motores, lo cual permite controlar la velocidad. En este caso, se estima una velocidad angular mínima de 0.01 m/s y una máxima de 0.05 m/s. Estos valores son aproximados y pueden variar dependiendo de las configuraciones del sistema y de los motores a utilizar.

Datos:

Velocidad lineal (v)

Velocidad angular (w)

Radio de la polea (r) = 24 mm \approx 0,024 m

Velocidad estimada para el avance: $1 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Para el retroceso: $\text{tiempo retroceso} > 1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, aproximadamente $5 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Velocidad angular mínima

$$w = \frac{v}{r} \quad (29)$$

$$w = \frac{0.01 \frac{m}{s}}{0.024 m} = 0,417 \frac{1}{s} = \frac{0,417 * 60}{2\pi} = 3,982 \text{ rpm} \approx 4 \text{ rpm}$$

Velocidad angular máxima

$$w = \frac{v}{r} = \frac{0.05 \frac{m}{s}}{0.024 m} = 2,083 \frac{1}{s}$$

$$w = \frac{2,083 * 60}{2\pi} = 19,89 \text{ rpm} \approx 20 \text{ rpm}$$

Para seleccionar la banda, se utiliza la velocidad angular más alta y los datos del motor.

Datos:

Velocidad angular máxima (w) = 19,89 rpm \approx 20 rpm

Potencia del motor (P_{motor}) = 0,09 HP

Diámetro polea conductora = diámetro polea conducida ($D = d$) = 48mm = 0.048 m

TIPO		FACTOR
Transportadores	Banda, carga ligera;	1.5
	bandas para tréncos, tréncos, carbón;	1.7
	apron cangilón, espiral, helicoidal	1.8

Figura 25. Factor de servicio para máquinas [32].

El factor de servicio básico elegido fue para transportador (banda, cargas ligeras) con un valor de 1,5 obtenida de la Figura 25.

$$P_{diseño} = Potencia_motor_en_HP * 1,5 \quad (30)$$

$$P_{diseño} = 0,09 \text{ HP} * 1,5 = 0,135 \text{ HP}$$

3.9 Elección del paso de la correa.

La selección del paso en las transmisiones de tiempo es esencial para un funcionamiento eficiente y sincronizado. Se debe considerar factores como la carga, velocidad y espaciado disponible. Una elección incorrecta puede causar desgaste prematuro, baja eficiencia y fallas.

La selección de esta banda síncrona es la crítica de entre toda la máquina, por lo que esta será usada en todos elementos que requieran transmisión de potencia por banda.

En este caso, al ser las poleas iguales, la relación de velocidad es de 1:1, lo que significa que ambas poleas giran a la misma velocidad. Para el cálculo de esta relación se emplea la Ecuación (31).

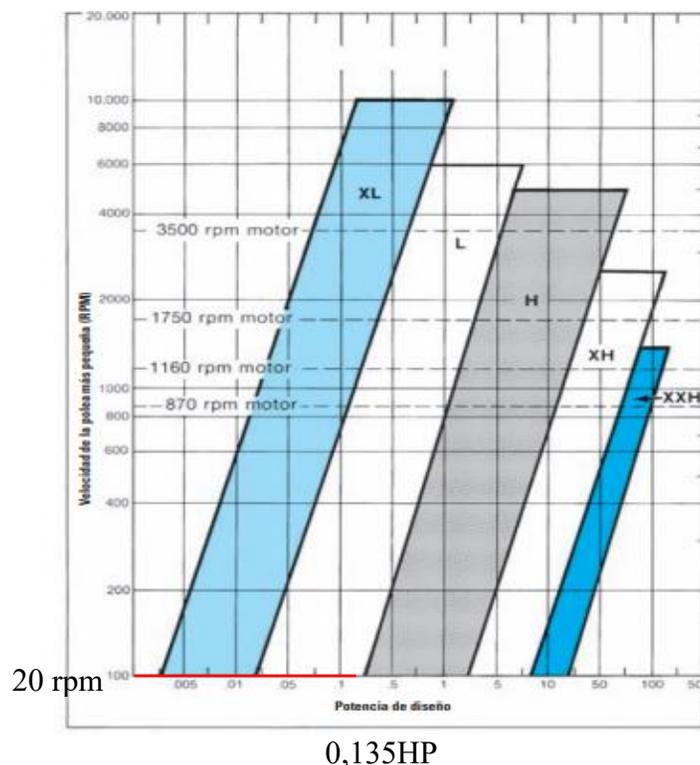
Relación de velocidad (poleas iguales).

$$\text{Relación de velocidad} = \frac{\text{rpm motriz}}{\text{rpm impulsada}} \quad (31)$$

$$\text{Relación de velocidad} = \frac{20 \text{ rpm}}{20 \text{ rpm}} = 1$$

De la Tabla 18 al cruzar una línea entre la potencia de diseño en Hp (0,135 HP) y, la velocidad mayor en rpm (20 rpm aproximándola a 100 rpm la cual es la mínima en el catálogo) se obtiene el punto de cruce dentro de la barra L, correspondiente al paso “ligero” de la banda de 1/5 pulgadas. Por la disponibilidad de la banda con paso XL” extra ligero” por parte de la empresa, se corrobora que esta banda soporta las cargas aplicadas.

Tabla 18: Selección del paso para transmisiones de tiempo [32].



3.10 Distancia entre centros para la correa de la base.

Debido a que el diseño de la máquina se realizó en el software CAD (SolidWorks), se estimó una distancia entre centros aproximada de $C = 751 \text{ mm}$ Figura 26 y a partir de ella se puede calcular la longitud de la banda.

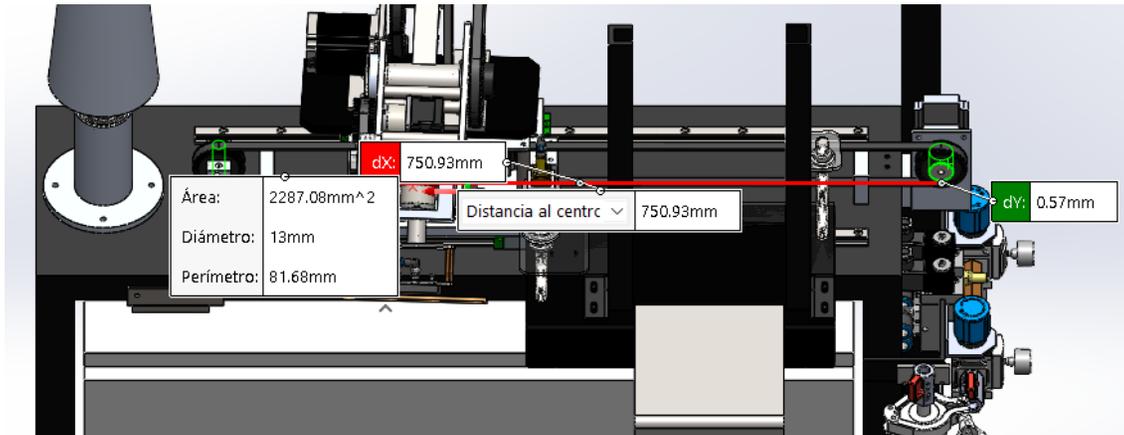


Figura 26. Distancia entre centros aproximada mediante el software CAD (SolidWorks).

Donde:

Longitud de la correa (L_p)

Diámetro mayor de la polea (D) = $48 \text{ mm} = 0.048 \text{ m}$

Diámetro menor de la polea (d) = $48 \text{ mm} = 0.048 \text{ m}$

Distancia entre centros (C)

Al utilizar la Ecuación (13), se tiene:

$$L_p = 2(751 \text{ mm}) + 1,57(48 \text{ mm} + 48 \text{ mm}) + \frac{(48 \text{ mm} - 48 \text{ mm})^2}{4(751 \text{ mm})} \quad (32)$$

$$L_p = 1652,72 \text{ mm}$$

$$L_{p_{\text{pulg}}} = \frac{1652,72 \text{ mm}}{25,4} = 64,067 \text{ pulg}$$

Mediante los cálculos realizados se puede identificar el tipo de correa, el ancho y la longitud de la misma, además se puede optar por elegir las correas dentadas de tiempo puesto que estas brindan

una transmisión eficiente de potencia y en consecuencia, se minimiza la pérdida de energía causada por la fricción, estas correas también presentan una alta precisión de sincronización debido a que están diseñadas con dientes que se acoplan a las poleas accionadas y la razón principal es debido a que brindan una mayor seguridad tanto al operador como a la máquina puesto que estas no presentan riesgo de desengranar o saltar, evitando daños o posibles accidentes.

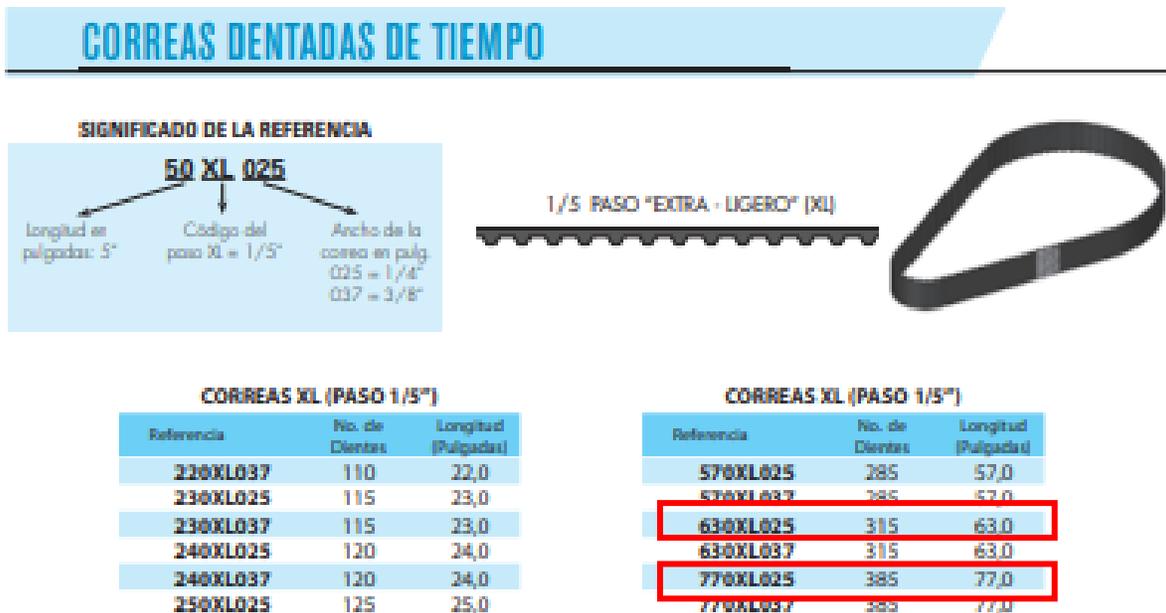


Figura 27. Correas dentadas de tiempo [32].

Las dimensiones de las poleas de tiempo elegidas se muestran a continuación.

630XL025

$$630 = 63 \text{ pulg} = 1600,2 \text{ mm}$$

$$XL = 1/5" = 5,08 \text{ mm}$$

$$025 = 1/4 = 0,25 = 6,35 \text{ mm}$$

770XL025

$$77 \text{ pulg} = 1955,8 \text{ mm}$$

$$XL = 1/5" = 5,08 \text{ mm}$$

$$025 = 1/4 = 0,25 = 6,35 \text{ mm}$$

En base a los análisis realizados, Se tiene dos alternativas a elegir que son la correa de tiempo 630XL025 y 770XL025, puesto que es necesario cortar una parte de la banda para que esta pueda ser ajustada a los acoples de la base del brazo, la longitud de la banda puede ser exacta o un poco

más pequeña sin embargo el factor determinante para la elección de esta es el costo dado que la banda con menor longitud es más barata que la de mayor longitud, se elige la banda 630XL025.

3.11 Cálculo de fuerzas que actúan sobre los eslabones y las juntas del brazo robot.

Para el cálculo de las fuerzas (F_A , F_B y F_C), necesarias para dimensionar el perno crítico ubicado en el hombro del brazo (F_A), es necesario identificar las fuerzas que actúan sobre cada eslabón mencionado. Para ello, se multiplica el peso de cada elemento que conforma la estructura del hombro-codo-brazo-muñeca del brazo por la aceleración de la gravedad. Estas fuerzas corresponden a las cargas que actúan sobre cada elemento, tal como se muestra en la Figura 28.

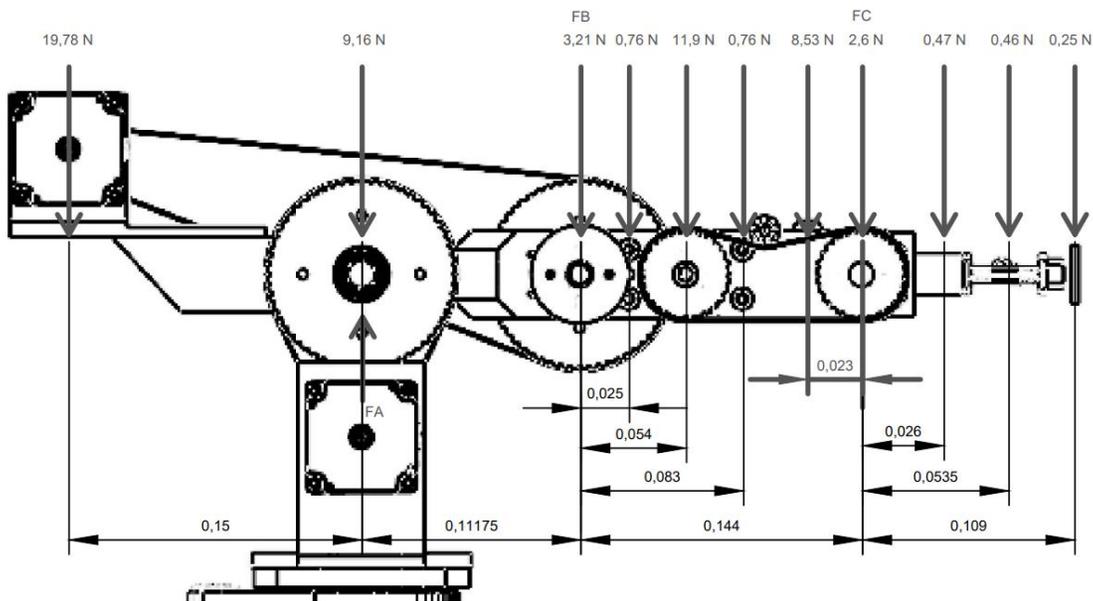


Figura 28. Diagrama de cargas que se ejercen sobre el brazo en función del peso.

En la Figura (30), se describen los tramos G1, G2, G3 y G4 correspondientes al hombro, codo, muñeca y tramo completo del brazo robot respectivamente.

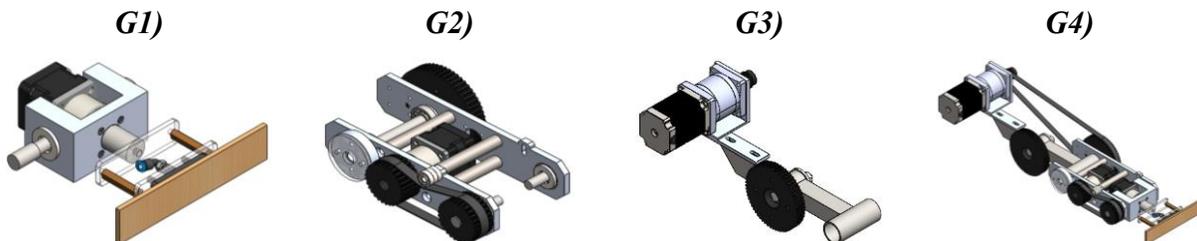


Figura 29. División de tramos para el brazo robot.

Para ingresar los datos en el software, primero se halla la fuerza en el punto C (FC) tomando solo los datos que componen este tramo, puesto que el software MDSolids 4.0 solo admite el ingreso de 7 variables de fuerza a la vez.

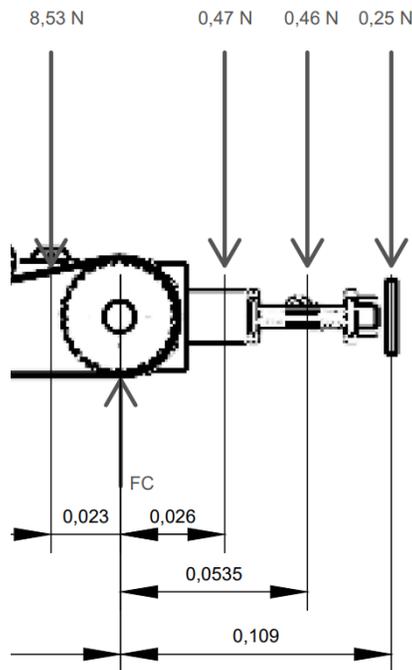


Figura 30. Diagrama de fuerzas para el tramo A.

Para calcular la fuerza que actúa sobre el eslabón C, se emplea una sumatoria de fuerzas en “y” para las fuerzas que se muestra en la Figura 30 y la Ecuación (33).

$$+\uparrow \sum Fy = 0$$

$$FC = 8,53 + 0,47 + 0,46 + 0,25 = 9,71 \text{ N} \quad (33)$$

Para el resto de los tramos se utiliza el software MDSolids 4.0.

La Figura 31, representa las cargas aplicadas de los elementos que componen el brazo robot.

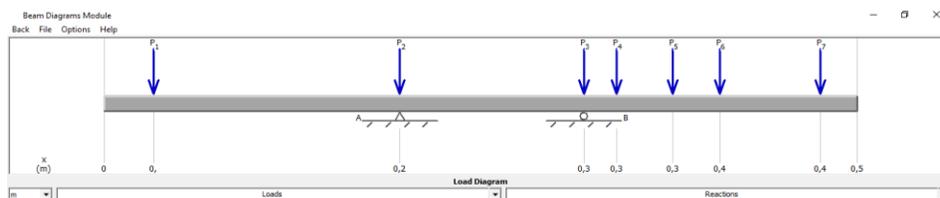


Figura 31. Diagrama de cargas del eslabón hombro-codo simulado como viga con apoyo fijo y pasador.

3.11.1 Fuerzas cortantes.

La Figura 32, representa de manera gráfica la distribución de fuerzas cortantes a lo largo de la estructura del brazo robot, a través de este diagrama, es posible identificar los puntos críticos donde las fuerzas cortantes son máximas o cambian de dirección.

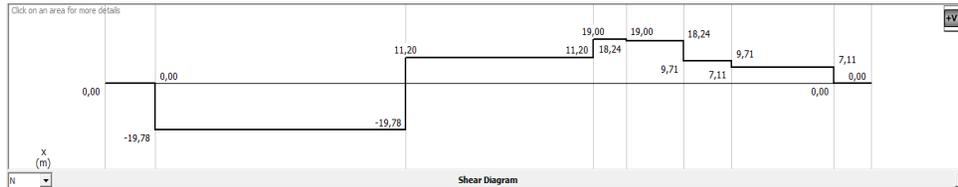


Figura 32. Diagrama de fuerzas del eslabón hombro-codo.

$$\text{Máxima fuerza cortante} = 19,78 \text{ N}$$

3.11.2 Momentos flectores

La Figura 33, es una representación gráfica que muestra la variación del momento flector a lo largo del hombro, codo y muñeca del brazo robot. El diagrama es útil, ya que brinda información visual sobre la variación del momento de flexión en la estructura, lo que facilita un diseño y análisis eficaz de los elementos sujetos a cargas y momentos.

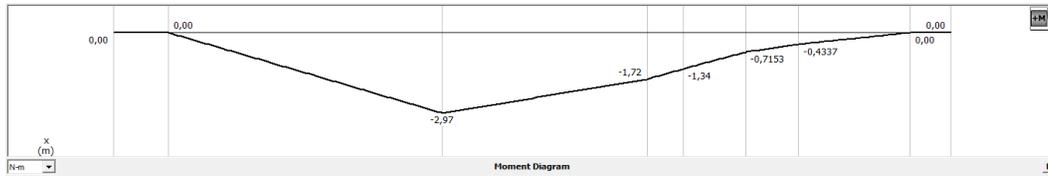


Figura 33. Diagrama de momentos flectores del eslabón hombro-codo

$$\text{Máximo momento torsor} = 2,97 \text{ Nm}$$

La Figura 34, muestra las cargas puntuales que se ingresan en el software, estas fuerzas se obtienen a partir del producto del peso de los elementos que conforman la estructura y la gravedad.



Figura 34. Fuerzas ingresadas hallar las reacciones en los pasadores.

La Figura 35, muestra las fuerzas que se obtienen a través del software para los puntos Ay y By.

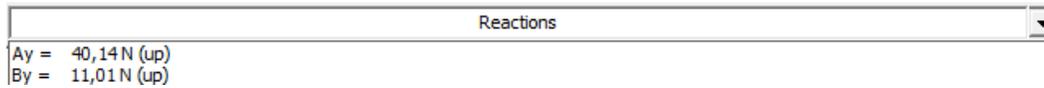


Figura 35. Reacciones obtenidas en Ay-By mediante MDSolids 4.0.

3.12 Eslabón hombro.

El eslabón del hombro utilizado para la construcción de la máquina se seleccionó a partir de elementos disponibles en la empresa por lo que se verifica que el elemento soporte las cargas que actúan sobre él a través del factor de seguridad. Además, se realiza una selección basada en el perfil con el espesor más pequeño puesto que se considera como el punto crítico en el ámbito de resistencia.

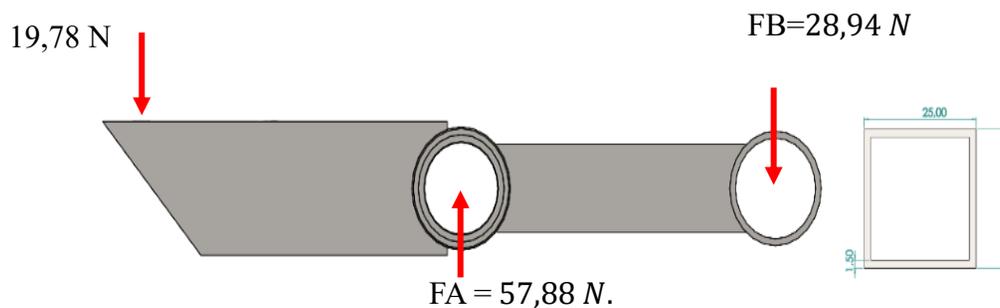


Figura 36. Eslabón hombro.

Datos:

Fuerza en la junta del hombro $F_A = 57,88 \text{ N}$.

Fuerza en la junta del codo $F_B = 28,94 \text{ N}$.

Esfuerzo a la fluencia $S_y = 175,82 \text{ MPa}$.

Por diseño, se utiliza la fórmula $\sigma_{perm} = 0,6S_y$.

Módulo de sección (S).

Aplicando la Ecuación (12), el momento máximo se toma de la Figura 33 correspondiente a $2,97 \text{ Nm}$.

Entonces:

$$S = \frac{2,97 \text{ Nm} \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right)}{0,6 \left(175,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)} \quad (34)$$

$$S = 28,15 \text{ mm}^3$$

$$S = 0,02815 \text{ cm}^3$$

La figura 38, presenta las especificaciones de un tubo cuadrado del catálogo DIPAC. Al utilizar el módulo de sección que se obtiene al resolver la Ecuación (34), se justifica el perfil seleccionado como eslabón para el hombro del brazo robot.Figura 33

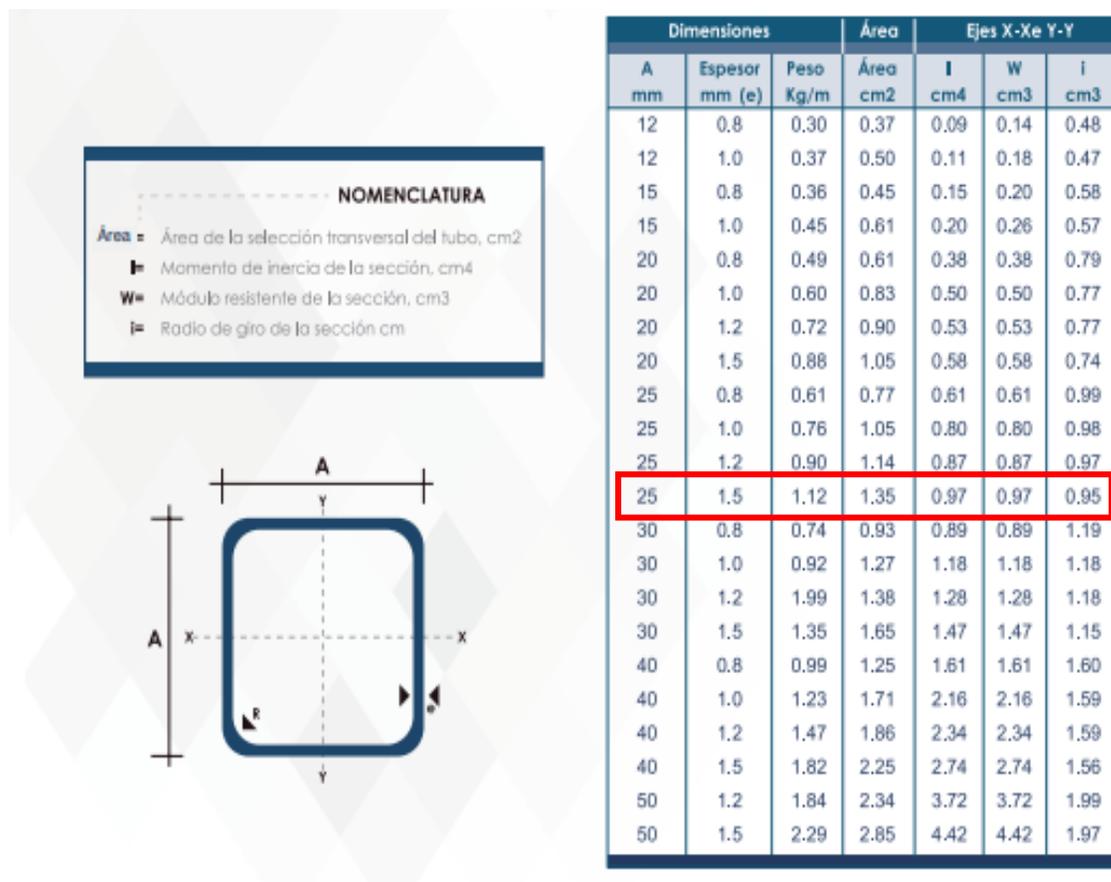


Figura 37. Especificaciones de tubo mecánico cuadrado [35].

Mediante los parámetros obtenidos en la Figura 38, Figura 39 y Figura 40, se corrobora que el perfil seleccionado, es el adecuado para las cargas que debe soportar.

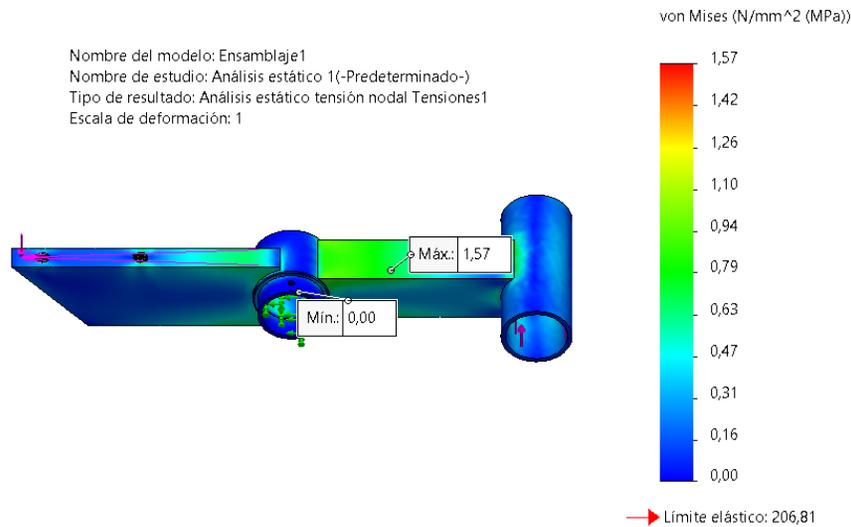


Figura 38. Simulación del esfuerzo Von Mises del eslabón correspondiente al hombro.

A partir del resultado obtenido en la Figura 38 se concluye que el esfuerzo máximo que actúa sobre la estructura es de 1,57 MPa y este es mucho menor que el esfuerzo de fluencia del material con 175,82 MPa (Sy AISI 304) satisfaciendo con la teoría de Von Mises para minimizar las fallas en la estructura.

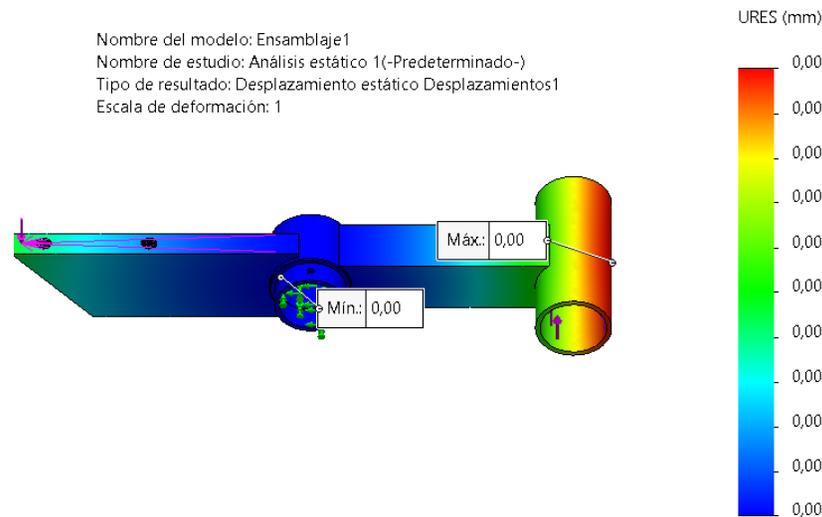


Figura 39. Simulación de los desplazamientos del eslabón correspondiente al hombro.

En Figura 39 se observa que la estructura no experimenta deformaciones significativas debido a que el perfil utilizado se encuentra sobredimensionado. Además, la carga que se transporta no genera un esfuerzo considerable a la estructura.

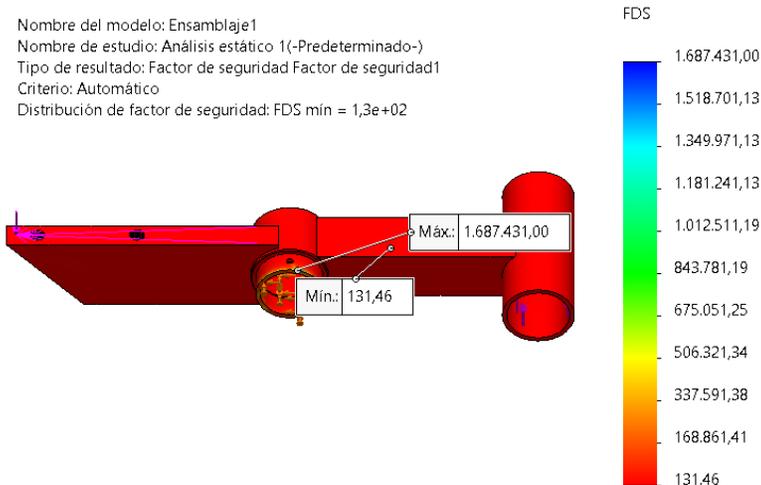


Figura 40. Simulación del factor de seguridad del eslabón correspondiente al hombro.

En la Figura 40 se puede apreciar que el factor de seguridad alcanza valores desde 131,46 hasta 1687431 lo cual indica que el modelo está sobredimensionado de tal manera que pueda soportar las cargas empleadas sin presentar fallas.

Es importante aclarar que se optó por adaptar este elemento como eslabón del hombro por motivos de conveniencia en cuanto a aprovechar la pieza existente en lugar de adquirir o elaborar una nueva, lo que contribuye a optimizar los recursos materiales y económicos.

3.13 Selección de rodamientos para la junta del hombro.

La Figura 41, muestra las dimensiones de las juntas necesarias para la selección de rodamientos.

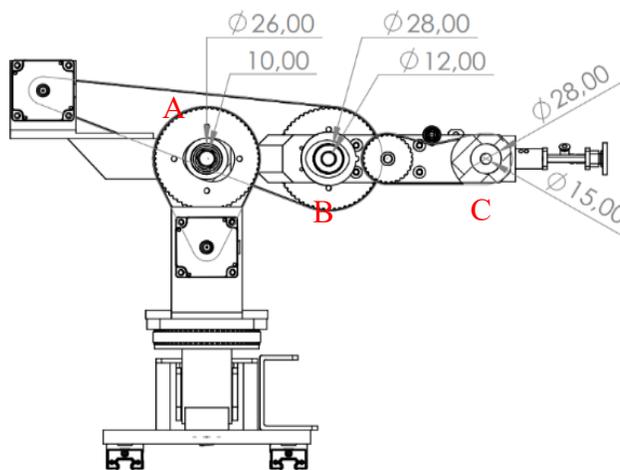


Figura 41. Diagrama hombro-codo-muñeca.

- A. La sección A corresponde al hombro.
- B. La sección B al codo.
- C. La sección C a la muñeca, los diámetros que se muestran corresponden a los diámetros exteriores de los elementos y ejes.

Para el movimiento del mecanismo es necesario implementar rodamientos en las juntas A, B y C, para lo cual se utiliza las medidas de los diámetros mostradas en la Figura 41, las cuales corresponden a los diámetros internos y externos para seleccionar los rodamientos. La selección de rodamientos se lo realiza a través del software de la SKF [36].

3.13.1 Selección rodamiento en la junta A.

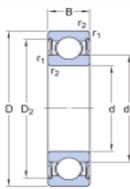
La Figura 42, presenta las opciones de rodamientos disponibles Para la junta A, considerando las dimensiones mostradas en la Figura 41.

Dimensiones principales			Clasificaciones de carga básicas		Designación
d (milímetro)	D (milímetro)	B (milímetro)	C (kN)	C ₀ (kN)	
10	26	12	4.62	1.96	63000-2RS1
10	26	8	4.62	1.96	6000-2RSLTN9/HCS3WT
10	26	8	2.86	1.14	7000 ACEGB/P4A
10	26	8	3.97	1.6	7000 ACD/HCP4A

Figura 42. Rodamientos disponibles SKF para la sección A, junta del hombro [37].

La Figura 43, muestra los datos técnicos del rodamiento seleccionado para la junta A.

2.1. Bearing data



Designation	Bearing type	Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Clearance class
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	P _u (kN)	n _{ref} (r/min)	n _{lim} (r/min)	
63000-2RS	Deep groove ball bearing	10.0	26.0	12.0	4.62	1.96	0.083		19000.0	Normal

2.2. Loads, Speed and Temperature

Shaft orientation	Horizontal					
Rotating ring	Inner ring rotation					
	Forces	Speed	Temperature	Case weight		
	Radial (F _r) (kN)	Axial (F _a) (kN)	(r/min)	Inner ring (°C)	Outer ring (°C)	
LC1	0.041		20.0	70	65	1

Maximum temperature is used for calculating the actual viscosity, kappa, a_{SKF} and SKF rating life.
Mean temperature is used for calculating bearing friction and power loss.

Figura 43. Datos técnicos del rodamiento elegido 63000-2RS [37].

Se ha elegido un rodamiento de bolas con las siguientes dimensiones: diámetro externo de 26 mm, diámetro interno de 10 mm y un ancho de 12 mm. Este rodamiento está diseñado para soportar la carga radial en la junta A, que en este caso es de 0,041 kN. Es importante destacar que el rodamiento tiene una carga de fatiga límite de 0,083 kN, lo que significa que puede soportar cargas más altas sin sufrir daños en su funcionamiento.

3.13.2 Selección rodamiento la junta B.

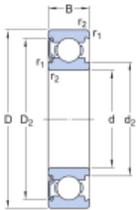
La Figura 44, presenta las opciones de rodamientos disponibles Para la junta B, considerando las dimensiones mostradas en la Figura 41.

Principal dimensions			Basic load ratings		Designation
d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	
12	28	8	4.36	1.83	7001 ACD/P4A
12	28	8	4.36	1.83	7001 ACDGD/P4A
12	28	8	3.19	1.34	7001 CEGA/HCP4A
12	28	8	3.19	1.34	7001 CEGA/P4A
12	28	8	5.07	2.36	6001/HC5C3
12	28	8	5.4	2.36	6001-RSL

Figura 44. Rodamientos disponibles SKF para la sección B, junta del codo [38].

La Figura 45, muestra los datos técnicos del rodamiento seleccionado para la junta B.

2.1. Bearing data



Designation	Bearing type	Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Clearance class
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	Dynamic	Static	P _u (kN)	Reference	Limiting	
					C (kN)	C ₀ (kN)		n _{ref} (r/min)	n _{lim} (r/min)	
6001-RSL	Deep groove ball bearing	12.0	28.0	8.0	5.4	2.36	0.1	60000.0	38000.0	Normal

2.2. Loads, Speed and Temperature

Shaft orientation	Horizontal					
Rotating ring	Inner ring rotation					
	Forces		Speed	Temperature		Case weight
	Radial (F _r) (kN)	Axial (F _a) (kN)	(r/min)	Inner ring (°C)	Outer ring (°C)	
LC1	0.011		20.0	70	65	1

Maximum temperature is used for calculating the actual viscosity, kappa, a_{3pF} and SKF rating life.
Mean temperature is used for calculating bearing friction and power loss.

Figura 45. Datos técnicos del rodamiento elegido 6001-RSL [38].

Se ha seleccionado un rodamiento de bolas con las siguientes medidas: diámetro externo de 28 mm, diámetro interno de 12 mm y un ancho de 8 mm. Este rodamiento se eligió principalmente para soportar la carga radial en la junta B de 0,011 kN. Es relevante destacar que el rodamiento tiene una carga de fatiga límite de 0,1 kN, por lo que es adecuado para soportar esta carga.

3.13.3 Selección rodamiento la junta C.

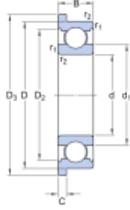
La Figura 46, presenta las opciones de rodamientos disponibles Para la junta C, considerando las dimensiones mostradas en la Figura 41.

Principal dimensions			Basic load ratings		Designation
d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	
15	28	7	3.71	2.24	W 61902 R
15	28	7	3.71	2.24	W 61902 R-2Z
15	28	7	3.71	2.24	W 61902 R-2RS1
15	28	7	4.36	2.24	61902-2RS1
15	28	7	4.36	2.24	61902

Figura 46. Rodamientos disponibles SKF para la sección C, junta de la muñeca [39].

La Figura 47, muestra los datos técnicos del rodamiento seleccionado para la junta B.

2.1. Bearing data



Designation	Bearing type	Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit P _u (kN)	Speed ratings		Clearance class
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)		Reference n _{ref} (r/min)	Limiting n _{lim} (r/min)	
W 61902 R	Deep groove ball bearing	15.0	28.0	7.0	3.71	2.24	0.095	56000.0	34000.0	Normal

2.2. Loads, Speed and Temperature

Shaft orientation	Horizontal	
Rotating ring	Inner ring rotation	

	Forces		Speed (r/min)	Temperature		Case weight
	Radial (F _r) (kN)	Axial (F _a) (kN)		Inner ring (°C)	Outer ring (°C)	
LC1	0.009		20.0	70	65	1

Maximum temperature is used for calculating the actual viscosity, kappa, a_{SKF} and SKF rating life.
Mean temperature is used for calculating bearing friction and power loss.

Figura 47. Datos técnicos del rodamiento elegido W 61902 R [39].

Para la junta C, se ha seleccionado un rodamiento de bolas con las siguientes medidas: diámetro externo de 28 mm, diámetro interno de 15 mm y un ancho de 7 mm para soportar una carga radial de 0,009 kN. Este rodamiento tiene una carga de fatiga límite de 0,095 kN, por lo que es adecuado para soportar esta carga.

3.14 Cálculo para el perno central del hombro.

La junta más relevante se encuentra localizada en el hombro del brazo robot, como se aprecia en la Figura 48. Este perno representa el eje central que soporta la carga total que actúa en el extremo del brazo, en conjunto a todos los elementos y materiales que lo conforman.

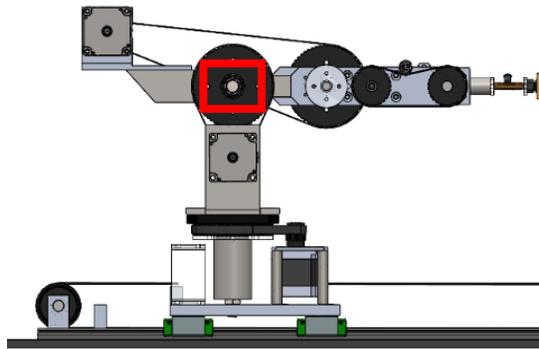


Figura 48. Ubicación del perno central (eje del hombro).

El diagrama del perno sometido a esfuerzo cortante simple se muestra en la Figura 49.

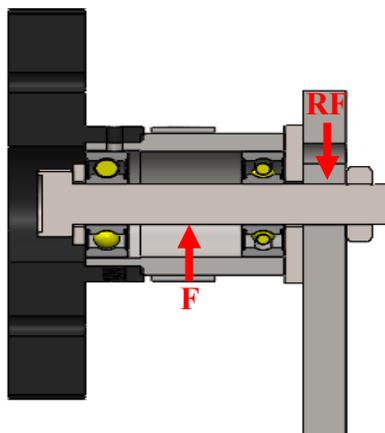


Figura 49. Diagrama de unión atornillada en la junta del hombro.

Primero se determina el diámetro mínimo que puede tener el perno, considerando un factor de seguridad razonable, con el objetivo de asegurar que el perno seleccionado es adecuado para

soportar la carga aplicada sobre esta unión, misma que se obtiene de la Figura 32. Este análisis permite afirmar que el perno cumple con los requisitos para garantizar la resistencia y seguridad en la junta.

Datos:

Máxima fuerza cortante en el punto A ($F = V$) = 19,78 N.

Reacción de la fuerza cortante ($RF = F$).

Diámetro del perno ya elegido = 10 mm.

Resistencia a la fluencia AISI 304 = 175,82 MPa

Entonces:

Inicialmente se determina el diámetro mínimo para el perno, asumiendo un factor de seguridad de 8, el cual es el valor recomendado para este tipo de elementos. Por cuestiones de diseño, se utiliza la fórmula 0,6Sy y la Ecuación (6).

$$\tau_{perm} = \frac{0,6 * 175,82 \text{ MPa}}{8} = 13,1865 \text{ MPa} = 13,1865 \frac{N}{mm^2} \quad (35)$$

$$\tau_{perm} = \frac{V}{A} = \frac{V}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (36)$$

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi \tau_{perm}}} = \sqrt{\frac{4(19,78 \text{ N})}{\pi \left(13,1865 \frac{N}{mm^2}\right)}}$$

$$d = 1,382 \text{ mm}$$

El cálculo realizado proporciona el diámetro mínimo (1,382 mm) necesario para que el perno soporte la carga asumiendo un factor de seguridad de 8 para resistir la carga. En base al cálculo se concluye que el diámetro del perno debe ser mayor que el diámetro mínimo obtenido y por ende se asevera que el perno de 10 mm seleccionado es apropiado para implementarlo. No obstante, se verifica mediante el cálculo del factor de seguridad. Cabe mencionar que la selección del perno se realizó en función del diámetro interno del rodamiento 63000-2RS el cual es utilizado para soportar las cargas que actúan en dicha juntura.

$$\tau_{perm} = \frac{V}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{19,78 N}{\frac{\pi}{4}(10 mm)^2} \quad (37)$$

$$\tau_{perm} = 0,25 \frac{N}{mm^2} \approx 0,25 MPa$$

$$F.S. = \frac{0,6 * 175,82 MPa}{0,25 MPa} = 421,968 \approx 422 \quad (38)$$

Se determinó que el perno utilizado como junta para el hombro del brazo robot se encuentra sobredimensionado, presenta un factor de seguridad de 422. Sin embargo, se justifica su uso por varias razones. En primer lugar, el perno estaba disponible en el almacén de la empresa, lo que facilitó su incorporación en el diseño. Además, su elección se basó en consideraciones estéticas para lograr una integración armónica con la máquina. Por último, su uso permite el ahorro en los costos de adquisición del componente.

3.15 Cálculo de la soldadura en el punto crítico en el eslabón del hombro.

La Figura 50, presenta la ubicación del punto crítico de soldadura seleccionado por la geometría del elemento y la concentración de tensiones.

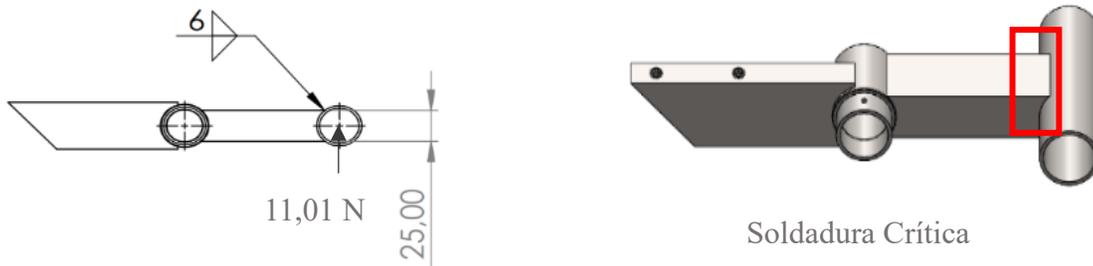


Figura 50. Diagrama eslabón-hombro para soldadura.

Las fórmulas necesarias para el cálculo de la unión soldada en el punto crítico del eslabón del hombro se encuentran en la sección 1.7.4.

Datos:

Garganta de soldadura (h) = 6mm.

Las variables para calcular se definen por la Ecuación (7).

Entonces:

$$\tau' = \frac{v}{Ag} = \frac{p}{2(1,414hl)} \quad (39)$$

$$\tau' = \frac{11,01 \text{ N}}{1,414(6 \text{ mm})(25 \text{ mm})(2)} = 0,02595 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0,02595 \text{ MPa}$$

El valor del punto máximo en el punto B se toma de la Figura 33 y la Ecuación (8).

$$\tau'' = \frac{Mc}{0,707hI_u} = \frac{Mc}{0,707(2)h\left(\frac{bd^2}{2}\right)} \quad (40)$$

$$\tau'' = \frac{(1,72 \text{ Nm})(0,0125\text{m})}{0,707(2)(0,006 \text{ m})\left(\frac{0,025 \text{ m} (0,025 \text{ m})^2}{2}\right)}$$

$$\tau'' = 324375,2947 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0,3243752947 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0,3243752947 \text{ Mpa}$$

$$\tau'' = 0,324 \text{ Mpa}$$

El esfuerzo total se calcula mediante la Ecuación (9).

$$\tau_{total} = \sqrt{0,02595 \text{ MPa} + 0,324 \text{ Mpa}} \quad (41)$$

$$\tau_{total} = 591,566 \text{ Pa}$$

$$F.S = \frac{\tau_{mat}}{\tau_{calc}} = \frac{\tau_{mat}}{\tau_{calc}} \quad (42)$$

$$F.S = \frac{0,6 \left(175,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} (1 * 10^6) \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right)}{591,566 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 178326,6787$$

El factor de seguridad obtenido de la Ecuación (42), es de 128649, lo cual indica que la soldadura es adecuada para soportar la carga. Dado que el análisis se realizó en el punto crítico del eslabón, se puede concluir que los demás puntos de soldadura también son seguros.

3.16 Selección de actuadores (motores).

Para lograr un movimiento preciso del brazo robot, es necesario realizar una selección adecuada de los motores. Para ello, es importante conocer los diferentes tipos de actuadores disponibles. En este caso, se requiere un control preciso de la posición por lo que se ha decidido utilizar motores paso y drivers industriales. Para este propósito, se puede ayudar de un programa elaborado en el software Matlab y Simulink, mismo que se encuentra disponible de forma gratuita para la comunidad. Este software proporciona herramientas que permiten evaluar y optimizar el rendimiento del brazo robot. Es de suma importancia mencionar que la empresa dispone de algunos de los motores paso por lo que solo se deben elegir los adecuados.

3.16.1 Par máximo requerido.

De manera inicial se verifica la posición crítica del brazo robot y el perfil de velocidad para cada articulación y así se identifica el par pico y el par nominal. Para ello es necesario modificar ciertos parámetros dentro del programa.

Dentro del script drawrobot3d6 es necesario ingresar los valores de la Tabla 24, como se observa en la Figura 51. De esta manera se obtiene la gráfica de la posición crítica del brazo robot con valores para $q = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ (punto crítico) tal como se observa en la Figura 52.

```
% DRAWROBOT3D6 Representación 3D de un robot.
% DRAWROBOT3D6(Q) realiza una representación 3D de un robot
% en función del vector de variables articulares Q.
%
% See also DENAVIT, DIRECTKINEMATIC6.

]function drawrobot3d6(q)

% Parámetros Denavit-Hartenberg del robot
teta = [q(1)      q(2)      q(3)      0      q(5)      q(6)];
d     = [0.13241+0.165  0      0      0      0      0 ];
a     = [0      0.11175  0.144      0      0.098  0 ];
alfa = [-pi/2      0      0      0      -pi/2  0 ];
```

Figura 51. Parámetros modificados en el script drawrobot3d6.

Es importante mencionar que la tabla de Denavit-Hartenberg fue minimamente modificada como se muestra en la Figura 51 puesto que el software opera con un eje de referencias distinto al elaborado para los cálculos de cinemática directa e inversa.

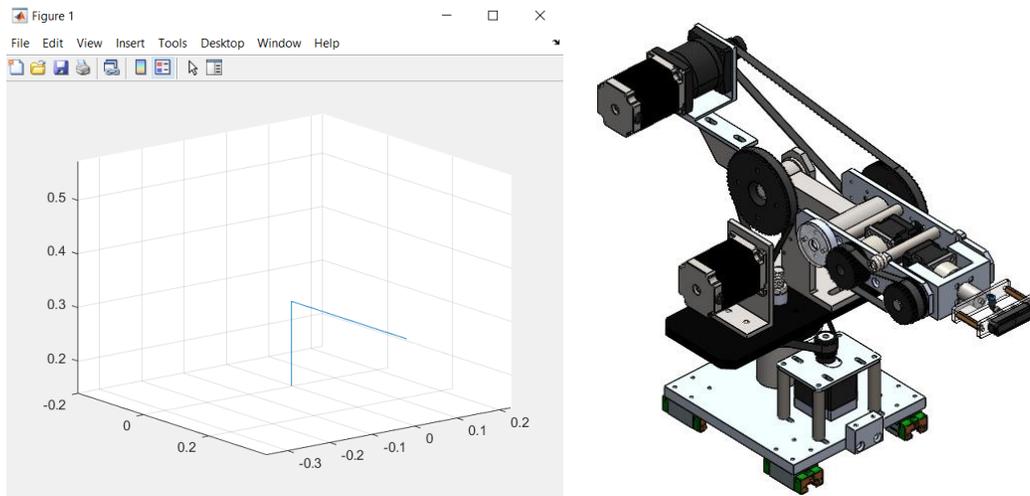


Figura 52. Posición crítica simulada y real del brazo robot.

Una vez identificada la posición crítica del brazo como se observa en la Figura 52, es necesario ingresar los parámetros solicitados en el programa selmotor6, mismo que pueden ser verificados en la Figura 53.

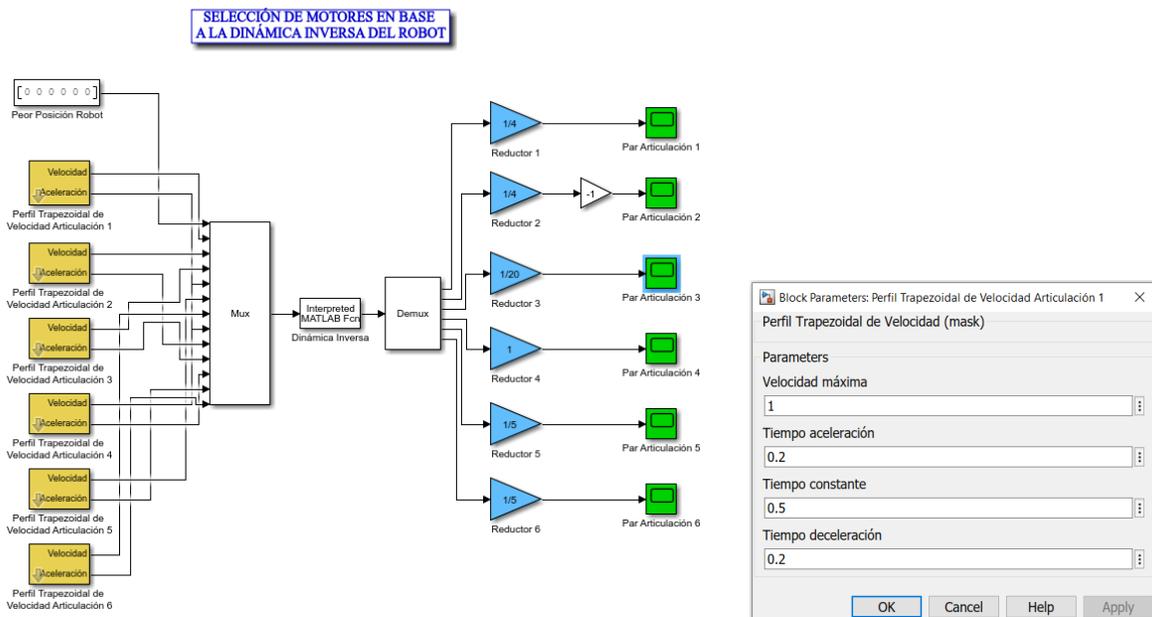


Figura 53. Interfaz del programa “selmotor6” configurado acorde a las necesidades de trabajo.

A continuación, se simula y adquiere los datos del par pico y el par nominal para cada motor, en la Figura 54, se ejemplifica cómo obtener estos valores.

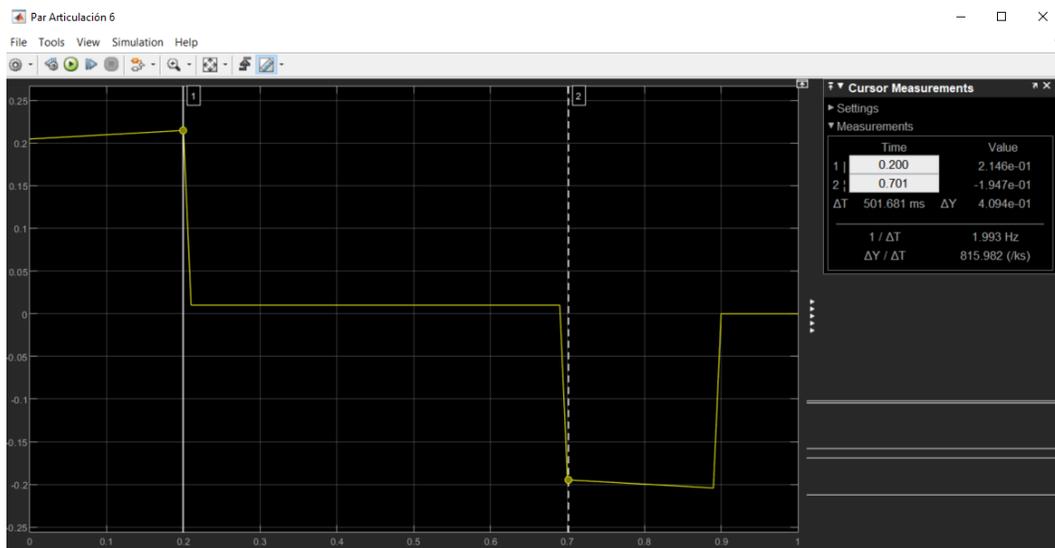


Figura 54. Par pico (cursor 1) y par nominal (cursor 2) del programa selmotor6.

La Tabla 19 presenta los datos obtenidos a través del software. El producto del torque del motor y la relación de transmisión permite conocer el momento de giro total que ofrece cada motor paso, se compara con el par pico que es la máxima fuerza de torsión que se ejerce durante el arranque y se verifica si cumple con los requerimientos necesarios.

Tabla 19: Datos obtenidos a partir del software Matlab para la selección de los motores.

# Motor	Par Nominal [Nm]	Par pico [Nm]	Relación de transmisión	Torque Motor [Nm]	Torque Total Motor [Nm]	Cumple los Requerimientos
1	0,1947	0,214	5:1	0,5	2,5	si
2	0,298	0,3	5:1	0,5	2,5	si
3	7,96	19,41	20:1	1	20	si
4	0,56	0,58	4:1	1	4	si
5	1,79	4,07	4:1	1,1	4,4	si
6		0,618	1:1	1	1	si

Con el fin de garantizar que el motor elegido para cada articulación del brazo robot sea capaz de soportar el torque necesario para contrarrestar las cargas aplicadas, es fundamental que el par pico sea menor que el torque del motor multiplicado por el índice de transmisión del multiplicador y los engranes.

3.17 Radio de acción y área de trabajo

El alcance de trabajo aproximado que dispone el brazo robótico depende del diseño, tipo y el lugar donde se encuentre, para realizar los cálculos correspondientes, se aborda dos casos, el primero donde la pieza a tomar se situará al nivel de la base inferior y el segundo donde la pieza a tomar se situará al nivel de la base central tal como se observa en la Figura 55.

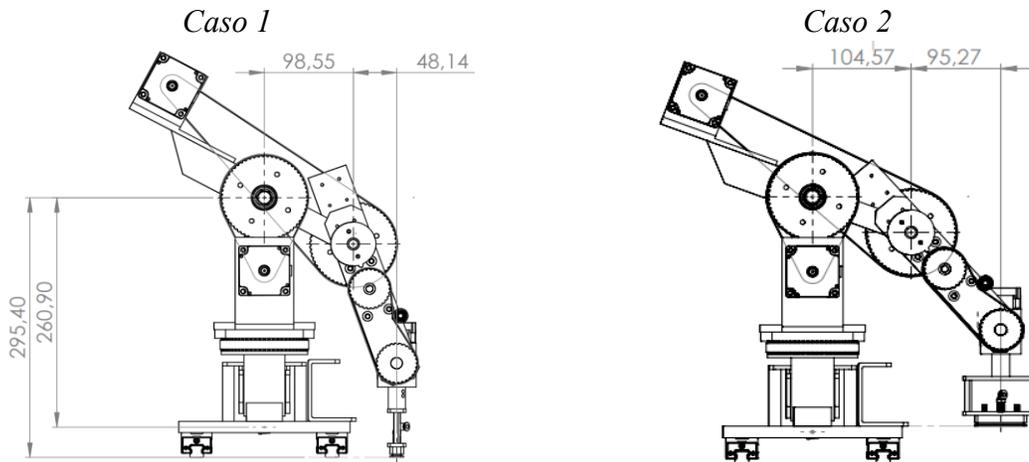


Figura 55. Dimensiones de las posiciones de trabajo del brazo robot.

Caso 1: Dimensiones del brazo robot con la ventosa de sujeción al ras de la mesa.

Caso 2: Dimensiones del brazo robot con la ventosa de sujeción al ras de la base.

El máximo alcance radial se lo puede calcular a partir de la suma de las medidas partiendo del eje central hasta el extremo donde se encuentra la ventosa, es necesario considerar la posición donde el brazo tomará la latilla.

Para el caso 1.

$$\text{Alcance radial} = l_1 + l_2 \quad (43)$$

$$\text{Alcance radial} = 98.55 \text{ mm} + 48.14 \text{ mm} = 146.69 \text{ mm}$$

Para el caso 2.

$$\text{Alcance radial} = l_1 + l_2 \quad (44)$$

$$\text{Alcance radial} = 104.57 \text{ mm} + 95.27 \text{ mm} = 199.84 \text{ mm}$$

Para el caso uno mediante el cual se considera que trabajará el brazo, el máximo alcance radial es de 146.69 mm. Para este caso, la ventosa puede trabajar de manera eficaz en toda el área del suelo.

Para el caso dos, el alcance radial es mayor que el primero. Sin embargo, este solo trabaja a la altura de la base del brazo por lo que se descarta esta alternativa.

3.17.1 Cálculo del área o volumen de trabajo.

En la Figura 56, se observa las dimensiones del brazo robot en posición vertical, Para calcular el volumen de trabajo se emplea la Ecuación (46).

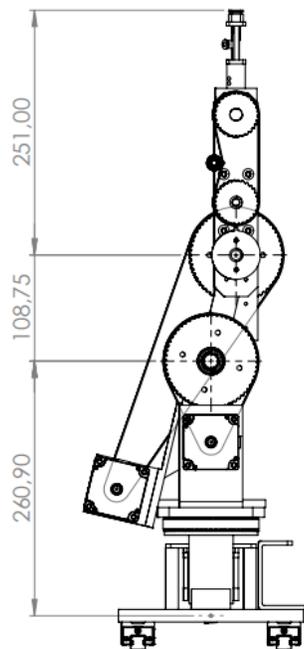


Figura 56. Dimensiones del brazo robot en su máxima altura.

Para simplificar los cálculos, se asumirá que el brazo robot tiene un volumen de trabajo de un cuarto de esfera perfecta puesto que hay que tener en cuenta de manera aproximada que el área cubierta será la parte superior de la esfera y el movimiento que puede realizar es de 180°. Así, el único dato necesario para este cálculo es la altura máxima útil, la cual se obtiene de la Figura 56.

$$h = 108.75 \text{ mm} + 251 \text{ mm} \quad (45)$$

$$h = 359.75 \text{ mm}$$

$$V_{trabajo} = \frac{1}{3}\pi r^3 \quad (46)$$

$$V_{trabajo} = \frac{1}{3}\pi(359.75 \text{ mm})^3$$

$$V_{trabajo} = 48756332.02 \text{ mm}^3 = 0.04876 \text{ m}^3$$

3.18 Cálculo de la fuerza de trabajo del pistón.

El pistón utilizado para el dispensador de latilla es un DSNU-16-100-PPS-A de la marca Festo.

Los datos del diámetro se encuentran en el Anexo D.

Datos:

Diámetro del pistón: 16 mm.

Presión de operación: 1 – 10 bar.

Área cilindro $\pi * \frac{D^2}{4}$

3 bar=0.3 MPa

5 bar=0.5 MPa

16 mm= 0.016 m

Presión mínima de trabajo para la máquina: 3 bar.

Presión máxima de trabajo para la máquina: 5 bar

Para el cálculo de la fuerza de avance se emplea la Ecuación (51). Es importante mencionar que, a través de método experimental, se determinó que la presión mínima de trabajo para que el pistón empuje sin esfuerzo la latilla es de 3 bar.

$$F = P * A \quad (47)$$

$$F = P \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) \quad (48)$$

$$F = 0.3 \text{ MPa} \left(\pi * \frac{0,016^2 \text{ m}^2}{4} \right)$$

$$F = 60,318 \text{ Pa} * \text{m}^2 = 60,32 \text{ N}$$

Para el cálculo de la fuerza de avance se emplea la Ecuación (50). Es importante mencionar que, a través de método experimental, se determinó que la presión máxima de trabajo, sin que el pistón empuje demasiado la latilla, es de 5 bar.

$$F = P * A \quad (49)$$

$$F = P \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) \quad (50)$$

$$F = 0.5 \text{ MPa} \left(\pi * \frac{0,016^2 \text{ m}^2}{4} \right)$$

$$F = 100,531 \text{ Pa} * \text{m}^2 = 100,53 \text{ N}$$

Donde:

Fuerza (F)

Presión (P)

Superficie (A)

3.19 Controlador

Para elegir el controlador adecuado, se tomaron en cuenta varias consideraciones importantes, como el tipo de proceso, precisión requerida, la compatibilidad con los sensores, actuadores e instrumentación requerida, ambiente de operación y costo asociado. Dado a que se requiere un funcionamiento prolongado y 6 canales de velocidad alta frecuencia para el control de los motores, se descarta la idea de utilizar un microcontrolador.

Un PLC está diseñado para controlar procesos industriales debido a su confiabilidad, fiabilidad y flexibilidad. Además, se destaca por su facilidad de programación, capacidad de diagnóstico y mantenimiento, así como su buena compatibilidad con los estándares industriales.

El controlador escogido es el PLC FP-XHC60PD debido a sus características y su relación costo-efectividad frente a PLC's de otras marcas que presentan características similares, pero con un costo más elevado.

3.19.1 PLC FP-XHC60PD (PNP)

Se seleccionó el PLC FP-XHC60PD debido a las ventajas y características que este ofrece. Su diseño sencillo con terminales de tornillo permite integrar bornas de cableado de manera fácil. Este

controlador cuenta con seis canales de alta velocidad, lo que permite controlar de manera precisa los motores utilizados en la máquina. Además, posee 16 entradas y 16 salidas de transistor, lo que proporciona flexibilidad para diferentes usos [40]. Dado que no se usan todas las entradas y salidas para el control del equipo, este controlador puede ser utilizado para integrar más sensores y lograr un control más preciso del brazo robot. También se puede adaptar o incorporar a otros procesos dentro de la empresa, En la Figura 57, se muestra el diagrama de entradas y salidas del PLC.

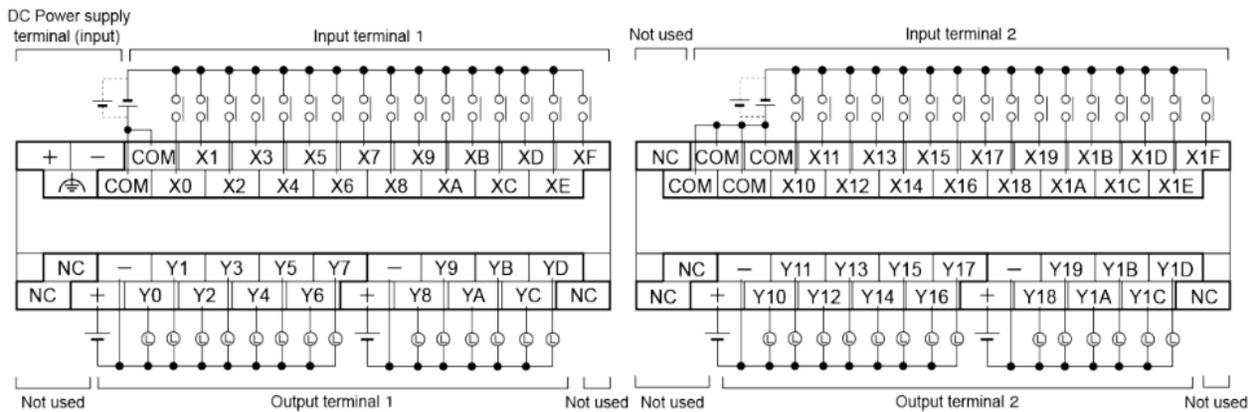


Figura 57. Diagrama de entradas y salidas del PLC FP-XHC60PD [40].

A continuación, se presentan las tablas de las entradas y salidas a utilizar del PLC para la programación de la máquina.

La Tabla 20 registra las entradas del PLC, correspondientes a los botones que se encuentran en el panel de control.

Tabla 20: Entradas del PLC para señales recibidas de los botones físicos.

Botón	Entrada
Botón 1	X1
Botón 2	X2
Botón 3	X3

En la Tabla 21 se encuentra registradas las salidas del PLC correspondientes a los actuadores utilizados como el pistón, el dispositivo encargado de la succión del aire y la válvula que activa la salida de la goma.

Tabla 21: Conexión de salidas del PLC.

Elemento	Salida
Pistón	Y10
Succión	Y12
Goma	Y14

En la Tabla 22, se registra los canales del PLC que corresponden a las señales de pulso y dirección utilizados para controlar los motores pasos. Es importante mencionar que el PLC cuenta con 6 canales de alta velocidad y que el motor 6 y 7 son controlados a través del canal 5, dado que estos no requieren moverse simultáneamente en comparación de los demás.

Tabla 22: Canales utilizados en el PLC para el control de los drivers de los motores.

	Pulso	Dirección	Canal
Motor 1	Y0	Y11	0
Motor 2	Y2	Y13	1
Motor 3	Y4	Y15	2
Motor 4	Y6	Y17	3
Motor 5	Y8	Y19	4
Motor 6	YA	YC	5
Motor 7	YB	YD	5

La Tabla 23 registra las entradas del PLC que corresponden a los finales de carrera, estos se encargan de enviar las señales respectivas una vez el brazo robot se posicione en el límite asignado. El sensor infrarrojo de igual manera envía una señal cuando la latilla alcanza la posición final.

Tabla 23: Entradas del PLC para señales recibidas de los finales de carrera y el sensor.

Elemento	Entrada
Final Carrera 1	X0
Final Carrera 2	X2
Final Carrera 3	X4
Final Carrera 4	X6
Final Carrera 5	X8
Final Carrera 6	X6
Sensor Infrarrojo	XC

3.20 Cinemática del brazo robot

La cinemática de un brazo robot es esencial para el diseño, la simulación y la programación de robots en diferentes aplicaciones. Un buen conocimiento de la cinemática de un brazo robot permite optimizar su funcionamiento, aumentar su precisión y reducir los tiempos de ciclo [30].

3.21 Cinemática directa

Mediante el software SolidWorks se realizó el modelado de la máquina, uno de los componentes que la conforma es el brazo robot, y mediante este software se adquirió las longitudes necesarias para el cálculo de la cinemática directa del mismo. También a través del solido 3D se visualiza con mayor claridad la rotación y traslación en cada plano, tal como se muestra en la Figura 59.

La Figura 58, muestra el sistema de referencias propuesto para el brazo robot.

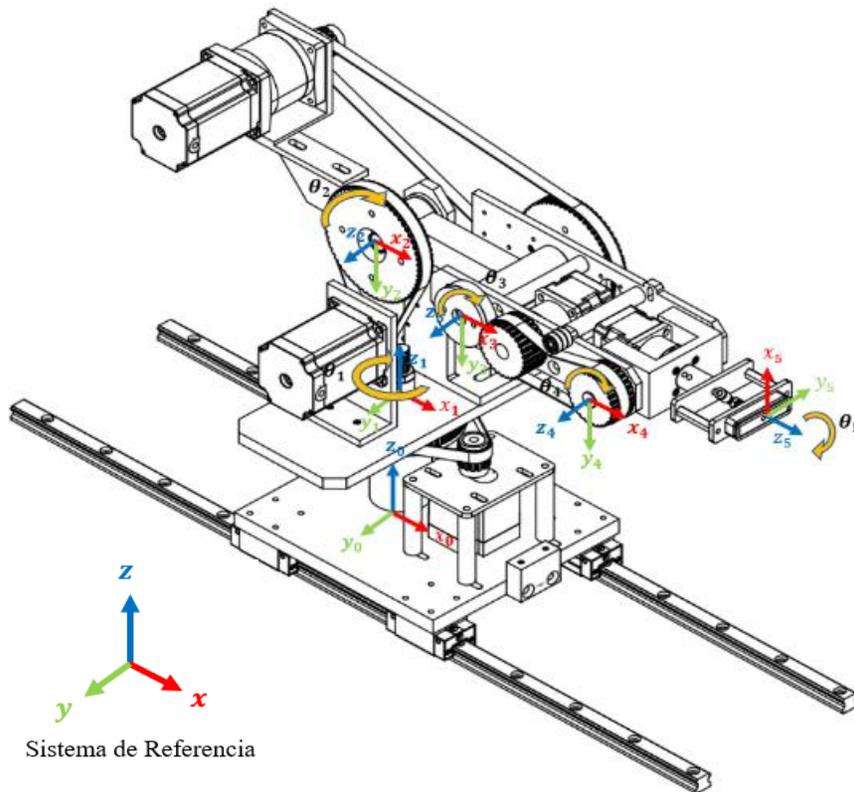


Figura 58. Sistema de referencias asignadas al brazo robot.

La Figura 59, representa de manera simplificada la Figura 58. Este diagrama se creó para visualizar de forma clara y sencilla el sistema de referencias del brazo robot, como preparación para la posterior elaboración de la tabla de Denavit – Hartenberg.

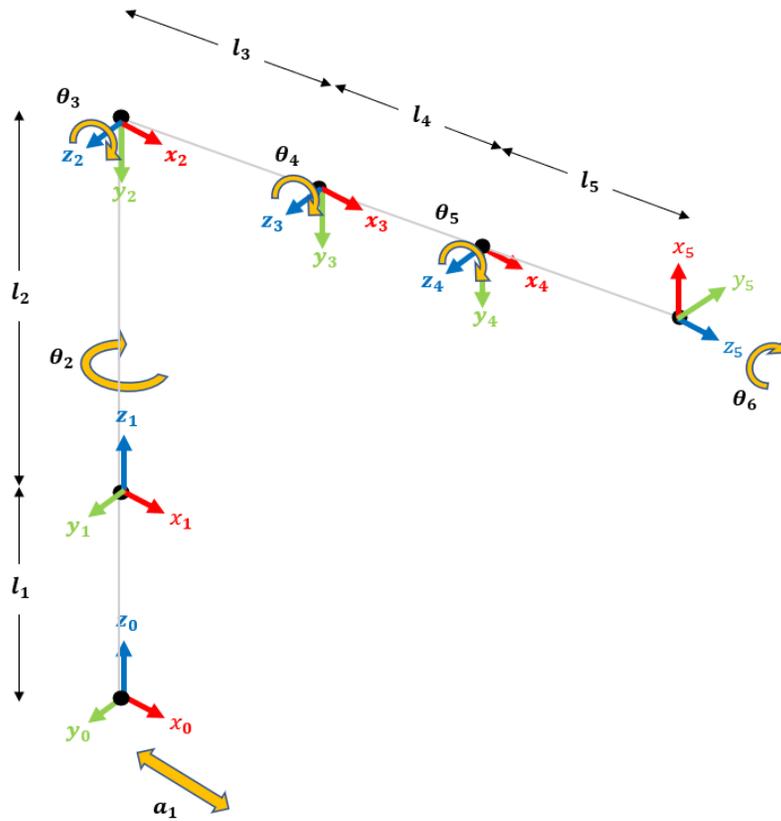


Figura 59. Sistema de referencias básico del brazo robot.

La Figura 60, muestra las dimensiones entre juntas del brazo robot. Estos valores se deben reemplazar en las variables 11, 12, 13, 14 y 15 de la Tabla 24.

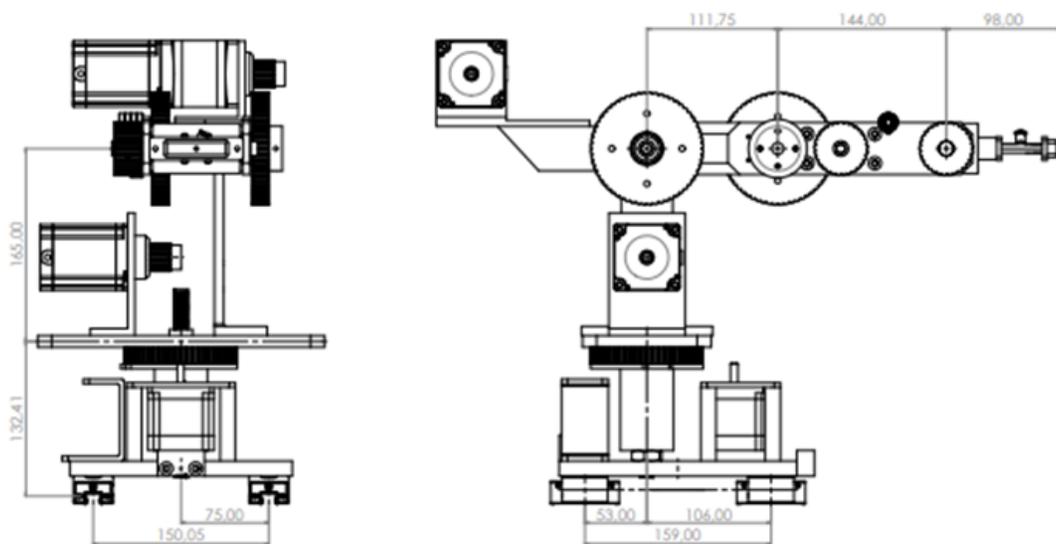


Figura 60. Plano de medidas para hallar la matriz de Denavit-Hartenberg.

3.21.1 Método Denavit-Hartenberg.

El método de Denavit-Hartenberg se utiliza para el análisis cinemático de robots, puesto que facilita el modelado y planificación de movimientos. Se toma en consideración parámetros que incluyen la longitud de enlaces, ángulo de rotación alrededor del enlace, distancia de traslación entre los sistemas de referencia y el ángulo de giro entre ellos. A partir de estos parámetros, se construye la tabla de Denavit-Hartenberg, que se registra en la Tabla 24. Esta tabla proporciona una descripción de las transformaciones de coordenadas y las relaciones de transformación entre los sistemas de referencia adyacentes.

Tabla 24: Tabla Denavit-Hartenberg.

#	θ	d	A	α
1	0	l_1	a_1	0
2	θ_2	l_2	0	+90
3	θ_3	0	l_3	0
4	θ_4	0	l_4	0
5	θ_5	0	l_5	+90
6	θ_6	0	0	0

Dado que las transformaciones no son conmutativas, las transformaciones se realizan en el orden de movimiento del brazo robot como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$A_{0-6} = A_{0-1} * A_{1-2} * A_{2-3} * A_{3-4} * A_{4-5} * A_{5-6} \quad (51)$$

$$A_{0-1} = T(x, a_1) * T(z, l_1) \quad (52)$$

$$A_{1-2} = R(z, \theta_2) * T(z, l_2) * R(x, +90^\circ) \quad (53)$$

$$A_{2-3} = R(z, \theta_3) * T(x, l_3) \quad (54)$$

$$A_{3-4} = R(z, \theta_4) * T(x, l_4) \quad (55)$$

$$A_{4-5} = R(z, \theta_5) * T(x, l_5) * R(x, +90^\circ) \quad (56)$$

$$A_{5-6} = R(z, \theta_6) \quad (57)$$

Para resolver la cinemática directa del brazo mediante el método de Denavit-Hartenberg, se aplica la Ecuación (1), Ecuación (2) y la Ecuación (3), dependiendo si se necesita una rotación en x, y o z. Se utiliza la Ecuación (4), de ser necesaria una traslación en x, y o z. Entonces:

$$A_{0-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$A_{1-2} = \begin{bmatrix} \cos(T2) & 0 & \sin(T2) & 0 \\ \sin(T2) & 0 & -\cos(T2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$A_{2-3} = \begin{bmatrix} \cos(T3) & -\sin(T3) & 0 & l3\cos(T3) \\ \sin(T3) & \cos(T3) & 0 & l3\sin(T3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$A_{3-4} = \begin{bmatrix} \cos(T4) & -\sin(T4) & 0 & l4\cos(T4) \\ \sin(T4) & \cos(T4) & 0 & l4\sin(T4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$A_{4-5} = \begin{bmatrix} \cos(T5 + 90) & 0 & \sin(T5) & l5\cos(T5) \\ \sin(T5 + 90) & 0 & -\cos(T5) & l5\sin(T5) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$A_{5-6} = \begin{bmatrix} \cos(T6) & -\sin(T6) & 0 & 0 \\ \sin(T6) & \cos(T6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$A_{0-6} = \begin{bmatrix} \sin(T2) * \sin(T6) + \cos(T2) * \cos(T6) * \cos(T3 + T4 + T5), \\ \cos(T6) * \cos(T3 + T4 + T5) * \sin(T2) - \cos(T2) * \sin(T6), \\ \cos(T6) * \sin(T3 + T4 + T5), \\ 0, \\ \cos(T6) * \sin(T2) - \cos(T2) * \cos(T3 + T4 + T5) * \sin(T6), \\ -\cos(T2) * \cos(T6) - \cos(T3 + T4 + T5) * \sin(T2) * \sin(T6), \\ -\sin(T6) * \sin(T3 + T4 + T5), \\ 0, \\ \cos(T2) * \sin(T3 + T4 + T5), \\ \sin(T2) * \sin(T3 + T4 + T5), \\ -\cos(T3 + T4 + T5), \\ 0, \end{bmatrix} \quad (64)$$

En la Figura 62, se muestra varias de las piezas que se han fabricado mediante el proceso de fresado a partir de un material en bruto.

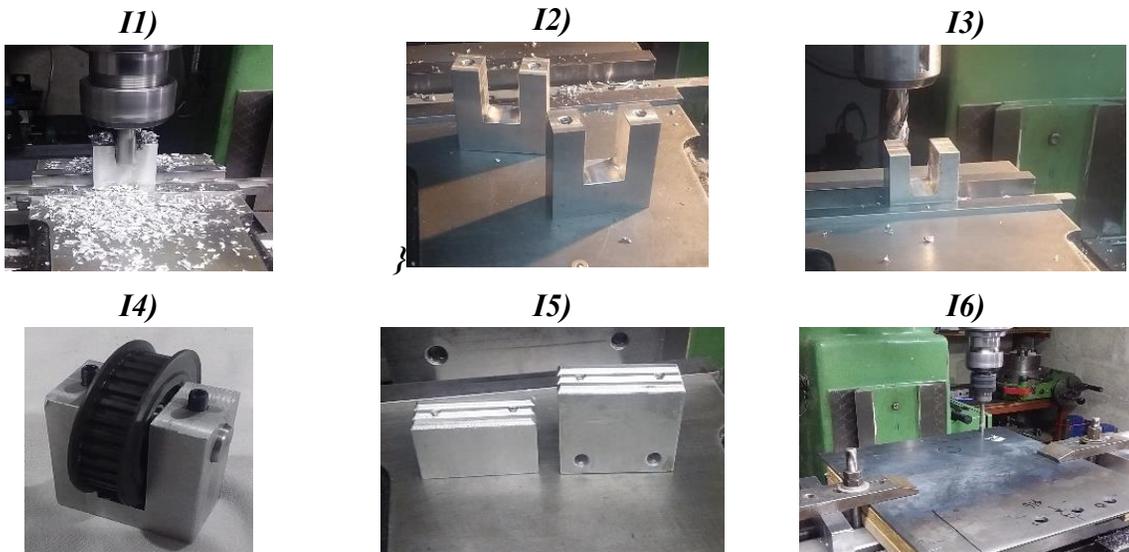


Figura 62. Proceso de fresado.

En la Figura 63, se presenta varios ejemplos de piezas donde se ha empleado un taladro vertical para efectuar perforaciones con gran precisión.

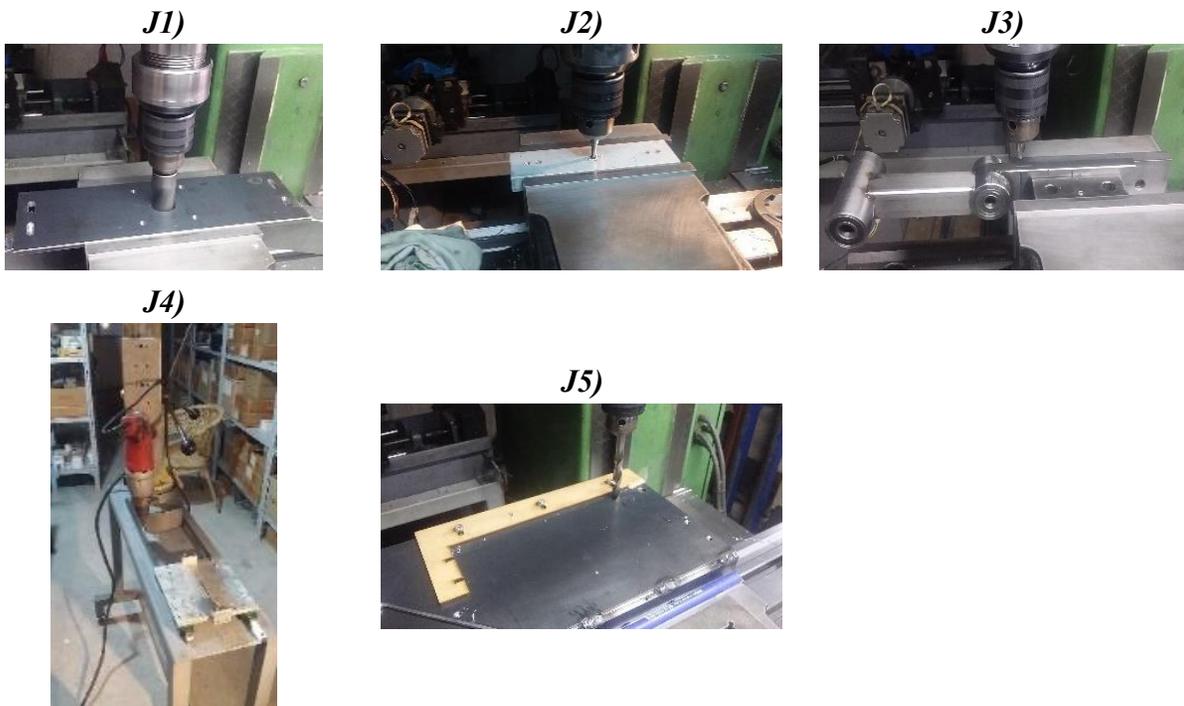


Figura 63. Proceso de perforado

La Figura 64, muestra dos ejemplos de piezas que requieren ser dobladas para conformar los elementos necesarios para la máquina.



Figura 64. Proceso de doblado.

En la Figura 65, se muestra varias piezas fabricadas a partir de proceso de torneado. Es importante mencionar que la mayoría de estas piezas presentan un acabado h6, sin embargo, para los elementos que requieren contener rodamientos, el acabado debe ser preciso, por lo que este debe ser h7 o h8.

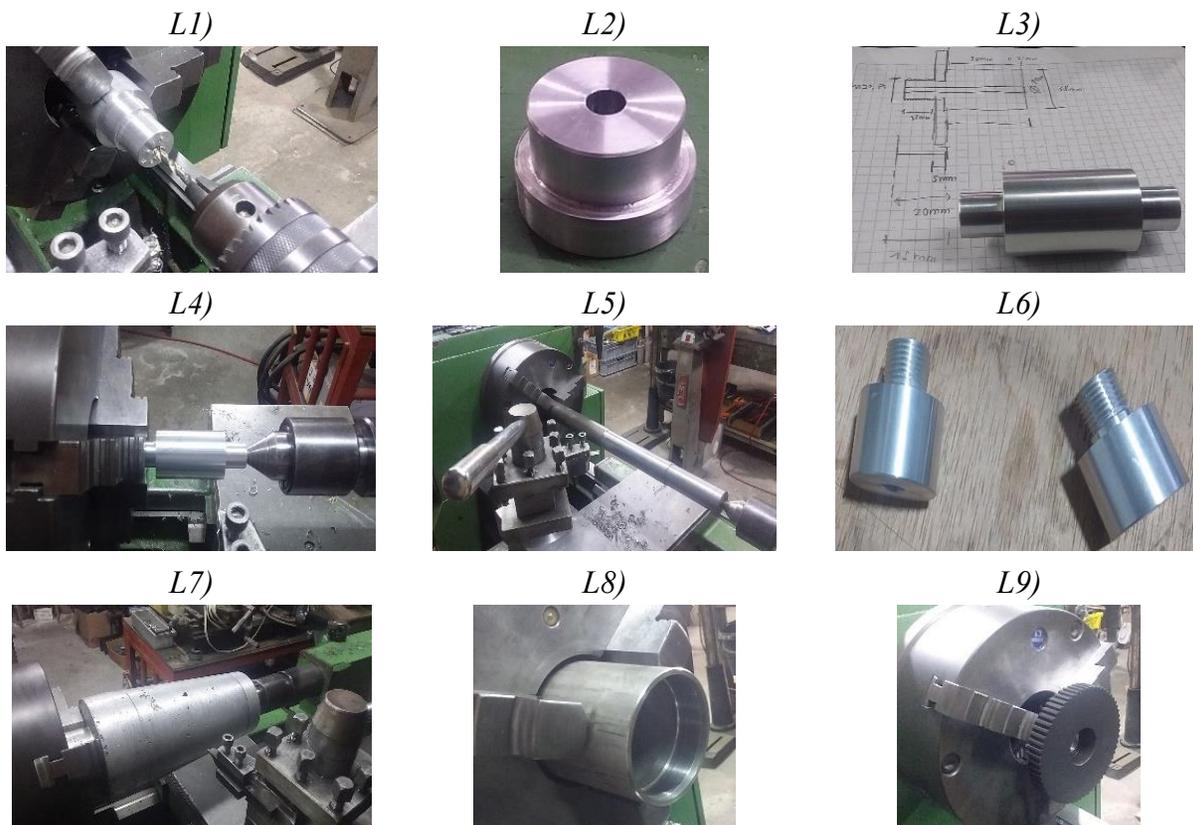


Figura 65. Proceso de torneado.

Para fabricar los elementos que integran la máquina, es imprescindible llevar a cabo el proceso de corte. Esto se debe a que el material bruto se encuentra en forma de planchas o tubos con dimensiones estándar, y es necesario reducirlos para adaptarlos a las diversas necesidades. Este procedimiento se lo puede observar de manera clara en la Figura 66.

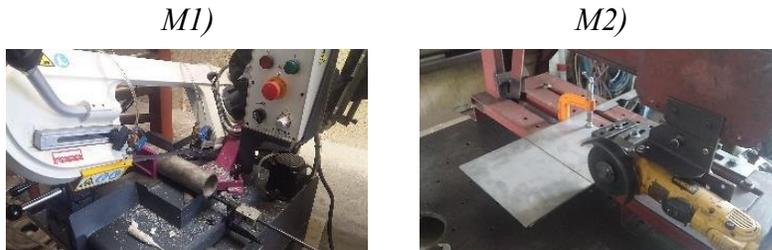


Figura 66. Procesos de corte.

El molde que integra el actuador rotatorio se fabrica a partir del proceso de fundición. En la Figura 67 se presenta el elemento resultante de la fundición en aluminio. Cabe mencionar que se requiere un proceso adicional (torneado) para lograr una superficie regular que no interfiera con la producción de los envases de bambú.



Figura 67. Proceso de fundición.

Las piezas elaboradas a partir de acrílico se realizan mediante corte láser, el resultado de este proceso se lo puede ver en la Figura 68.



Figura 68. Proceso de corte laser.

3.22.3 *Ensamble mecánico.*

El montaje mecánico está conformado por los materiales mencionados previamente, así como por los motores a pasos, los engranes, poleas dentadas, bandas síncronas, sensores y demás actuadores. Además, se incluye el panel de control equipado con una pantalla táctil la cual permite el control de la máquina. La caja que contiene las fuentes de alimentación, drivers y el controlador (PLC) se encuentra ubicado en la parte inferior de la mesa.

3.22.4 *Ensamble final del dispensador de latillas.*

En la Figura 69 puede identificarse los elementos que conforman el dispensador de latillas. Los materiales empleados son el acero ASTM A36 para la base del dispensador y las columnas que albergan las latillas, acrílico para la base de los sensores y la guía de posicionamiento de las latillas. La engomadora está compuesta por los diferentes tipos de aceros mencionados.



Figura 69. Componentes del dispensador de latillas.

En la Figura 70 se observa las piezas que integran la engomadora, la unidad de mantenimiento y el contenedor de la goma.



Figura 70. Componentes de la engomadora.

El ensamblaje final se compone mediante la unión de los componentes que se muestran en la Figura 69 y pernos tal como se observa en la Figura 71.

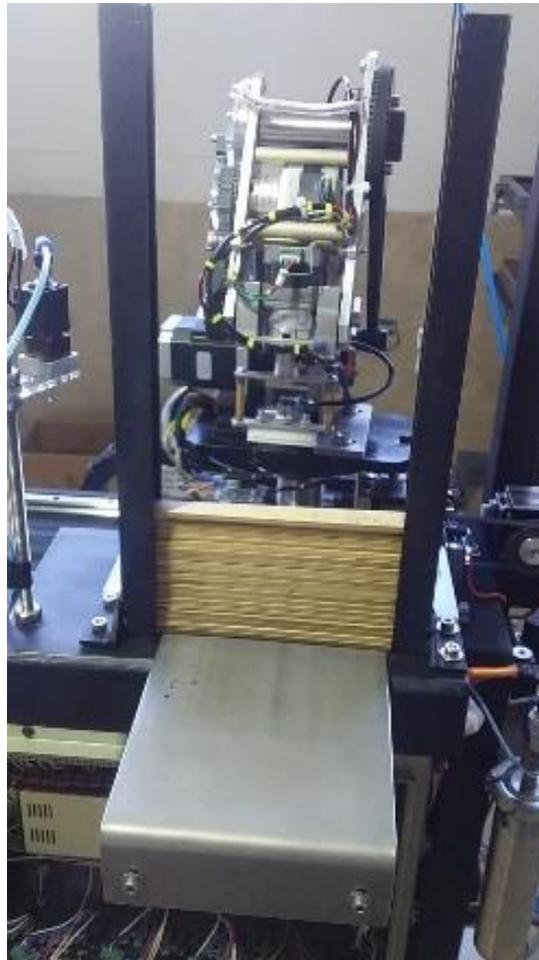


Figura 71. Ensamble final del módulo dispensador de latillas.

3.22.5 Ensamble final del actuador giratorio.

En la Figura 72 se puede identificar los elementos que componen el actuador giratorio, como se puede apreciar en las imágenes, este dispositivo cuenta con un eje central escalonado, el cual posibilita un acople perfecto con los rodamientos. Debido a esta conexión, el actuador puede girar en conjunto con el motor y los engranes, con una relación de 4:1, lo que aumenta el torque entregado por el motor. La unión del módulo a la mesa se logra mediante juntas empernadas, mientras que la transmisión de potencia es a partir de una banda síncrona de paso XL. Los materiales empleados son el duraluminio para las piezas, acero AISI 304 para el eje central y el aluminio AW 6061 mediante el cual están compuestos los engranes.



Figura 72. Componentes del actuador giratorio.

En la Figura 73 se muestra el ensamblaje final del actuador rotatorio, donde se posicionan las latillas engomadas para elaborar los envases de bambú.



Figura 73. Ensamblaje final del módulo correspondiente al actuador giratorio.

3.22.6 Ensamble final del manipulado (Brazo robot).

En la Figura 74 se puede observar varios de los componentes que conforman el brazo robot, iniciando desde las carrileras, los patines de bolas, la base, el eje central, los soportes de los motores, el eslabón del hombro, el eslabón del codo, la muñeca, sensores y demás componentes. Se puede observar de mejor manera en la Figura 75. Los materiales empleados son el duraluminio para la mayoría de las piezas puesto que es resistente y liviano, el acero inoxidable AISI 304 para el eslabón del hombro y el eje que soporta el peso del brazo, el acero ASTM A36 para los ejes, silicona para la ventosa y acrílico para algunos soportes, las juntas se unen mediante pernos, la transmisión de la potencia es a través de las poleas dentadas y bandas síncronas de paso XL.



Figura 74. Componentes del brazo robot.

La Figura 75, muestra el resultado final del ensamblaje del brazo robot en conjunto a los cables de alimentación de los motores, la línea neumática para el funcionamiento de la ventosa, multiplicadores de velocidad, entre otros.

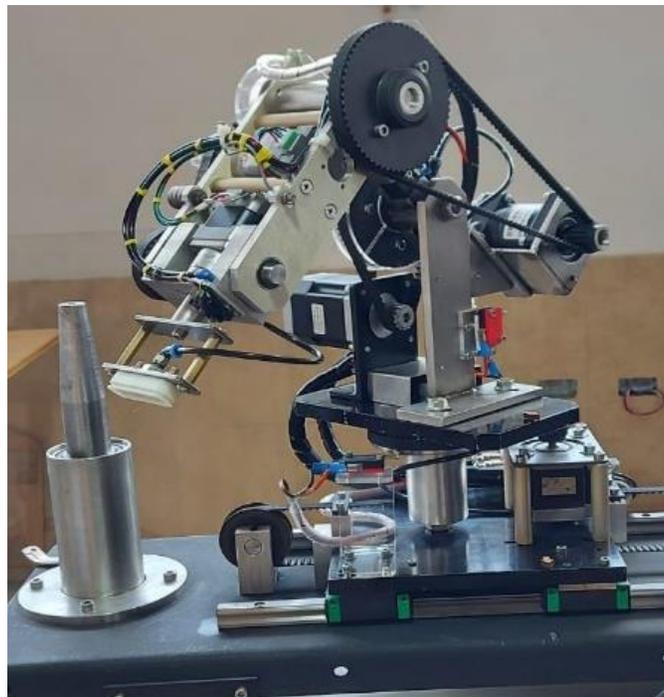


Figura 75. Ensamble final del brazo robótico.

3.22.7 Ensamblaje del sistema eléctrico

Con el objetivo de realizar un montaje adecuado de la línea de cableado, se ha optado por dividir el circuito en dos partes fundamentales: la sección de control y la sección de potencia. Esta división permite un enfoque más estructurado y eficaz en el cableado de la línea, asegurando un funcionamiento óptimo del sistema.

En la sección de control que se presenta en la Figura 76, se encuentran elementos como el controlador (PLC), la fuente de alimentación, los drivers encargados de controlar los motores paso y el sistema de protección del circuito.



Figura 76. Circuito de potencia de la máquina.

En el sistema de potencia que se presenta en la Figura 77, se encuentran los elementos que necesitan un mayor consumo de corriente y que se encarga de energizar los relés para alimentar el circuito de control. Además, se encuentra el panel con la pantalla táctil (HMI), desde la cual se controla la máquina.

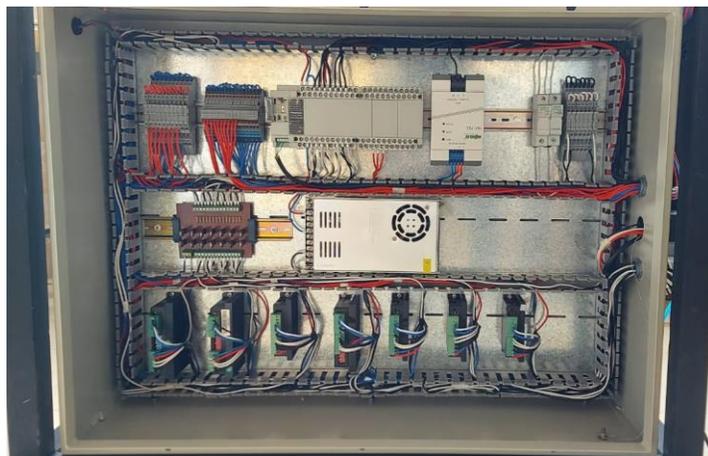


Figura 77. Circuito de control de la máquina.

3.23 Desarrollo del sistema de control.

En este apartado se desarrolla el sistema de control para la ejecución del trabajo de la máquina, la cual consiste en trasladar latillas de bambú, desde el dispensador, pasando por la engomadora y posicionándola en el actuador giratorio por medio del controlador (PLC) y la implementación de los elementos mencionados a lo largo de todo el capítulo.

En la Figura 78, Figura 79, Figura 80 y Figura 81, se identifica la ventana principal de programación, la cual está diseñada a partir de lógica de contactos y bloques de programación. Esta ventana recibe la información final que se ejecuta en los subprocesos, lo que permite una visualización más intuitiva de la activación de los contactos o bobinas finales, al igual que el software de programación, el cual se puede visualizar en la Figura 85.

Dentro del programa existen varios subprogramas en ejecución que envían información al primero. Uno de estos es la programación de los motores, donde se ingresa los datos necesarios para que el motor funcione, como son la señal de pulsos, tiempos de aceleración y desaceleración, entre otros.

En la Figura 78, se visualiza el bloque “CONTROL_NUMERICO_MANUAL1”. En esta parte de la programación, es posible manipular el brazo robot a través del uso de la interfaz de control numérico en el HMI. Es decir, se deben ingresar parámetros de coordenadas o número de pulsos para que el brazo robot se desplace a la posición asignada, la ventana de esta programación en el HMI corresponde a la Figura 86, literal AA2.

Bloque “CONTROL_MANUAL1”. Funciona de manera similar al bloque anterior. Permite interactuar con el brazo robótico a través del HMI y sus botones virtuales. En otras palabras, el operador puede desplazar el brazo robot manteniendo pulsado los botones virtuales hasta que visualice que el brazo robot alcanza la posición requerida, la ventana mencionada se observa en la Figura 86, literal AA1.

Bloque “ENGOMADO_BRAZO1”. Es el programa principal encargado de la secuencia de procesos de engomado y posicionamiento de las latillas. También se utilizan los datos ingresados desde el HMI por el operador para ajustar la velocidad de engomado.

Bloque “HOME_MOTOR1”. Dentro de este bloque se ejecutan todos los procesos relacionados al posicionamiento inicial de la máquina en general. Este bloque puede ser modificado por el operador dependiendo de la posición desde la cual se desea que el brazo comience su trabajo. Durante la

ejecución de este programa, el brazo mueve sus articulaciones hasta hacer contacto con los finales de carrera. Esto garantiza que el robot establezca las posiciones de las articulaciones en cero y luego se sitúe nuevamente en la posición ingresada por el operador, este proceso se lo puede observar en la Figura 86, literal AA4.

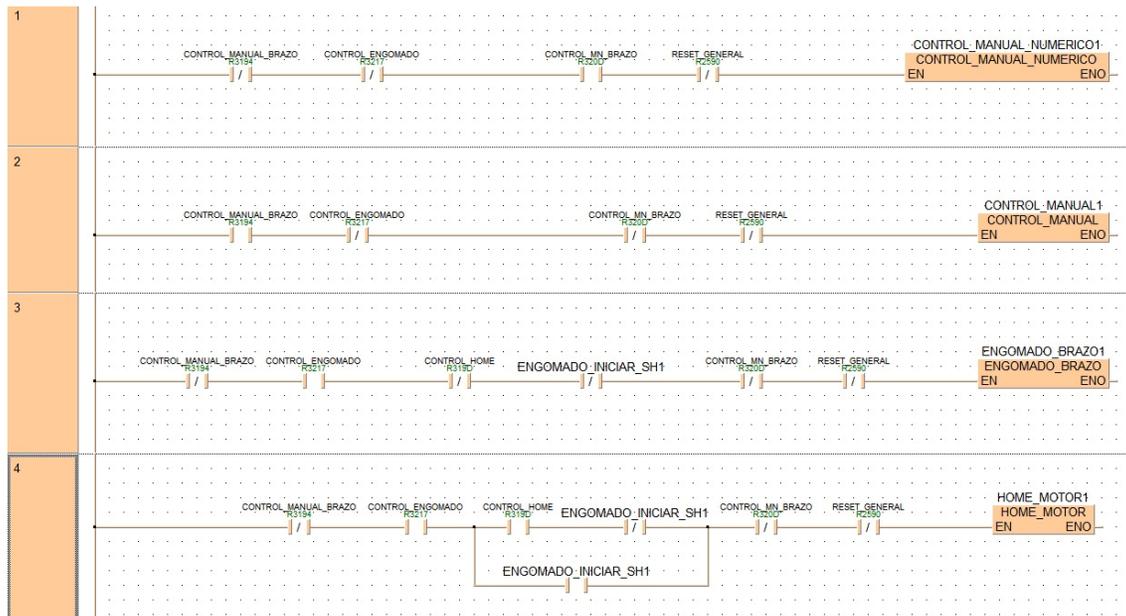


Figura 78. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 1.

Dentro de las Figura 79 y Figura 80, se encuentran los contactores que se interrelacionan entre sí y con los demás subprocessos del programa. Estos contactores ayudan al programa principal a realizar acciones secundarias para reiniciar ciertas funciones durante el funcionamiento de los procesos.

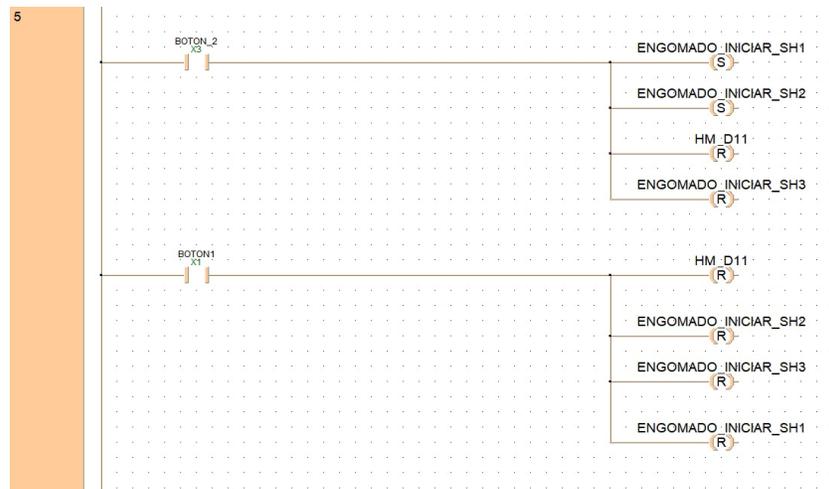


Figura 79. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 2.

EL bloque “RESETEO1” actúa como un reset general para todas las operaciones y el funcionamiento de la máquina. Está programado a partir de variables globales que permiten detener los canales y deshabilitar todo el proceso.

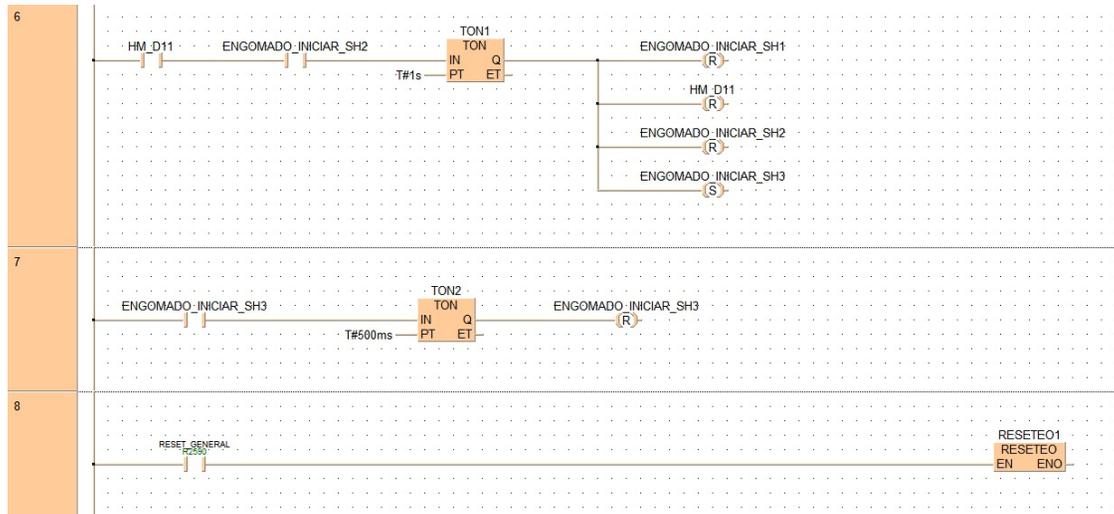


Figura 80. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 3.

En la Figura 81, se puede identificar el bloque de cinemática directa. Este bloque funciona de manera similar a los bloques mencionados anteriormente en cuanto al posicionamiento del brazo robot. La diferencia radica en que, a través de la cinemática directa, se determina la posición y orientación del brazo ingresando los ángulos de las articulaciones.

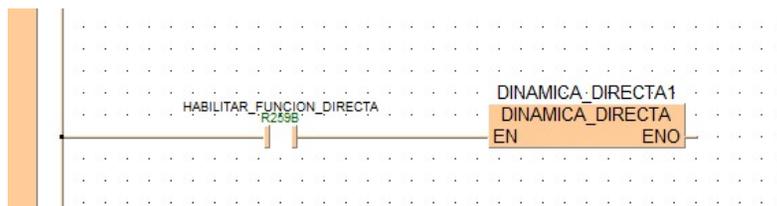


Figura 81. Ventana principal de la programación en el software FPWIN Pro. Parte 4.

En la Figura 82 se puede identificar el bloque "PulseOutputStop". Este bloque se encarga de detener la salida de pulsos del canal especificado, al ingresar una señal en “EN”. En la misma figura, se observa el bloque "PulseOutputContinue", el cual permite continuar con la salida de pulsos.



Figura 82. Bloque "PulseOutputStop" y "PulseOutputContinue".

En la Figura 83, se visualiza el bloque “PulseControl_ElapsedValueReset”, esta instrucción permite reiniciar el valor numérico del canal especificado, de la salida de los pulsos al ingresar una señal en “EN” el valor actual de conteo de la salida de pulsos se convierte en cero. En la misma figura, se observa el bloque "ElapsedValueContinue", el cual reanuda el conteo del canal especificado.

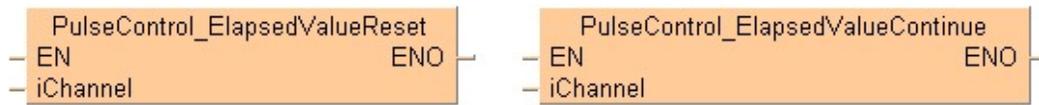


Figura 83. Bloque “PulseControl_ElapsedValueReset” y "ElapsedValueContinue".

El bloque “PulseOutput_Jog_FB” mostrado en la Figura 84, Este bloque se usa para enviar un número específico de pulsos cuando se cumple la condición (True) para el control de posición. Antes de alcanzar el valor de preselección y detener esta salida. Se transmiten pulsos desde el canal especificado hasta cumplir la condición.



Figura 84. Bloque de salida de pulsos para controlar los motores.

3.24 Manual de operación de la máquina.

A continuación, se describen las distintas características que pueden ser modificadas en el HMI para controlar la posición, velocidad de desplazamiento de los motores, la velocidad de engomado y otros factores importantes para el funcionamiento adecuado de la máquina.



Figura 85. Ventana principal del HMI.

Dentro de la ventana principal del HMI, se encuentran 4 botones virtuales principales, los cuales se pueden observar en la Figura 85. A continuación, se detalla cada uno:

3.24.1 Botón de control manual

Al accionar este botón, se habilita una ventana emergente con un recuadro que indica la velocidad de desplazamiento. Esto permite al usuario mover los motores en sentido horario o antihorario.

El indicador de pulsos, como su nombre lo indica, sirve para visualizar el número de pulsos en el que se mueven los motores. Aunque esta función no es utilizada por el operador, resulta útil en caso de requerir un nuevo posicionamiento, ya que facilita el proceso de ubicar los actuadores que realizan el movimiento en la Figura 86, literal AA1.

Asimismo, dentro de la ventana, se puede observar 4 botones extra, los cuales cumplen con las funciones que se muestran a continuación.

El botón “Pistón”, permite el accionamiento manual del pistón presente en el dispensador de latillas.

El botón “Ventosa”, posibilita la apertura de la electroválvula encargada de suministrar de aire al succionador de la ventosa, permitiendo que esta se active o desactive de manera manual.

El botón “Goma”, permite activar o desactivar de manera manual la aplicación de goma a través de la boquilla de la engomadora.

El botón “Home”, posibilita el desplazamiento de los motores hacia los finales de carrera correspondientes, una vez cumple su función, el brazo se mantiene en dicha posición con todos los finales de carrera presionados.

3.24.2 Botón de control numérico

El control de posición es similar al del control manual en cuanto a la visualización de los datos. Sin embargo, a diferencia del control manual, en este caso el desplazamiento de los motores se verá afectado en función de los parámetros ingresado y a partir de ellos mover el brazo robot hasta orientar la ventosa en la posición espacial establecida. Los botones laterales controlan la dirección de los motores. Por otro lado, el control de velocidad regula la velocidad de desplazamiento de cada motor de manera individual.

En cuanto a los pulsos absolutos, estos se suman o resta para indicar el desplazamiento realizado por los motores. Esta función facilita el posicionamiento preciso de la máquina. La ventana descrita puede observarse en la Figura 86, literal AA2.

3.24.3 Botón “Reseteo de Variables”

Este botón permite reiniciar o restablecer la máquina al estado previamente configurado en el PLC, así como las variables globales booleanas que pueden quedar seteadas dentro del mismo.

3.24.4 Botón Cinemática Directa

Este botón permite realizar pruebas de funcionamiento al hacer referencia a tres ejes específicos (cintura, hombro y codo). Esta opción se encuentra en la Figura 86, literal AA6, es necesario ingresar los ángulos correspondientes para obtener los respectivos datos espaciales.

3.24.5 Botón de “Engomado”

Al presionar este botón, se despliega la ventana correspondiente, la cual se muestran en la Figura 86, literal AA3. Esta ventana proporciona acceso a parámetros fundamentales relacionados con el control de la máquina.

A continuación, se describe cada parámetro y su función correspondiente.

- Velocidad de engomado, permite controlar la velocidad de desplazamiento lineal (Motor 6) para el proceso de engomado.
- Tiempo engomado 1, controla la duración en al que se abrirá la válvula que permite el paso de la goma.
- Tiempo engomado 2, controla la duración de apertura de la válvula que permite el paso de la goma.
- Velocidad de proceso, controla la velocidad de desplazamiento del brazo, con restricciones establecidas entre el 50% y el 230%, garantizando un proceso sin pérdida de pasos.
- Número de repeticiones, controla el número de ciclos que se realizaran al presionar el botón uno del panel de control.
- Conteo de repeticiones, indica el número de secuencias en la que se encuentra la máquina.
- Control angular M1, determina el grado de inclinación del motor M1 durante la aplicación de la goma.

- Control angular M5, Es el grado de inclinación (motor 5) al colocar la latilla en el sistema giratorio.

Además, en la misma ventana se encuentran 5 botones virtuales, representadas por los gráficos que se muestran en la Figura 86, literal AA3.

- Compensación, abre otra ventana en la cual se puede ingresar una compensación en caso de pérdida de pasos en los motores. Actualmente, el valor de las compensaciones se encuentra en cero debido a que los motores no presentan este problema. Sin embargo, esta función está prevista para futuros casos en donde los campos magnéticos y el desgaste progresivo de los drivers que controlan los motores afecten el posicionamiento preciso de la máquina.
- Detener, este botón permite detener o habilitar el funcionamiento de la máquina.
- Detener engomado, mientras este se encuentre en modo “stop”, no se aplica goma durante el ciclo.
- Abrir o cerrar válvula de goma, permite abrir o cerrar manualmente la válvula de paso de la goma. Es importante destacar que, si el botón “Detener Engomado” se encuentra en “stop”, no se aplica la goma durante el ciclo.
- Velocidad de home, es la velocidad de desplazamiento de los motores hacia los finales de carrera.
- Ubicación, despliega una ventana con un plano en el espacio como se muestra en la Figura 86, literal AA4. Al presionar esta imagen, todos los motores se desplazan a los finales de carrera y, una vez culminado este proceso, regresan a la posición de inicio (home).

Dentro de la ventana “Ubicación” y debajo del parámetro de velocidad del home, se encuentran dos botones adicionales. El primero redirige a la ventana principal de engomado, mientras que el segundo permite acceder a otra ventana en la cual se puede ingresar los parámetros de posicionamiento de los motores y la velocidad de home. En esta ventana, se incluye una tabla comparativa que indica la equivalencia de los pulsos enviados y los ángulos de desplazamiento, mismos que se toman en cuenta desde el punto donde se han seteado los finales de carrera.

Es importante mencionar que los visualizadores (vistos) que se muestran en la Figura 85 deben permanecer activos (verdes) puesto que estos indican que todas las ventanas y parámetros se encuentran en orden. Si alguno de los visualizadores está en gris, indica que algún parámetro o

alguna ventana no se encuentra adecuadamente configurada, por lo que se recomienda verificarlos antes de iniciar el proceso.

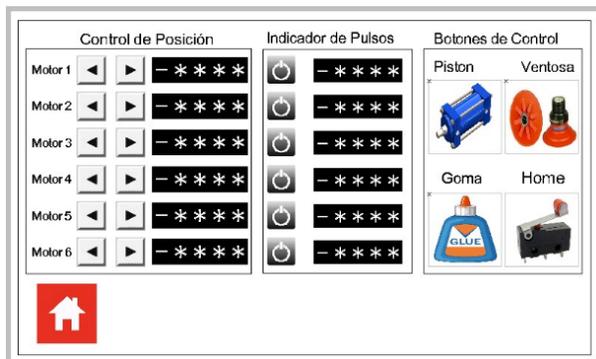
3.24.6 Uso de botones externos (físicos)

El inicio del ciclo se produce una vez se presiona el botón uno, ubicado en el panel del gabinete pequeño. Sin embargo, este botón solo funciona cuando la ventana de control de engomado se encuentra activa.

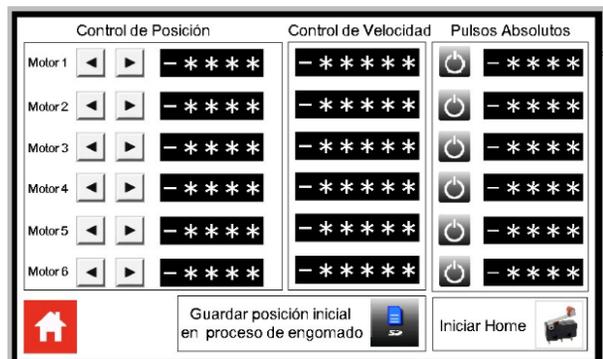
El botón dos cumple una función similar al primero, la diferencia radica en que dirige al brazo robot de forma automática al punto de inicio (home) hasta llegar a los finales de carrera. Luego se posiciona en las coordenadas preestablecidas y da comienzo al ciclo. Al igual que el botón uno, este botón funciona únicamente cuando la ventana “Control de Engomado” está activa.

El botón 3 se utiliza exclusivamente para agregar nuevas funciones dentro de la programación.

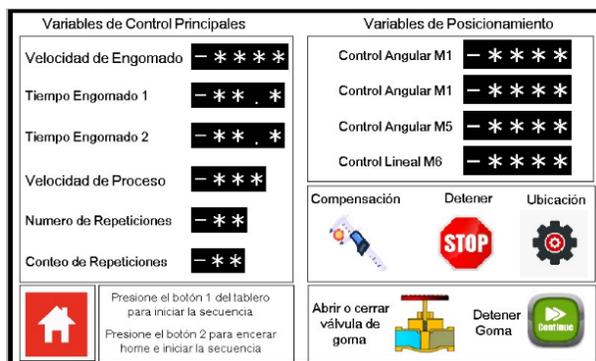
AA1)



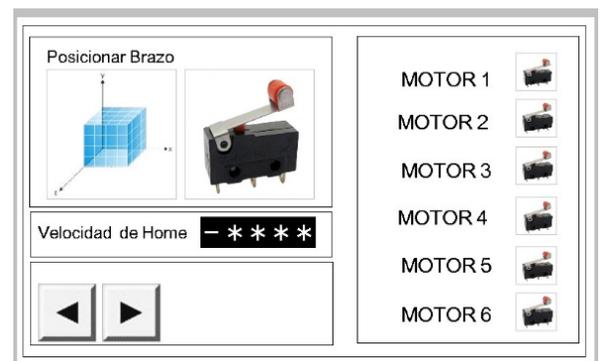
AA2)



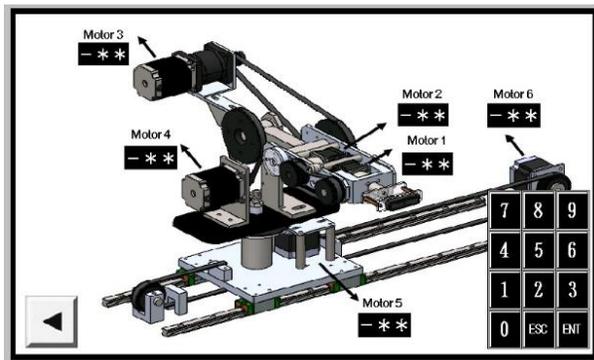
AA3)



AA4)



AA5)



AA6)

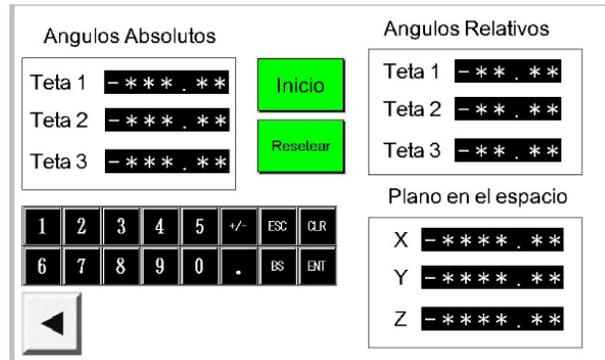


Figura 86. Ventanas secundarias de la pantalla principal.

3.25 *Mantenimiento de la máquina:*

3.25.1 *Mantenimiento periódico (diario):*

Antes de cada uso verificar que los parámetros de la máquina se encuentren encerrados.

Engrasar las guías lineales.

Verificar que las correas se encuentren tensionadas.

Verificar que los componentes se encuentren en buen estado.

Antes de iniciar el proceso, habilitar la válvula para que pase la goma y verificar que esta no se encuentre taponada.

Asegurarse que el tanque de almacenamiento de goma se encuentre dentro de los niveles requeridos para su correcta función.

Asegurarse que la presión del aire sea menor a 6 bares.

Limpieza del tanque de almacenamiento de goma (Cada que se acaba).

Limpieza en caso de derrame de goma.

Revisión rápida de sobrecalentamiento en los actuadores.

3.25.2 *Mantenimiento anual*

Limpieza general.

Realizar inspección de las condiciones del robot

Verificar el estado de los motores.

Comprobar que el HMI y los botones físicos (paro de emergencia, switch de encendido y apagado, perilla de encendido de drivers, entre otros) funcionen adecuadamente.

Revisión de la unidad de mantenimiento.

3.26 Diagrama de funcionamiento de la máquina

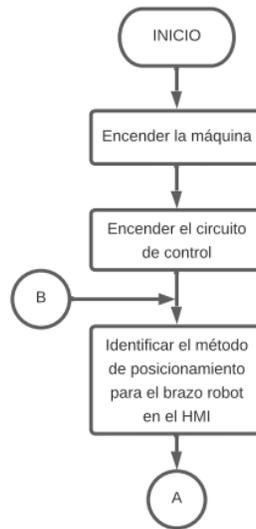


Figura 87. Diagrama de flujo del funcionamiento parte 1.

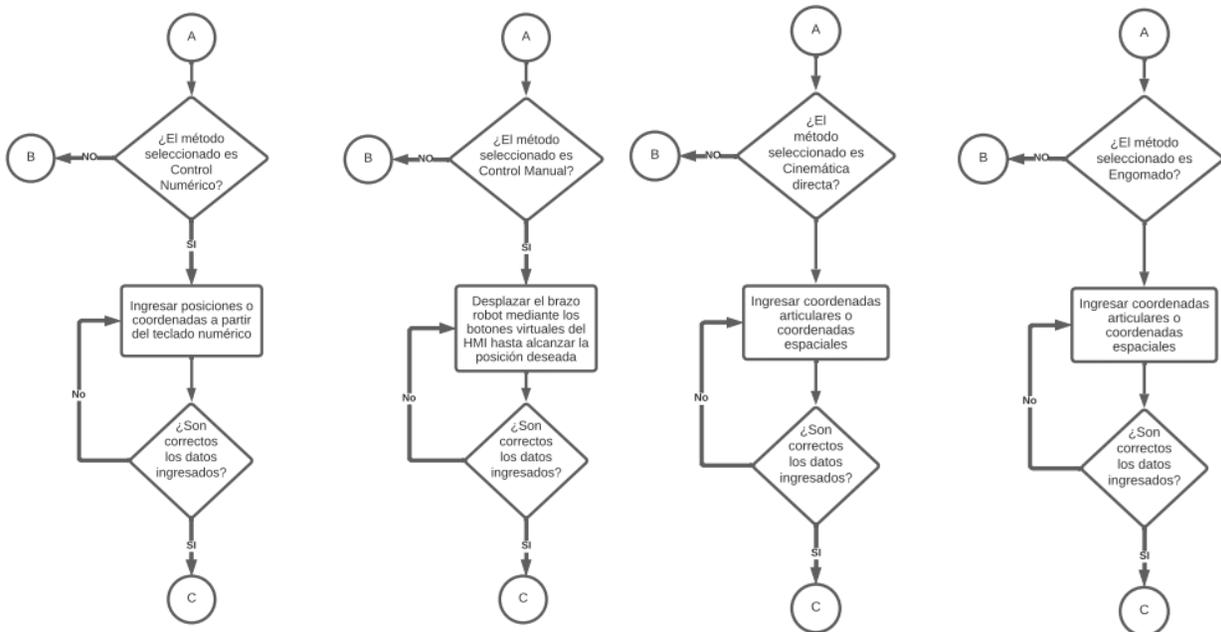


Figura 88. Diagrama de flujo del funcionamiento parte 2.

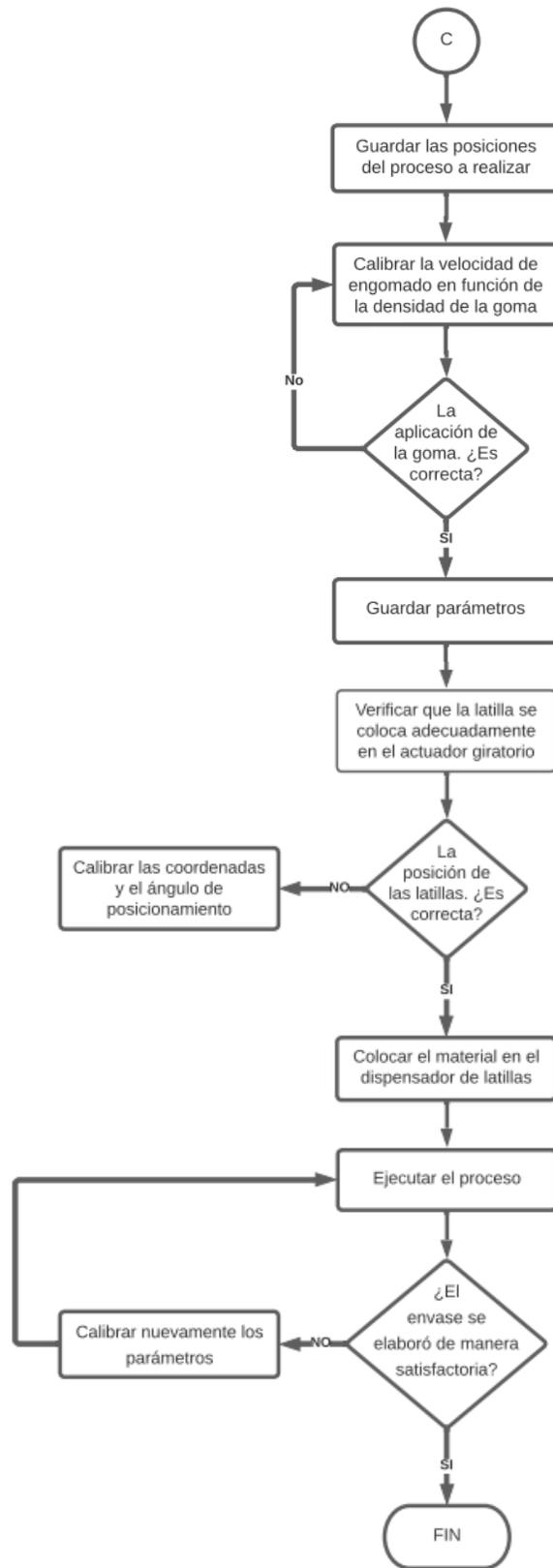


Figura 89. Diagrama de flujo del funcionamiento parte 3.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas una vez la máquina se ha sido construida, con el propósito de validar su funcionalidad y verificar que cumpla con los requerimientos de diseño. Se lleva a cabo principalmente pruebas de precisión desde el momento en que el brazo robot recoge las latillas de bambú hasta su posicionamiento en el actuador giratorio.

El objetivo de estas pruebas es evaluar la exactitud y el rendimiento del sistema en las distintas etapas del proceso, asegurando que se logre un posicionamiento preciso y consistente de las latillas. Los resultados de estas pruebas son fundamentales para validar el funcionamiento adecuado de la máquina y realizar ajustes o mejoras de ser necesario, con la finalidad de optimizar su rendimiento y garantizar la calidad del producto final.

En primer lugar, se llevó a cabo pruebas manuales, es decir, se elaboraron los envases de forma tradicional, con el propósito de realizar una comparación entre el tiempo de elaboración artesanal y el tiempo de producción utilizando la máquina.

4.1 Pruebas de elaboración artesanal

Durante el proceso de elaboración de los envases de bambú de forma tradicional, se pudo observar que la aplicación de la goma requiere de habilidad y experiencia para lograr una ejecución eficiente y minimizar el desperdicio de material. La velocidad de elaboración de los envases se ve afectado por varios factores, tales como el tamaño de la herramienta a utilizar para aplicar la goma, la cantidad de goma aplicada, la posición y destreza del personal, así como el uso de una base que permita dar soporte a las latillas y permita dar forma al envase final.

Una vez que se completa el proceso de engomado y posicionamiento de las latillas en el molde, se procede a colocar anillos, los cuales cumplen la función de ajustar, dar forma y proporcionar soporte al envase terminado. Además, es necesario dar golpes ligeros a las latillas para asegurar su nivelación y alineación uniforme.

El proceso antes mencionado se lo puede visualizar en la Figura 90 y se lo realiza entre aproximadamente los 8 y 10 minutos por lo que, si se toma el tiempo más pequeño, el tiempo total

para aplicar la goma, nivelar las latillas y colocar los anillos de sujeción en 10 envases es de 1 hora y 20 minutos.



Figura 90. Procedimiento para elaboración de envases de forma tradicional.

En la Tabla 25 se puede observar que el tiempo promedio requerido para aplicar la goma, nivelar las latillas y colocar los anillos de sujeción es de 10 minutos. De igual manera, el tiempo total para elaborar 10 envases es de 1 hora y 40 minutos.

Tabla 25: Tiempos empleados en la elaboración de envases de forma tradicional.

<i># Muestra</i>	<i>Hora de inicio engomado</i>	<i>Hora finalización engomado</i>	<i>Tiempo de anillar y retirar</i>	<i>Hora final</i>	<i>Tiempo total empleado en el proceso</i>
1	9:15:00	9:24:00	0:01:10	9:25:10	0:10:10
2	9:25:10	9:34:10	0:01:05	9:35:15	0:10:05
3	9:35:15	9:44:15	0:00:58	9:45:13	0:09:58
4	9:45:13	9:54:13	0:01:00	9:55:13	0:10:00
5	9:55:13	10:04:13	0:01:02	10:05:15	0:10:02
6	10:05:15	10:14:15	0:00:55	10:15:10	0:09:55
7	10:15:10	10:24:10	0:01:04	10:25:14	0:10:04
8	10:25:14	10:34:14	0:00:54	10:35:08	0:09:54
9	10:35:08	10:44:08	0:00:56	10:45:04	0:09:56
10	10:45:04	10:54:04	0:01:01	10:55:05	0:10:01
				<i>Total</i>	<i>1:40:05</i>

Es importante destacar que los datos de la Tabla 25 se adquirieron de manera experimental y no se tuvieron en cuenta tiempos de descanso ni los tiempos perdidos debido variables externas. Factores como el cansancio, la ergonomía, tareas repetitivas y las distracciones pueden incrementar el riesgo de errores humanos, lo que a su vez puede aumentar los tiempos de producción por envase.

4.2 Pruebas de trabajo sin carga

Al igual que en la sección 4.1, se lleva a cabo pruebas de la máquina en condiciones sin carga para identificar los tiempos requeridos para completar el proceso de manera ideal. A continuación, se presentan los tiempos de inicio y fin del primer y último envase por cada conjunto de 10 envases elaborados. La tabla completa con todos los datos se encuentra disponible en el Anexo C.

Velocidad de trabajo 230%.

Tabla 26: Tiempo de pruebas elaboradas sin carga (simuladas).

# Muestra	Hora de inicio engomado	Hora finalización engomado	Tiempo de anillar y retirar	Hora final	Tiempo total empleado en el proceso
1	10:05:00	10:11:00	0:00:00	10:11:00	0:06:00
10	10:55:00	11:01:00	0:00:00	11:01:00	0:06:00
11	11:04:00	11:09:00	0:00:00	11:09:00	0:05:00
20	11:52:00	11:57:00	0:00:00	11:57:00	0:05:00
21	11:48:00	11:53:00	0:00:00	11:53:00	0:05:00
30	12:36:00	12:41:00	0:00:00	12:41:00	0:05:00
31	2:00:00	2:05:00	0:00:00	2:05:00	0:05:00
40	2:45:00	2:50:00	0:00:00	2:50:00	0:05:00
41	3:00:00	3:05:00	0:00:00	3:05:00	0:05:00
50	3:45:00	3:50:00	0:00:00	3:50:00	0:05:00
				Total	0:52:00

Los datos registrados en la Tabla 26, corresponden a pruebas realizadas en condiciones ideales, es decir, donde la máquina opera a plena capacidad en conjunto al operador y sin contratiempos. Se observa que en la muestra 1 y 10 existe una variación en los tiempos, lo cual se debe a pequeñas discrepancias en el cronometraje inicial, con una pequeña variación en los segundos. Por tal motivo para las siguientes muestras, se aseguró un inicio preciso en la hora establecida. Según los datos

recopilados, se estima que la máquina puede elaborar 10 envases en aproximadamente 52 minutos, lo que representa un ahorro de tiempo significativo.

4.3 Pruebas de trabajo funcionales

En esta prueba en particular, se consideró la velocidad de aplicación de la goma por lo que se ajustaron algunos parámetros, lo que resultó en un aumento mínimo del tiempo necesario para realizar cada envase. Estas pruebas reflejan el tiempo real requerido para llevar a cabo el proceso de engomado y posicionamiento de las latillas de bambú.

Tabla 27: Tiempo de proceso reales.

# Muestra	Hora de inicio	Hora finalización engomado	Tiempo de anillar y retirar	Hora final	Tiempo total
1	14:20:00	14:25:34	0:01:06	14:26:40	0:06:40
2	14:26:40	14:32:14	0:01:12	14:33:26	0:06:46
3	14:33:26	14:39:00	0:00:56	14:39:56	0:06:30
4	14:39:56	14:45:30	0:00:53	14:46:23	0:06:27
5	14:46:23	14:51:57	0:01:30	14:53:27	0:07:04
6	14:53:27	14:59:01	0:01:18	15:00:19	0:06:52
7	15:00:19	15:05:53	0:01:16	15:07:09	0:06:50
8	15:07:09	15:12:43	0:00:54	15:13:37	0:06:28
9	15:13:37	15:19:11	0:01:02	15:20:13	0:06:36
10	15:20:13	15:25:47	0:00:57	15:26:44	0:06:31
				Total	1:06:44

Como se puede observar en la Tabla 27, el tiempo total requerido para la elaboración de 10 envases es de aproximadamente 1 hora y 7 minutos. Este tiempo aumenta debido a que se incluyen en el proceso tareas adicionales, como la corrección de posibles desajustes en caso de que las latillas no encajen bien en el actuador giratorio y el tiempo de anillado del envase. Estos contratiempos requieren que el operador realice ajustes y anille las latillas para que no se separen, lo que puede tardar entre 50 segundos y 1 minuto 30 segundos, dependiendo de su destreza. Sin embargo, en comparación con el método tradicional, se logra un ahorro de tiempo considerable.



Figura 91. Envases elaborados mediante la máquina.

La Tabla 28, presenta una comparativa entre el proceso para elaborar los envases de bambú de forma artesanal y mediante la máquina fabricada.

Tabla 28: Comparativa entre el tiempo de elaboración de envases.

Tiempo ocupado en el proceso de posicionamiento, engomado y anillado de las latillas para elaborar envases.	
Método tradicional	Mediante máquina y operador
1:40:05	1:06:44

Tras analizar los datos, se puede verificar que la máquina cumple con los parámetros necesarios para optimizar el tiempo de producción en el proceso de posicionamiento y engomado de latillas de bambú para la elaboración de envases. En comparación con el método tradicional, se requiere un tiempo de 1 horas con 40 minutos para elaborar 10 envases, el procedimiento realizado con la máquina construida toma aproximadamente 1 hora y 7 minutos. Esto representa un ahorro de tiempo significativo, siendo el método actual 1,31 veces más rápido que el tradicional. Estos resultados confirman la eficacia y viabilidad de la máquina en la mejora del proceso en la producción de los envases.

$$Relación\ de\ tiempo = \frac{Tiempo\ del\ método\ tradicional}{Tiempo\ del\ método\ actual} = \frac{1,40}{1,07} = 1,31 \quad (65)$$

4.4 Pruebas de precisión

Las pruebas de precisión fueron realizadas en conjunto con las pruebas de trabajo funcionales para evaluar la exactitud del posicionamiento. Para ello, se colocaron indicadores en todo el brazo robot como se muestra en la Figura 92, mismos que permiten visualizar que el brazo regrese a la misma posición después de culminar cada ciclo.

BB1) Precisión en la base

BB2) Precisión en la cintura

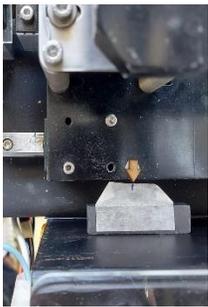
BB3) Precisión en el hombro

BB4) Precisión en motor del codo

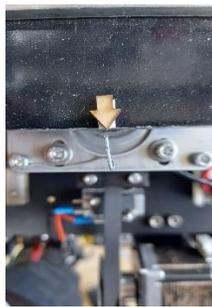
BB5) Precisión en polea de la muñeca

La Figura 92, muestra la precisión de los indicadores a las 3 muestra de fabricación de envases, lo que corresponde al posicionamiento de 57 latillas de bambú.

BB1)



BB2)



BB3)



BB4)



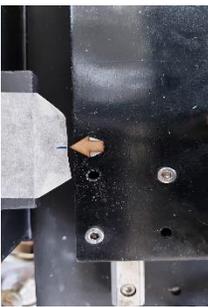
BB5)



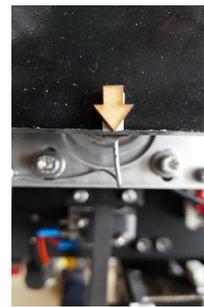
Figura 92. Precisión en los eslabones del brazo robot en la muestra 3.

La Figura 93, muestra la precisión de los indicadores a las 6 muestra de fabricación de envases, lo que corresponde al posicionamiento de 144 latillas de bambú.

BB1)



BB2)



BB3)



BB4)



BB5)



Figura 93. Precisión en los eslabones del brazo robot en la muestra 6.

La Figura 94, muestra la precisión de los indicadores a las 10 muestra de fabricación de envases, lo que corresponde al posicionamiento de 190 latillas de bambú.

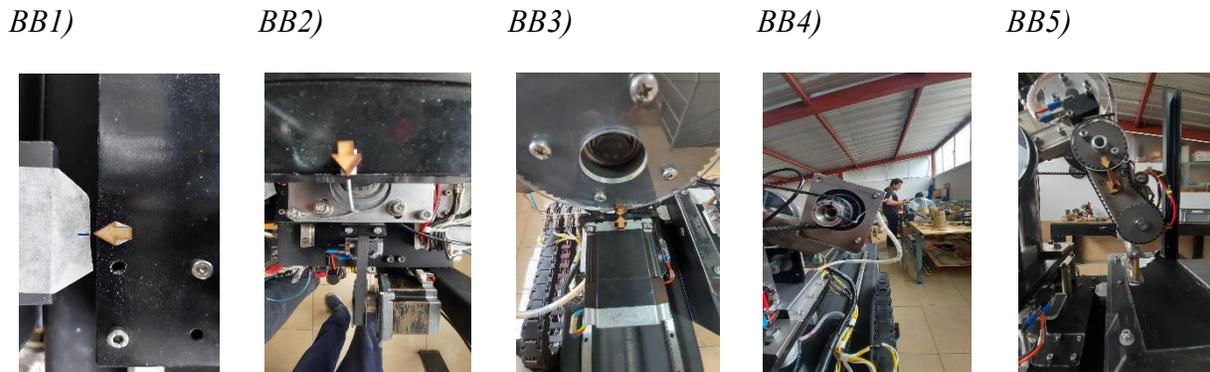


Figura 94. Precisión en los eslabones del brazo robot en la muestra 10.

Como se puede observar en la Figura 92, Figura 93 y Figura 94, se muestran los indicadores a las 3, 6 y 10 muestras respectivamente. Durante las pruebas, se observó que no hubo cambios o desplazamientos incorrectos en las posiciones de los indicadores, por lo que se concluye que la máquina es precisa y cumple con los estándares de repetibilidad sin presentar fallos.

Es importante mencionar que estas pruebas también se llevaron a cabo durante el análisis sin carga, lo cual permitió obtener un mayor número de muestras y concluir que la máquina es precisa y no presenta fallos. Estas pruebas adicionales respaldan la confiabilidad y precisión de la máquina en diferentes escenarios y condiciones de trabajo.

La Figura 95, muestra el diagrama de conexión y en la sección de anexos, se puede observar el diagrama de conexión eléctrica “plano 10.1522148.1604128.01.00.00”.

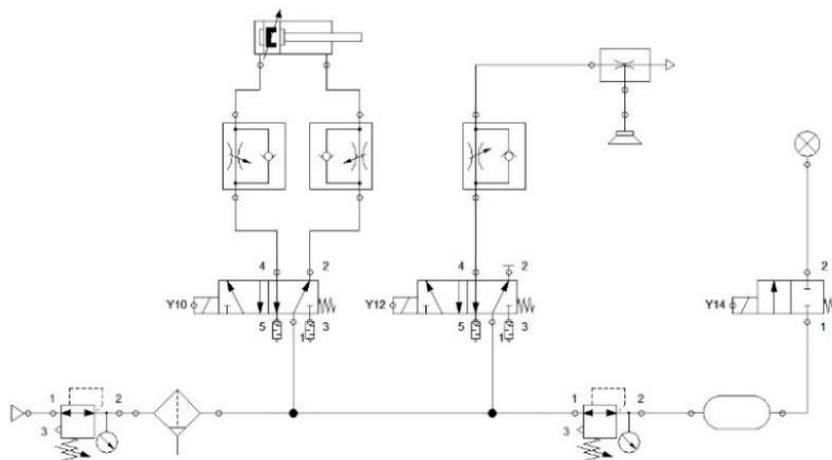


Figura 95. Diagrama de conexión neumática.

4.5 Costos

En este apartado, se incluyen los costos de los recursos materiales y financieros utilizados en la construcción.

Tabla 29: Suministros ferreteros

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Perfiles cuadrados hueco 40 x 40 x 6000	1	\$18,00	\$18,00
Bloque deslizante	4	\$24,00	\$96,00
Guías lineales 2000 mm	1	\$45,00	\$45,00
Plancha A36 32 x 38 x 5	1	\$12,00	\$12,00
Placa aluminio 16 x 22 x 4	1	\$6,00	\$6,00
Placa A36 33 x 90 x 6	1	\$35,00	\$35,00
Tubo de acero inoxidable 120 x 115 x 3,5	1	\$12,00	\$12,00
Eje de acero diámetro 45	1	\$8,00	\$8,00
Plancha de acrílico 60 x 200 x 4	1	\$70,00	\$70,00
Caucho de silicona líquida	1	\$26,00	\$26,00
Poleas dentadas 15 dientes	7	\$2,50	\$17,50
Polea dentada 60 dientes	4	\$2,50	\$10,00
Poleas dentadas 30 dientes	2	\$5,00	\$10,00
Pernos M3	50	\$0,07	\$3,50
Pernos M4	200	\$0,09	\$18,00
Pernos M5	200	\$0,11	\$22,00
Pernos M6	100	\$0,15	\$15,00
Tornillo M3	50	\$0,07	\$3,50
Tornillo M4	200	\$0,09	\$18,00
Tornillo M5	200	\$0,11	\$22,00
Tornillo M6	100	\$0,15	\$15,00
Retazos	2	\$7,59	\$15,18
Duraluminio Retazos	2	\$25,00	\$50,00
Pieza fundida	2	\$80,00	\$160,00
Total			\$707,68

Tabla 30: Material eléctrico.

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
PLC FP-XH	1	\$779,79	\$779,79
Fuente alimentación 24V a 20A	1	\$40,00	\$40,00
Fuente alimentación 24V a 5A	1	\$96,00	\$96,00
Motor paso Nema 23 (0,8 Nm)	2	\$60,00	\$120,00
Motor paso Nema 23 (1,26 Nm)	3	\$40,00	\$120,00
Motor paso Nema 17 (0,5 Nm) con caja reductora 5:1	2	\$47,00	\$94,00
Caja Reductora 5:1 (Nema 23)	1	\$97,00	\$97,00
Driver motor paso DM556	7	\$60,00	\$420,00
Electroválvula Monoestable 5/2	2	\$184,00	\$368,00
Sensor infrarrojo	1	\$50,00	\$50,00
Finales de carrera	6	\$1,00	\$6,00
Alambre calibre N18	4	\$10,53	\$42,12
HMI GTWIN 707	1	\$300,00	\$300,00
Porta fusibles	3	\$5,00	\$15,00
Breakers	2	\$5,00	\$10,00
Paro emergencia	1	\$5,00	\$5,00
Botones Industriales	3	\$3,00	\$9,00
Borneras industriales	50	\$1,00	\$50,00
Gabinete metálico 400*300*200	1	37,85	\$37,85
Gabinete metálico 800*600*250	1	159,46	\$159,46
Conectores	4	\$2,50	\$10,00
Total			\$2.829,22

Tabla 31: Costos de construcción.

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Coste total de elaboración de la máquina	531	\$3,00	\$1.593,00
Total			\$1.593,00

Tabla 32: Material neumático.

Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Filtro Regulador 1/4	1	\$45,00	\$45,00
Manómetro estándar 1/8	1	\$7,50	\$7,50
Regulador de presión 1/4	1	\$39,00	\$39,00
Racor Codo 1/4 * 6mm	3	\$2,64	\$7,92
Racor Recto 1/4 * 6mm	2	\$2,32	\$4,64
Silenciador Bronce Sinterizado 1/8	6	\$1,59	\$9,54
Tubo Poliuretano 4mm	10	\$0,50	\$5,00
pistón Festo D16 C100	1	\$85,00	\$85,00
Total			\$203,60

Tabla 33: Costo total.

Designación	Precio Total
Suministro ferretero	\$707,68
Material eléctrico	\$2.829,22
Material neumático	\$203,60
Costos de construcción	\$1.593,00
Total	\$5.333,50

La empresa BHLEM-PAC, ha asumido el costo de financiamiento de la construcción de la máquina. Los costos mencionados representan un aproximado del valor de fabricación del proyecto, puesto que gran parte de los materiales y elementos utilizados, así como la maquinaria para la manufactura de las piezas necesarias, ya estaban disponibles. Esto ha permitido reducir significativamente el costo real de fabricación hasta un total de \$3800.

CONCLUSIONES

A través de la favorable consecución del diseño y construcción de este proyecto, se ha logrado desarrollar un mecanismo eficiente y preciso que permite automatizar uno de los procesos de fabricación de envases utilizando latillas de bambú. El sistema implementado proporciona un método optimizado para posicionar y aplicar la goma en las latillas. Además, la integración del brazo robótico y el actuador giratorio permite un control preciso y versátil de las operaciones, lo que ha mejorado considerablemente la velocidad y la precisión del proceso.

Este proyecto se ha enfocado en satisfacer las necesidades y requerimientos relacionados con agilizar el proceso de engomado y posicionamiento de latillas de guadua para elaborar envases. A través de análisis, se definió el tipo de máquina a construir, considerando las dimensiones de prototipado y materiales disponibles que garanticen una larga vida útil y resistencia ante los factores del entorno laboral. La implementación de esta máquina ha demostrado ser una solución efectiva para optimizar y mejorar el proceso, puesto que ha permitido reducir parcialmente los riesgos laborales asociados a las tareas repetitivas, permitiendo reorganizar al personal de trabajo a otras áreas de la empresa.

Al analizar los datos obtenidos, se puede verificar que la máquina desarrollada cumple con los criterios necesarios para optimizar el tiempo en el proceso de posicionamiento y engomado de latillas, puesto que, elaborar 10 envases de forma tradicional conlleva un tiempo de 1 hora y 40 minutos mientras que elaborar la misma cantidad mediante la máquina robotizada conlleva un tiempo de 1 hora 7 minutos, lo que resulta en 1,31 veces más rápido que método tradicional. Estos resultados confirman la eficacia y viabilidad de la máquina en la mejora del proceso en la producción de los envases.

Ya que la máquina utiliza parámetros numéricos, los procesos son repetitivos y precisos. A diferencia del engomado tradicional, la goma se reparte de manera uniforme a través de la latilla, evitando desperdicios innecesarios. Es importante mencionar que la goma no puede esparcirse internamente en el recipiente ya que, lijarse resulta complicado y conlleva a costos extra de producción. Durante el método tradicional, es posible que la goma se riegue en el interior, por el exceso en la aplicación de esta, el uso de la máquina reduce al mínimo este tipo de fallas al ser totalmente automatizada, los parámetros pueden ser calibrados para evitar este tipo de errores.

En términos del acabado del producto, tanto el método tradicional como el elaborado a partir de la máquina, son similares y no influyen de manera significativa en el producto final, considerando que, es necesario realizar un proceso posterior para obtener una superficie lisa y uniforme, lo importante es evitar al máximo que el adhesivo sea aplicado en exceso y que este se riegue en el interior del envase, lo que crea grumos y superficies irregulares que afecten el atractivo del envase final. Por tal motivo, la implementación de este mecanismo semiautomático resulta en una excelente opción para realizar este tipo de procesos, ya que los parámetros pueden ser modificados dependiendo del trabajo a realizar y por ende se obtiene una alta precisión.

En base a los análisis, se establece que el mecanismo puede trabajar por largos periodos de tiempo, sin embargo, es necesario que un operador se encuentre disponible, puesto que este se encarga de colocar los anillos metálicos para la sujeción del envase, además de cargar continuamente el dispensador de latillas.

La estructura mecánica del proyecto, en combinación con la diversidad de movimientos disponibles dentro del rango de trabajo y el número de entradas y salidas disponibles en el PLC, permite al brazo robótico definir y programar una amplia variedad de funciones y tareas. Además, es posible incorporar más sensores y actuadores en las salidas y entradas del PLC, lo que permite adaptar la máquina a múltiples entornos de trabajo en caso de ser necesario.

El brazo robótico realiza una secuencia de movimientos repetitivos, una vez encerrado la posición de la ventosa, el brazo se desplazará desde el punto de inicio y regresará a este mismo punto por cada secuencia, la pérdida de pasos de los motores supone errores en la trayectoria de sujeción y engomado de las latillas. Durante el proceso de las pruebas de funcionamiento se ha realizado aproximadamente 950 ciclos de funcionamiento, equivalente a la elaboración de 50 envases, durante el análisis de posicionamiento no se percibe desplazamiento en los motores.

RECOMENDACIONES

Puesto que varios de los elementos utilizados en la construcción de la máquina son componentes que la empresa ya disponía, mejorar la calidad de estos permitiría trabajar a una velocidad mayor.

Es importante evitar presionar el botón de “home” y el de posicionamiento cuando todos los finales de carrera se encuentren activos, ya que esto podría resultar en colisiones y daños en la máquina.

No se aconseja extraer las bandas del motor 2 ni la pinza del motor, en caso de realizarlo y no colocarlas en la posición anterior, la sincronización de estos se verá afectada y requerirá una calibración.

Es recomendable invertir en componentes de calidad, puesto que muchos de los elementos electrónicos presentan altos niveles de ruido como son los drivers que controlan los motores pasos. El controlador TB6660 presenta altos niveles de interferencia, lo que ocasiona que los motores pierdan pasos y por ende el brazo robot no sea preciso por lo que se recomienda utilizar DM556.

Es necesario realizar pruebas de funcionamiento para comprobar los rangos de funcionamiento requeridos para el trabajo de los actuadores y sensores.

Uno de los parámetros dentro de la pantalla de posicionamiento, permite aumentar o disminuir la velocidad de procesamiento de latillas, se debe tener en consideración que, al modificar el parámetro de velocidad, también es necesario modificar los parámetros de tiempo de engomado tanto para activar como para desactivar la válvula.

REFERENCIAS

- [1] D. Azcurra, P. Santos, D. Giordano, V. Arboleya, y H. García-Martínez, «Arquitecturas de sistemas embebidos utilizables en robótica autónoma», en *XIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2011, pp. 702-706. Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19575>
- [2] C. Balarezo, M. D'Alessio, G. Lisung, y J. Ojeda, «Plan Estratégico de la Industria del Envase», Pontificia Universidad Católica del Perú, Santiago de Surco, 2012. Accedido: 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4558/BALAREZO_D_ALESSIO_LISUNG_OJEDA_ENVASE.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] Roberto. Sanchis Llopis, C. Vicente. Ariño Latorre, y J. Ariel. Romero Pérez, *Automatización industrial*, Primera. Publicaciones de la Universidad Jaume I, Servicios de Comunicación & Publicaciones, 2010.
- [4] A. Ollero, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [5] J. M. Trejo Peraza y R. M. Hernández Ortiz, «Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot con Tres Grados de Libertad para Posicionamiento de Objetos», Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, ene. 2018.
- [6] J. J. Craig, *Introduction to Robotics*, Tercera. 2006. Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com.ec/books/edition/Introduction_to_Robotics/hRzOp_qdxG8C?hl=es&gbpv=1
- [7] I. Salazar, «Los robots y la inteligencia Artificial. Nuevos retos del periodismo», *Doxa Comunicación*, pp. 295-315, diciembre de 2018. Accedido: 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10637/9889com.n27a15>
- [8] R. Iñigo Madrigal y E. Vidal Idiarte, *Robots industriales manipuladores*, vol. 130. 2002. Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=zhG5Qhf2_LMC&oi=fnd&pg=PA1&dq=R.+I%C3%B1igo+Madrigal+y+E.+Vidal+Idiarte,+Robots+industriales+manipuladore

s,+Barcelona:+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Catalu%C3%B1a,+200&ots=i48Rn0
SCDH&sig=XP9gb2ufi1gDWNdbnouJgfyNVJo#v=onepage&q&f=false

- [9] J. C. León Pérez, «Impacto de las tecnologías disruptivas en la percepción remota: big data, internet de las cosas e inteligencia artificial», *Revista UD y la Geomática*, vol. 14, pp. 54-61, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/UDGeo/index>
- [10] B. Villota, H. Ordoñez, y K. Forero, «Empaques y Envases Biodegradables con Conciencia Ambiental en el Mercado de EE. UU», Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, Colombia, 2021. Accedido: 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10823/2903>
- [11] Barry. A. Morris, *The Science and Technology of Flexible Packaging: Multilayer Films from Resin and Process to End Use*, Second. 2022. Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=06RXEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Packaging+Science+and+Technology:+A+Comprehensive+Handbook%22&ots=N1pI-aANZt&sig=rTi8r15HksVD2RT0Zgpp-es4G0Y#v=onepage&q=Packaging%20Science%20and%20Technology%3A%20A%20Comprehensive%20Handbook%22&f=false>
- [12] Fernando. Trenor *et al.*, «La Ciencia en el Desarrollo Tecnológico de Envases Sostenibles», 2014.
- [13] J. H. Han, Y. Zhang, y R. Buffo, *Surface chemistry of food, packaging and biopolymer materials. In Innovations in food packaging*. 2005. doi: 10.1016/B978-012311632-1/50036-X.
- [14] M. E. N. Dávila Moreno y S. I. Brugger Jakob, «El bambú», Accedido: 11 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54567556/libro_El_bambu-libre.pdf?1506637018=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEl_bambu_especie_multiproposito_para_el.pdf&Expires=1686801902&Signature=bhWtCDC2tVi~PdoFrQG9lc~ltUNoEgp22TWixIP2hEdqOLRjpDFTLzmE5xsLKAQmqSWQRVe15shv4meggqXqxvSYzd49rlZ071VNQ~ZYgwM3

nvXhXX1eJ5z-9DVc9D6lD8yCdpY3UwozSL0lxNeNy-
snmnMCbt1jvixvxoQzvpvIu6KYHV4gETsLo~U61ZAV5M9gpRgcI1G1O-
hYwalLs2kZB~TIFgr-MkGunIaUUX0MwhaW24Urtzc-tK8O1fxx2jF1~hOpE-K9aT-
DZflh86Tg0PDiCmPD1DvcjQ2k-
9BfJCqT~DsI1LfCsXgqjMgs6zVmZdb26ZelmliRnsIdzcw__&Key-Pair-
Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- [15] B.-Z. Zhou, M.-Y. Fu, J.-Z. Xie, X.-S. Yang, y Z.-C. Li, «Ecological functions of bamboo forest: Research and Application», *J For Res (Harbin)*, vol. 16, N.º 2, pp. 143-147, 2005, doi: 10.1007/BF0285790.
- [16] R. Cabana Álvarez, P. P. Chicata Lazo, B. B. García Alcázar, L. K. Mattos Borja, y L. D. Ramon Gómez, «Producción y comercialización de tomatodo de bambú», 2020. Accedido: 13 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14005/10206>
- [17] C. Arero. Castaño, J. Manuel. Zapata, Anamar. Casallas Bonilla, R. José. Núñez, y Marielvys. Villalba, «Envases de bambú producción y consumo responsable», 2021, Accedido: 12 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40439>
- [18] A. E. Flores Pérez, M. S. Lama Villar, y P. E. Paredes Bustamante, «Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta productora de envases a base de fibra de bambú (*Guadua angustifolia*)», 2021. Accedido: 9 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12724/14467>
- [19] F. Liesa y L. Bilurbina Alter, *Adhesivos Industriales*, Ilustrada., vol. 39 Productica Series. 1990.
- [20] M. Hernández Ruiz y A. Vergara Narváez, «Elaboración y evaluación de un adhesivo a partir del almidón de yuca nativo (*Manihot sculenta crantz*), Variedad M-Tai, utilizando hidróxido de sodio como agente hidrolizante.», *Procesos Agroindustriales y Desarrollo sostenible (PADES)*, Universidad de Sucre, Sucre, 2008. Accedido: 7 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unisucree.edu.co/bitstream/handle/001/255/668.38H557.pdf?sequence=2>

- [21] A. P. Padilla Caluña, «Diseño de un reactor para la fabricación de resinas vinílicas utilizadas en la elaboración de colas blancas en la empresa pintuglobal del cantón mocha», Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2017. Accedido: 7 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6594>
- [22] L. Corona, G. Abarca, y J. Mares, *Sensores y Actuadores*. 2014.
- [23] Sorotec, «Driver digital modelo: DM556». [En línea]. Disponible en: <http://www.sorotec.de>
- [24] M. Jennifer, «UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA», Ambato, 2020.
- [25] Aceros Arequipa, «Canales U CALIDAD: ASTM A36 CALIDAD: ASTM A36/A572-G50». [En línea]. Disponible en: www.acerosarequipa.com
- [26] G. Camaleón Creativos, «Catálogo Sabater-Fundimol».
- [27] ACP Materials S.L., «Ficha Técnica Aluminio AW6061_ACP». Accedido: 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: http://acpmaterials.es/images/valenciana/fichas_tecnicas/aluminios/Ficha%20Tecnica%20Aluminio%20AW6061_ACP.pdf
- [28] BOHMAN, «ACEROS Y MATERIALES». Accedido: 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://online.fliphtml5.com/dljug/rdmz/#p=25>
- [29] Roque. J. Saltarén Pazmiño, José. M. Azorín Poveda, M. Almonacid Kroeger, y José. M. Sabater Navarro, *Prácticas de robótica utilizando Matlab*. 2013.
- [30] A. Barrientos, L. F. Peñín, y C. Balaguer, *Fundamentos de robótica*, 2.^a ed. McGraw-Hill, 2007.
- [31] R. G. Buyans y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Décima. 2015.
- [32] INTERMEC. Ltda, «Transmisiones por Correas Dentadas de Tiempo y Sincrónicas». [En línea]. Disponible en: www.intermec.com.co
- [33] Perfiles CNC, «Guías de aluminio y accesorios para CNC», 2022. Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://perfilescnc.com/>
- [34] «THK Guías de Movimiento Lineal», México, 2018.
- [35] «DIPAC Productos de acero», 2020.

- [36] SKF, «Calculadora para selección de rodamientos». <https://www.skf.com/mx/support/engineering-tools/bearing-select> (accedido 8 de julio de 2023).
- [37] SKF, «63000-2RS1». Accedido: 11 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-63000-2RS1>
- [38] SKF, «6001-RSL». Accedido: 11 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6001-RSL>
- [39] SKF, «W 61902 R Rodamiento rígido de bolas». Accedido: 11 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%2061902%20R>
- [40] Panasonic, «Controlador programable serie FP-XH».
- [41] FESTO, «ISO cylinder DSNU-16-100-PPS-A». Accedido: 18 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/559267/>