

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal II

**“Sistema robótico de un rover de exploración para
la obtención y análisis de muestras geológicas”**

*Que para obtener el título de
“Ingeniero en Mecatrónica”*

Presentan:

Barrera Rosales Eduardo Salvador

Millán López José Alejandro

Serna Mora Oscar Manuel

Asesores:

Dr. Flores Hernández Diego Alonso

Dr. Luviano Juárez Alberto

Dr. Sossa Azuela Juan Humberto

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal II

**“Sistema robótico de un rover de exploración para
la obtención y análisis de muestras geológicas”**

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presenta:

Barrera Rosales Eduardo
Salvador

Millán López José Alejandro

Serna Mora Oscar Manuel

Asesores:

Dr. Flores Hernández Diego
Alonso

Dr. Luviano Juárez Alberto

Dr. Sossa Azuela Juan
Humberto

Presidente del Jurado

Profesor titular

Contenido

Resumen	xiii
Nomenclatura y simbología	xv
Introducción	xix
1. Marco de referencia	1
1.1. Marco teórico	1
1.1.1. Descripción de forma de partículas	1
1.1.2. Diseño de componentes de máquinas	1
1.1.3. Cinemática de robots	5
1.1.4. Convertidores CD-CD	9
1.1.5. Selección de cables	9
1.1.6. Visión artificial	10
1.2. Marco procedimental	11

1.2.1. Metodología mecatrónica	11
2. Diseño	13
2.1. Diseño del sistema	13
2.1.1. Necesidades y requerimientos	13
2.1.2. Arquitectura funcional	15
2.1.3. Arquitectura física	22
2.1.4. Concepto solución	26
2.1.5. Concepto Final	28
2.2. Diseño de dominio específico	31
2.2.1. Sistema robótico (S1)	31
2.2.2. Sistema de Información (S2)	70
2.2.3. Sistema energético (S3)	73
2.2.4. Sistema del laboratorio (S4)	76
2.2.5. Sistema estructural (S5)	79
2.3. Integración del sistema mecatrónico	81
2.3.1. Integración de hardware	81
2.3.2. Integración de software	92
3. Implementación	99
3.1. S5. Estructural	99
3.2. S1. Robótico	100
3.2.1. M1. Manipulador	100
3.2.2. M2. Efecto final	105
3.3. S4. Laboratorio	109
3.4. S3. Energético	109
3.5. S2. Información	109
3.5.1. M3. Percepción	109
3.5.2. M4. Comunicación	113
3.5.3. M5. Procesamiento	113
3.6. Integración	115
4. Análisis de resultados	119
4.1. Análisis de ingeniería	119

4.2. Análisis de costos	122
Conclusiones	123
4.3. Trabajo a futuro	123
Referencias	127
Apéndices	131
Apéndice 1: Árboles de decisión	133
A. 1. Motores de CD	133
A. 2. Servomotores	135
A. 3. Fuentes de alimentación	137
A. 4. Cámaras	139
Apéndice 2: Simulación cinemática del robot	141
B. 1. Código de simulación de cinemática de robots utilizando el toolbox “Robotics” para MATLAB ®	141
Apéndice 3: Planos normalizados	143
Apéndice 4: Herramienta de selección multicriterio	153
D. 1. Criterios de selección	153
D. 2. Selección de concepto mediante AHP	155
Apéndice 5: Códigos implementados	159
E. 1. Código para la Interfaz Gráfica de Usuario	159
E. 2. Código implementado en la tarjeta Núcleo	163
Anexos	173
Anexo 1: Hojas de datos	175
A. 1. Motor Planetario goBilda 5202 YellowJacket, 30RPM, 3470oz-in	176
A. 2. Servomotor Ez Robot 0007	178
A. 3. Polea 15D	179
A. 4. Polea A 6A 3-15DF03716	180

A. 5. Piezas adquiridas para ensamblar el manipulador	182
A. 6. Piezas adquiridas para ensamblar la muñeca esférica	186
A. 7. Buje para el servo del efecto	189
A. 8. Rodamiento axial de agujas AXK 4565	190
A. 9. Rodamiento radial de rodillos NU 303	192
A. 10Rodamiento radial de bolas DW ER1212 2ZS	195
A. 11Sensor de temperatura y humedad DHT11	198
A. 12Núcleo STM32F446RE	200
A. 13Fuente de alimentación TDK-Lambda GWS250	202
A. 14Regulador DFR0205	205
A. 15S9V11F3S5	208
A. 16Driver MDD10A	210
A. 17Driver MD20A	215
Anexo 2 (Anexo2)	219
Anexo 3(Anexo 3)	221

Índice de figuras

1. Rover soviético Lunokhod 1[1]	xx
2. Rover Opportunity, Spirit y Curiosity[2]	xxi
1.1. Cuadro cualitativo para determinar visualmente la forma de una partícula	2
1.2. Modelo V como metodología para el diseño mecatrónico(VDI 2206)	12
2.1. Desglose gráfico de funciones a través de un modelo FBS	17
2.2. Modelo IDEF0 del sistema	19
2.3. Modelo mejorado del diagrama a bloques de flujo funcional	21
2.4. Arquitectura física que muestra la interacción de los sistemas y módulos . .	25
2.5. Conceptos solución	27
2.6. AHP a) Jerarquía de criterios; b) Desempeño general de los conceptos . .	28
2.7. Modelo tridimensional del concepto mejorado	30
2.8. Alcance máximo del sistema	31
2.9. Rango de materiales elegibles para el eslabón	34
2.10. Modelos CAD de los eslabones	35
2.11. Cargas aplicadas al sistema	35
2.12. Cargas aplicadas a los eslabones.	36
2.13. Estudios de resistencia	37
2.14. Diagramas de cargas aplicadas a los motores.	37

2.15. Vista de sección del ocioso con dientes	41
2.16. Diagramas de cargas del eje 1	42
2.17. Plano frontal de cargas del eje 1	42
2.18. Plano superior de cargas del eje 1	43
2.19. Diagramas de cargas del eje 2	45
2.20. Plano frontal de cargas del eje 2	46
2.21. Plano superior de cargas del eje 2	47
2.22. Diagrama de cargas para el eje del primer GDL	48
2.23. Modelo CAD de la plataforma giratoria	50
2.24. Vistas de referencia para la plataforma giratoria	51
2.25. Piezas de la base fija	51
2.26. Analisis de elemento finito de la plataforma	51
2.27. Análisis de elemento finito del cilindro de la base	52
2.28. Análisis de elemento finito de la base fija ensamblada	53
2.29. Vistas de la base del robot	53
2.30. Primer grado de libertad de la muñeca esférica	54
2.31. Segundo y tercer grado de libertad de la muñeca esférica	55
2.32. Modelo CAD de la muñeca esférica	55
2.33. Reacciones máximas en las juntas de la muñeca	56
2.34. Elementos del mecanismo del gripper[3]	57
2.35. Secuencia de movimientos del mecanismo del gripper[3]	58
2.36. Gripper OPEN SOURCE publicado en IEEE[3]	58
2.37. Diagrama simplificado de un dedo y la muestra objetivo (5[cm])	58
2.38. Modelo CAD del efecto final	59
2.39. Ensamble de sensor de presión en la falange del efecto	60
2.40. Efecto final	60
2.41. Análisis geométrico del agarre del efecto con distintos diámetros de muestra	61
2.42. Asignación de los marcos de referencia a las articulaciones del robot	62
2.43. Modelo tridimensional del sistema robótico desarrollado en el toolbox Robotics de Peter Corke para MATLAB®	64
2.44. Proyecciones del centro de la muñeca en distintos planos	64
2.45. Diagrama de comunicación entre módulos	72
2.46. Elementos básicos de la interfaz de usuario	73

2.47. Familia de procesadores ARM, ARM	74
2.48. Extracto de la guía de selección para calibre de cables[4]	76
2.49. Piezas de laboratorio	78
2.50. Laboratorio	80
2.51. Análisis dinámico de impacto de la muestra sobre la superficie de medición del laboratorio	80
2.52. Estructura del banco de pruebas	80
2.53. Integración del manipulador a través de la muñeca	82
2.54. Integración del sistema robótico con el sistema estructural	82
2.55. Análisis de elemento finito de la estructura	83
2.56. Espacio de trabajo del robot	84
2.57. Robot en reposo	84
2.58. Integración del laboratorio con el sistema estructural	85
2.59. Integración del sistema energético	86
2.60. Sensores de temperatura y humedad montados en la estructura (Encerrados en círculos)	87
2.61. Cámaras montadas en la estructura	87
2.62. Conexión de los periféricos al controlador	89
2.63. Diseño del circuito del sistema	90
2.64. Ensamblaje de PCB con microcontrolador y soporte del sistema de información	91
2.65. Placas colocadas en la estructura	91
2.66. Render del sistema completo	93
2.67. Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por la PC	94
2.68. Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por el microcontrolador	96
3.1. Estructura construida	100
3.2. Base del manipulador	101
3.3. Ejes desbastados	101
3.4. Base giratoria con motores	102
3.5. Rediseño del ocioso dentado	103
3.6. Base del manipulador	103
3.7. Modelos CAD de los eslabones y eslabones construidos	104
3.8. Análisis de resistencia de eslabones de acrílico	104
3.9. Componentes impresos de la muñeca esférica	106

3.10. Efector final impreso	107
3.11. Comparación del modelo de robot con la implementación	108
3.12. Configuraciones clave del robot	108
3.13.	110
3.14. Vistas del sistema de laboratorio	110
3.15. Distribución del sistema energético	111
3.16. Kinect, fabricado por Microsoft®	112
3.17. Interfaz Gráfica de Usuario	113
3.18. Pines utilizados en la núcleo STM32F446RE	115
3.19. Diseño implementado del circuito del sistema	116
3.20. PCB construido	116
3.21. Posición auxiliar del manipulador	118
3.22. Sistema robótico completo	118

Índice de Tablas

1. Antecedentes	XXIV
1.1. Guía de selección de reguladores de tensión	10
2.1. Necesidades que el sistema debe cumplir	14
2.2. Requerimientos técnicos del sistema	14
2.3. Matriz de trazabilidad para la validación de requerimientos respecto a necesidades	16
2.4. Matriz de trazabilidad para la validación de funciones respecto a requerimientos	18
2.5. Matriz de trazabilidad para la validación de módulos respecto a funciones .	23
2.6. Tabla de comparación de características contrarias para el mejoramiento del concepto elegido	29
2.7. Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 T6	33
2.8. Características de las bandas seleccionadas	40
2.9. Características de las poleas seleccionadas	41
2.10. Masas de los elementos del brazo robótico	49
2.11. Parámetros de Denavit-Hartenberg	61
2.12. Requerimientos de comunicación	71
2.13. Características de los procesadores ARM, STM	74

2.14. Consumo energético de los componentes	75
2.15. Nomenclatura de sistemas y módulos	81
2.16. Conexiones de los periféricos al controlador	88
2.17. Estimación de costos	98
3.1. Configuraciones clave del robot	109

Resumen

Abstract- Geologic data acquisition of remote solar system bodies, is only feasible by means of robots, which are tested in scenarios that recreate conditions in which they want to be operated. To achieve a soil analysis, tests require *in situ* samples to be taken. Usually, exploration is carried out by *rover*-type mobile robots, which besides the motion system, consist of analytical instruments and end effectors to obtain the required samples. Due to the sample acquisition is already a complex problem, in this document the design of a mechatronic system is developed, which by means of a 6 degrees-of-freedom manipulator and an 3 finger gripper-like end effector, picks a sample, identified by computer vision, from the ground and places it in a specified place for its analysis, and sends the result to a computer for its display.

Resumen- La obtención de datos geológicos de cuerpos distantes del sistema solar, sólo es viable mediante robots, los cuales son probados en escenarios que recrean condiciones en las que quieren ser operados. Es de gran interés científico el análisis de terreno, para lo cual se pueden realizar pruebas que requieren la obtención de muestras *in situ*. Generalmente, la exploración se lleva a cabo mediante robots móviles de tipo *rover*, los cuales incluyen además del sistema de locomoción, instrumental de análisis y efectores para obtener las muestras de interés. Dado que la obtención de la muestra presenta un problema complejo, en este documento se desarrolla el diseño de un sistema mecatrónico que mediante un manipulador de 6 grados de libertad y un efecto de tipo gripper de 3 dedos, recoja una muestra del suelo identificada mediante visión por computador y la ubique en un lugar específico para su análisis, enviando el resultado obtenido a un ordenador para su visualización.

Palabras Clave: Sistema robótico, exploración, análisis de muestras, brazo antropomórfico, *rover*.

Nomenclatura y simbología

Nomenclatura

<i>ASTM</i>	American Society of Testing Materials (Sociedad Americana de Materiales de Prueba)
<i>AWG</i>	American Wire Gauges (Calibres de Alambres Americanos)
<i>CD</i>	Corriente Directa
<i>eFFBD</i>	enhanced Function Flow Block Diagram (Diagrama a Bloques Mejorado del flujo de funciones)
<i>FBS</i>	Functional Breakdown Structure (Estructura de descomposición funcional)
<i>GDL</i>	Grados de Libertad
<i>IDEF0</i>	Integration Definition for Function Modeling (Definición de integración para modelado de funciones)
<i>IP</i>	International Protection (Protección Internacional)
<i>M1</i>	Módulo de manipulador
<i>M2</i>	Módulo de efecto final
<i>M3</i>	Módulo de percepción
<i>M4</i>	Módulo de comunicación
<i>M5</i>	Módulo de procesamiento
<i>M6</i>	Módulo de obtención de datos de la muestra
<i>M7</i>	Módulo de desechador
<i>S1</i>	Sistema robótico
<i>S2</i>	Sistema de información
<i>S3</i>	Sistema de administración energética
<i>S4</i>	Sistema de laboratorio
<i>S5</i>	Sistema estructural
<i>VDI</i>	Verein Deutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros Alemanes)
<i>3D</i>	Tridimensional
<i>ABS</i>	Acrylonitrile butadiene styrene (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
<i>ADC</i>	Analogic to Digital Converter (Convertidor Analógico-Digital)
<i>AHP</i>	Analytic Hierarchy Process (Proceso analítico de jerarquía)
<i>CAD</i>	Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)

<i>Ce</i>	Concepto elegido
<i>Cm</i>	Concepto mejorado
<i>Cr_n</i>	Criterio <i>n</i> para AHP
<i>FSR</i>	Force-sensing resistor (Sensor Sensible a Fuerza)
<i>HD</i>	Heavy Duty (Alto Rendimiento)
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)
<i>IPS</i>	Industrial Profile Systems (Sistemas de perfil industrial)
<i>MEMS</i>	Micro Electro-Mechanical Systems (Sistemas Micro Electro-Mecánicos)
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration(Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)
<i>PC</i>	Polycarbonate (Policarbonato)
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (Tabla de circuito impreso)
<i>PET</i>	Polyethylene Terephthalate (Tereftalato de polietileno)
<i>PLA</i>	Polylactic Acid (Ácido Poliláctico)
<i>PVC</i>	Polyvinyl Chloride (Cloruro de polivinilo)
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso)
<i>RPM</i>	Revoluciones por minuto
<i>USD</i>	U.S. dollar (dólar estadounidense)
<i>XL</i>	Extra Light (Extra Ligero)
Símbolos	
$\delta\theta$	Desplazamientos virtuales
δW^{NC}	Trabajo virtual asociado a las fuerzas generalizadas
\mathcal{J}	Tensor de inercia
\mathcal{Q}	Conjunto de fuerzas generalizadas
ω	Vector de velocidad angular
ϕ	Flujo magnético debido al estator
τ_0	Par a rotor bloqueado
τ_m	Par motor generado
\tilde{P}_2	Imagen corregida
b	Distancia entre cámaras
$C(\theta, \dot{\theta})$	Vector de fuerzas/pares centrífugas y de Coriolis
g	Vector de dirección de la gravedad en el marco inercial
$g(\theta)$	Vector de fuerzas/pares gravitacionales y potencial
H_m	Matriz de homografía
i_a	Corriente de armadura
J_v	Componente de velocidad lineal del Jacobiano
J_ω	Componente de velocidad angular del Jacobiano
K	Energía cinética
K_1	Constante física del motor
K_m	Constante de par motor
m	Masa total
P_d	Carga de diseño
R_a	Resistencia de armadura
r_{ci}	Coordenadas del centro de masa
v	Vector de velocidad lineal
x	Distancia real
x_D	Número de pixeles desde el origen hasta el centro del objeto en la imagen derecha

x_I	Número de pixeles desde el origen hasta el centro del objeto en la imagen izquierda
z	Profundidad
α	Ángulo de giro del eslabón, formado entre z_{i-1} y z_i sobre el eje x_i
\mathcal{L}	Lagrangiano del sistema
\mathcal{Q}	Conjunto de fuerzas generalizadas
ω	Velocidad angular
ρ	Densidad del eslabón
τ	Torque
θ	Conjunto de coordenadas generalizadas
θ_i	Ángulo de la junta i
\tilde{P}_1	Imagen original
a	Longitud del eslabón
BH	Distancia horizontal al punto más lejano
BT	Longitud del brazo totalmente estirado
BV	Distancia de la base del robot hasta el suelo
C	Distancia entre centros
$C_{dinamica}$	Capacidad de carga dinámica mínima del rodamiento
C_m	Factor de material
C_r	Factor de confiabilidad
C_{st}	Factor de tipo de esfuerzo
C_s	Factor de tamaño
D	Diámetro mínimo del eje
d	Desplazamiento del eslabón
$D(\theta)$	Matriz de inercia del sistema
F_n	Fuerza neta asociada al torque transmitido
F_s	Factor de seguridad
F_s	Fuerza flexionante
H	Matriz de transformación homogénea
h_e	Altura del eslabón
J	Jacobiano
k_{rod}	Constante para rodamientos
K_t	Factor de concentración de esfuerzos
L_b	Longitud de la banda
L_d	Vida de diseño del rodamiento, en número de revoluciones
l_e	Longitud del perfil del eslabón
M	Momento flexionante
m_e	Masa del eslabón
N	Factor de seguridad
N_{polea}	Número de dientes de la polea
o	Vector de posición
P	Potencia
PD	Paso de la polea
R	Matriz de orientación
r	Radio de la polea
r	Radio
r_e	Radio del chaflán del eslabón
S'_n	Límite de fatiga modificado
S_n	Límite de fatiga

S_u	Esfuerzo último a la tensión
S_y	Esfuerzo de cedencia
T	Esfuerzo torsionante
T_{banda}	Torque transmitido por la banda
t_e	Espesor del eslabón
v	Velocidad lineal
v_e	Volumen ocupado por el eslabón
z	Vector unitario en el eje Z

Introducción

Antecedentes

Los sistemas robóticos han permitido a la humanidad realizar tareas que antes resultaban sumamente complicadas, o directamente impracticables. La exploración de otros cuerpos del sistema solar es un claro ejemplo. Desde los días de la carrera espacial, los Estados Unidos de América y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, demostraron su dominio tecnológico al enviar misiones robóticas para la exploración lunar. Desde aquella época, el paradigma de los dispositivos de exploración es el llamado “*rover*”, el cual es un robot móvil que porta instrumental para efectuar análisis *in situ*. El primero de ellos, el *rover* soviético “Lunokhod 1”[1] se posó sobre la superficie lunar el 17 de noviembre de 1970. Además de su capacidad locomotiva, llevó consigo instrumental desplegable para medir las propiedades mecánicas y químicas del suelo lunar, un espectrógrafo de rayos X y un telescopio de rayos X (entre otros). Desde entonces, varias misiones *rover* han sido prioridad científica, tecnológica y mediática para distintas agencias espaciales en todo el mundo.

Puesto que el principal objetivo de un *rover* es el análisis *in situ*, la capacidad de trasladarse, aunque vital, no es suficiente para una misión de exploración que obtenga resultados científicos relevantes. Es por ello que los *rovers* más sofisticados como Opportunity y Spirit[2], junto al Curiosity[5] y el Mars 2020[6] de la NASA, incorporan un brazo robótico que dota al vehículo con la capacidad de ejecutar diversas tareas, como transportar instrumental de imagen a lugares específicos de interés para realizar estudios. Otra aproximación es la de montar un taladro sobre la estructura del *rover* para extraer las muestras,

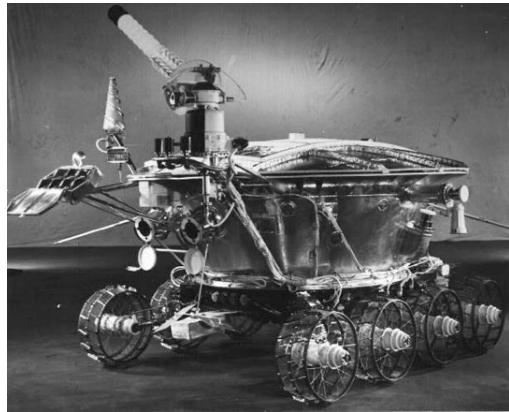


Figura 1: Rover soviético Lunokhod 1[1]

sin embargo esta opción limita la versatilidad de la herramienta, dado que depende del posicionamiento del vehículo en su totalidad, siendo necesario posicionarlo en la ubicación exacta de la muestra, mientras que con el brazo basta con trasladar el efecto para que alcance la posición deseada. En el presente documento se desarrolla el diseño de un manipulador robótico, así como un efecto final para identificar mediante visión artificial la posición de una roca que el usuario le indique para posteriormente obtener información de ella.

Justificación

La obtención de datos sobre otros cuerpos del sistema solar resulta de vital importancia para comprender los procesos de formación planetaria y de la evolución de las condiciones ambientales que han estado presentes a lo largo de su historia. Dichos datos han sido obtenidos mediante misiones de varios tipos, como los orbitadores que realizan tareas de cartografía, o a través del uso de robots que se colocan en la superficie y son capaces de obtener muestras *in situ*. Con el objetivo de probar y validar los dispositivos, las agencias espaciales realizan misiones análogas, las cuales son simulaciones del comportamiento del sistema en condiciones similares a las de operación. Dado que la obtención de muestras del suelo es una tarea que puede ser realizada mediante el desarrollo de un sistema robótico que posicione un efecto adecuado con un error lo suficientemente pequeño para que tome la muestra deseada, el sistema que efectúe la tarea debe integrar sistemas eléctricos, electrónicos, mecánicos, de control y de cómputo. Por lo tanto, el enfoque mecatrónico es idóneo para atacar el problema ya que ofrece la capacidad de integrar todos los sistemas

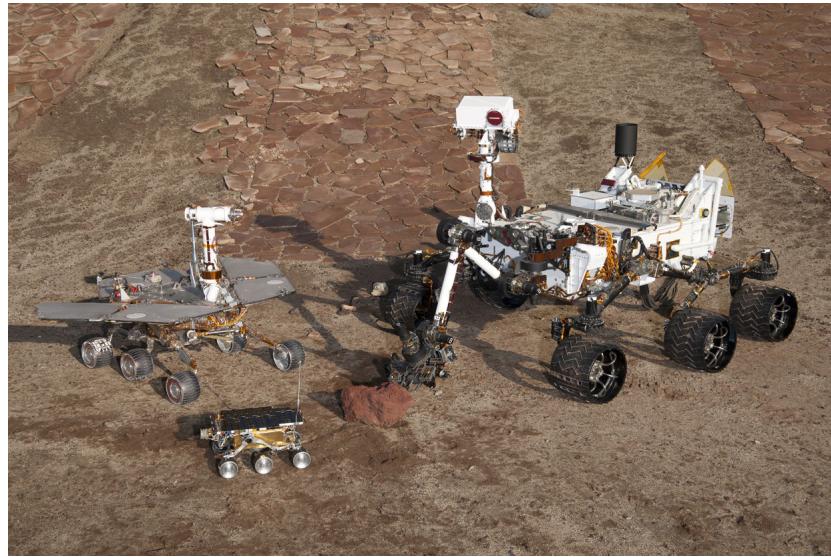


Figura 2: Rover Opportunity, Spirit y Curiosity[2]

para que trabajen de forma armónica, facilitando la comunicación con otros sistemas, como el *rover* y el analizador, cubriendo las debilidades de una disciplina con las fortalezas de las otras.

Definición del problema

Una vez que el robot móvil ha llegado a la zona de interés, el usuario localizará la muestra en el espacio de trabajo y el brazo robótico deberá llegar a la posición y orientación deseada con el menor error posible, para recoger una muestra y colocarla en un contenedor para su futuro análisis. Los principales retos de ingeniería que este proyecto presenta son:

- La obtención de una muestra de piedra del suelo, debido a que las rocas no tienen una geometría uniforme. Aunque el operario identifica la zona donde la muestra está ubicada, es necesario que el sistema de reconocimiento del entorno traduzca esa posición al espacio de trabajo del robot. Para tomar la muestra, hay que conocer la posición y orientación, tanto inicial como final de los actuadores, y generar una trayectoria adecuada tomando en consideración que la prioridad es el consumo eficiente de energía. Con la finalidad de asegurar la integridad, tanto del actuador como de la muestra, se requiere conocer la presión que el efecto ejerce sobre la piedra.
- El traslado de la muestra obtenida a un sitio concreto, ya que el espacio en el que se puede manipular es limitado, y se necesita llevar la muestra a un entorno controlado para poder analizarla.

- Reducir el consumo energético, pues las celdas incorporadas en los *rover* generan poco más de 100W[7] para desplazarse y alimentar el resto de módulos, por lo que el sistema debe utilizar una parte de la energía disponible.
- Determinación de la masa de las muestras obtenidas, pues es la información más esencial que se puede obtener de ellas, por lo cual es necesaria una medida confiable.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema robótico de recolección de muestras geológicas para un *rover* de exploración, que sea capaz de obtener piedras del suelo para su posterior análisis y envío de datos a una estación.

Objetivos Particulares.

1. Trabajo Terminal I

- Diseñar un módulo a manera de efecto final que sea capaz de recoger muestras del suelo para su manipulación.
- Diseñar un sistema robótico de 6 grados de libertad que posicione y oriente el efecto para transportar la muestra.
- Diseñar un módulo de percepción que le permita al sistema reconocer el ambiente para crear un marco de referencia en el espacio.
- Diseñar un sistema de procesamiento y comunicación que permita el análisis de las muestras para determinar las características del entorno, además de permitir la transmisión y recepción de datos.
- Integrar los módulos de manera computacional para que trabajen en conjunto.
- Validar el sistema mecatrónico mediante simulaciones con el objetivo de comprobar que los parámetros obtenidos cumplen su función.

2. Trabajo Terminal II

- Implementar el módulo de efecto final que sea capaz de recoger muestras del suelo para su manipulación.
- Implementar un sistema robótico de 6 grados de libertad que posicione y oriente el efecto para transportar la muestra.
- Implementar un módulo de percepción que le permita al sistema reconocer el

ambiente para crear un marco de referencia en el espacio, así como identificar la geometría de la muestra.

- Implementar un sistema de procesamiento y comunicación que permita el análisis de las muestras para determinar las características del entorno, además de permitir la transmisión y recepción de datos.
- Realizar pruebas y ajustes necesarios para garantizar que cada módulo trabaja correctamente de manera independiente.
- Integrar secuencialmente los módulos para consolidar el sistema mecatrónico.
- Verificar que todos los módulos del sistema mecatrónico trabajen armónicamente para posteriormente realizar pruebas de recolección de muestras en un ambiente análogo que nos permitan comprobar que el sistema cumple con la función principal.

Tabla 1: Antecedentes

	Nombre	Descripción	Características	País	Instituto	Tipo
1	Apilador robótico autónomo de piedras, con planeación de posición del objeto en línea.[8]	Sistema robótico de brazo con efecto final capaz de reconocer rocas en el ambiente, orientar el efecto a fin de asirla, y colocar una encima de otra con un máximo de estabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manipulador y efecto comerciales. ▪ Sistema de escaneo óptico 3D para caracterizar geométricamente las rocas (Proceso fuera de línea). ▪ Algoritmo de búsqueda de la posición adecuada para el apilamiento de la piedra (Proceso en línea) 	Suiza	ETH Zurich	Artículo de conferencia
2	Brazo robótico UR5[9]	Módulo de brazo robótico que se adapta al robot Husky para generar una plataforma de manipulación móvil.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Norma = ISO 10218-1, ISO 13849-1, Cat. 3, PL d. ▪ Clasificación IP = IP54 ▪ Grados de libertad = 6 ▪ Rango de trabajo de cada eje = 360° ▪ Carga máxima = 3 Kg ▪ Alcance = 500 mm ▪ Consumo energético = 100 W (Típicamente) ▪ Rango de temperatura de trabajo = 0°C - 50°C ▪ Peso total = 11.2 Kg ▪ Materiales = Aluminio, acero, plástico 	Canadá	Clearpath Robotics	Producto
3	3-Finger Adaptive Robot Gripper[10]	Gripper de 3 dedos adaptativos para manufactura avanzada e investigación robótica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apertura de gripper: 0 - 155 mm ▪ Peso: 2.3 kg ▪ Carga máxima recomendada: 10 kg ▪ Fuerza de agarre: 30 - 70 N ▪ Modos de agarre ▪ Puntual ▪ Ancho ▪ Tijeras ▪ Básico 	Canadá	Robotiq	Producto
4	Design of a smart gripper for industrial applications[11]	Diseño de un gripper inteligente y flexible para actividades industriales. Además la adaptación de un módulo para el uso de herramiental eléctrico.	<p>Mediciones en el gripper:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuerza (Galga extensiométrica) ▪ Torsión en la muñeca (Sensor de fuerza y torsión de 6 ejes) ▪ Temperatura ▪ Dentro del gripper (LM35) ▪ Pinzas de sujeción (DS18B20) ▪ Visión desde el gripper: ▪ Cámara (Dragonfly 2 con cabeza extendida) <p>Peso de objetos a manipular: 15 kg</p> <p>Tipo de agarre del gripper:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dentro del gripper (LM35) ▪ Pinzas de sujeción (DS18B20) 	Finlandia	Tampere University of Technology	Tesis de maestría
5	Mediciones in situ de color de suelo, composición mineral y contenido de arcilla por espectroscopía VIS-NIR (espectroscopía visible e infrarrojo cercano).[12]	Ánalysis de propiedades del suelo in situ mediante el uso de espectroscopía infrarroja.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rango de vis-NIR = 400 - 2500 nm ▪ Tamaño de grano de la muestra de polvo = 2mm 	Australia Francia	-Bruce E. Butler Laboratory -University of Sydney -UMR SAS INRA-Agrocampus Renneser Laboratory	Artículo de revista

Descripción de los capítulos

En el capítulo 1, denominado “Marco de referencia” se da una breve descripción de los fundamentos requeridos para el desarrollo del proyecto, como lo son algunos conceptos de diseño mecánico, modelado de robots, visión por computador, electrónica y la metodología de diseño mecatrónico.

El capítulo 2, “Diseño del sistema”, introduce las necesidades que el sistema debe satisfacer y a partir de ellas desarrollan los requerimiento técnicos que sirven como base para generar la arquitectura funcional a través de modelos tales como FBS[13], IDEF0[14] y eFFBD[15]. Posteriormente se plantean los módulos que conforman al sistema mecatrónico, y a partir de ellos se proponen soluciones que se someten a una herramienta de selección multi-criterio para encontrar la que mejor satisface los criterios establecidos.

En el capítulo 3, “Diseño de dominio específico”, se realiza un diseño a profundidad de cada uno de los módulos que conforman el concepto solución elegido en el capítulo 2.

En el capítulo 4, “Integración”, se realiza la unión de los módulos diseñados para asegurar que cada una de las partes del sistema opera de manera armónica con las demás. Este proceso se realiza siguiendo una secuencia que inicia con el hardware y concluye con el software.

Finalmente, en el capítulo 5 se analizan los resultados de las simulaciones computacionales para determinar si el sistema diseñado es adecuado para cumplir los requerimientos.

Marco de referencia

1.1. Marco teórico

1.1.1. Descripción de forma de partículas

Medir dimensiones y características de partículas individuales es un proceso tardado y costoso, por ellos existen escalas cualitativas que permiten una rápida evaluación visual de la misma. Dichas tablas evalúan parámetros como la angularidad y esfericidad. De acuerdo a [16], una escala como esta es usada en la norma ASTM F1632 2003, como se muestra en la Figura 1.1.

1.1.2. Diseño de componentes de máquinas

Selección de materiales

Las propiedades mecánicas de los materiales influyen en el desempeño de los componentes físicos, por esta razón es necesario tomar en cuenta sus límites para el diseño. Además es importante considerar la relación existente entre las propiedades, pues suele tomarse en cuenta la combinación de ellas para realizar la selección.

En este documento, son de particular interés las propiedades de rigidez y densidad, por lo que se utiliza la relación entre el módulo de Young y la densidad[17].

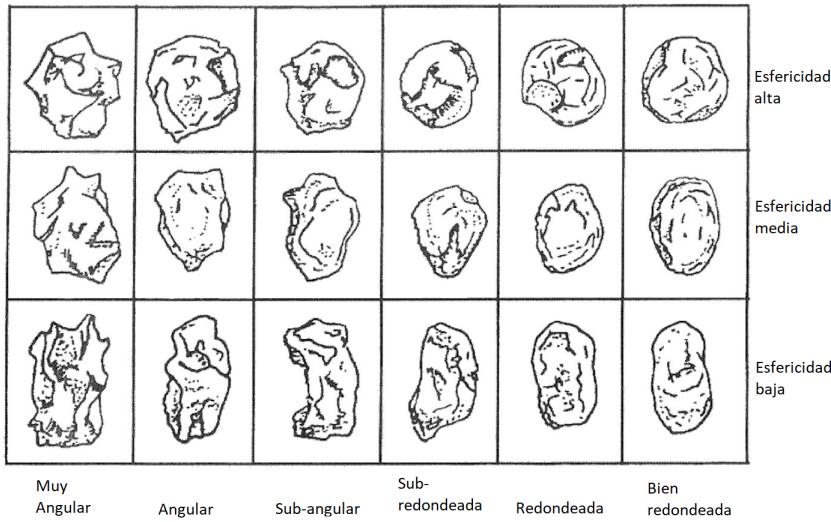


Figura 1.1: Cuadro cualitativo para determinar visualmente la forma de una partícula

Diseño de transmisión por bandas

Para seleccionar las bandas a usar, se debe establecer la relación de velocidades entre la polea conductora y la polea conducida, además del par que el motor suministra.

La velocidad tangencial de un objeto que gira se relaciona con la velocidad angular según la ecuación:

$$v = \omega \times r \quad (1.1)$$

Posteriormente, se calcula la potencia necesaria que la banda debe transmitir (ecuación 1.2), así como el factor de servicio que se obtiene de tablas[18], con base en la aplicación, el tipo de motor y el tiempo de operación, calculando la potencia de diseño con la ecuación 1.3.

$$P = \tau \omega = \quad (1.2)$$

$$P_{ajustada} = P * F_S \quad (1.3)$$

Posteriormente, se determina el paso requerido de la banda utilizando la guía de selección de perfil del proveedor[19].

Seleccionar la combinación de poleas que producen la relación de velocidad especificada, basándose en el catálogo de proveedores [20], en el cual también se indica el ancho apropiado de las bandas.

Conociendo el diámetro de las poleas seleccionadas, se calcula la longitud de la banda como sigue:

$$L_b = 2C + N_{polea} * PD \quad (1.4)$$

En donde L_b es la longitud de la banda, C es la distancia entre centros, N_{polea} , el número de dientes de la polea y PD el paso de la banda.

Con la longitud de la banda calculada, se ajusta el valor de la potencia con la ecuación 1.5.

$$\text{Potencia base nominal}_{ajustada} = \quad (1.5)$$

$$\text{Potencia base nominal} * \text{Factor de corrección de longitud}$$

Finalmente, se calcula la velocidad lineal de las bandas para comprobar que operan con niveles bajos de ruido, como sigue:

$$V_{banda-1} = \frac{PD_1}{2} * \omega_1 \quad (1.6)$$

$$V_{banda-2} = \frac{PD_2}{2} * \omega_2 \quad (1.7)$$

Diseño de ejes

El diseño de un eje consiste en determinar el diámetro mínimo para un estado de esfuerzos estático. Primero se obtienen los esfuerzos debidos a momentos flectores, para buscar el momento flector máximo para todos los diámetros diferentes del eje[18]. Después se consideran los momentos torsionantes a los que esté sometido el eje.

Para calcular el momento flector, deben tomarse en cuenta las tensiones que las bandas ejercen sobre el eje a través de las poleas, utilizando las ecuaciones

$$F_n = \frac{T_{banda}}{r} \quad (1.8)$$

$$F_s = 1.5F_n \quad (1.9)$$

En donde F_n es la fuerza neta asociada al torque transmitido, F_s es la fuerza flexionante, T_{banda} es el torque transmitido por la banda y r es el radio de la polea.

Una vez que se obtienen estos valores, se propone un material y se corrigen los valores de resistencia última a fatiga con las ecuaciones 1.10 y 1.11.

$$S_n = 0.5S_u \quad (1.10)$$

En donde S_n es el límite de fatiga y S_u es el esfuerzo último a la tensión.

$$S'_n = S_n C_m C_{st} C_R C_s \quad (1.11)$$

En donde S'_n es el límite de fatiga modificado, C_m es el factor del material, C_{st} es el factor del tipo de esfuerzo, C_R es el factor de confiabilidad y C_s es el factor de tamaño.

Finalmente, se utiliza la fórmula 1.12 para calcular el diámetro mínimo del eje.

$$D = \sqrt[3]{\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left[\frac{K_t M^2}{S'_n} \right] + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{S_y} \right]^2}} \quad (1.12)$$

En donde D es el diámetro máximo del eje, N es el factor de seguridad, K_t es el factor de concentración de esfuerzos, M es el momento flexionante, T el momento torsionante y S_y es el esfuerzo de cedencia.

Selección de rodamientos

Para seleccionar rodamientos aleados, es necesario conocer las reacciones que tienen ante las fuerzas del eje, utilizando la ecuación 1.13 para conocer la carga dinámica, que es el dato que ofrece el fabricante para su selección.

$$C_{dinámica} = P_d \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{1/k_{rod}} \quad (1.13)$$

En donde $C_{dinámica}$ es la capacidad de carga dinámica del rodamiento, P_d es la carga de diseño, L_d es la vida de diseño del rodamiento medida en número de revoluciones y k_{rod} es la constante del rodamiento (3.33 para rodamientos de rodillos).

1.1.3. Cinemática de robots

Para conocer la manera en la que el manipulador se mueve, es necesario identificar las relaciones que hay entre los diferentes grados de libertad que lo conforman, en este apartado se desarrolla dicha relación desde un enfoque puramente geométrico, conocido como cinemática del robot, sin tomar en cuenta las fuerzas y torques que generan los movimientos, pues estos se tomarán en cuenta para desarrollar la dinámica del robot.

Cinemática directa

Como ya se mencionó, el modelo cinemático sirve para describir geométricamente el movimiento del manipulador, para lo que se considera en primer lugar el problema de la cinemática directa, la cual describe la posición y orientación del efecto final dados los valores de las variables de las juntas del robot.

Una matriz de transformación homogénea representa una traslación y rotación de un marco coordenado n con respecto de un marco base 0, y está definida por la ecuación 1.14.

$$H = \begin{bmatrix} R_n^0 & o_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Para calcular esta matriz, se utilizan matrices de la forma

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & o_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

las cuales relacionan al marco i con respecto al marco $i - 1$, el cual se obtiene al acoplar rígidamente un marco de referencia a cada junta del sistema.

De esta manera, la matriz de la ecuación 1.14 se puede descomponer en una serie de transformaciones, como se ve en la ecuación 1.15.

$$H = T_n^0 = A_1(\theta_1) \dots A_n(\theta_n) \quad (1.15)$$

Para facilitar la asignación de marcos y la obtención de las matrices se utiliza la convención de Denavit-Hartenberg, asumiendo que el eje x_1 es perpendicular al eje z_0 , y que se intersecan.

De esta manera, se puede representar la transformación H de la ecuación 1.14 con matrices de la forma:

$$A_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_i & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En donde θ es el ángulo de la junta, formado entre x_{i-1} y x_i sobre el eje z_{i-1} , a es la longitud del eslabón, definida como la distancia sobre el eje x_i desde el punto de intersección de z_{i-1} con x_i hasta el origen O_i , d es el desplazamiento del eslabón, definido como la distancia sobre el eje z_{i-1} desde el origen O_{i-1} hasta la intersección de z_{i-1} con x_i , y α es el ángulo de giro del eslabón, formado entre z_{i-1} y z_i sobre el eje x_i .

Cinemática inversa

Una vez que se ha resuelto el problema de cinemática directa, se puede realizar el proceso contrario, conocido como cinemática inversa, utilizado para conocer los valores de las variables de las juntas dada la posición y orientación del efecto final.

Esto significa que de la ecuación 1.14, se conoce el valor de H , y el objetivo es encontrar el valor de $R_n^0(\theta_1 \dots \theta_n)$ y $o_n^0(\theta_1 \dots \theta_n)$.

En los sistemas robóticos con una muñeca esférica, los ejes de las 3 últimas juntas se intersecan en un punto, en el cual se asignan los orígenes de los marcos de referencia 3,4 y 5. Esto se conoce como *desacoplamiento cinemático*, y permite separar el problema de cinemática inversa en 2 problemas más sencillos de resolver, conocidos como *cinemática inversa de posición* y *cinemática inversa de orientación*.

Para realizar este procedimiento, se interpreta que:

$$R_n^0(\theta_1 \dots \theta_n) = R \quad (1.16)$$

$$o_n^0(\theta_1 \dots \theta_n) = o \quad (1.17)$$

Siendo

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

$$o = [ox \quad oy \quad oz]^T \quad (1.19)$$

Cinemática inversa de posición

Desplazando una distancia d_6 el efecto final o hacia el origen de la muñeca o_c , se puede resolver R_3^0 como sigue:

$$o = o_c^0 + d_6 R \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (1.20)$$

Cinemática inversa de orientación

Conociendo R_3^0 se puede calcular θ_1 , θ_2 y θ_3 , permitiendo resolver la ecuación 1.21 para conocer θ_4 , θ_5 y θ_6

$$R_6^3 = (R_3^0)^T R \quad (1.21)$$

Cinemática diferencial - El Jacobiano

Matemáticamente la cinemática directa define una función entre el espacio de posiciones y orientaciones del efecto final y el espacio de posiciones de las juntas. Las relaciones de velocidad están determinadas por el jacobiano de esta función.

La matriz Jacobiana para una junta de tipo revoluta está dada como sigue:

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

El robot desarrollado en este proyecto tiene solo juntas de tipo revoluta. Todas las variables implicadas en la determinación del Jacobiano están disponibles una vez que se ha ejecutado la cinemática directa.

Singularidades.

El rango de la matriz Jacobiana no es constante, pues depende de la configuración de las juntas del robot. Las configuraciones para los cuales el Jacobiano pierde rango se llaman singularidades, y su identificación es importante porque:

- Pueden representar configuraciones para las cuales ciertas direcciones de movimiento son inalcanzables.
- La velocidad de movimiento de las juntas puede diverger conforme se acercan a una posición singular.
- En las singularidades, fuerzas y momentos acotados del efecto final pueden requerir fuerzas y momentos divergentes en las juntas.

- d) Las singularidades usualmente (aunque no siempre) corresponden a puntos en la frontera del espacio de trabajo del manipulador, es decir, los puntos de máximo alcance del manipulador.
- e) Las singularidades corresponden a puntos en el espacio de trabajo del manipulador que pueden ser inalcanzables bajo pequeñas perturbaciones en los parámetros de los eslabones, tales como desplazamiento, longitud, etc.
- f) Cerca de las singularidades, no existirá una única solución al problema de cinemática inversa. En tales casos puede no haber soluciones o existir infinitas.

El problema de resolver la ecuación no lineal $\det J(q) = 0$ puede ser complicado, pero es posible utilizar una técnica que explota el hecho de tener una muñeca esférica, conocida como desacoplamiento de singularidades. Si el número de grados de libertad es igual a 6, y tres de ellos corresponden al brazo y 3 de ellos a la muñeca esférica, el Jacobiano consistirá en una matriz de 6x6, como es una matriz cuadrada, será singular cuando $\det(J) = 0$.

Si se parte la matriz en segmentos de 3x3, se tiene:

$$J = \begin{bmatrix} J_P & | & J_O \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \frac{J_{11}}{J_{21}} & \frac{J_{12}}{J_{22}} \end{array} \right] \quad (1.23)$$

Como los últimos tres GDL son revoluta

$$J_O = \begin{bmatrix} z_3 \times (o_3 - o_3) & z_4 \times (o_3 - o_3) & z_5 \times (o_3 - o_3) \\ z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Y ya que los ejes se intersectan en el mismo punto, se considera que los orígenes de los marcos de referencia del 3 al 6 están en el mismo punto, se vuelve

$$J_O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Este caso, el Jacobiano se convierte en una forma triangular

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Y cuyo determinante se simplifica

$$\det(J) = \det(J_{11})\det(J_{22}) \quad (1.27)$$

De forma que las singularidades del sistema son las singularidades del brazo $\det J_{11} = 0$ y de las singularidades de la muñeca $\det J_{22} = 0$.

Cabe señalar que esta forma de Jacobiano solo sirve para la determinación de singularidades, pues no se corresponde con la matriz que relaciona la velocidad el efecto final con las velocidades de las juntas, ya que usa la suposición de que o_6 está en el mismo punto que o_5 , lo cual no es cierto, pues está desplazado por una distancia d .

1.1.4. Convertidores CD-CD

Los reguladores lineales, cuyo principio de operación está basado en divisores de corriente o voltaje, son ineficientes, pues su voltaje de salida está limitado a ser menos que el voltaje de entrada, además de que requieren filtros y transformadores de línea de baja frecuencia. Por esta razón su principal uso es en aplicaciones de baja potencia, mientras que en aplicaciones de mayor potencia se usan reguladores comutados.

Mientras que los reguladores lineales trabajan en su región activa, los reguladores comutados se basan en interruptores semiconductores de electrónica de potencia que trabajan en los estados de *encendido* y *apagado*. Debido a que dichos estados presentan bajas pérdidas de potencia (bajo voltaje en el estado *encendido*, y corriente cero en el estado *apagado*), alcanzan eficiencias altas en la conversión de energía. Entre más alta la frecuencia de operación, más ligeros y pequeños son sus componentes.[21]

La Tabla 1.1 muestra una comparación entre reguladores.

1.1.5. Selección de cables

Dependiendo de la intensidad de corriente que un cable debe transportar, y de la longitud del mismo, debe elegirse un calibre de cable siguiendo la Figura 2.48, desarrollada por Enerdrive[4] bajo el estándar AWG (Calibres de Alambre Americanos - American Wire Gauges por sus siglas en inglés) con ayuda de estos pasos:

1. Localizar en la Figura la intensidad de corriente en CD que fluye por el cable.
2. Determinar el tipo de circuito en los siguientes tipos
 - Crítico: Aplicaciones como paneles de alimentación, electrónica, extractores y luces de navegación.
 - No crítico: Aplicaciones como iluminación general, electrodomésticos.
3. Determinar la longitud total de cable, sumando alambres negativos y positivos.

Tabla 1.1: Guía de selección de reguladores de tensión

	Regulador lineal	Regulador comutado
Flexibilidad de diseño	Bajada	Subida, bajada, subida y bajada
Eficiencia	Generalmente baja, media para una diferencia pequeña entre la tensión de entrada y tensión de salida	Alta
Complejidad	Baja	Media a alta
Tamaño	Pequeño a mediano, crece conforme a la potencia	Pequeño aún a potencias altas (aunque depende de la frecuencia de comutación)
Costo total	Bajo	De medio a alto (Componentes externos)
Rizo/ruido/interferencia electromagnética	Bajo	De medio a alto
Rango de tensión de entrada	Estrecho debido a la disipación de potencia	Amplio

4. Identificar el símbolo asociado al valor de intensidad de corriente en CD y la longitud del cable.
5. Relacionar el símbolo con el código de color para encontrar las especificaciones del cable.

1.1.6. Visión artificial

La visión por computadora es una de las herramientas más poderosas que existen en la actualidad para permitir a un robot identificar las condiciones del ambiente en el que opera.

El Kinect es un sensor RGB-D, lo que quiere decir que además de una cámara convencional cuenta con un proyector de luz infrarroja y un sensor infrarrojo, con los cuales es capaz de generar una imagen de profundidad con los datos de distancia perpendicular al plano del sensor. Es un periférico fabricado por Microsoft ®, para la consola de videojuegos Xbox 360 y la manera en que detecta la profundidad de los objetos es mediante el despliegue de una malla de puntos infrarrojos por parte del proyector y la visualización de esos puntos con la cámara infrarroja. La malla de puntos infrarrojos está calibrada para mostrar un patrón específico en una superficie plana, y cuando dichos puntos se encuentran en otra posición es posible obtener la profundidad a la que se encuentran.

1.2. Marco procedimental

1.2.1. Metodología mecatrónica

La metodología de diseño mecatrónico que se utiliza es el modelo V, descrito en el estándar VDI 2206[22], el cual considera al proceso de diseño como un “macro-ciclo” en el que el grado de madurez se incrementa con cada iteración, y cuyo número de iteraciones depende del progreso realizado con cada una hasta llegar a un producto final que cumpla satisfactoriamente con las expectativas de desempeño esperadas. Este modelo consta de 3 fases principales, denominadas “**Diseño del sistema**”, la cual es la fase inicial y comienza definiendo los requerimientos que el sistema debe satisfacer, seguido de la descomposición de las funciones que lleva a cabo, para poder dar paso a la fase de “**Diseño de dominio específico**”, en el que se realiza un diseño a profundidad de cada una de las disciplinas involucradas, para llegar finalmente a la “**Integración del sistema**”, en donde se implementan todos los módulos y se unen para trabajar armónicamente. Además de las fases principales, el modelo cuenta con 2 fases que son transversales a todo el proceso, las cuales son el “**Modelado y análisis del modelo**”, en la cual se realizan modelos que describen el comportamiento de cada uno de los módulos y del sistema en general, para poder realizar simulaciones que ayudan en la fase de “**Validación y verificación**”, la cual se realiza en todo momento para evaluar el desempeño de cada módulo y determinar el grado de madurez del proyecto.

FBS

IDEF0

eFFBD

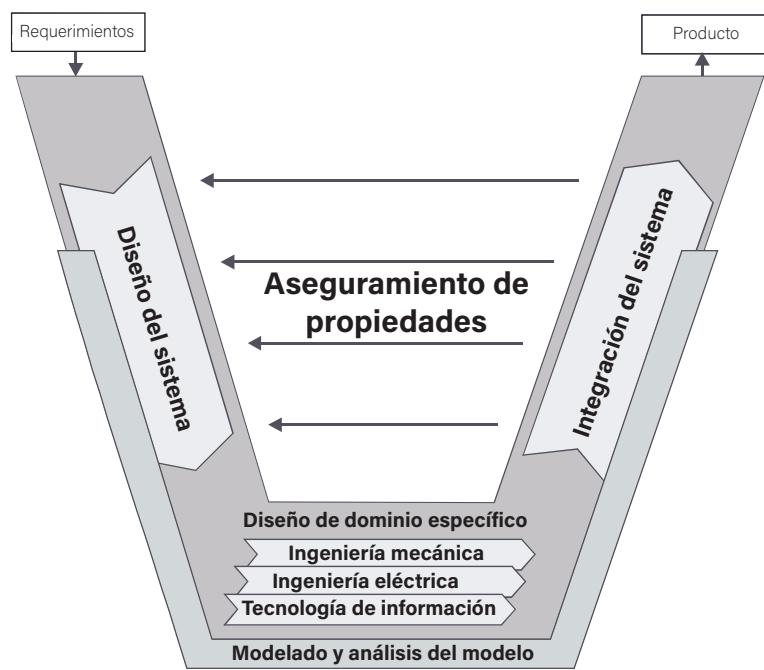


Figura 1.2: Modelo V como metodología para el diseño mechatrónico(VDI 2206)

Diseño

2.1. Diseño del sistema

A lo largo de este capítulo se establecen las necesidades que el sistema mecatrónico debe satisfacer, para posteriormente determinar las funciones a realizar y los módulos que forman parte del concepto de solución, el cual se elige a través de la implementación de una herramienta de selección multicriterio.

2.1.1. Necesidades y requerimientos

Para dar comienzo con el diseño del sistema, es preciso determinar cuales son las **necesidades**[23] que debe satisfacer, las cuales son el resultado de la *transformación* de uno o más conceptos en una *expectativa* para el cumplimiento de una *función* de acuerdo a ciertos indicadores de *rendimiento* que aseguren la *calidad*. La Tabla 2.1 asocia las necesidades establecidas con un identificador, el cual será útil para identificarlas rápidamente a lo largo del proceso de diseño.

Una vez que se han establecido las necesidades que el sistema debe satisfacer, es posible establecer los **requerimientos**[23] técnicos que componen las especificaciones del mismo, pues estos son el resultado de transformar las necesidades en una obligación para cumplir cierta función dentro de las cotas establecidas, de manera análoga a la tabla de necesidades (Tabla 2.1), la Tabla 2.2 asocia cada requerimiento con un identificador.

Tabla 2.1: Necesidades que el sistema debe cumplir

Identificador	Necesidad
N1	Tomar la muestra desde su posición de origen.
N2	Ser capaz de trabajar en las condiciones ambientales determinadas para la misión.
N3	Obtener datos de la muestra.
N4	Enviar datos.
N5	Recibir instrucciones.
N6	Ser ligero.
N7	No desequilibrar al <i>rover</i> .
N8	Tener dimensiones reducidas.
N9	Trabajar bajo el sol.
N10	Consumir poca energía.

Tabla 2.2: Requerimientos técnicos del sistema

Identificador	Requerimiento	Valor
R1	Masa máxima de la muestra	250 g
R2	Diámetro máximo de la muestra	5 cm
R3	Esfericidad	Media a alta
R4	Angularidad	Sub-angular a bien redondeada
R5	Masa máxima del sistema	12 kg
R6	Envergadura máxima	1.5 m
R7	Alimentación máxima	24 V
R8	Resolución mínima de masa de muestra	1 g
R9	Rango de comunicación	Entre 2 y 10 m
R10	Área de recolección	1m ²
R11	Temperatura de trabajo	$5^{\circ}C < t_{amb} < 25^{\circ}C$
R12	Humedad del ambiente	$20\% < h_{amb} < 70\%$
R13	Tiempo de ciclos de operación	10 min

Validación de requerimientos

Para evaluar si los requerimientos cubren todas las necesidades establecidas, se utiliza la matriz de trazabilidad[23].

La Tabla 2.3 contiene las necesidades en las columnas y las filas representan los requerimientos derivados. Con el fin de comprobar que todas las necesidades se satisfagan, es importante que cada una esté asociada al menos a un requerimiento.

Para llevar la muestra de su lugar de origen al lugar de análisis (N1), es necesario tomar en cuenta las características físicas de la misma, como son, masa(R1), diámetro (R2), esfericidad[16](R3), angularidad[16](R4), además de la destreza del sistema (R6 y R10).

Para asegurar que el sistema es capaz de trabajar en el ambiente determinado (N2), se deben conocer la temperatura y humedad del mismo (R11 y R12), así como el tiempo de operación (R13).

Debido a que el sistema está diseñado para analizar piedras pequeñas (N3), es necesario que sea capaz de medir la masa de manera precisa (R8).

Para que el sistema sea capaz de trabajar de manera remota (N4 y N5), es necesario establecer cotas de distancia (R9).

La necesidad 6 se asocia directamente con un límite de masa (R5).

Los límites de masa y dimensiones (R5 y R6) garantizan que las reacciones generadas no vuelquen al “rover” (N7).

La necesidad 8 se asocia directamente con un límite de longitud (R6).

El sistema debe ser capaz de trabajar en las condiciones típicas (R11 y R12) de un ambiente a la intemperie (N9).

Para asegurar un bajo consumo de energía, se deben establecer límites a la masa de la muestra a tomar (R1), el peso propio del sistema (R5), las dimensiones del manipulador (R6), la energía disponible (R7), y el tiempo en que se puede operar(R13).

2.1.2. Arquitectura funcional

En esta sección se lleva a cabo la descomposición de **funciones**, dividiendo la función general, la cual describe el comportamiento del sistema, en funciones secundarias inherentes al mismo, así como las funciones genéricas, que pueden asociarse a la mayoría de sistemas.

Una vez que se han determinado los requerimientos principales, es posible establecer la

Tabla 2.3: Matriz de trazabilidad para la validación de requerimientos respecto a necesidades

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
R1	✓									✓
R2	✓									
R3	✓									
R4	✓									
R5						✓	✓			✓
R6	✓					✓	✓			✓
R7										✓
R8			✓							
R9				✓	✓					
R10	✓									
R11		✓						✓		
R12		✓								
R13		✓								✓

función general, cuyo objetivo es describir el funcionamiento que tiene el sistema; posteriormente, se debe realizar una descomposición de la función principal en subfunciones que realicen una tarea en específico a modo de que sea más sencillo comprender los problemas a los que el diseñador debe enfrentarse. Una forma de realizar esta descomposición es utilizar una herramienta denominada FBS[13] (*Functional Breakdown Structure* por sus siglas en inglés), mostrada en la Figura 2.1, la cual permite ver las funciones que desempeña el sistema de una manera organizada y jerárquica, las cuales se enlistan a continuación.

Validación de funciones

La Tabla 2.4 muestra las relaciones existentes entre las funciones y los requerimientos.

Para el traslado de una muestra con las características especificadas en los requerimientos R1, R2, R3 y R4, es necesario que el sistema se posicione y oriente de manera que pueda tomar la muestra de su origen (f1.1 y f1.2), y posteriormente depositarla en el área de análisis (f1.3). Una vez que hayan obtenido los datos de la misma (f3.3), sea devuelta al entorno (f1.4).

En general, es deseable que un sistema gaste la menor cantidad de energía posible (f2.1), siendo la reducción del peso una forma de conseguirlo (R5).

Las funciones de posicionamiento y orientación (f1.1 y f1.2) son realizadas dentro de las cotas establecidas en los requerimientos R6 y R10, que hablan sobre el alcance máximo del brazo y el área de recolección respectivamente, el cual recibe las coordenadas del objetivo mediante el sistema de percepción (f3.4).

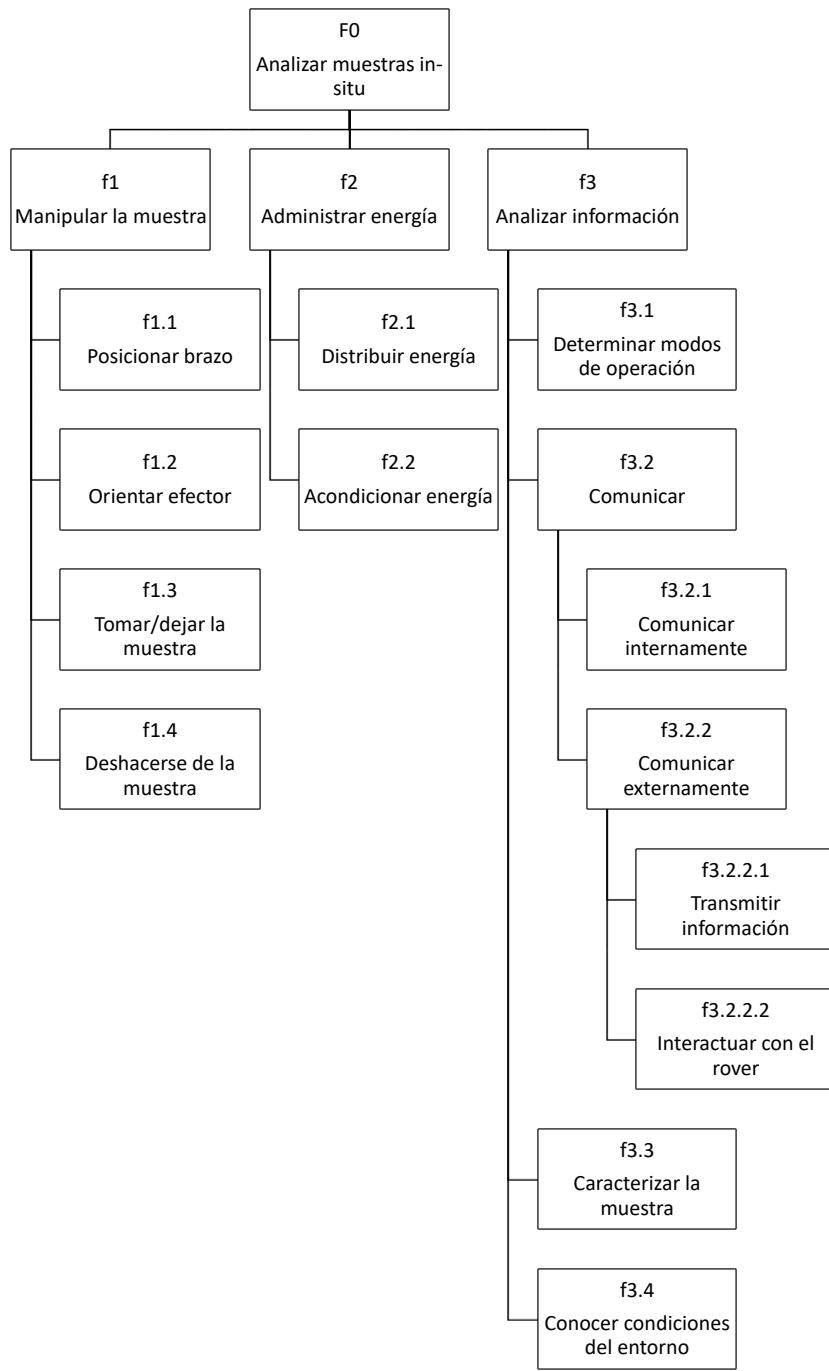


Figura 2.1: Desglose gráfico de funciones a través de un modelo FBS

Para cumplir con la función general, utilizando la energía disponible descrita en el requerimiento R7, son implementadas las funciones de gestión energética (f2.1 y f2.2), así como la toma de decisiones basada en el nivel de energía disponible (f3.1), el cual se toma del sistema energético general que incluye al rover (f3.2.2.2).

Para obtener una medición confiable de la muestra (R8), es necesario contar con un sistema de medición adecuado (f3.3).

Una comunicación remota(R9) se consigue al transmitir datos de manera bidireccional entre el usuario y el sistema (f3.2.2.1), los cuales se encuentran alejados uno del otro.

El área de recolección (R10) es aquella definida por los puntos en el espacio que el sistema puede alcanzar mediante las operaciones de posición y orientación del manipulador (f1.1 y f1.2).

Para determinar los modos de operación (f3.1), es necesario que el sistema obtenga los parámetros del entorno (R11 y R12) mediante un sistema de percepción (f3.4), el cual comunicará los datos obtenidos (f3.2.1).

Conocer el nivel de energía disponible (f3.2.1), permite saber si es posible realizar la función general (f2.1 y f3.1) para que, en caso negativo, se notifique al usuario (f3.2.2.1).

Una vez que se han determinado las funciones que desempeña el sistema, es posible definir los **módulos** que lo componen, con el objetivo de dar solución a problemas específicos. Para ello resulta útil determinar la relación existente entre las mismas a través del modelo IDEF-0[14]. El modelo del nodo A0 expandido, mostrado en la Figura 2.2 permite dimensionar la complejidad del proyecto, facilitando la comprensión del comportamiento del sistema y por ende, la búsqueda de posibles soluciones.

Tabla 2.4: Matriz de trazabilidad para la validación de funciones respecto a requerimientos

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13
f1.1	✓					✓				✓			
f1.2	✓						✓				✓		
f1.3	✓	✓	✓	✓									
f1.4	✓	✓	✓	✓									
f2.1					✓		✓						✓
f2.2							✓						
f3.1						✓				✓	✓	✓	
f3.2.1										✓	✓	✓	
f3.2.2.1								✓					✓
f3.2.2.2							✓						
f3.3	✓	✓	✓	✓				✓			✓	✓	✓
f3.4										✓	✓	✓	

19

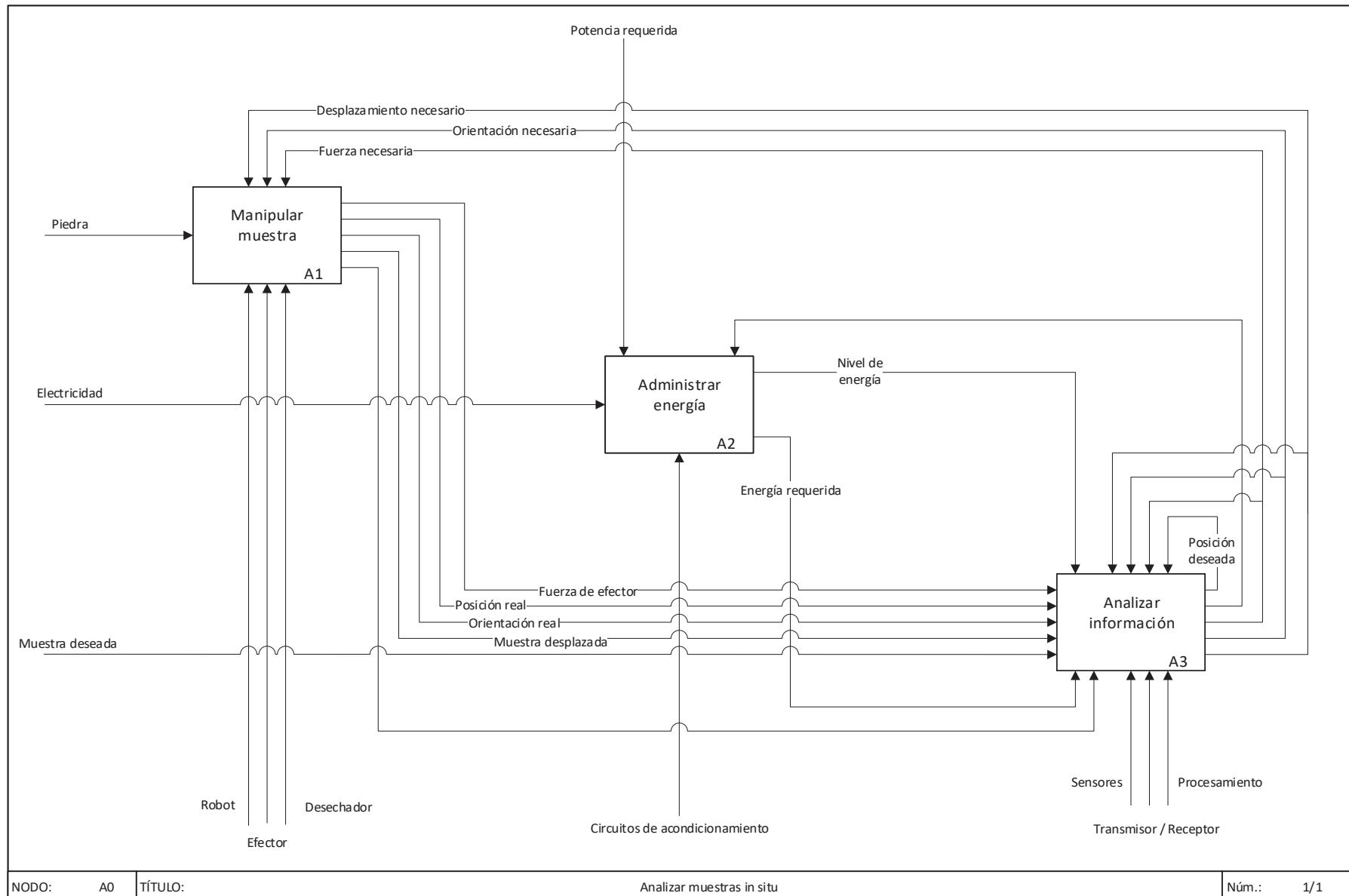


Figura 2.2: Modelo IDEF0 del sistema

Así mismo, resulta de gran utilidad analizar el comportamiento del sistema mediante la ejecución de las funciones. Esto permite observar como cada función contribuye al cumplimiento de la función principal del sistema y como se relacionan entre si, identificando las condiciones que cada una necesita para ejecutarse, mostrando la interacción entre las entradas y salidas a lo largo de las transformaciones realizadas. Para ello se utiliza el modelo mostrado en la Figura 2.3, el cual es un diagrama a bloques mejorado del flujo de funciones (*eFFBD - enhanced Function Flow Block Diagram* por sus siglas en inglés)[15]. Este modelo permite observar que la comunicación y la administración energética permanecen activas hasta que el sistema sea desactivado, mientras que para que se realice la función general, es necesario que el usuario lo ordene, pues de lo contrario el proceso nunca dará inicio. Por otro lado, el sistema evalúa las condiciones de trabajo actuales, tanto externas como internas, y con base en ellas decide la acción a realizar, ya sea quedarse en la posición de reposo o la toma de la muestra, cuyo proceso se realiza a través del posicionamiento y orientación del sistema robótico hacia la ubicación de la muestra en el entorno, seguido del traslado al laboratorio, el cual, tras obtener información de ella la devuelve al ambiente.

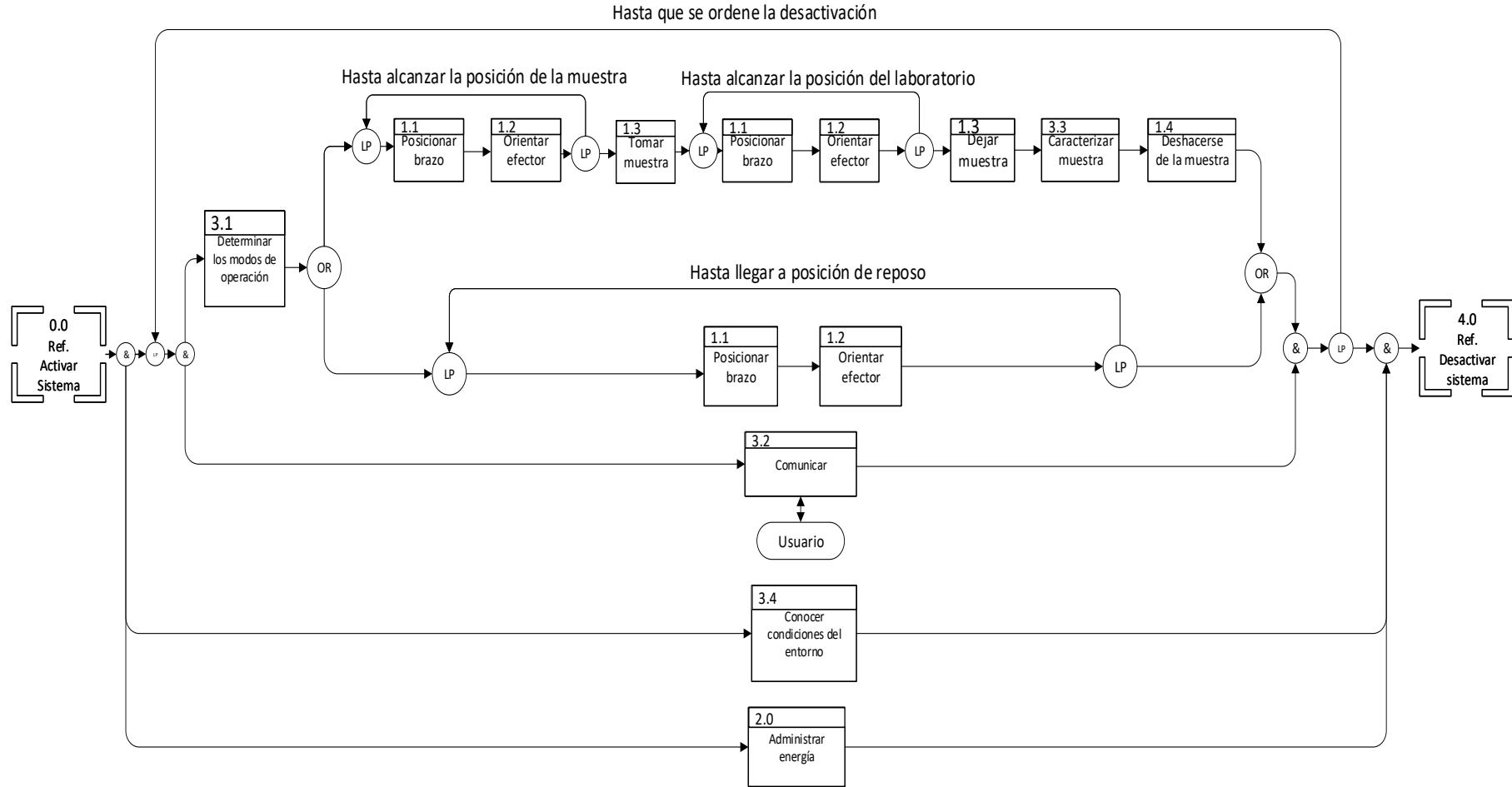


Figura 2.3: Modelo mejorado del diagrama a bloques de flujo funcional

2.1.3. Arquitectura física

Una vez que se ha analizado el comportamiento del sistema mediante las funciones y la relación existente entre ellas, es posible deducir los elementos físicos que las lleven a cabo, los cuales pueden agruparse en los siguientes sistemas con sus correspondientes módulos.

S1 Robótico.

- M1 Manipulador: Un brazo de 3 grados de libertad (GDL) más una muñeca esférica de 3 GDL que realizará la función de posicionar y orientar al efecto final, con el objetivo de trasladar la muestra.
- M2 Efecto final: Herramienta colocada en el extremo del manipulador capaz de sujetar la muestra.

S2 Información

- M3 Percepción: Sensores que le permitirán al sistema obtener información de sí mismo y de su entorno con el fin de conocer los parámetros necesarios para tomar decisiones.
- M4 Comunicación: Elementos que permitan realizar la transmisión y recepción de información.
- M5 Procesamiento: Componentes electrónicos que permitan analizar la información, tomar decisiones y enviar órdenes.

S3 Administración energética: Fuente de alimentación y circuitos que adapten la energía de acuerdo a las necesidades de cada componente.

S4 Laboratorio

- M6 Obtención de datos de la muestra: Sensores que le permitirán al sistema obtener información de la muestra de interés.
- M7 Desechador: Mecanismo encargado de expulsar la muestra del sistema.

S5 Estructural: Soporte y protección para los componentes que conforman el sistema.

Validación de módulos

La Tabla 2.5 muestra la matriz de trazabilidad utilizada para validar los módulos propuestos al comprobar que cada una de las funciones es realizada por algún módulo, y que cada módulo cumple al menos una función.

En primer lugar, se puede apreciar fácilmente que S3 y S5 están presentes en todas las funciones, pues para que sean realizadas, es fundamental que cuenten con la energía necesaria, además de que el sistema debe ensamblarse de manera integral.

Las funciones de posicionamiento y orientación(f1.1 y f1.2) se llevan a cabo a través del manipulador M1, el cual recibe las coordenadas del objetivo en el espacio tridimensional mediante M3, el cual envía los datos a M5 para que haga los cálculos necesarios de cinemática inversa y control.

El efecto final M2 toma la muestra de su posición original y la deposita en el área de análisis (f1.3), mediante las funciones de posicionamiento y orientación (f1.1 y f1.2).

La muestra se devuelve al entorno (f1.4) mediante M7, el cual es controlado por M5.

Para seleccionar el modo de operación (f3.1), se utiliza la información provista por M3 sobre las condiciones del ambiente, y M5 sobre la energía disponible.

Para que el sistema pueda realizar la función general, es necesario que haya comunicación (M4) entre todos sus sistemas y módulos (f3.2.1), para que se puedan realizar las tomas de decisiones, y además, informar al usuario(f3.2.2.1) sobre los datos obtenidos (M6) y los problemas que se presenten (M3).

La interacción con el rover (f3.2.2.2) se realiza mediante M4, para recibir de éste el nivel de energía disponible.

Los datos físicos de la muestra se obtienen (f3.3) a través de M6, y su posición a través de M3.

Las condiciones del entorno se obtienen a través de M3.

Una vez que se han validado los módulos es útil comenzar a agruparlos en sistemas, para la cual se utiliza un diagrama de bloques que describe gráficamente a la *Arquitectura física*[24], de manera que resulte más sencillo analizar la interacción entre estos para dar

Tabla 2.5: Matriz de trazabilidad para la validación de módulos respecto a funciones

	f1.1	f1.2	f1.3	f1.4	f2.1	f2.2	f3.1	f3.2.1	f3.2.2.1	f3.2.2	f3.3	f3.4
M1	✓		✓									
M2		✓	✓									
M3	✓	✓	✓				✓	✓	✓		✓	✓
M4								✓	✓	✓	✓	
M5	✓	✓	✓	✓			✓					
S3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
M6								✓			✓	
M7				✓								
S5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

paso a la búsqueda de soluciones.

La Figura 2.4 muestra como el sistema estructural se encarga de integrar el resto de sistema y módulos para que trabajen en conjunto. El sistema de información se conforma del módulo de percepción, el cual obtiene datos de las condiciones internas y externas al sistema; el módulo de comunicación, controlando el tráfico de datos; y por último el módulo de procesamiento, el cual se encarga de recibir los datos, interpretarlos, tomar decisiones con base en ellos y, finalmente, emitir órdenes al resto de módulos. El sistema robótico se compone del efector, que es la herramienta que permite sujetar y soltar la muestra, y del manipulador, que consta de un brazo articulado de 3 GDL para posicionar el efector, y de una muñeca esférica para orientarlo. El sistema energético suministra de energía a todo el sistema, adaptándola a las específicas de cada uno. Finalmente el laboratorio se compone del módulo de obtención de datos, y del desechador, que devuelve la muestra al ambiente una vez que ha sido analizada.

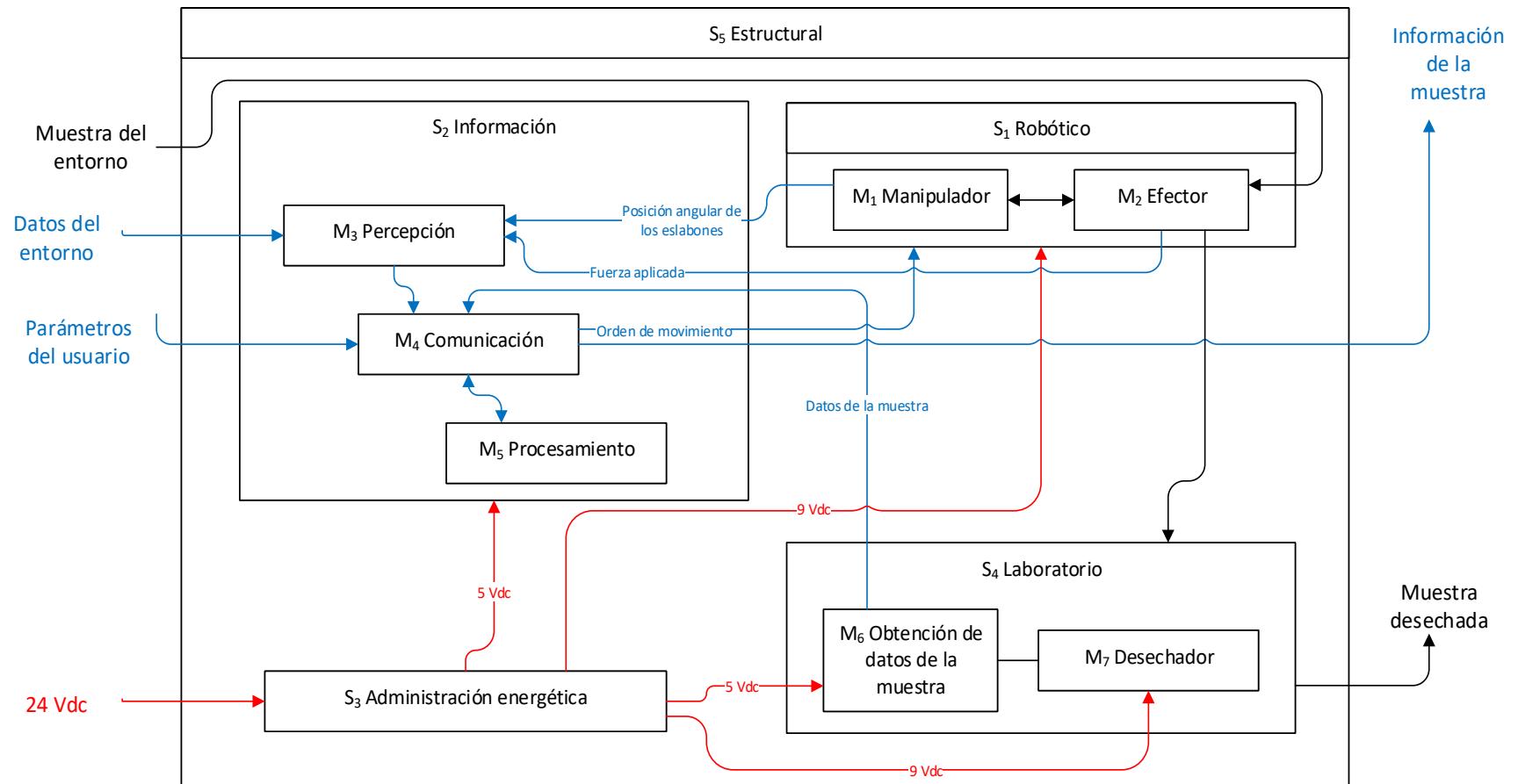


Figura 2.4: Arquitectura física que muestra la interacción de los sistemas y módulos

2.1.4. Concepto solución

Una vez que se han determinado los módulos que compondrán el sistema completo, es posible comenzar a proponer soluciones específicas para cada uno, las cuales serán sometidas a un proceso de selección utilizando una herramienta de selección multicriterio.

La Figura 2.5 muestra los modelos tridimensionales de las soluciones propuestas. Estas soluciones comparten diversos aspectos, como son: 1) Una estructura similar a la de un rover, 2) Un brazo de 6 GDL, 3) Batería como fuente de alimentación, 4) Sensores de temperatura y 5) Cámaras en la parte frontal de la estructura.

El concepto 1 (Figura 2.5a) tiene un brazo construido de placas paralelas, un gripper con forma de pinza de 2 dedos como efecto final, un laboratorio con un cono en la parte superior para guiar la caída de la muestra, y circuitos electrónicos apilados y colocados en el centro de la estructura.

El concepto 2 (Figura 2.5b) tiene eslabones eslabones tubulares, y un efecto final similar a los presentes en las excavadoras. Los circuitos también se encuentran apilados y se ubican en la esquina superior derecha (desde la vista frontal), mientras que el laboratorio está en la esquina superior izquierda.

El concepto 3 (Figura 2.5c) cambia en el laboratorio, el cual es un tubo que desliza la muestra hacia la zona de análisis y después a un agujero que la deja caer. El efecto final es un gripper de 3 dedos.

El concepto 4 (Figura 2.5d) ubica el laboratorio en el centro del lado izquierdo de la estructura. Los circuitos están ubicados lado a lado. El brazo se conforma de eslabones de placas paralelas ranuradas y los actuadores se colocan en una sola base ubicada en la parte frontal.

El concepto 5 (Figura 2.5e) contiene los mismos elementos que el concepto 1 a excepción del efecto final, además de que cambian las ubicaciones de los mismos.

El concepto 6 (Figura 2.5f) contempla los eslabones ranurados y la base se ubica en una esquina, además el laboratorio está conformado por una placa que tiene la zona de análisis, la cual se inclina para que la muestra se deslice hacia un agujero que la deja caer.

Con el objetivo de determinar cuál es la propuesta que mejor se desempeña en la realización de las funciones, se utiliza una herramienta de selección multicriterio denominada *Proceso analítico de jerarquía*, (*Analytic Hierarchy Process - AHP* por sus siglas en inglés)[25]; la cual se ayuda de criterios originados a partir del análisis de las diferencias que hay entre ellas, los cuales se muestran en el Apéndice D. 2.

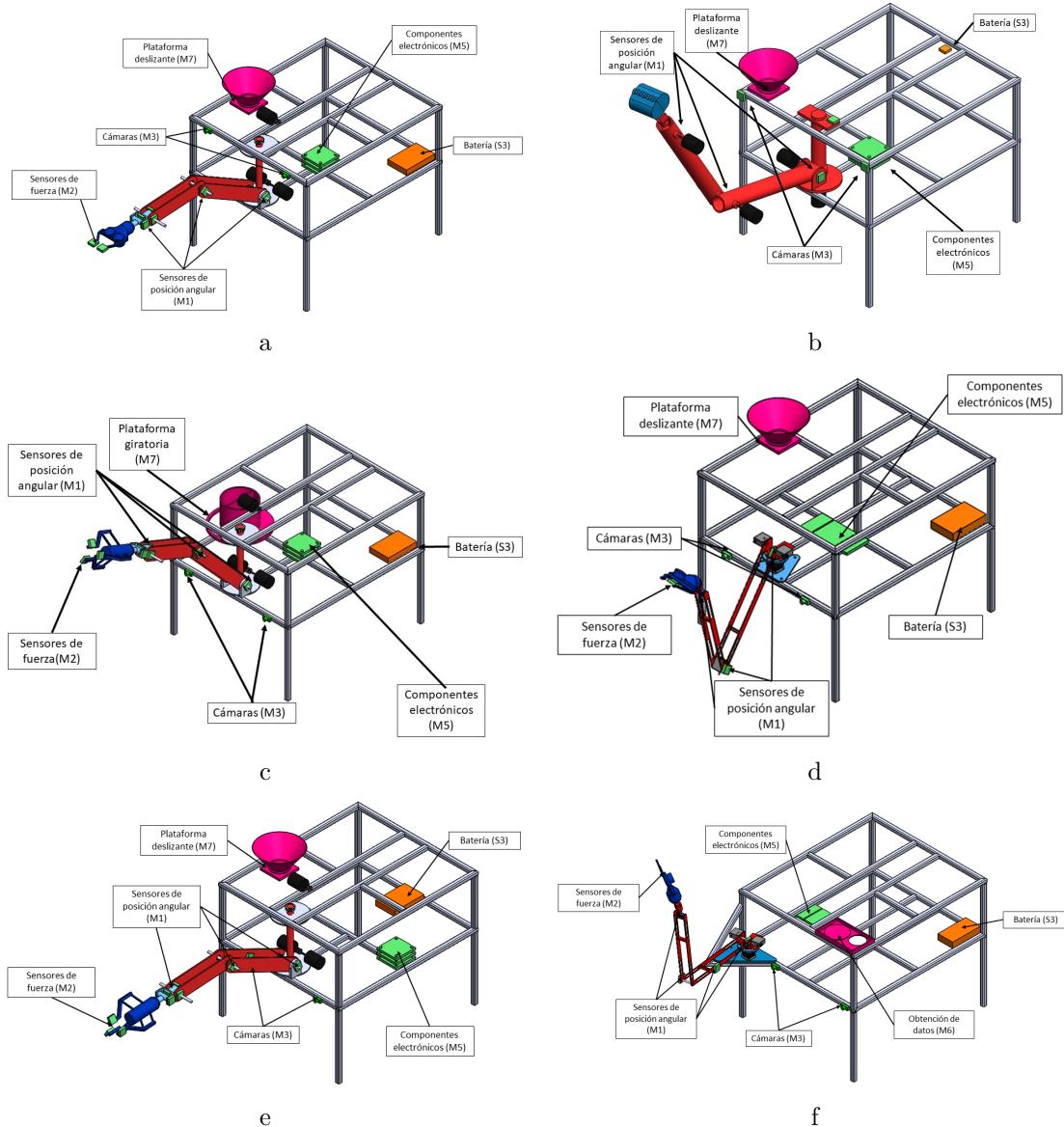


Figura 2.5: Conceptos solución

El proceso de selección comienza con una tabla en la que se compara la importancia de cada criterio contra el resto en una relación de 1:1, obteniendo el llamado “vector de prioridad”, en el cuál se establece la jerarquía de los criterios, como se muestra en el gráfico de la Figura 2.6a, en la cual se puede apreciar que el criterio 13 (Riesgo de daños a la muestra) es el más importante, seguido por el criterio 4 (Riesgo de daños a la estructura).

Para determinar cual es el concepto que mejor satisface las necesidades, se compara uno a uno el nivel en el que se desempeña en cada criterio.

De esta manera, para cada criterio se obtiene un concepto que destaca, y posteriormente se relaciona el desempeño en cada criterio con la importancia de este, encontrando el valor de desempeño general de cada concepto, como muestra la Figura 2.6b, donde se observa que el mayor valor pertenece al concepto número 5, presentado en la Figura 2.5e.

El proceso completo se encuentra en el Apéndice D. 2.

2.1.5. Concepto Final

A pesar de que el concepto número 5 es el concepto elegido (**Ce**), se puede proponer una nueva configuración, donde se revisa el desempeño de cada concepto con respecto a los criterios, analizándolos para extraer las características que lo hicieron superior en ese criterio en específico.

Una vez que se han identificado las características a mejorar del **Ce**, se pueden realizar modificaciones a estas, sin embargo, hay algunas características que están contrapuestas. Para determinar el cambio a realizar, se utiliza la Tabla 2.6, en la cual se comparan las características con sus criterios asociados y sus valores, realizando una suma directa de

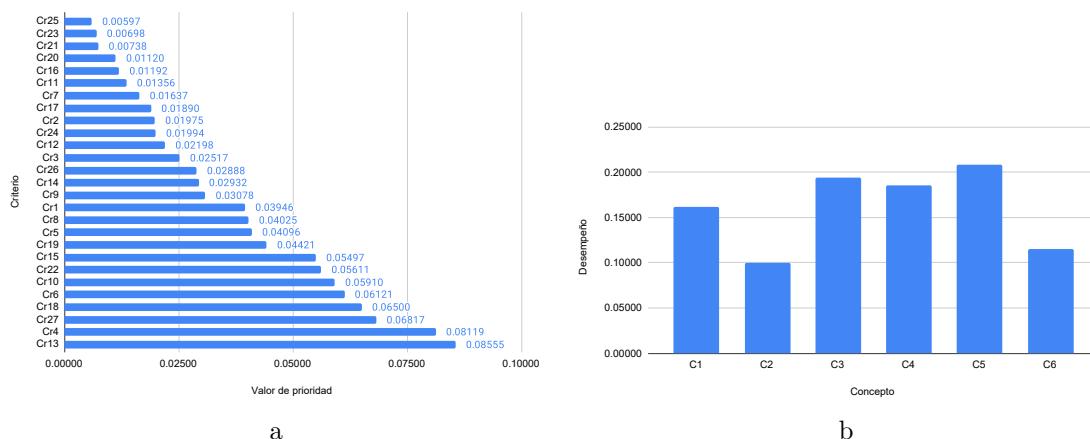


Figura 2.6: AHP a) Jerarquía de criterios; b) Desempeño general de los conceptos

estos para elegir el que tenga un resultado mayor.

Por lo tanto, las modificaciones a realizar son:

- Para reducir la potencia, se usa el brazo ranurado con actuadores en la base.
- Se sustituye el eje largo de acoplamiento a la estructura por una placa similar a la del concepto 4.
- Se elimina la plataforma deslizable del laboratorio cónico para recuperar la forma cilíndrica del concepto 3, lo cual mejora el aprovechamiento del espacio tanto del módulo desechar como del de medición de peso.
- Las tarjetas se colocan al centro de la estructura.
- Se utilizan más sensores, ubicados en los componentes de mayor interés.

Validación de concepto mejorado

Es necesario someter el **Cm** a la misma evaluación aplicada a los otros conceptos, comparando únicamente el **Ce** con el **Cm**, de manera que si este último obtiene un mejor puntaje, significa que las modificaciones realizadas incrementan el desempeño del sistema.

Tras realizar la evaluación de conceptos, el concepto 5 obtuvo *.375*, mientras que el **Cm** obtuvo *0.588*.

La Figura 2.7 muestra el modelo tridimensional del concepto final mejorado (**Cm**), en el que se han realizado los cambios mencionados previamente.

Tabla 2.6: Tabla de comparación de características contrarias para el mejoramiento del concepto elegido

Característica	Criterios favorecidos	Valor de los criterios	Suma
Motor acoplado directamente	Cr2	0.019	0.019
Transmisión mecánica	Cr1,Cr4,Cr6	0.039,0.081,0.061	0.181
Brazo en el centro	Cr3,Cr5,Cr6	0.025,0.04,0.061	0.126
Brazo en un extremo	Cr4	0.081	0.081
Efector de 2 dedos	Cr8,Cr11,Cr12	0.04,0.013,0.021	0.074
Efector de 3 dedos	Cr9,Cr10,Cr13	0.03,0.059,0.085	0.174

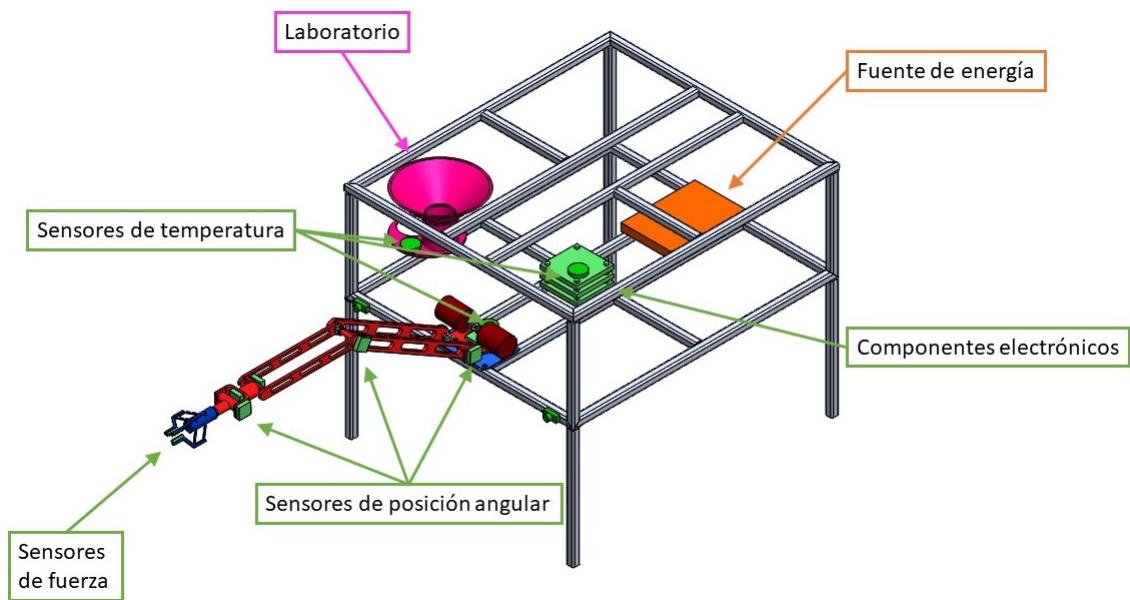


Figura 2.7: Modelo tridimensional del concepto mejorado

2.2. Diseño de dominio específico

A lo largo de este capítulo se realiza el diseño a detalle del sistema, para posteriormente seleccionar los métodos de manufactura, materiales y componentes físicos que conforman los módulos pertenecientes al mismo.

2.2.1. Sistema robótico (S1)

Módulo de manipulador (M1)

Brazo antropomórfico

Para comenzar el diseño del manipulador, resulta necesario establecer la distancia horizontal máxima que debe alcanzar el mismo, la cual se calcula utilizando la ecuación 2.1, que corresponde a la ecuación de triángulos rectángulos propuesta por Pitágoras, y despejando para obtener el cateto horizontal a partir de la cateto vertical y la hipotenusa mostrados en la figura 2.8.

$$BH = \sqrt{BT^2 - BV^2} \quad (2.1)$$

En donde BH es la distancia horizontal al punto más lejano, BT es la longitud del brazo totalmente estirado y BV es la distancia de la base del robot hasta el suelo.

El objetivo propuesto es que el alcance horizontal del brazo sea de aproximadamente 70cm ($BH \approx 70\text{cm}$), y tomando en cuenta que la distancia del suelo a la base del robot BV es de 37cm, se requiere una longitud de brazo BT de 79.17 cm, de los cuales 20cm se consideran ocupados por la muñeca esférica y el efecto final, quedando 59.17cm libres para los dos eslabones del manipulador.

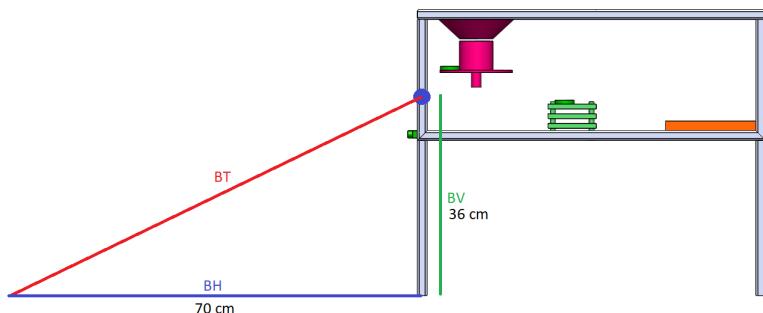


Figura 2.8: Alcance máximo del sistema

Además de esto, se establece que la longitud del segundo eslabón l_2 sea igual a $3/4$ de la longitud del primero l_1 , resultando en $l_1 = 33.81cm$ y $l_2 = 25.35cm$. Los números enteros más cercanos que cumplen esta relación son $l_1 = 32cm$ y $l_2 = 24cm$, los cuales son seleccionados con fines de simplicidad en la manufactura.

De esta manera, las longitudes quedan como se muestra a continuación: $BT = 76cm$, $BH = 66.38cm$, $BV = 37cm$

Selección de material para eslabones

Con el fin de determinar el material para construir el sistema robótico, se debe considerar su geometría, tomando en consideración la restricción de masa (R5). Se considera de forma preliminar que la base fija al rover tenga una masa de 2 Kg, lo cual deja 10 Kg disponibles para el manipulador, además de que se determina un factor de seguridad para la masa de la muestra igual a 2, y el efecto final tiene una masa de 2Kg[3], el cual se discute en la sección Efecto Final (M2)(Vinculo), quedando 7.5 Kg para el manipulador.

Con el objetivo de generar reacciones pequeñas, se establece que el primer eslabón ocupe la mayor parte de la masa, ya que es el que soporta al resto del manipulador, mientras que el eslabón 2 y la muñeca deben ser más ligeros que el primer eslabón al estar más lejos de los ejes de giro de los primeros 2 GDL, por lo que se reduce la masa asignada en un Kg para cada elemento, quedando de la siguiente manera: 1) Eslabón 1: 3.5 Kg, 2) Eslabón 2: 2.5 Kg, 3) Muñeca: 1.5 Kg, 4) Efecto final: 2 Kg, 5) Muestra: 0.5 Kg.

Contando con estos datos, es posible calcular la densidad máxima que debe poseer el material a utilizar, consultando el gráfico que relaciona la densidad de los materiales con su respectivo módulo de elasticidad propuesto por Michael Ashby[17].

Diseño de geometría de los eslabones

La geometría del primer eslabón está determinada por las siguientes dimensiones: 1) Longitud: 32 cm, 2) Espesor: 8 mm. 3) Alto: 3 cm, 4) Radio de chaflán: 1.5 cm.

Con estos datos es posible calcular el volumen ocupado por el mismo, separándolo en sus geometrías básicas, que son un cilindro y un prisma rectangular, además de considerar el volumen de los ejes utilizados para unir ambos perfiles de cada eslabón, por lo que se debe sumar el volumen de éstos, y restar el volumen del barreno requerido para acoplarlos, sustituyendo las dimensiones en la ecuación 2.2

$$V_e = 2t_e(h_e l_e + \pi r_e^2 - 50\pi) + 400\pi \quad (2.2)$$

En donde V_e = es el volumen ocupado por el eslabón, t_e = es el espesor del perfil del eslabón, h_e = es la altura del perfil del eslabón, l_e = es la longitud del perfil del eslabón y r_e = es el radio del chaflán del eslabón.

Sustituyendo t_{e1}, h_{e1}, l_1 y r_{e1} en la ecuación 2.2, queda lo siguiente:

$$V_{e1} = 174.962e - 6 \text{ m}^3$$

Una vez que se ha calculado el volumen que ocupa el eslabón con las dimensiones especificadas, y utilizando el valor de su masa determinada, es posible calcular la densidad máxima que debe tener el material, cuyo valor está dado por la ecuación 2.3, recordando que el concepto solución contempla dos placas paralelas, por lo que el peso determinado debe distribuirse equitativamente.

$$\rho_e = \frac{m_e}{2V_e} \quad (2.3)$$

En donde m_e es la masa del eslabón y ρ_e es la densidad del eslabón.

Sustituyendo m_{e1} y V_{e1} en la ecuación 2.3, queda lo siguiente:

$$\rho_{e1} = 10002.17 \text{ Kg/m}^3$$

Una vez que se conoce la densidad máxima ρ_{e1} del material a seleccionar, se analiza la relación entre la densidad y el módulo de elasticidad de los materiales mostrada en el gráfico de la Figura 2.9, que indica aquellos materiales que no se pueden elegir con un área sombreada, debido a que su densidad es mayor a la máxima establecida en el cálculo anterior, mostrando que la variedad de materiales entre los que se puede elegir es amplia. Esto incluye a los metales, los cuales son una buena elección debido a su módulo de elasticidad elevado, sobresaliendo entre éstos el aluminio, muy utilizado en aplicaciones aeroespaciales debido a su alta maquinabilidad sin comprometer el peso. En la Tabla 2.7 se muestran las principales propiedades mecánicas del mismo[26].

Para seleccionar el material del segundo eslabón se sigue el mismo procedimiento, utilizando las dimensiones determinadas, las cuales son: 1) Longitud: 24 cm, 2) Espesor: 6 mm, 3) Alto: 2.25 cm, 4) Radio de chaflán: 1.125 cm.

Tabla 2.7: Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 T6

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	2700	Kg/m ³
Módulo elástico	69	GPa
Coeficiente de Poisson	0.33	adimensional

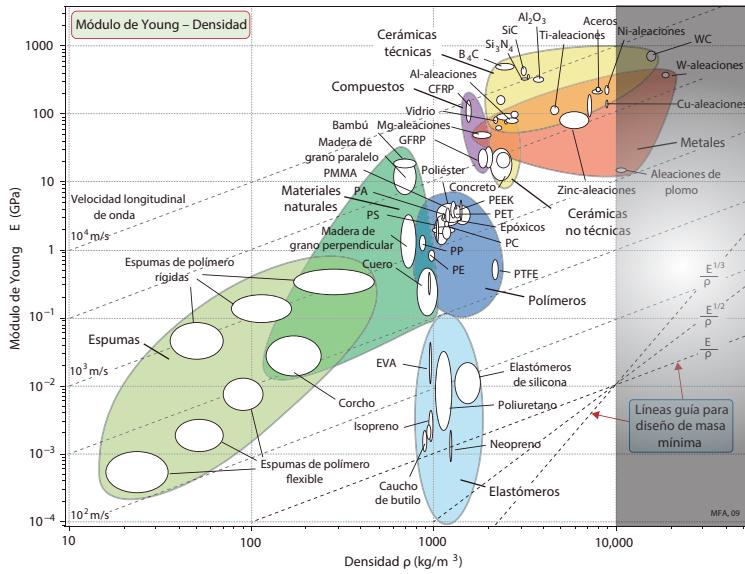


Figura 2.9: Rango de materiales elegibles para el eslabón

Con estos datos se calcula el volumen y la densidad sustituyéndolos en las ecuaciones 2.2 y 2.3 como sigue:

$$V_{e2} = 80.252e - 6 \text{ m}^3$$

$$\rho_{e2} = 15575.93 \text{ Kg/m}^3$$

Como en el caso anterior, el cálculo demuestra que hay muchos materiales entre los cuales elegir, por lo que se selecciona nuevamente el aluminio, ya que presenta la ventaja añadida de que es más barato comprar el mismo material en mayor cantidad que una cantidad menor de distintos materiales.

Considerando que unos eslabones sólidos tienen factores de seguridad grandes, y dado que uno de los objetivos del proyecto es reducir el consumo energético del sistema, se realizaron varios rediseños en las cuales se reduce la cantidad de material ranurando los eslabones y modificando la sección transversal, resultando en las siguientes dimensiones $t_{e1} = 6.35 \text{ mm}$, $t_{e2} = 6 \text{ mm}$.

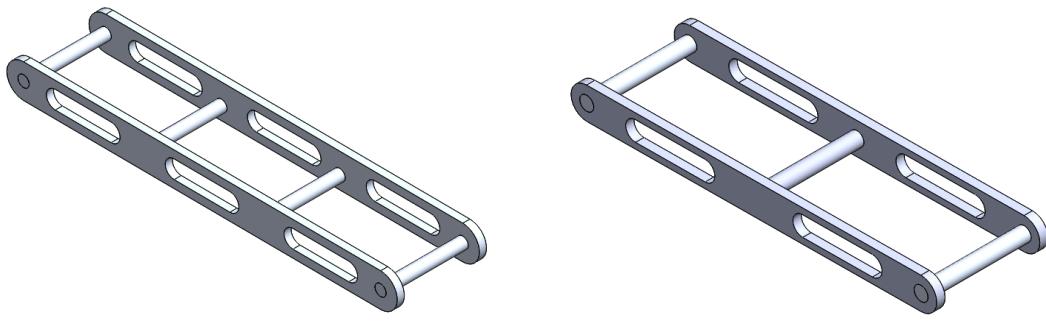
Los eslabones rediseñados pueden observarse en la Figura 2.10.

El volumen ocupado por los eslabones y la masa de los mismos son los siguientes:

$$V_{e1} = 113.899e - 6 \text{ m}^3, V_{e2} = 65.098e - 6 \text{ m}^3, m_{e1} = 307.53g \text{ y } m_{e2} = 175.77g$$

Validación de la selección

Para comprobar el rendimiento del material frente a las cargas aplicadas se ejecuta un



a) Primer eslabón

b) Segundo eslabón

Figura 2.10: Modelos CAD de los eslabones

análisis de elemento finito estático[27] realizando un estudio de resistencia a cada elemento en el software SolidWorks 2018®[26].

Para poder ejecutar este análisis, el software requiere que el usuario indique el valor de las cargas a las que el elemento está sometido, por lo tanto, se calculan las cargas equivalentes mediante las ecuaciones estáticas de equilibrio, siendo la ecuación 2.4 la correspondiente a la suma de fuerzas y la ecuación 2.5 a la suma de momentos.

$$\uparrow \sum F_y = 0 \quad (2.4)$$

En donde F_y = Fuerzas existentes en el eje Y.

$$\circlearrowleft \sum M_o = 0 \quad (2.5)$$

En donde M_o = Momentos generados por las fuerzas normales al punto O.

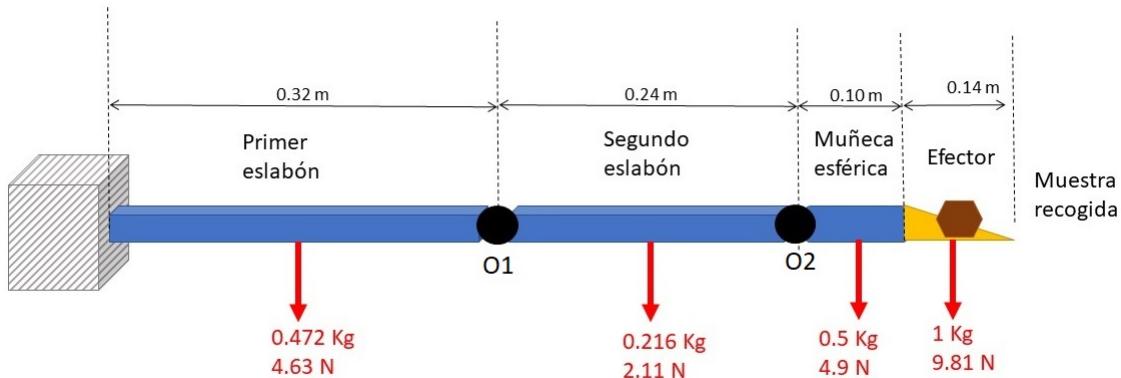


Figura 2.11: Cargas aplicadas al sistema

En la Figura 2.11 se pueden apreciar las cargas a las que está sometido el sistema, analizando las cargas aplicadas en el eslabón 1 en la Figura 2.12a, mientras que las cargas aplicadas al eslabón 2 son mostradas en la Figura 2.12b. Estos datos proporcionan la información necesaria para hacer las simulaciones.

Los estudios de los eslabones se muestran en las Figuras 2.13a y 2.13b respectivamente, mostrando en color rojo las áreas en las que el esfuerzo von Mises es mayor, reduciendo la magnitud así como cambiando el color a azul en las áreas en las que es menor.

El esfuerzo von Mises máximo de 4.681 MPa en el primer eslabón y 8.19 MPa en el segundo arrojan un factor de seguridad de 58.74 y 33.57 respectivamente, por lo que es posible concluir que se logró reducir la masa en un 30 % en comparación a eslabones sólidos sin que el material falle.

Selección de actuadores para los eslabones

Para seleccionar los motores, es necesario determinar el torque que el motor debe aplicar para poder mover al sistema y la muestra, indicada en la Figura 2.14a para el segundo GDL, y la Figura 2.14b para el tercer GDL.

Conociendo este valor, se comparan diversos motores en el mercado utilizando el árbol de decisiones mostrado en el Apéndice A. 1, y se selecciona el motorreductor Planetario Premium HD 12V, 23RPM 4166.2oz-in con codificador, fabricado por Servo City, que de acuerdo a la hoja de especificaciones (Anexo A. 1), cuenta con las siguientes características.

- Par máximo = 4166.2 oz-in = 29.4198 Nm
- Velocidad nominal = 23 rpm
- Corriente sin carga = 0.54 A
- Corriente de motor bloqueado = 20[A]
- Voltaje de alimentación = 12 V

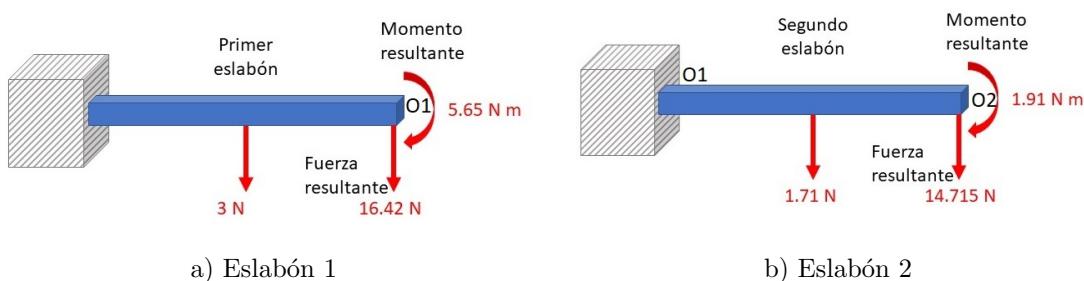


Figura 2.12: Cargas aplicadas a los eslabones.

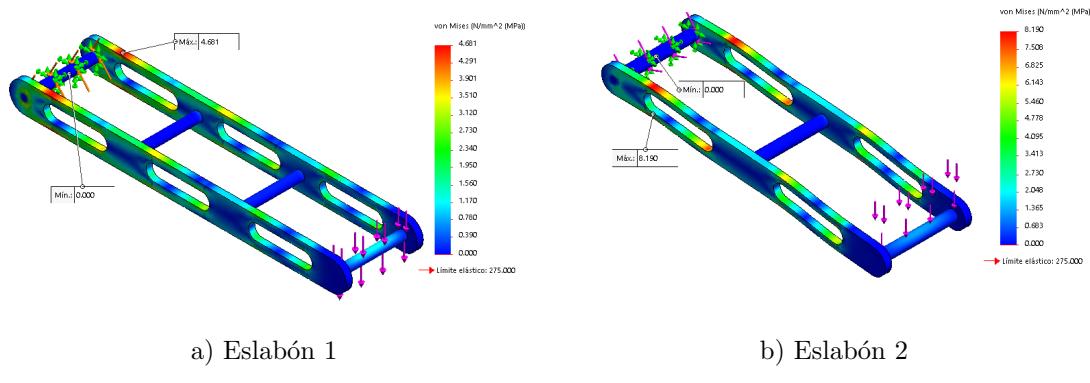


Figura 2.13: Estudios de resistencia

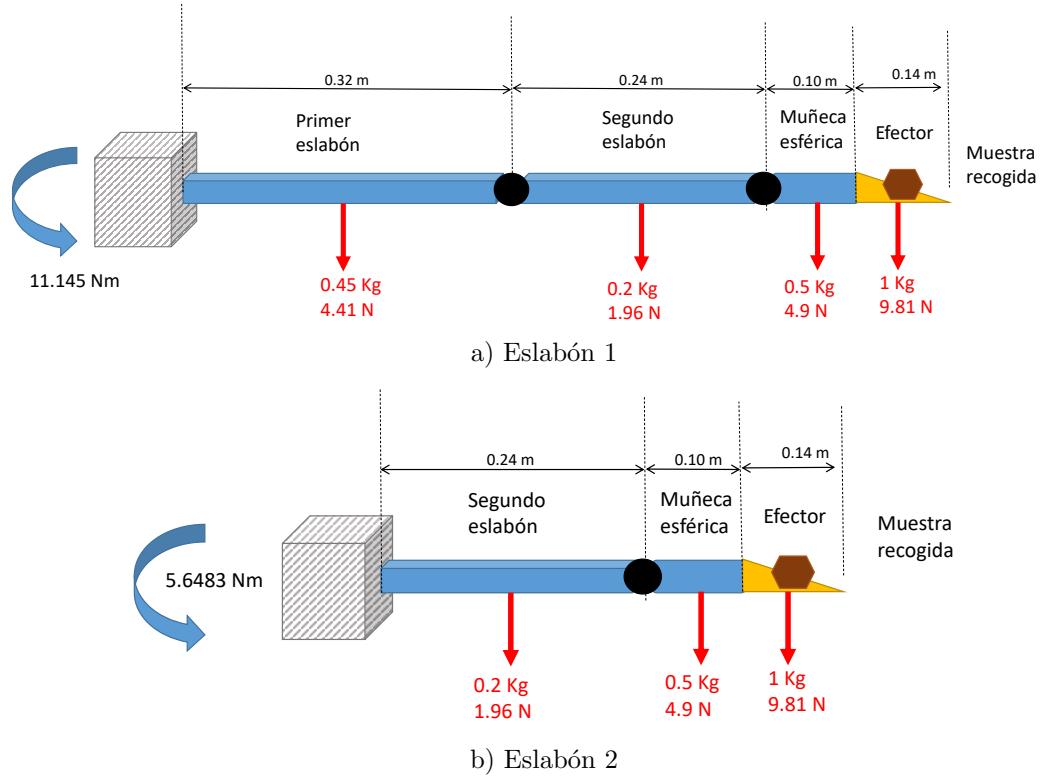


Figura 2.14: Diagramas de cargas aplicadas a los motores.

- Relación de transmisión = 369:1

Conociendo la corriente del motor bloqueado, y el par máximo se calcula la constante de par K_m de acuerdo a la ecuación ??.

$$K_m = \frac{29.5[N - m]}{20[A]} = 1.475^{\text{N-m/A}}$$

Validación de actuadores

Para comprobar que los motores seleccionados son capaces de mover la carga determinada, se calcula el factor de seguridad.

Par necesario para el segundo GDL = 11.145 Nm ; FS = 2.639

Par necesario para el tercer GDL = 5.6483 Nm ; FS = 5.208

Con estos pares calculados, y despejando para i_a de la ecuación ??, se puede calcular la corriente esperada.

$$i_a = \frac{\tau_0}{K_m} = \frac{11.145N - m}{1.475^{\text{N-m/A}}} = 7.55[A] \quad (2.6)$$

Transmisión de movimiento

Las bandas síncronas son cada vez más utilizadas en aplicaciones donde antes se consideraba utilizar engranes o cadenas[18], pues tienen la ventaja de presentar bajas vibraciones de operación, poco ruido, facilidad de determinar la posición actual entre otras, sin sacrificar la capacidad de carga que pueden mover. Por esta razón, se utilizan bandas para transmitir la potencia generada por los actuadores. Los parámetros que debe cumplir la banda de transmisión son los siguientes: 1) Velocidad de movimiento del efecto: 0.05m/s, 2) Relacion de velocidad: 1:1.

Para calcular la potencia que debe transmitir la banda de cada eslabón (ecuación 1.2), se toman en cuenta los pares necesarios (mostrados en las Figuras 2.14a y 2.14b respectivamente), y la velocidad angular a la que gira el eje del motor, recordando que es la misma de la banda y utilizando la ecuación 1.1 como sigue.

$$\omega_1 = v/r = \frac{.05\text{m/s}}{0.73\text{m}} = 0.068\text{rad/s} = 0.64\text{rpm}$$

$$\omega_2 = \frac{.05\text{m/s}}{0.41\text{m}} = 0.121\text{rad/s} = 1.15\text{rpm}$$

$$P_1 = \tau_1 \omega_1 = 11.145\text{Nm} * 0.068\text{rad/s} = 0.757\text{W} = 0.0010\text{HP}$$

$$P_2 = \tau_2 \omega_2 = 5.6483\text{Nm} * 0.121\text{rad/s} = 0.683\text{W} = 0.0009\text{HP}$$

El ajuste de potencia se determina con la ecuación 1.3, utilizando un factor de servicio de 1.1, asociado con aplicaciones de carga ligera en periodos de 8 horas diarias (servicio intermitente)[18], y queda como sigue:

$$P_{1-ajustada} = 0.757\text{W} * 1.1 = 0.8327\text{W} = 0.0014\text{HP}$$

$$P_{2-ajustada} = 0.683\text{W} * 1.1 = 0.7513\text{W} = 0.0012\text{HP}$$

Para determinar el paso mínimo de la transmisión se utiliza la tabla del fabricante SDP/SI[19], con el valor de potencia y la velocidad de operación, lo que indica que una banda de perfil XL es adecuada para esta aplicación en ambos eslabones. La longitud de la banda está determinada por dos factores, la distancia entre centros y el diámetro de las poleas, por lo que se procede a realizar su selección.

Dado que el diámetro de la polea es directamente proporcional a su número de dientes para mantener el paso, se busca para la polea conducida el número mínimo estándar de dientes para poleas con diámetro interno de 12mm (de acuerdo al diseño del eje, tratado en la página), el cual es de 15 dientes, por lo que se selecciona la polea A 6A 3-15DF03716 de SDP/SI (Anexo A. 4). Por lo tanto, para la polea conductora se requiere una polea de diámetro interno de 6mm (diámetro del eje del motor), con 15 dientes para mantener la relación de velocidad especificada, siendo elegida la polea Actobotics 15D (Anexo A. 3).

Con el valor del diámetro de la polea, se calcula la longitud de cada banda con la ecuación 1.4.

$$L_{entre ejes} = 2 * 320[\text{mm}] + 15 * 5.080[\text{mm}] = 716.2[\text{mm}] = 28.19[\text{in}] = 145 \text{ ranuras}$$

$$L_{motor a eje} = 2 * 44.6[\text{mm}] + 15 * 5.080[\text{mm}] = 165.4[\text{mm}] = 6.511[\text{in}] = 35 \text{ ranuras}$$

Las bandas XL se encuentran en el mercado con anchos entre 0.25[in] y 0.375[in]. Una vez que se conocen los datos necesarios para las bandas, se seleccionan los modelos de ServoCity B375-290XL con 145 ranuras y B375-70XL con 35 ranuras.

Conociendo estos datos, se calcula la potencia base nominal ajustada[18] utilizando la ecuación 1.5 como sigue:

$$P_{1-ajustada} = 0.0014HP * 1 = 0.0014HP$$

$$P_{2-ajustada} = 0.0012HP * 0.7 = 0.0008HP$$

Para comprobar que la banda opera con niveles bajos de ruido, se calcula la velocidad lineal de la banda, y para ello se utiliza la ecuación 1.6.

$$V_{banda-1} = \frac{12.7[\text{mm}] * 0.068 [\text{m/s}]}{2} = 0.431\text{m/s}$$

$$V_{banda-2} = \frac{12.7[\text{mm}] * 0.121 [\text{m/s}]}{2} = 0.768\text{m/s}$$

Ya que la velocidad en ambas bandas es menor a 17.78 m/s, que es la velocidad máxima a la que puede operar la banda sin perturbaciones[18], se comprueba que las bandas no operan con ruido.

Las características de las bandas seleccionadas se muestran en la tabla 2.8.

Las poleas mostradas en la Tabla 2.9 sirven para la transmisión de movimiento de todos los ejes de movimiento del brazo, sin embargo es importante tomar en cuenta que la banda necesita estar en tensión, por lo que es necesario diseñar un mecanismo que mantenga la tensión en la banda perteneciente al segundo eslabón, para lo cual se diseña un “ocioso” que puede colocarse en el eje del primer eslabón sin afectar su comportamiento, pues tiene rodamientos en la parte interna (Anexo A. 10), como se muestra en la Figura 2.15, con los cuales se ajusta al eje del primer eslabón, girando libremente sin aplicar torsión al mismo. La necesidad de diseñar la polea surge del hecho de que los fabricantes solo ofrecen ociosos para tensar una banda, mientras que esta aplicación requiere que dos bandas diferentes se muevan a la par, por lo que utilizar las poleas ociosas comerciales requiere unirlas

Tabla 2.8: Características de las bandas seleccionadas

	Primer eslabón	Segundo eslabón
Modelo	B375-70XL	B375-290XL
Paso	0.200 (XL)	
Material	Neopreno	
Número de ranuras	35	145
Material tensor	Fibra de vidrio	
Ancho [in]	3.75	
Largo [in]	7	29

Tabla 2.9: Características de las poleas seleccionadas

	Conductora	Conducida
Material	Aluminio 6061 T6	
Ancho máximo de banda [in]	0.375	
Diámetro de barreno [mm]	6	12
Modo de sujeción	Retenedor 10-32*1/8 [in]	
Diámetro de paso [in]	0.637	

mecánicamente, lo que puede representar riesgo de deformaciones o desalineamiento entre ejes de giro, por lo cual se opta por manufactura aditiva en un plástico de ingeniería [28], como es el Nylon12, PC, Ultem y Antero.

Diseño de ejes para los eslabones

Eje del primer eslabón

El primer eje tiene está configurado por dos apoyos de rodamiento, una polea ociosa doble, una polea síncrona común y dos sujetadores, como se muestra en la Figura 2.16.

Para conocer la magnitud del momento flector y el momento torsionante, se analiza el eje como viga en dos planos, mostrados en las Figuras 2.17 y 2.18.

De estos diagramas se obtienen además las reacciones generadas en los rodamientos, las cuales se utilizan más adelante para realizar la selección de estos.

Para calcular la fuerza que la banda aplica sobre el eje, se utilizan las ecuaciones 1.8.

$$F_n = \frac{11.244 Nm}{0.023749 m} = 473.45 N$$

$$F_s = 1.5 * 473.45 = 710.177 N$$

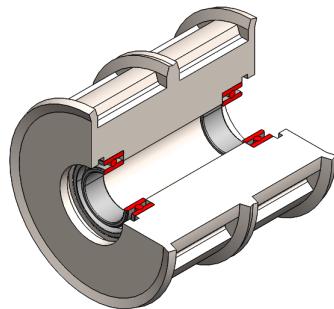


Figura 2.15: Vista de sección del ocioso con dientes

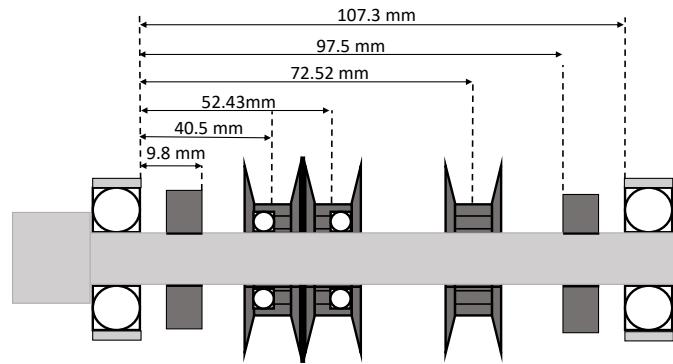


Figura 2.16: Diagramas de cargas del eje 1

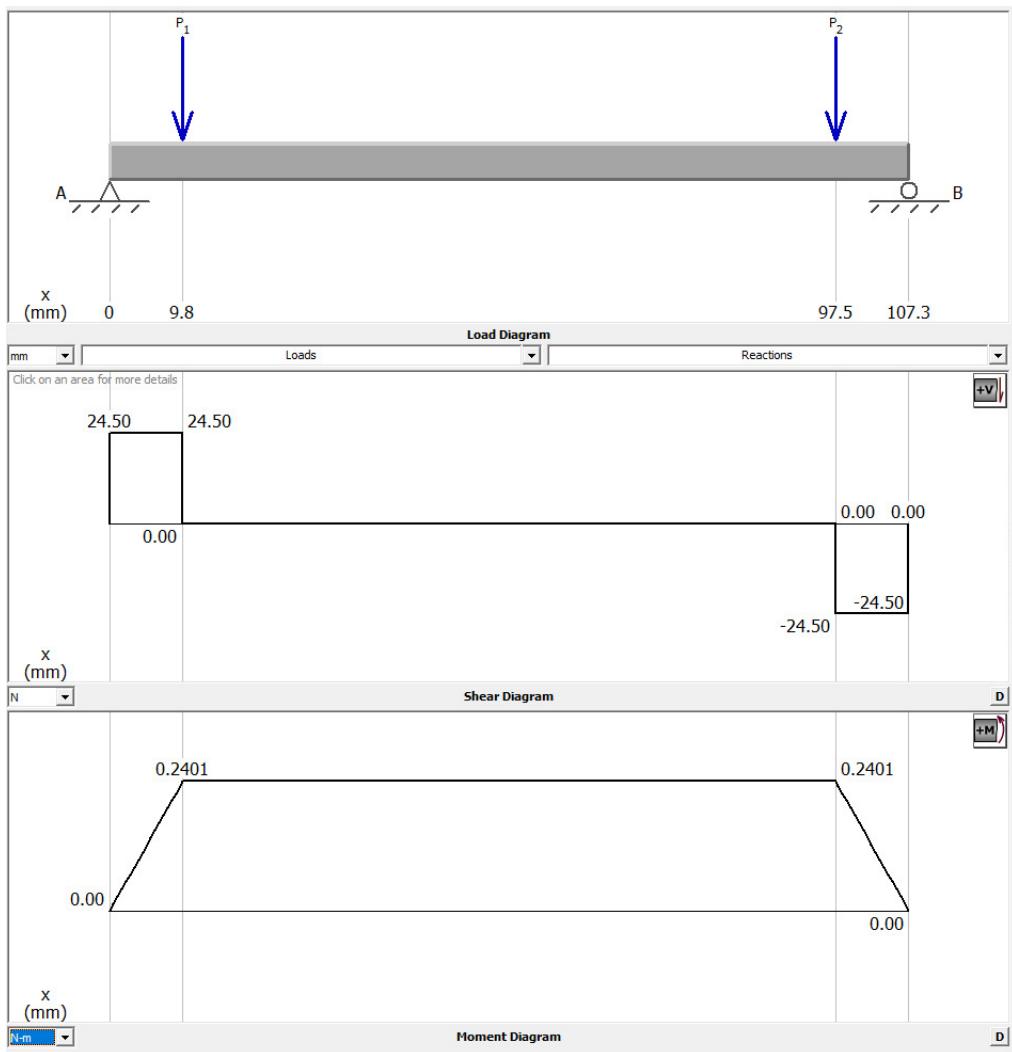


Figura 2.17: Plano frontal de cargas del eje 1

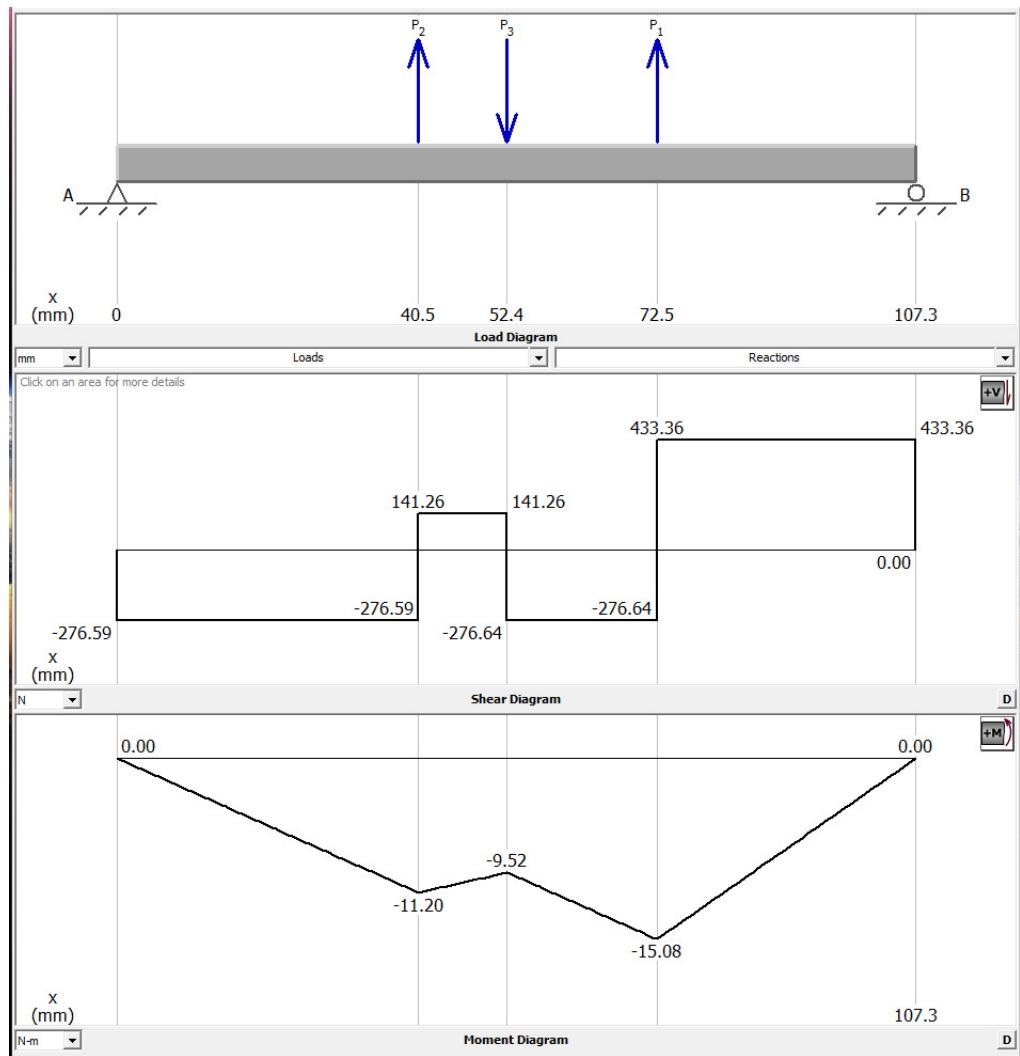


Figura 2.18: Plano superior de cargas del eje 1

$$F_n = \frac{6.616Nm}{0.02375m} = 278.568N$$

$$F_s = 1.5 * 278.568 = 417.852N$$

Con los valores obtenidos, enlistados a continuación, se propone utilizar acero 1060 rolado, cuyas características son:

- Densidad: 7850Kg/m^3
- Módulo de elasticidad: 205GPa
- Límite elástico: 814MPa
- Esfuerzo de cedencia: 485MPa

Se ajusta el valor del límite elástico con las ecuaciones 1.10 y 1.11 con los siguientes factores de corrección[18]

- Factor de material: $C_m = 0.8$
- Factor de tipo de esfuerzo (flexionante): $C_{st} = 1$
- Factor de confiabilidad al 90 %: $C_R = 0.9$
- Factor de tamaño: $C_s = 0.95$

$$S_n = 0.5 * 814\text{MPa} = 407\text{MPa}$$

$$S'_n = 407\text{MPa} * 0.8 * 1 * 0.9 * 0.95 = 278\text{MPa}$$

Finalmente, con los valores obtenidos, se puede calcular el diámetro mínimo del primer eje con la ecuación 1.12.

$$D_1 = 0.0113m$$

Las reacciones en los apoyos representan las cargas radiales a las que están sometidos los rodamientos, por lo que es necesario calcular la carga dinámica mínima que deben soportar utilizando la ecuación 1.13, tomando como base una vida de un año con el servicio intermitente, es decir, 2900 horas o 4.002 millones de revoluciones.

$$C_{eje-1} = 166.823N$$

$$C_{eje-2} = 160.377N$$

Eje del segundo eslabón

De manera análoga al diseño del primer eje, se analizan las cargas a las que está sometido el segundo eje, como se muestra en la Figura 2.19.

Como se puede ver en las Figuras 2.20 y 2.21., solo la polea y los eslabones producen fuerzas sobre el eje, el cual también está apoyado en dos rodamientos.

La fuerza ejercida por la banda, es la misma que la calculada anteriormente para la polea ociosa.

Para este eje, se propone el mismo material, y se utilizan los mismos factores de corrección.

Entonces, el diámetro mínimo queda como sigue:

$$D_2 = 0.0096m$$

Finalmente, las reacciones obtenidas se utilizan en la ecuación 1.13

$$C_1 = 95.013N$$

$$C_2 = 95.240N$$

Las piezas comerciales adquiridas para ensamblar el manipulador, las cuales pueden verse en el Anexo A. 5, son:

- Chumacera de piso: Soporte para el eje del eslabón perteneciente al segundo GDL.
- Abrazadera para motor: Sujeción de los motores a la base giratoria.
- Chumacera de pared: Soporte para el eje del eslabón perteneciente al tercer GDL.
- Sujetador: Para acoplar rígidamente el eje al eslabón.

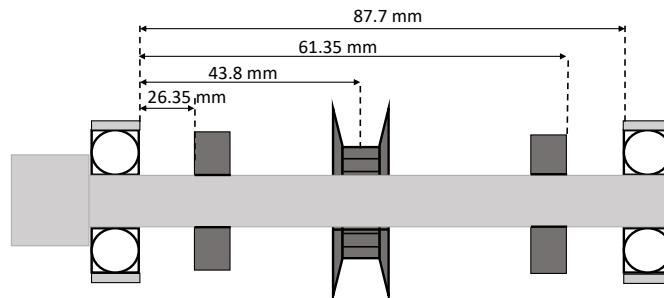


Figura 2.19: Diagramas de cargas del eje 2

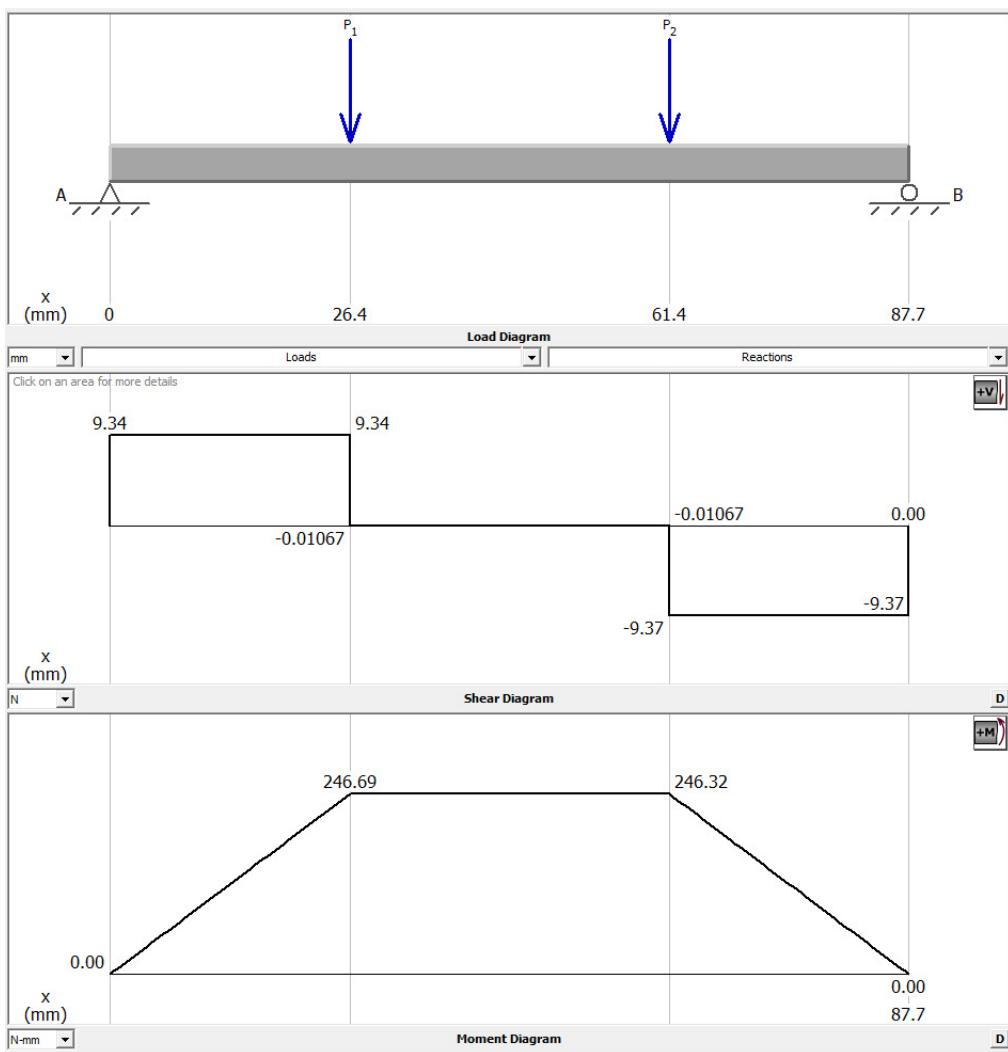


Figura 2.20: Plano frontal de cargas del eje 2

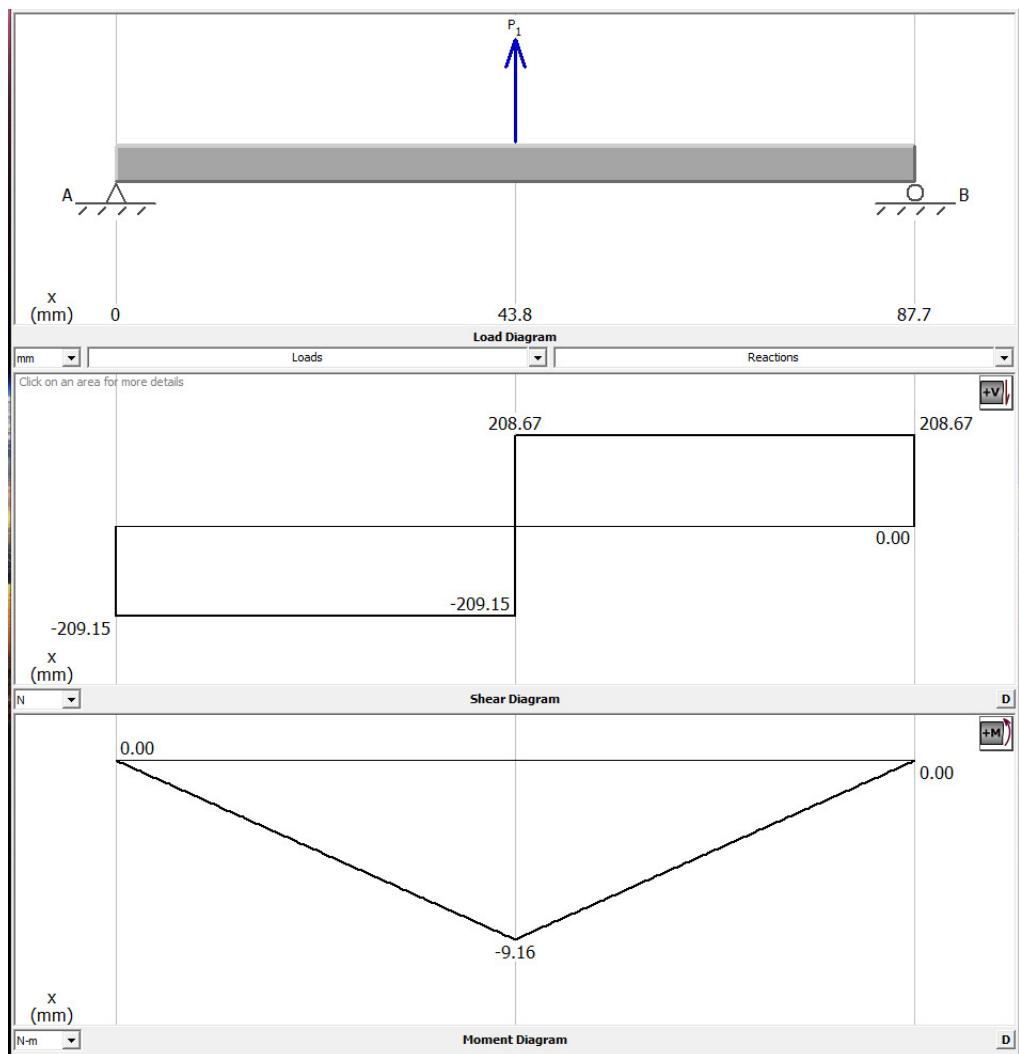


Figura 2.21: Plano superior de cargas del eje 2

En el diseño de la cadera (GDL 1) se considera extender el eje de giro del motor a una plataforma giratoria que sostenga a los demás elementos del manipulador robótico. Dicha extensión consiste en un acoplador sujeto al eje del motor en un extremo y al eje de la plataforma giratoria en el otro.

Considerando que el eje de giro se encuentra sometido a cargas y esfuerzos debido a la distribución de los elementos del manipulador robótico, se colocan rodamientos en el eje de giro de la plataforma giratoria para resistir las fuerzas axiales y radiales generadas.

Estas cargas se conocen al trasladar las reacciones generadas por el brazo robótico y la muestra que transporta hacia las direcciones radial y axial, como se muestra en la Figura 2.22, las cuales se distribuyen a rodamientos específicos para cada tipo de carga.

La Tabla 2.10 muestra las masas de los elementos del brazo, así como la distancia a la que se encuentran del punto D, que es en el que se realiza la suma de momentos.

$$R_A = 488.6N$$

$$R_B = 488.6N$$

$$R_C = 326.58N$$

$$R_D = -273.51N$$

Con las reacciones R_A y R_B , es posible diseñar el eje, pues son las únicas que provocan flexión, mientras que el momento torsionante es proporcionado por el motor.

El material disponible para acoplar el eje del motor, y sobre el cual se aplican las reacciones, es acero inoxidable 303, cuyas características se enlistan a continuación.

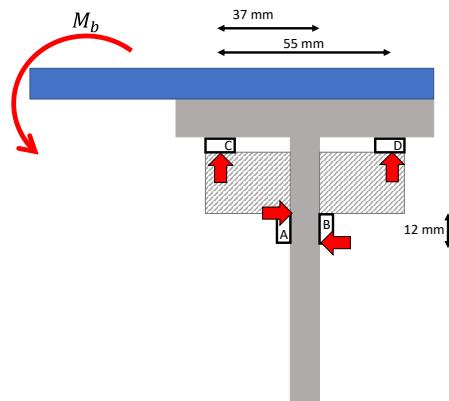


Figura 2.22: Diagrama de cargas para el eje del primer GDL

Tabla 2.10: Masas de los elementos del brazo robótico

	Símbolo	Masa [kg]	Distancia [m]
Muestra	m_{piedra}	0.5	0.96
Efector final	m_{ef}	0.5	0.885
Muñeca	$m_{muñeca}$	0.627	0.775
Eslabón 2	m_2	0.28	0.535
Eslabón 1	m_1	0.627	0.255
Soporte del brazo	$m_{soporte}$	0.5	0.095
Base giratoria	m_{base}	2.375	0.0275

- Densidad: 8000Kg/m^3
- Módulo de elasticidad: 193GPa
- Límite elástico: 620MPa
- Esfuerzo de cedencia: 240MPa

El proceso de diseño del eje es similar al de los ejes de los eslabones, como se muestra:

$$S_n = 0.5 * 620 \text{ MPa} = 310 \text{ MPa}$$

$$S'_n = 310 \text{ MPa} * 0.8 * 1 * 0.9 * 0.95 = 212 \text{ MPa}$$

$$D = 0.0178 \text{ m}$$

$$C_{axial} = 496 \text{ N}$$

$$C_{radial} = 742 \text{ N}$$

Las cargas dinámicas que son capaces de soportar los rodamientos se calculan con la ecuación 1.13, sustituyendo P_d con el valor de las reacciones axial y radial según sea el caso.

De acuerdo al catálogo en línea del fabricante SKF[29], se seleccionan los rodamientos más pequeños que cumplen con las características necesarias, siendo un rodamiento axial de agujas con designación AXK-4565 (Anexo A. 8) para las cargas axiales, y un rodamiento de rodillos con designación NU-303 (Anexo A. 9) para las cargas radiales.

La plataforma giratoria debe ser capaz de sostener a los dos motores que mueven los eslabones, así como el soporte del brazo. Por ello se utiliza una geometría de medio círculo en la parte posterior, mientras que en la parte frontal se colocan dos salientes, como se muestra en la Figura 2.23, sobre los que se montan las chumaceras que soportan al eje del primer grado de libertad, dejando un espacio libre entre estas para permitir que el eslabón gire por debajo del plano horizontal evitando la colisión con la plataforma. Para facilitar la comprensión de la geometría, se recurre a una perspectiva isométrica (donde se observa

como la ranura en la pieza permite el movimiento de los eslabones) y a la vista superior (en donde se ve la distribución de los componentes), mostradas en la Figura 2.24a y 2.24b respectivamente.

El cilindro está diseñado de acuerdo a las dimensiones del eje del motor acoplado y los rodamientos seleccionados previamente, además de añadir barrenos para atornillarlo a la base fija, cuyo resultado se muestra en la Figura 3.2a.

Finalmente, la base fija, mostrada en la Figura 3.2b, es aquella que debe soportar los esfuerzos generados por todo el manipulador, en la que se acopla el cilindro base de la Figura 3.2a a la placa, como se muestra en la Figura 3.2c.

Validación de la base

Para comprobar la integridad mecánica de las piezas que conforman la base, se realiza un análisis de elemento finito^[27] en SolidWorks®, utilizando como material el aluminio 6061 (propiedades disponibles en la Tabla 2.7).

Plataforma giratoria

Para la plataforma giratoria, que tiene una masa de 0.128[Kg], el análisis queda como sigue:

La Figura 2.26a muestra que el esfuerzo von Mises máximo es 53.73[MPa], por lo que tiene un factor de seguridad de 5.11. Mientras que la Figura 2.26 muestra que la deformación máxima es 0.8[mm].

Cilindro base

Para el cilindro base, que tiene una masa de 0.096[Kg], el análisis es el siguiente:

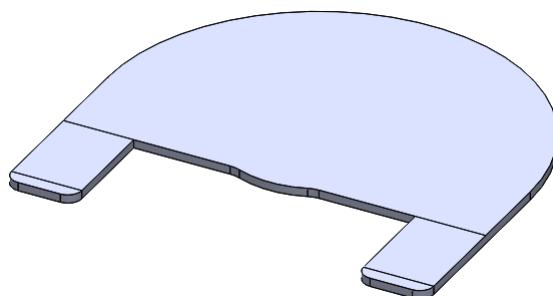
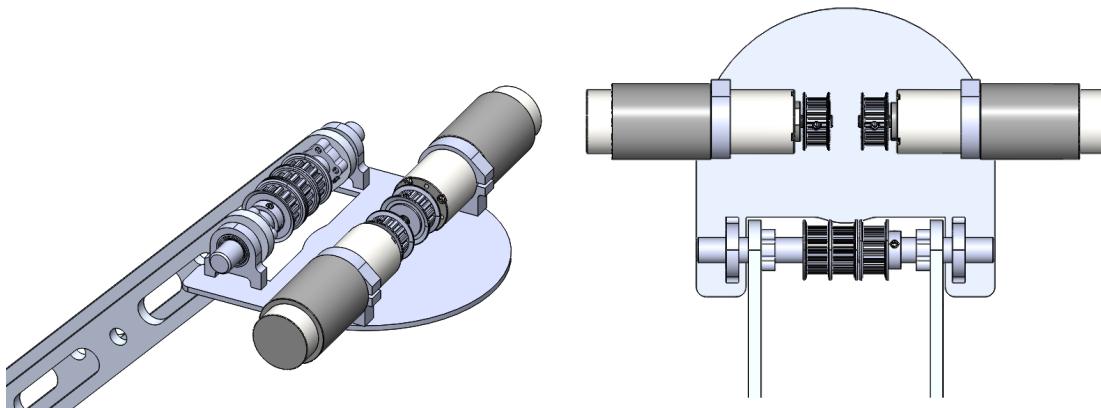


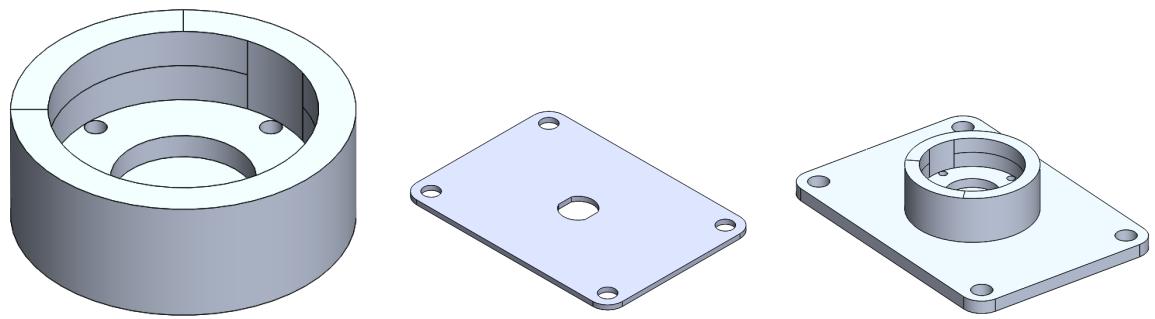
Figura 2.23: Modelo CAD de la plataforma giratoria



a) Perspectiva isométrica

b) Vista superior

Figura 2.24: Vistas de referencia para la plataforma giratoria

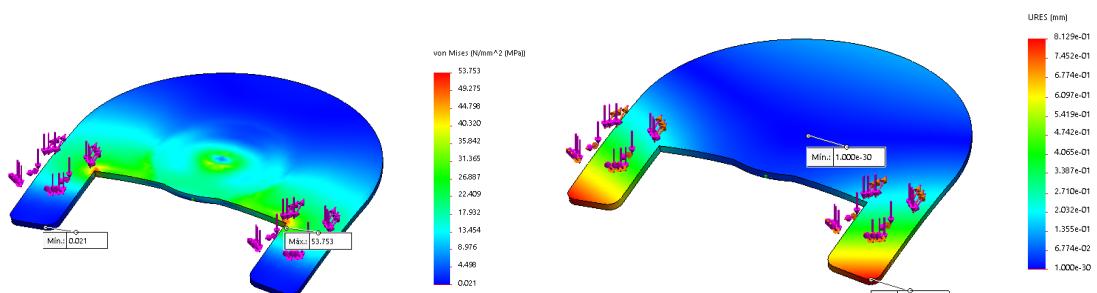


a) Cilindro

b) Placa rectangular

c) Cilindro y placa ensamblados

Figura 2.25: Piezas de la base fija



a) Análisis de resistencia

b) Análisis de rigidez

Figura 2.26: Análisis de elemento finito de la plataforma

La Figura 2.27a muestra que el esfuerzo von Mises máximo es 52[MPa], por lo que tiene un factor de seguridad de 5.28. Mientras que la Figura 2.27b muestra que la deformación máxima es 0.004[mm].

Base fija

Para la base fija, que tiene una masa de .230[Kg], el análisis queda como sigue:

La Figura 2.28a muestra que el esfuerzo von Mises máximo es 19.9[MPa], por lo que tiene un factor de seguridad de 13.18. Mientras que la Figura 2.28b muestra que la deformación máxima es 0.028[mm].

Diseño final de la base fija

La Figura 2.29a muestra la configuración final de la mesa ensamblada, mientras que la Figura 2.29b muestra una vista explosionada que permite apreciar los elementos que la conforman.

Muñeca esférica

De acuerdo a las ecuaciones 1.16 y 1.17, para poder realizar el desacoplamiento cinemático los 3 ejes de giro de la muñeca deben intersecarse en un punto, por lo que se diseña una muñeca esférica.

Debido a que se cuenta con poco espacio y son fáciles de utilizar, se propone utilizar servomotores de tamaño estándar.

Con la finalidad de acoplar el servomotor del primer grado de libertad de la muñeca (que corresponde al cuarto grado de libertad del robot) al segundo eslabón, y para sopor tar los esfuerzos radiales, se utiliza una estructura de carga comercial que, como puede

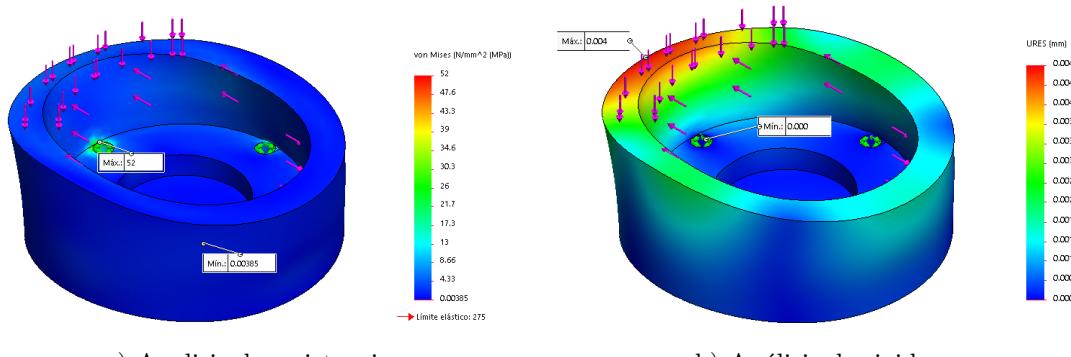
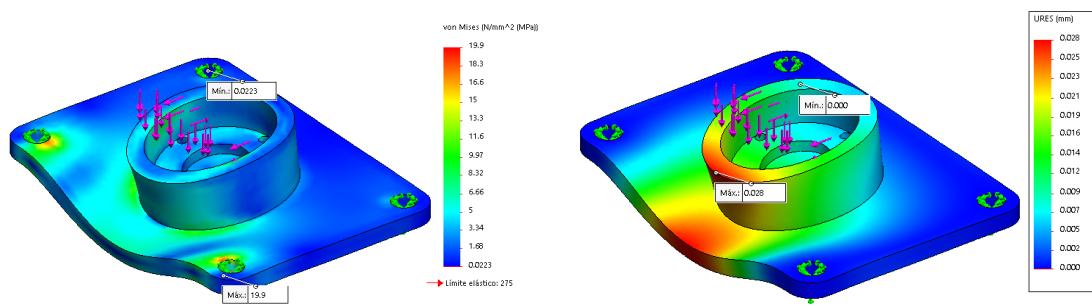


Figura 2.27: Análisis de elemento finito del cilindro de la base



a) Análisis de resistencia

b) Análisis de rigidez

Figura 2.28: Análisis de elemento finito de la base fija ensamblada

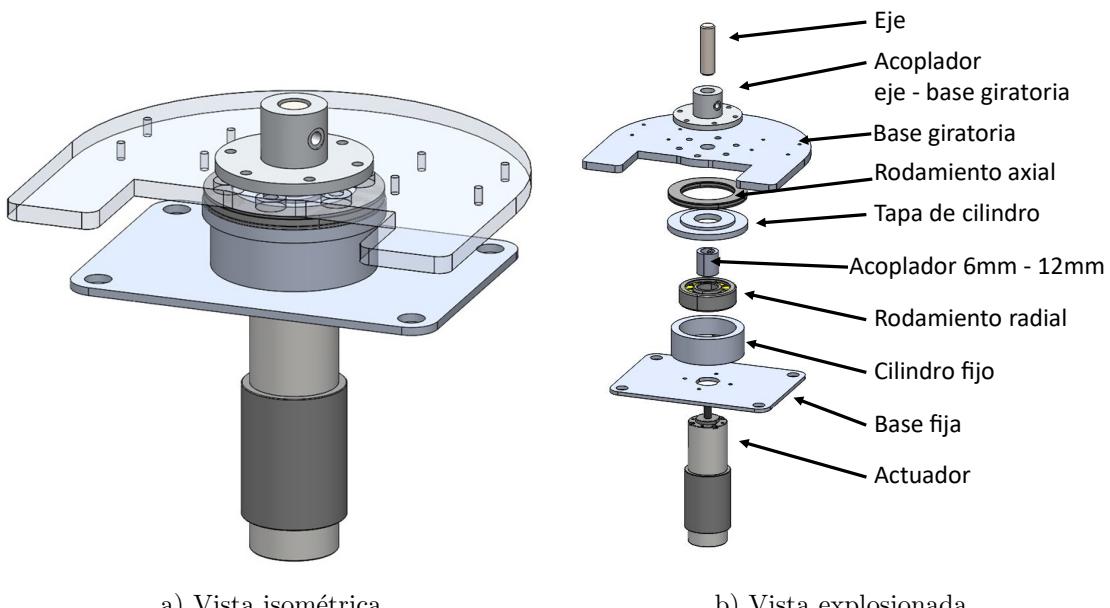


Figura 2.29: Vistas de la base del robot

apreciarse en la vista explosionada de la Figura 2.30a, consta de dos soportes laterales, un marco para el servomotor, una chumacera y un adaptador para el eje del mismo. La estructura armada se muestra en la Figura 2.30b.

Para soportar los motores restantes, manteniendo la intersección de sus ejes, se diseñan varias piezas como sigue: Un conector tipo C que transmite la rotación del primer GDL, una pieza a modo de cubierta que sostiene a los servomotores manteniendo la ortogonalidad entre sus ejes de giro, a la vez que absorbe las cargas radiales aplicadas al eje a través de rodamientos y una tapa para la cubierta con espacio para rodamiento radial, además de un cople para unir el eje del tercer servomotor con la base del efecto final.

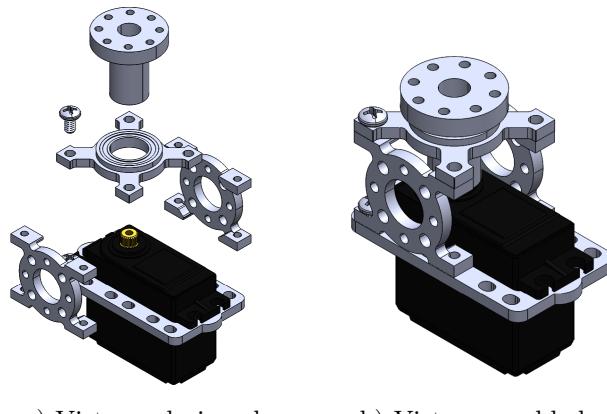
Además, se adquieren dos acopladores el eje de los servomotores de los últimos 2 GDL de la muñeca. Aunado a ello, se adquieren dos rodamientos con diámetro intero igual al diámetro del acoplador de $1/2$ [in] y un rodamiento con brida para acoplar la pieza con forma de “C”.

Estas piezas pueden observarse a detalle en la Figura 2.31a, mientras que el ensamblaje se muestra en la Figura 2.31b. Las piezas adquiridas se encuentran en el Anexo A. 6, mientras que los rodamientos aparecen en el Anexo A. 10.

La muñeca esférica completa con los servomotores se puede apreciar en la Figura 2.32.

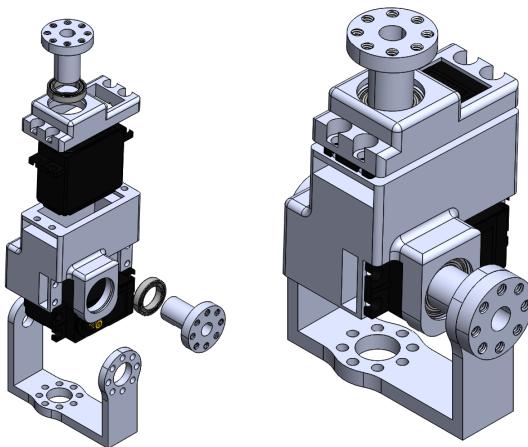
Debido a que estas piezas presentan geometrías complejas, y que no se someten a esfuerzos tan grandes como el brazo, se opta por utilizar manufactura aditiva con materiales típicos de la misma. En este sentido, los más populares son el PLA y el ABS, sin embargo, el PLA es conocido por su fragilidad, por lo que el material seleccionado es ABS.

Finalmente, resta seleccionar los servomotores a usar, para lo cual se calcula el par



a) Vista explosionada b) Vista ensamblada

Figura 2.30: Primer grado de libertad de la muñeca esférica



a) Vista explosionada b) Vista ensamblada

Figura 2.31: Segundo y tercer grado de libertad de la muñeca esférica

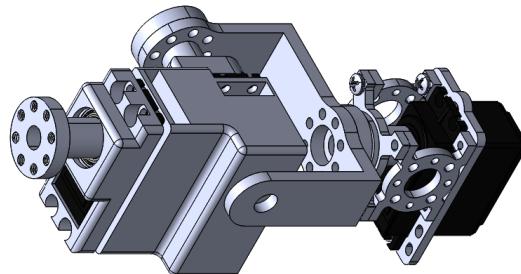


Figura 2.32: Modelo CAD de la muñeca esférica

máximo que deben de soportar, utilizando los diagramas mostrados en las Figuras 2.33a y 2.33b, destacando que, dado que las cargas se encuentran muy cerca del eje de giro del tercer GDL, el momento que generan es muy pequeño, por lo que se omite su cálculo.

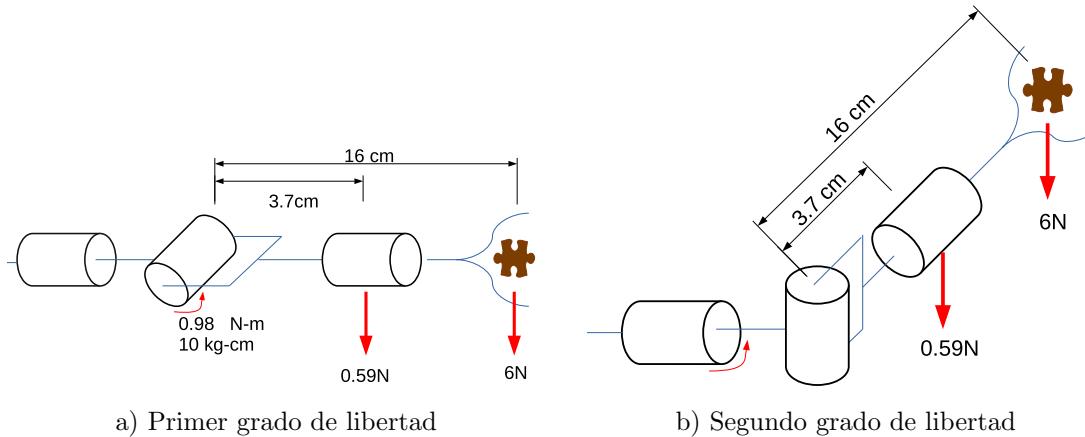


Figura 2.33: Reacciones máximas en las juntas de la muñeca

Conociendo este valor, se comparan los distintos motores disponibles en el mercado, utilizando un árbol de decisiones (Apéndice A. 2) y, con base en este, se selecciona el servo de alto rendimiento de EzRobot, con las siguientes características: 1) Par máximo a 7.4 [V] = 19 [kg cm]. 2) Corriente a motor bloqueado = 3[A]. 3) Voltaje de operación = 4.8[V] a 8.4[V]

Módulo de efecto (M2)

La función f1.3 (“Tomar/dejar muestra”), requiere que exista una herramienta en el extremo del manipulador robótico, capaz de sujetar una piedra con las características determinadas en los requerimientos R1, R2, R3 y R4. De acuerdo al concepto solución seleccionado, el efecto final a desarrollar es de tipo “Gripper” de tres dedos.

Existe un modelo de efecto con esas características, desarrollado por Kuat Telegenov, Yedige Tlegenov y Almas Shintemirov, titulado y publicado en IEEE Access con el nombre “A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes”[3], el cual, como se presenta en el abstract del artículo: “Presentamos un modelo de plataforma de gripper robótico de tres dedos de fuente abierta (Open source) para propósitos de educación e investigación”, resulta una opción viable para utilizar en este proyecto.

La acción de agarre de las falanges se basa en un mecanismo subactuado de dos grados

de libertad. En la Figura 2.34 se muestra un diagrama esquemático de los elementos del mecanismo.

El torque de un actuador se aplica en O_1 , donde el torque T_a genera un desplazamiento angular θ_1 . El resorte con módulo elástico K , ejerce una fuerza que mantiene el ángulo θ_2 fijo. Cuando el eslabón $O_1 - O_2$ se ve detenido en su movimiento, el torque T_a provoca una elongación en el resorte, lo que provoca un movimiento angular en θ_2 . Dicha secuencia es mostrada en la Figura 2.35.

En la Figura 2.36a se muestra el ensamblaje de una falange con el mecanismo de actuación, que consiste en un tornillo sin fin más un engrane que transmite el movimiento al piñón que, unido al eslabón, transmite el torque al mecanismo.

Según los resultados de las pruebas mostradas en la fuente[3], el efecto es capaz de sujetar objetos con diversas geometrías. En la Figura 2.36b, el lector puede observar que el objeto agarrado es una pelota de geometría esférica. Se busca que el agarre para la muestra de roca sea similar, sin embargo, la pelota tiene dimensiones mayores al tamaño propuesto en el requerimiento R2, como se puede apreciar en el diagrama simplificado mostrado en la Figura 2.37a, por lo que se propone un cambio de dimensiones en los “dedos” y la plataforma que funciona como “palma”.

Después de realizar un análisis geométrico con el software Geogebra®, y comprobar varias opciones, se determinan las siguientes dimensiones: 1) Distancia del eje central de la palma al inicio de la falange: 2.5[cm], 2) Longitud de la primer falange: 6[cm], 3) Longitud de la segunda falange: 2.5[cm].

Con las dimensiones modificadas se aprecia que, aunque la palma no tenga contacto con la muestra, existe una mejora en el agarre de la misma, a la vez que se disminuye la probabilidad de golpear el suelo al disminuir la distancia necesaria para asegurar la sujeción. Esto se puede apreciar en la Figura 2.37b.

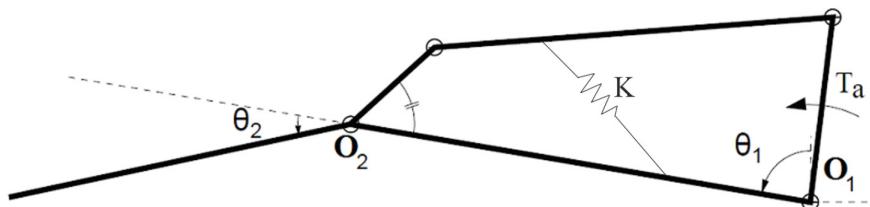


Figura 2.34: Elementos del mecanismo del gripper[3]

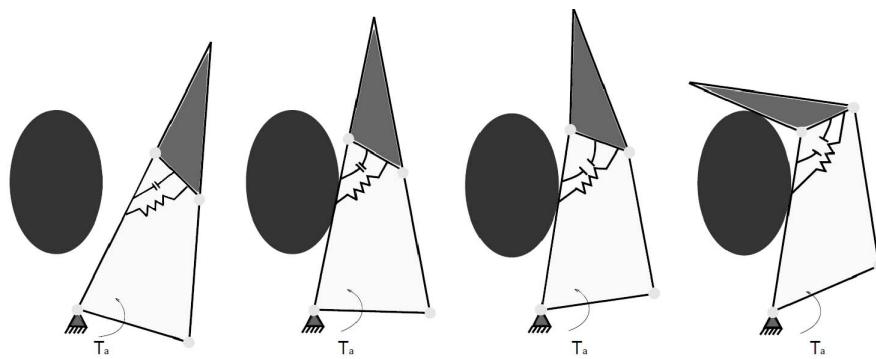
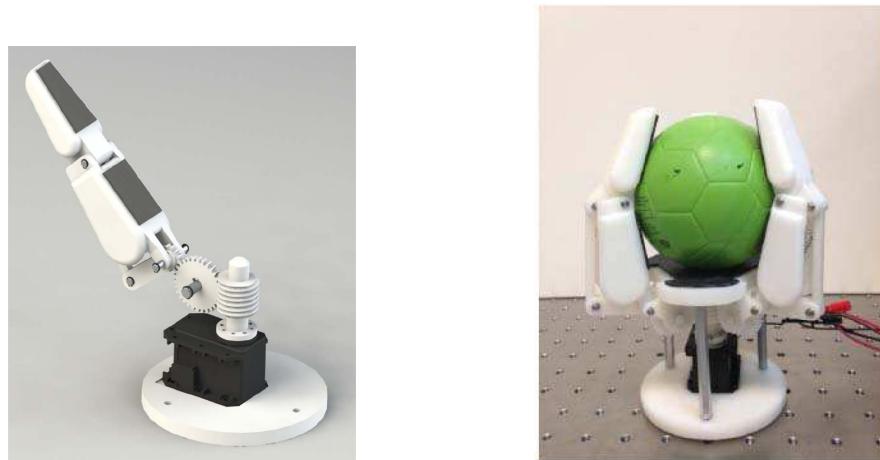


Figura 2.35: Secuencia de movimientos del mecanismo del gripper[3]



a) Ensamblaje de una falange del gripper b) Agarre del gripper con una pelota esférica

Figura 2.36: Gripper OPEN SOURCE publicado en IEEE[3]

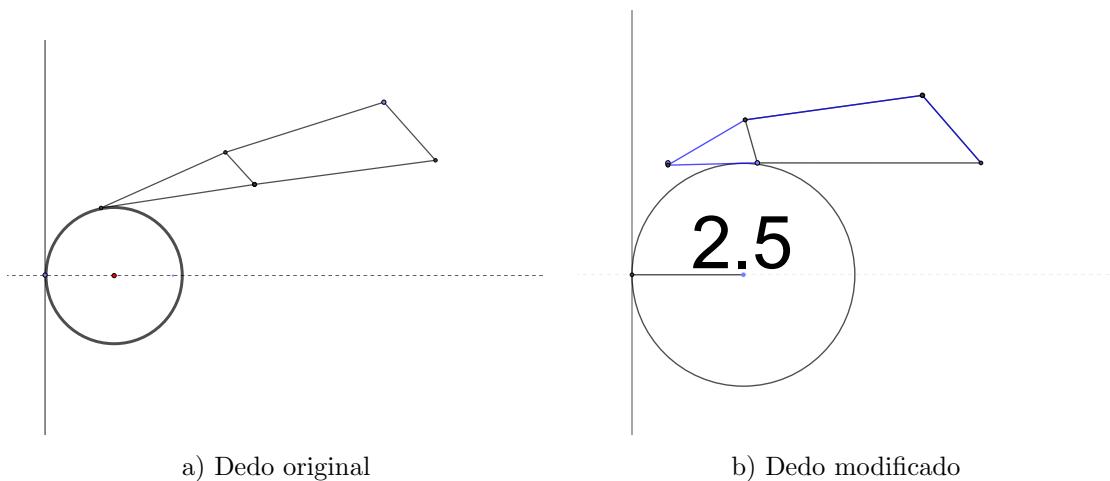


Figura 2.37: Diagrama simplificado de un dedo y la muestra objetivo (5[cm])

La distribución de los dedos del efecto se pueden apreciar claramente en la vista superior del efecto, mostrada en la Figura 2.38a, mientras que el mecanismo subactuado se aprecia en la Figura 2.38b.

Además de la modificación a las dimensiones, se agrega una placa deslizante que permite introducir un sensor de fuerza para determinar cuando la muestra es asegurada, de manera que no se ejerza una fuerza excesiva que resulte en un daño a la muestra o al efecto, como se muestra en la Figura 2.39.

Para medir la fuerza ejercida por el efecto a la muestra se opta por utilizar sensores de fuerza resistivos, ya que el espacio disponible para colocar el sensor es limitado y la delgadez de estos sensores los convierte en una opción adecuada.

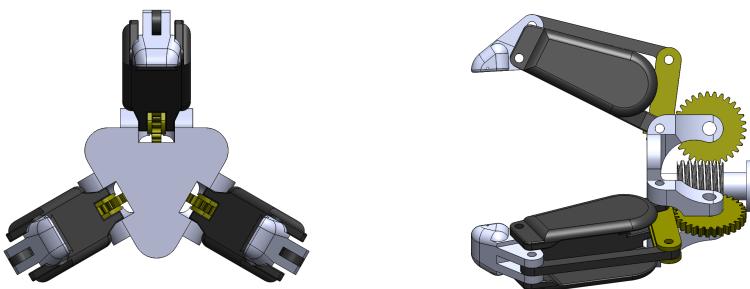
El espacio está pensado para adaptarse a sensores de aproximadamente media pulgada de diámetro, por lo que el sensor FSR 402 (Anexo ??) es apropiado para los objetivos del proyecto.

Para transmitir la potencia al tornillo sin fin que actúa las falanges, se utiliza un buje de servo, mostrado en el Anexo A. 7.

El efecto ensamblado se puede apreciar en la Figura 2.40a, y las piezas que lo componen en la vista explosionada de la Figura 2.40b.

Validación del efecto rediseñado

Para comprobar que el efecto tiene un rango de agarre por encima y debajo de la muestra ideal de [5cm] de diámetro, se realiza un análisis geométrico con piezas de 3[cm] y 7[cm], como se puede observar en la Figuras 2.41a y 2.41b respectivamente.



a) Distribución de los dedos del efecto b) Mecanismo subactuado

Figura 2.38: Modelo CAD del efecto final

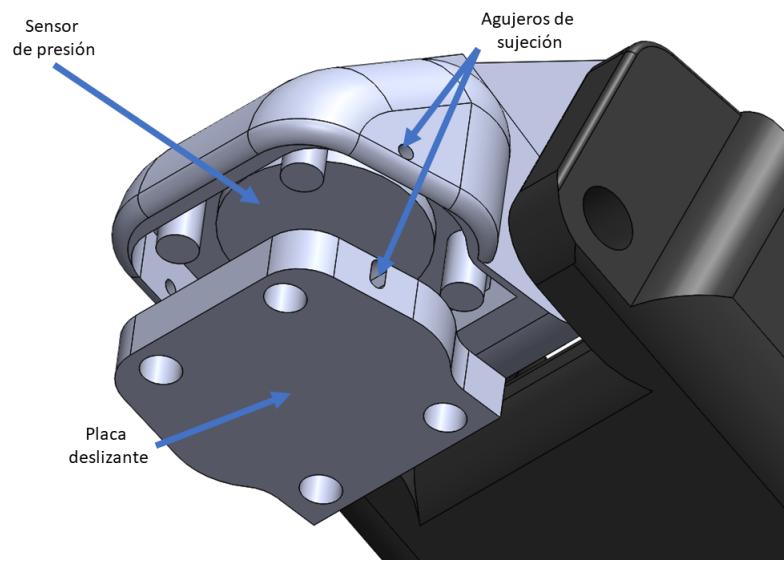


Figura 2.39: Ensamble de sensor de presión en la falange del efecto

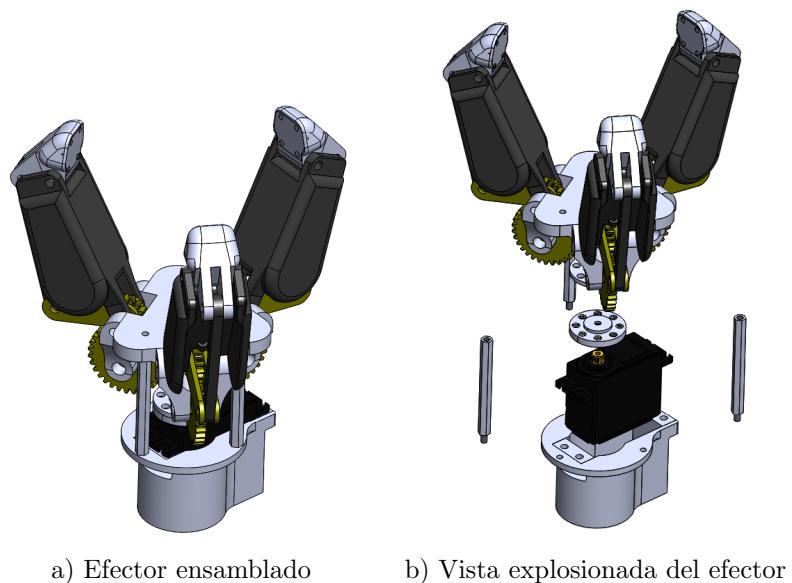


Figura 2.40: Efecto final

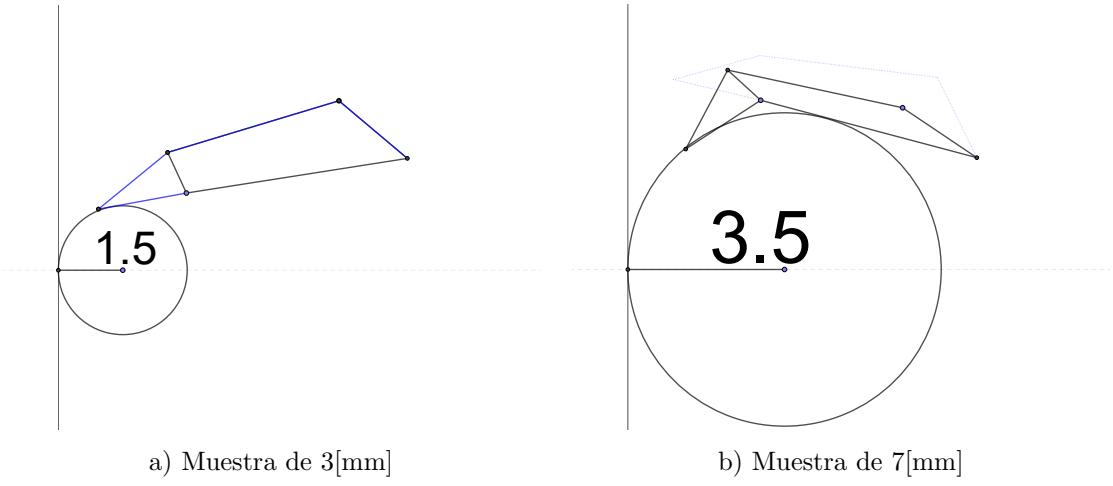


Figura 2.41: Análisis geométrico del agarre del efecto con distintos diámetros de muestra

Modelo matemático del sistema robótico

Modelo cinemático

Cinemática directa

Para abordar el problema de cinemática directa, primeramente se establecen marcos coordinados, que sirven como referencia para la posición y orientación de cada eslabón, de acuerdo a la convención de Denavit-Hartenberg [30], como se ve en la Figura 2.42.

Para determinar la relación de posición y orientación del marco de referencia del efecto final respecto al marco fijo T_0^6 , se utilizan las matrices de transformación homogénea A_i , que relacionan la posición y orientación del marco de referencia i respecto al marco $i - 1$, construidas con la ecuación 1.14.

Al sustituir los valores de los parámetros de Denavit-Hartenberg, indicados en la Tabla 2.11, es posible calcular las matrices de transformación homogénea A_1 hasta A_6 , las cuales, al posmultiplicarse, resultan en la matriz T_0^6 :

Tabla 2.11: Parámetros de Denavit-Hartenberg

i	θ	d	a	α	Offset
1	θ_1	o_{ff_1}	o_{ff_2}	$\frac{\pi}{2}$	0
2	θ_2	0	l_1	0	0
2'	θ_3	0	l_2	$\frac{\pi}{2}$	0
3	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	0
4	θ_4	0	0	$\frac{\pi}{2}$	π
5	θ_5	0	0	$\frac{\pi}{2}$	π
6	θ_6	l_3	0	0	0

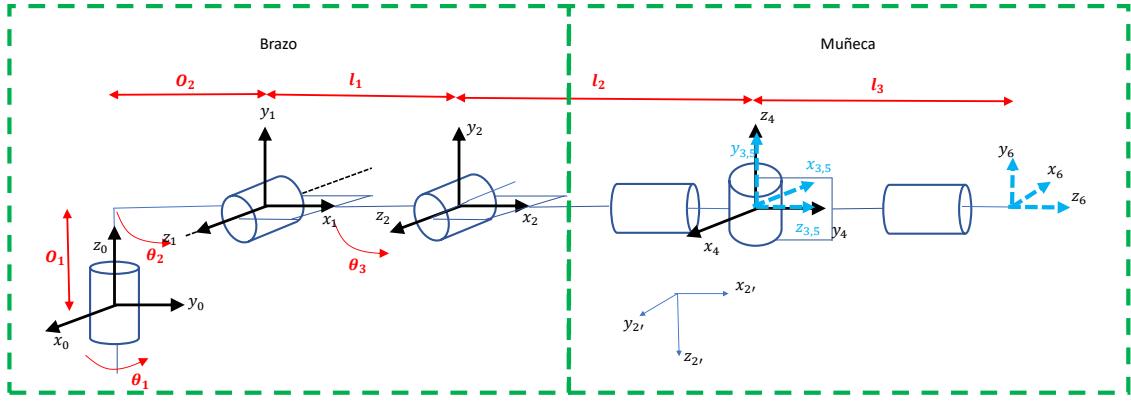


Figura 2.42: Asignación de los marcos de referencia a las articulaciones del robot

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & O_2c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & O_2s_1 \\ 0 & 1 & 0 & O_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A'_2 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & l_2c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & l_2s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} -c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ -s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_5 = \begin{bmatrix} -c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ -s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A forma de comprobación, los parámetros de Denavit-Hartenberg obtenidos se colocan en el toolbox “*Robotics*” para MATLAB®, desarrollado por Peter Corke para simular sistemas robóticos (el código puede encontrarse en el Apéndice B. 1), en el que se construye un modelo tridimensional del sistema en desarrollo, mostrado en la Figura 2.43, en donde se puede observar que la configuración formada por los parámetros de la Tabla 2.11 son congruentes con la configuración de la asignación de marcos de la Figura 2.42.

Cinemática inversa

Debido a que este manipulador robótico se compone de un brazo articulado de codo planar y una muñeca esférica, se aprovecha la capacidad que ofrece de desarrollar la cinemática inversa del brazo y la muñeca por separado, lo que se conoce como *desacoplamiento cinemático*.

Cinemática inversa del brazo articulado - Posición inversa.

Para conocer los valores de las juntas pertenecientes al brazo articulado, es conveniente utilizar un enfoque geométrico, proyectando el centro de la muñeca esférica. La Figura 2.44a muestra la proyección del centro de la muñeca en el plano $x_0 - y_0$, permitiendo ver fácilmente el valor de θ_1 como una relación entre las coordenadas x_c y y_c del centro de la muñeca, como se muestra en la ecuación 2.7.

$$\theta_1 = \text{atan2}(x_c, y_c) \quad (2.7)$$

En donde θ_1 es el valor de la variable del primer grado de libertad.

Para encontrar el valor de θ_2 y θ_3 , resulta de gran utilidad la Figura 2.44b.

En primer lugar, es importante considerar que existen dos desplazamientos entre las juntas como sigue:

$$r_{real} = r_{total} - off_2$$

$$s = z_c - off_1$$

Utilizando el teorema de Pitágoras, se calcula la longitud equivalente l_{eq} , para posteriormente obtener θ_3 mediante la ley de cosenos.

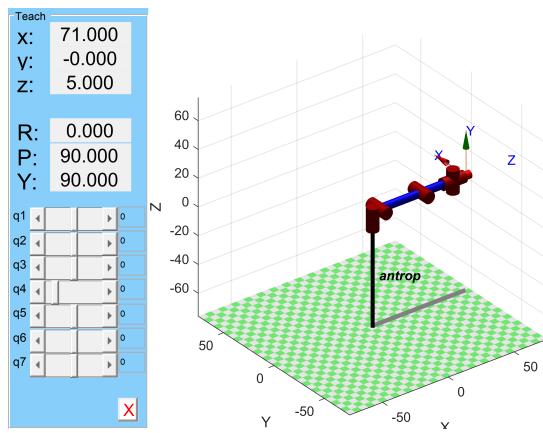


Figura 2.43: Modelo tridimensional del sistema robótico desarrollado en el toolbox Robotics de Peter Corke para MATLAB®

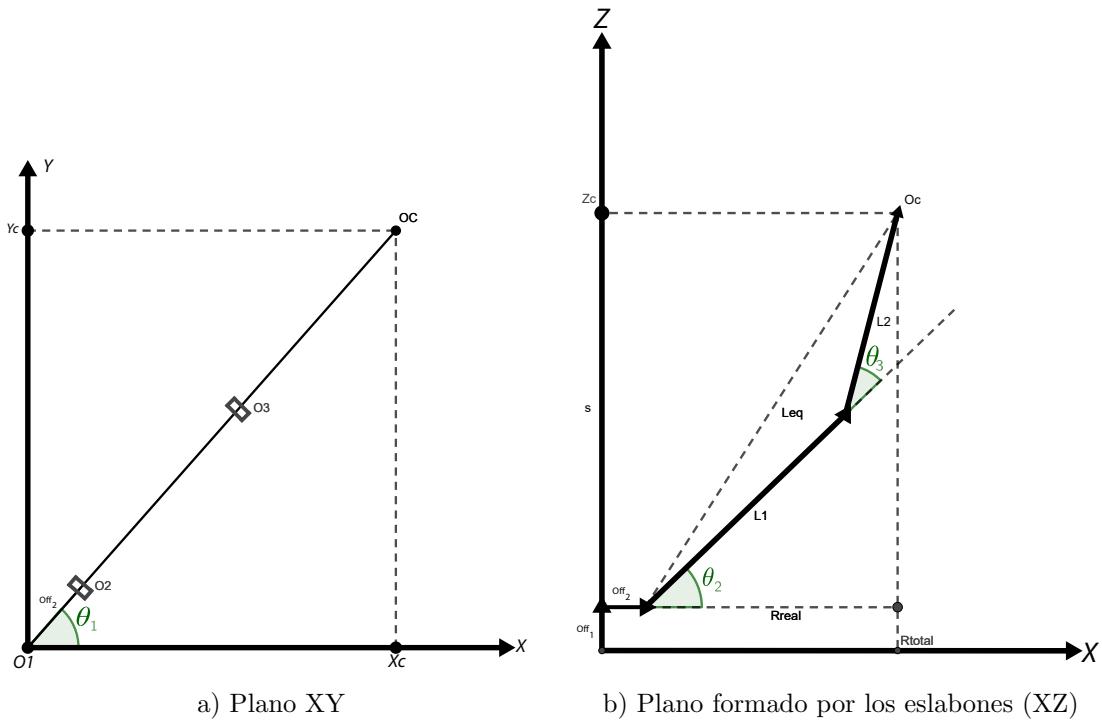


Figura 2.44: Proyecciones del centro de la muñeca en distintos planos

$$\begin{aligned}
l_{eq} &= \sqrt{r_{real}^2 + s_2} \\
\cos \theta_3 &= \frac{l_{eq}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \\
&= \frac{(r - off_2)^2 + s^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \\
&= \frac{(x_c^2 + y_c^2 - off_2)^2 + (z_c - off_1)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} := D
\end{aligned}$$

Dado que $l_{eq}^2 = (x_c^2 + y_c^2 - off_2)^2$ y $s^2 = z_c - off_1$. Entonces, θ_3 está dada por la ecuación 2.8.

$$\theta_3 = \text{atan2}\left(D, \pm \sqrt{1 - D^2}\right) \quad (2.8)$$

En donde θ_3 es el valor de la variable del tercer grado de libertad.

El hecho de que se tomen ambas raíces en la ecuación implica que son soluciones para la posición de **codo arriba** y **codo abajo**, para lo que finalmente se obtiene θ_2 , definido por la ecuación 2.9.

$$\theta_2 = \text{atan2}(r_{real}, s) - \text{atan2}(l_1 + l_2c_3, l_2s_3)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - off_2}, z_c - off_1\right) - \text{atan2}(l_1 + l_2c_3, l_2s_3) \quad (2.9)$$

En donde: θ_2 es el Valor de la variable del segundo grado de libertad.

Cinemática inversa de la muñeca esférica - Orientación inversa.

Para obtener los tres grados de libertad faltantes, pertenecientes a la orientación de la muñeca, resulta útil resolver la ecuación 1.21.

La matriz simbólica R_6^3 es la siguiente:

$$\begin{aligned}
R_6^3 &= \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -s_4c_6 - s_6c_4c_5 & s_5c_4 \\ s_4c_5c_6 + s_6c_4 & c_4c_6 - s_4s_6c_5 & s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} \\
R_3^0 &= \begin{bmatrix} -s_1 & -s_{23}c_1 & c_1c_{23} \\ c_1 & -s_1s_{23} & s_1c_{23} \\ 0 & c_{23} & s_{23} \end{bmatrix} \quad (2.10)
\end{aligned}$$

Para construir $(R_3^0)^T R$ se utiliza la ecuación 1.18 y 2.10, resultando en:

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} r_{21}c_1 - r_{11}s_1 & r_{22}c_1 - r_{12}s_1 & r_{23}c_1 - r_{13}s_1 \\ -r_{11}s_{23}c_1 - r_{21}s_1s_{23} + r_{31}c_{23} & -r_{12}s_{23}c_1 - r_{22}s_1s_{23} + r_{32}c_{23} & -r_{13}s_{23}c_1 - r_{23}s_1s_{23} + r_{33}c_{23} \\ r_{11}c_1c_{23} + r_{21}s_1c_{23} + r_{31}s_{23} & r_{12}c_1c_{23} + r_{22}s_1c_{23} + r_{32}s_{23} & r_{13}c_1c_{23} + r_{23}s_1c_{23} + r_{33}s_{23} \end{bmatrix}$$

Resolviendo para θ_4 , θ_5 y θ_6 como sigue.

$$\theta_5 = \text{atan2} \left(r_{13}c_1c_{23} + r_{23}s_1c_{23} + r_{33}s_{23}, \pm \sqrt{1 - (r_{13}c_1c_{23} + r_{23}s_1c_{23} + r_{33}s_{23})^2} \right) \quad (2.11)$$

$$\theta_4 = \text{atan2} \left(\pm \sqrt{s_5^2 - (r_{33}c_{23} - r_{13}c_1s_{23} - r_{23}s_1s_{23})^2}, r_{33}c_{23} - r_{13}c_1s_{23} - r_{23}s_1s_{23} \right) \quad (2.12)$$

$$\theta_6 = \text{atan2} \left(\pm \sqrt{s_5^2 - (r_{12}c_1c_{23} + r_{22}s_1c_{23} + r_{32}s_{23})^2}, r_{12}c_1c_{23} + r_{22}s_1c_{23} + r_{32}s_{23} \right) \quad (2.13)$$

Jacobiano

En esta sección se derivan las relaciones de velocidad entre las velocidades lineal y angular del efecto final con respecto a las velocidades de las juntas.

$$J = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} J_1 & J_2 & J_3 & J_4 & J_5 & J_6 \end{array} \right] \quad (2.14)$$

Jacobiano para singularidades

Con el fin de realizar el desacoplamiento de singularidades, se construye un Jacobiano de la forma:

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (o_3 - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Las singularidades se calculan con la ecuación 1.27, quedando como sigue:

$$\det J_{11} = -l_1 l_2 s_3 (l_1 c_2 + l_2 c_{23} + O_2) \quad (2.16)$$

$$\det J_{22} = -s_5 \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
J_1 &= \begin{bmatrix} -l_1 s_1 c_2 - l_2 s_1 c_{23} - l_3 (s_1 c_{23} c_5 + s_5 (c_1 c_4 - s_1 s_{23} s_4)) - O_2 s_1 \\ l_1 c_1 c_2 + l_2 c_1 c_{23} + l_3 (c_1 c_{23} c_5 - s_5 (s_1 c_4 + c_1 s_{23} s_4)) + O_2 c_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
J_2 &= \begin{bmatrix} -c_1 (l_1 s_2 + l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ -s_1 (l_1 s_2 + l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ l_1 c_2 - l_3 s_{23} s_4 s_5 + c_{23} (l_3 c_5 + l_2) \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_3 = \begin{bmatrix} -c_1 (l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ -s_1 (l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ -l_3 s_4 s_5 s_{23} + c_{23} (l_3 c_5 + l_2) \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
J_4 &= \begin{bmatrix} l_3 s_5 (s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) \\ -l_3 s_5 (c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) \\ l_3 s_5 c_{23} c_4 \\ c_1 c_{23} \\ s_1 c_{23} \\ s_{23} \end{bmatrix} \quad J_5 = \begin{bmatrix} -l_3 (s_1 c_4 c_5 + c_1 (s_{23} s_4 c_5 + s_5 c_{23})) \\ l_3 (c_1 c_4 c_5 - s_1 (s_{23} s_4 c_5 + s_5 c_{23})) \\ l_3 (s_4 c_{23} c_5 - s_{23} s_5) \\ s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4 \\ -c_1 s_4 - s_1 s_{23} c_4 \\ c_{23} c_4 \end{bmatrix} \\
J_6 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_1 c_{23} c_5 - s_5 (s_1 c_4 + c_1 s_{23} s_4) \\ s_1 c_{23} c_5 + s_5 (c_1 c_4 - s_1 s_{23} s_4) \\ s_{23} c_5 + s_4 s_5 c_{23} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

De 2.16, se puede observar que las singularidades del brazo se presentan cuando

$$\theta_3 = 0$$

$$l_1 c_2 + l_2 c_{23} + O_2 = 0$$

Mientras que de 2.17 se obtiene la singularidad de la muñeca esférica, que se presenta cuando

$$\theta_5 = 0$$

Lo que implica que dos de sus ejes están alineados, provocando que el Jacobiano pierda rango y existan infinitas soluciones para un solo valor de posición.

Modelo dinámico

Como se menciona en el marco teórico, el Jacobiano adecuado[30] para el modelo dinámico se calcula sustituyendo la longitud total l del eslabón del GDL de interés por la distancia de su origen a su centro de masa l_c , y volviendo cero las columnas correspondientes a los GDL posteriores.¹

Generación de trayectorias

Para la generación de las trayectorias Home-Muestra-Laboratorio se propone utilizar un polinomio de grado 5, ya que permite restringir los valores iniciales y finales de posición, velocidad y aceleración, a diferencia de los polinomios cúbicos, que no permiten restringir la aceleración, generando una sacudida que afecta la precisión del manipulador y un pico de corriente que puede afectar los circuitos controladores.

El polinomio de quinto orden

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el movimiento del robot está restringido por el espacio en el que se monta, por lo que es necesario tomar en cuenta los obstáculos

¹ J_{vw6} es igual al Jacobiano calculado en la ecuación 2.14, pues toma en cuenta el movimiento de todas las juntas, por lo que solo se requiere sustituir l_3 por l_{c3}

$$\begin{aligned}
J_{v\omega 1} &= \begin{bmatrix} -O_2 s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ O_2 c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad J_{v\omega 2} = \begin{bmatrix} -s_1(l_{c1}c_2 + O_2) & -l_{c1}s_2c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_{c1}c_2 + O_2) & -l_{c1}s_1s_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{c1}c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
J_{v\omega 3} &= \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_{c2}c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_{c2}s_{23}) & -l_{c2}s_{23}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_1c_2 + l_{c2}c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_{c2}s_{23}) & -l_{c2}s_1s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1c_2 + l_{c2}c_{23} & l_{c2}c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
J_{v\omega 4} &= \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_{23}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_1s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1c_2 + l_2c_{23} & l_2c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & c_1c_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & s_1c_{23} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & s_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
J_{v\omega 5} &= \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_{23}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_1s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1c_2 + l_2c_{23} & l_2c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & c_1c_{23} & s_1s_4 - s_{23}c_1c_4 & 0 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & s_1c_{23} & -s_1s_{23}c_4 - s_4c_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & s_{23} & c_{23}c_4 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

presentes en el espacio de trabajo, así como restringir movimientos que provoquen la superposición de los eslabones para evitar colisiones.

Finalmente, para la trayectoria Laboratorio-Home, se propone utilizar un método Teach and Play, pues el punto de inicio y el final son conocidos y no es necesario calcular la cinemática inversa cada vez que se ejecute.

Control

Un enfoque típico para controlar sistemas robóticos es considerar cada junta como un sistema de control independiente que intenta seguir su trayectoria de manera precisa. Sin embargo, esto representa un reto complicado debido a perturbaciones debidas a la gravedad, velocidades y aceleraciones producidas por el resto de las juntas, así como la fricción en cada junta. Por esta razón, se propone utilizar una técnica de control por juntas independientes, la cual sigue un método sencillo que consiste en representar la inercia del sistema mediante una aproximación denominada “Inercia efectiva”, que es un promedio de los posibles valores de inercia que el sistema puede adoptar de acuerdo a las configuraciones dentro del espacio de trabajo. A pesar de que dicha aproximación no representa la inercia real, el hecho de presentar una relación de reducción alta incrementa la viabilidad en su implementación.

2.2.2. Sistema de Información (S2)

Módulo de percepción (M3)

Condiciones de operación

Para asegurar que el sistema trabaja en condiciones seguras de operación, es necesario determinar los parámetros del ambiente, para que el sistema se desactive en cuando alguno de ellos no cumpla con los valores establecidos por los requerimientos (R11 y R12).

Dado que el sistema debe operar a la intemperie, es necesario conocer las condiciones de temperatura y humedad a las que está expuesto, para ello se recurre a un sensor.

En el mercado hay una gran variedad de productos disponibles capaces de medir estas dos magnitudes, destacando entre ellos el DHT11 (Anexo A. 11) por su popularidad, lo que lo convierte en un componente de fácil adquisición y uso, y dado que su rango de operación cumple con los requerimientos, es seleccionado.

Los puntos del sistema más vulnerables al calentamiento por radiación solar, aire caliente por convección, o por calentamiento propio son: los actuadores, los circuitos electrónicos y el sistema de alimentación, por lo que deben ser monitoreados.

Visión artificial

El objetivo de la visión artificial es obtener las coordenadas de la muestra en el espacio.

Módulo de comunicación (M4)

Dado que el sistema involucra varios agentes que intercambian datos entre sí, es necesario identificar la forma en que interactúan. Esta interacción está ilustrada en la Figura 2.45. Debido a que estos componentes forman parte de diferentes sistemas, la unión de ellos se realiza en el capítulo “Integración”.

Con ayuda de este diagrama, se determinan los requerimientos de comunicación, mostrados en la Tabla 2.12, que serán útiles para diseñar los circuitos y elegir el microcontrolador adecuado.

Comunicación interna

Los componentes electrónicos deben interactuar entre sí para lograr que el sistema mecatrónico realice su función, en la Tabla 2.12 se muestra la forma en que cada uno de ellos maneja su información.

Comunicación con el usuario

Para interactuar con el usuario, se plantea utilizar una interfaz gráfica, como la que se ve en la Figura 2.46.

Como se puede ver, esta interfaz cuenta con los siguientes elementos.

Tabla 2.12: Requerimientos de comunicación

Elemento	Número de terminales	Tipo
Servomotor (x5)	1	PWM
Motor CD (x3)	1	PWM
Encoder (x3)	2	Digital
Sensor de temperatura (x3)	1	1-wire
Módulo de celda de carga	1	Serial
Sensores de fuerza (x3)	1	Analógico
Camara (x2)	2	SPI
Computadora	2	UART

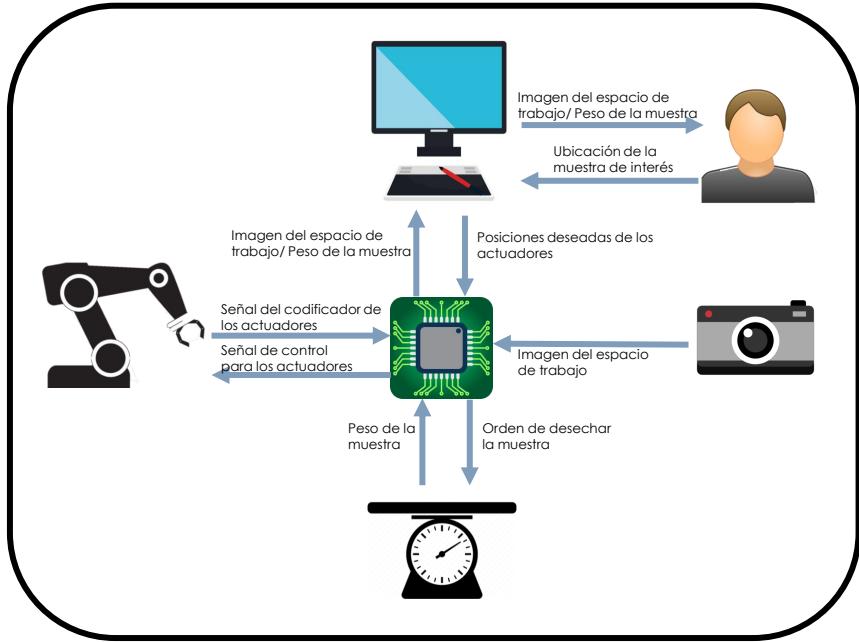


Figura 2.45: Diagrama de comunicación entre módulos

- Botón de activación y desactivación, además cuando se cierre la aplicación se realiza la comprobación del estado del sistema, si se encuentra activo, envía el brazo a la posición de reposo y lo desactiva.
- La imagen del entorno obtenida por el sistema de visión, mostrada al usuario en la parte central para que este, a su vez, identifique la ubicación de la muestra de interés.
- Botón de corrección de selección, en caso de que el usuario desee cambiar la muestra de interés
- Información del sistema dependiendo del resultado de la operación, si la función principal se realizó con éxito, mostrará los parámetros obtenidos de la muestra, en caso contrario, enviará un mensaje de error.

Módulo de procesamiento (M5)

Para seleccionar un sistema de procesamiento adecuado, es necesario tomar en cuenta lo siguiente[31]

1. Determinar interfaces de hardware necesarias.
2. Seleccionar la arquitectura adecuada de acuerdo a las necesidades.
3. Determinar restricciones de costo y energía.
4. Comprobar disponibilidad.
5. Determinar el entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés *Integrated*

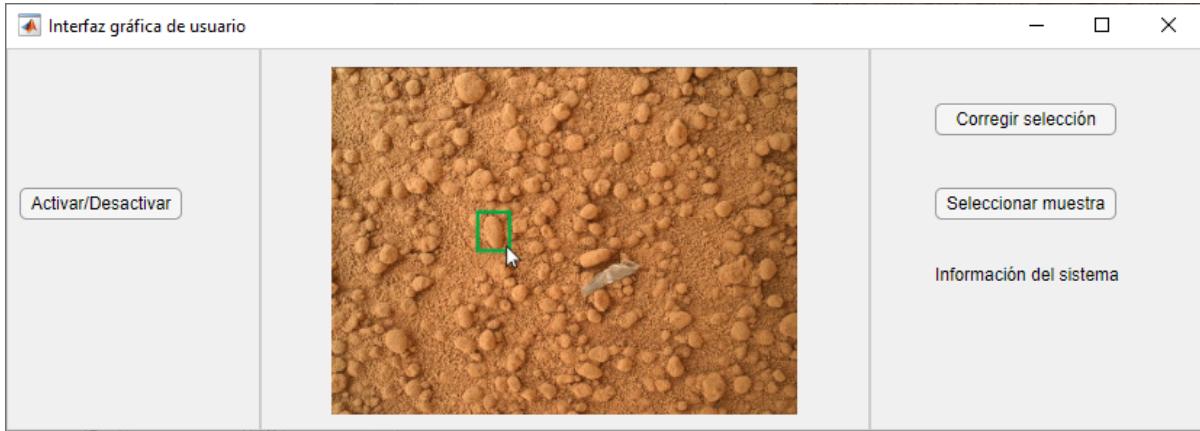


Figura 2.46: Elementos básicos de la interfaz de usuario

Development Environment) en el que se desarrolla el código para el microcontrolador.

Las interfaces de hardware se encuentran enlistadas en la Tabla 2.12.

El hecho de implementar la comunicación, lectura de datos y el control de posición de motores, significa que la aplicación requiere realizar operaciones complejas, en las que se incluyen las operaciones de punto flotante, por lo que la arquitectura de 32 bits tiene ventajas claras antes las arquitecturas de 8 y 16 bits.

En la Figura 2.47, proporcionada por el fabricante ARM[32], se pueden apreciar las diferentes familias de procesadores disponibles, especificando las aplicaciones típicas para cada una, lo cual se revisa con más detalle en la Tabla 2.13.

De acuerdo a esto, se selecciona la tarjeta de desarrollo STM32F446RE (Anexo A. 12), pues cumple con las características necesarias y ya se cuenta con ella. Así mismo, existe un IDE en línea específico para estas tarjetas, denominado mbed Compiler [33], el cual es desarrollado por el fabricante de las mismas.

2.2.3. Sistema energético (S3)

Para conocer los requerimientos energéticos del sistema, debe identificarse cuanta energía consumen los elementos que lo conforman.

De acuerdo al modelo eFFBD, mostrado en la Figura 2.3, es posible separar a los elementos de sistema en dos grupos con base en el tiempo que están activos, estos grupos se muestran en la Tabla 2.14.

Con esta información, el consumo mínimo del sistema cuando se encuentra en reposo es de 57.65 [mA], mientras que la corriente máxima requiere tomar en cuenta que sólo se mueve un actuador a la vez para evitar picos de corriente y aceleraciones de Coriolis,

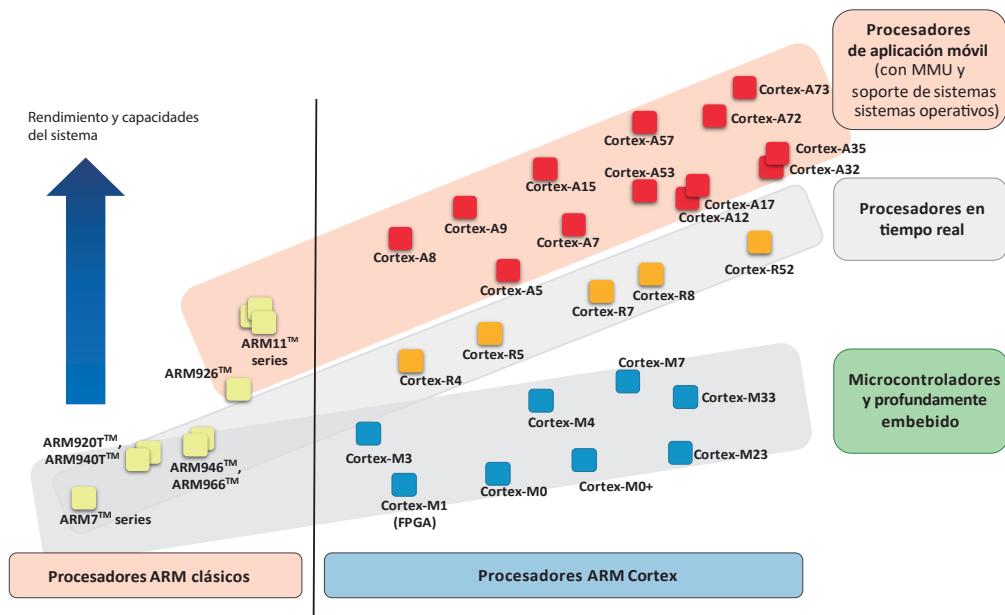


Figura 2.47: Familia de procesadores ARM, ARM

Tabla 2.13: Características de los procesadores ARM, STM

	Procesadores de aplicación móvil	Procesadores en tiempo real	Microcontroladores
Diseño	Alta frecuencia de reloj, Pipeline larga, Alto desempeño, Soporte multimedia	Alta frecuencia de reloj, Pipeline de media a larga Determinista (baja latencia de interrupción)	Ultra baja potencia, Determinista (Baja latencia de interrupción Pipeline corta
Características del sistema	Unidad de administración de memoria, memoria cache, Seguridad “ARM TrustZone R”	Unidad de protección de memoria, memoria cache, Memoria estrechamente acoplada	Unidad de protección de memoria, Control de interrupciones anidado y vectorizado, Controlador de despertador.
Mercado objetivo	Cómputo móvil, teléfonos inteligentes. Servidores energéticamente eficientes, Micropresesadores de gama alta	Microcontroladores industriales, automotrices, Controladores de disco duro, modems de linea base	Microcontroladores, sistemas profundamente embebidos (e.g sensores, MEMS, circuitos integrados de señal mezclada), Internet de las cosas

Tabla 2.14: Consumo energético de los componentes

Componente	Voltaje [V]	Corriente en reposo [A]	Corriente promedio [A]	Corriente máxima [A]
Operación continua				
Sensor de fuerza (x3)	5	0.5 μ	-	0.005
Módulo ADC de celda de carga	5	1 μ	0.0015	0.0015
Tarjeta de procesamiento	5	0.0512	0.081	0.120
Sensor de temperatura (x3)	5	150 μ	0.0025	0.0025
Encoder (x3)	5	0.002	0.002	0.005
Operación intermitente				
Motor reductor CD (x3)	12	-	7.73	20
Servomotor (x5)	7.6	-	1.43	3
Camara (x2)	5	-	0.390	0.390

mientras que los otros solo consumen la corriente mínima para mantener su posición, de esta manera el caso de consumo máximo se asocia al motor del primer eslabón, pues es el que debe generar un mayor par (11.145[Nm]), resultando en un consumo de 24.768 [A]. Estos valores se obtienen de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$i_{reposo} = 57.6545[mA]$$

$$i_{máxima} = 20.48[A]$$

Por esto, se selecciona una fuente que sea capaz de suministrar esta cantidad de energía, utilizando el árbol de decisión mostrado en el Apéndice A. 3. De este proceso de selección quedan 2 fuentes que cumplen con los criterios (S-350-12^[34] y S-500-12^[35] del fabricante Yueqing Mingwei Electric Co. Ltd.), sin embargo se selecciona el modelo S-500-12 (Anexo A. 13), ya que aunque cuesta 10 USD más, tiene varias ventajas como 11[A] extras, protección contra altas temperaturas y garantía de 2 años.

Acondicionamiento

Según la Tabla 2.14, existen 3 niveles distintos de tensión requeridos por los elementos (los cuales son 5, 7.6 y 12[V]), por lo tanto deben diseñarse circuitos que adapten el valor de tensión de la fuente a estos valores.

De acuerdo a la Tabla 1.1 los reguladores commutados son una buena opción para aplicaciones de alta potencia, sin embargo, también menciona que son muy complejas de construir, por ello se buscan modelos en el mercado que cumplan las características mínimas

de acuerdo a cada nivel de tensión, como sigue: 12[V], que no requiere convertidor, 7.6[V], 7.15[A] y 5[V]: 0.939[A].

El único proveedor con precios accesibles es RobotShop, por lo que los componentes seleccionados son: 7.6[V] a 7.15[A] es la 2xGS2678 de DFRobot en paralelo para sumar corrientes (cada uno suministra 5[A]) (Anexo A. 14) y eñ de 5[V] a 0.939[A]: S9V11F3S5 de Pololu (Anexo A. 15).

Distribución

Con ayuda de la Figura 2.48 se determina el calibre mínimo necesario para los cables que transmiten la energía de los actuadores y, debido a que los servomotores consumen menos corriente que los motores de CD, se utiliza el mismo calibre.

1. Corriente máxima que fluye por el cable: 20A
2. Tipo de circuito: Crítico
3. Longitud de cable: <2[m]
4. Calibre necesario: 14

En cuanto al cable que se conecta a la red eléctrica debe transmitir menos de 6[A], como indica la hoja de datos de la fuente (Anexo A. 13), y tiene una longitud de aproximadamente 9m, por lo que el calibre necesario es 12.

2.2.4. Sistema del laboratorio (S4)

Recordando de la Tabla 2.5, el laboratorio debe obtener datos de la muestra (f3.3), comunicarlos al usuario (f3.2.1) y devolver la muestra al ambiente (f1.4). A continuación se desarrolla el diseño de los módulos destinados a cumplir dichas funciones, los cuales son el módulo de obtención de datos (M6) y el desechar (M7).

El concepto mejorado (Figura 2.7) comprende un cono truncado que aumenta la superficie en donde el sistema robótico (S1) puede depositar la muestra, además de que la pendiente

		1. Corriente en CD																	
2. Tipo de circuito																			
10% Caída de voltaje No Crítico		3% Caída de voltaje Crítico		5A	10A	15A	20A	25A	30A	40A	50A	60A	70A	80A	90A	100A	120A	150A	200A
3. Longitud	0-6 m	0-2 m	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	6-9 m	2-3 m	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

Figura 2.48: Extracto de la guía de selección para calibre de cables[4]

del mismo sirve para permitir que la muestra se deslice suavemente hacia el área de obtención de datos, reduciendo la magnitud del impacto. A su vez, el desechador consiste en una base móvil que, una vez que es retirada, deja caer la muestra.

Las celdas de carga están diseñadas específicamente para la medición de masa y existe en el mercado variedad de opciones con capacidades y sensibilidades distintas.

De acuerdo a la ecuación 2.18, presente en la guía de selección de celdas de carga [36], una capacidad de 0.95 kg es adecuada para cumplir con el requerimiento de masa establecido (R8 con factor de seguridad de 2). Por ello se decide usar la celda con una capacidad de 1 Kg.

$$Capacidad = \frac{(Ic * L + L0) * Lec * Lic}{Nc} \quad (2.18)$$

En dónde Ic es el coeficiente de impacto, L es la carga máxima a medir, $L0$ es la carga inicial (Peso de la superficie de medición), Lec es el coeficiente de excentricidad de carga, Lic coeficiente de desbalance de carga, Nc numero de celdas de carga a utilizar.

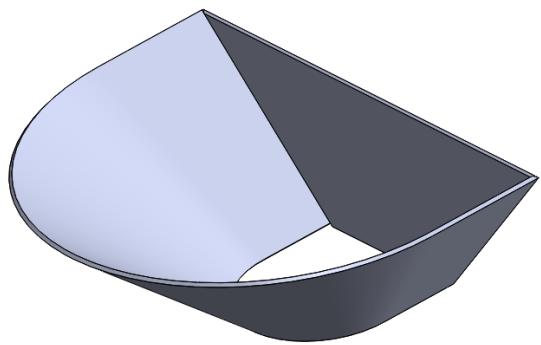
$$Capacidad = \frac{(1.5 * 0.5 + 0.03) * 1.2 * 1}{1} = 0.95Kg$$

El contenedor de la muestra con forma de cono trunco de la Figura 2.7 se rediseña para asemejar a un embudo, con el objetivo de aumentar la superficie de sujeción, pues un círculo solo tiene puntos tangentes, mientras que la geometría mostrada en la Figura 2.49a puede sujetarse en un extremo.

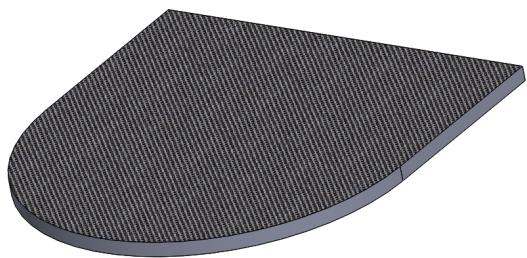
Además de la disminución de velocidad de impacto por la pendiente del cono, se reduce la distancia entre el punto en donde el efecto suelta la muestra hasta la superficie de medición. Para la manufactura de esta pieza, la manufactura aditiva resulta muy complicado por sus dimensiones, siendo una solución simple el uso de un polímero rígido para la parte plana (PVC), y un polímero semiflexible para la parte curva (PET), puesto que la primera se une a la estructura y soporta el mecanismo de desecho, mientras que la última debe adoptar una geometría curva.

Como se ve en la Figura 2.49b, la superficie de medición es una pieza sencilla, ya que solamente se encarga de soportar la muestra durante el proceso de pesado, por lo que se acopla sobre la celda de carga.

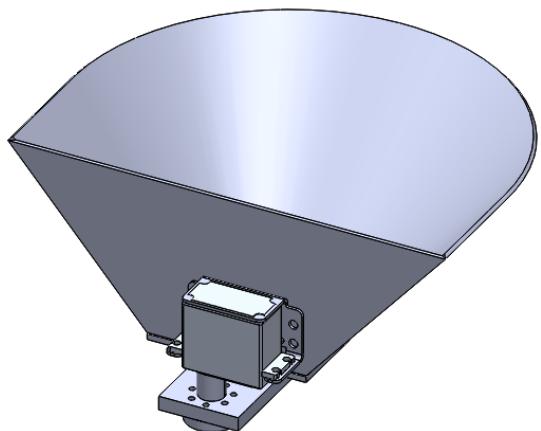
Finalmente, el mecanismo desechador consta de un actuador que remueve la superficie



a) Contenedor de la muestra



b) Superficie de medición



c) Mecanismo de desecho



d) Vista lateral del laboratorio

Figura 2.49: Piezas de laboratorio

de medición para que la muestra caiga. El actuador se acopla al costado del embudo contenedor, como se muestra en la Figura 2.49c.

El actuador es un servomotor estándar MG1501, pues solo debe alcanzar dos posiciones (posición de medición y posición de desecho).

Este motor se acopla al contenedor con una cubierta comercial ASBI24, mientras que el eje transmite el movimiento a través de un cople fijado a una plataforma sobre la que se coloca la celda de carga.

La distribución de estos módulos se puede apreciar fácilmente con la ayuda de la vista lateral, mostrada en la Figura 2.49d.

Finalmente, los módulos que conforman el laboratorio pueden observarse en la Figura 2.50a, mientras que el ensamblaje completo se muestra en la Figura 2.50b.

Validación

Para determinar que los elementos que conforman la superficie de medición mantienen su integridad estructural, se realiza un estudio dinámico no lineal en el software SolidWorks [26] para conocer los efectos del impacto de la muestra cuando se deja caer.

El estudio se realiza tomando en cuenta las siguientes características

- Material: ABS
- Velocidad de impacto: 10 [m/s] exagerando la altura a la que se deja caer. (5[m])
- Masa de la muestra: 1[Kg]

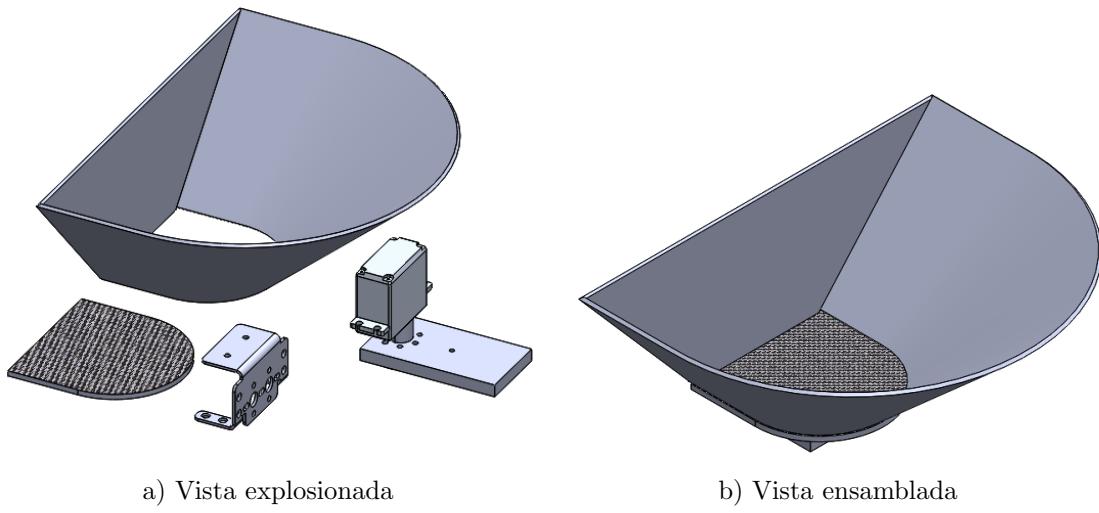
El estudio mostrado en la Figura 2.51 indica que la mayor parte del impacto es absorbida por esta pieza en lugar de ser absorbida por el ABS, y dado que la celda de carga está hecha de aluminio, es seguro concluir que el material no falla.

2.2.5. Sistema estructural (S5)

La estructura del vehículo tipo *rover* en el que el sistema se pretende montar está construida con perfil de aluminio IPS de 20x20 [mm].

La estructura básica debe ser reproducida para el banco de pruebas, el cual consiste en una base fija, por lo que se omite el uso de las ruedas.

Para reducir costos y tiempo de manufactura, se eliminan las partes de la estructura que no sostienen a ningún elemento del sistema, como se aprecia en la Figura 2.52.



a) Vista explosionada

b) Vista ensamblada

Figura 2.50: Laboratorio

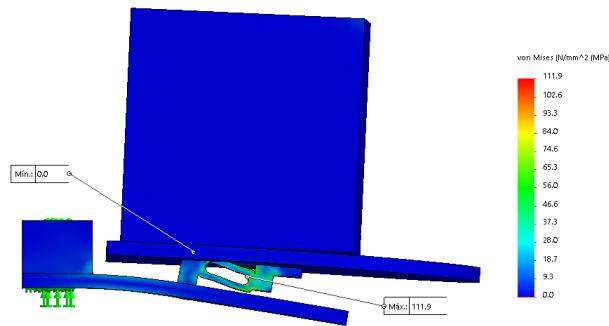
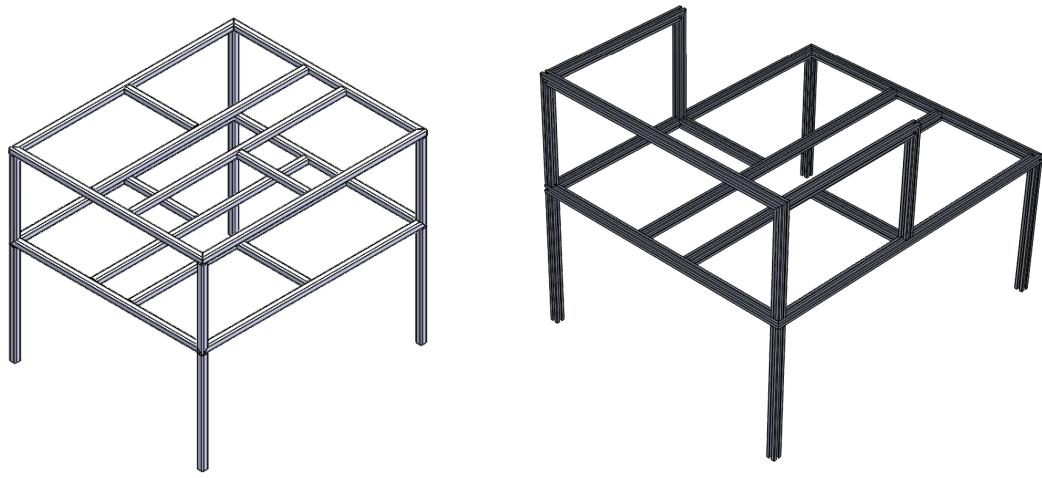


Figura 2.51: Análisis dinámico de impacto de la muestra sobre la superficie de medición del laboratorio



a) Diseño original

b) Diseño modificado

Figura 2.52: Estructura del banco de pruebas

2.3. Integración del sistema mecatrónico

En este capítulo se realiza la integración, la cual es un proceso jerárquico que comprende la unión de los distintos módulos que conforman al sistema, partiendo de la integración de componentes en ensamblajes, ensamblajes en módulos, módulos en sistemas y, finalmente, la integración de los sistemas para consolidar el sistema mecatrónico.

Con ayuda de la Tabla 2.15, se define el estado de integración SIx en donde x indica la secuencia de integración:

2.3.1. Integración de hardware

Sistema robótico

En primer lugar, se integra el módulo del manipulador robótico con el efecto final a través del último GDL de la muñeca, utilizando un cople en el eje del servomotor para unirlo con la base del efecto, como se muestra en la Figura 2.53.

Estado de integración

$$M1 + M2 = S1$$

Sistema estructural

La base que soporta al sistema robótico se fija en la estructura mediante tornillos. Una vez que se ensamblan estos sistemas, se obtiene la configuración mostrada en la Figura 2.54.

Validación

Tabla 2.15: Nomenclatura de sistemas y módulos

S1: Sistema robótico	M1: Manipulador M2: Efecto
S2: Información	M3: Percepción M4: Comunicación M5: Procesamiento
S3: Energético	
S4: Laboratorio	M6: Obtención de datos M7: Desechador
S5: Estructural	

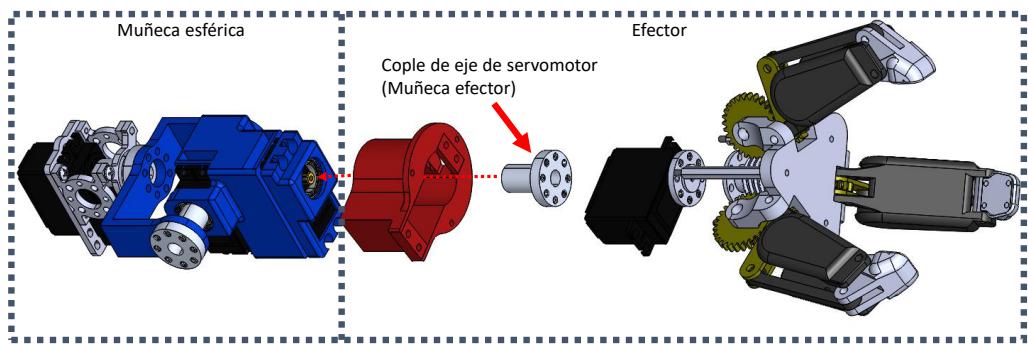


Figura 2.53: Integración del manipulador a través de la muñeca



Figura 2.54: Integración del sistema robótico con el sistema estructural

Debido a que la estructura soporta al sistema robótico, es necesario comprobar la integridad de la misma frente a las cargas que eso implica, para lo que se realiza un análisis estático de elemento finito.

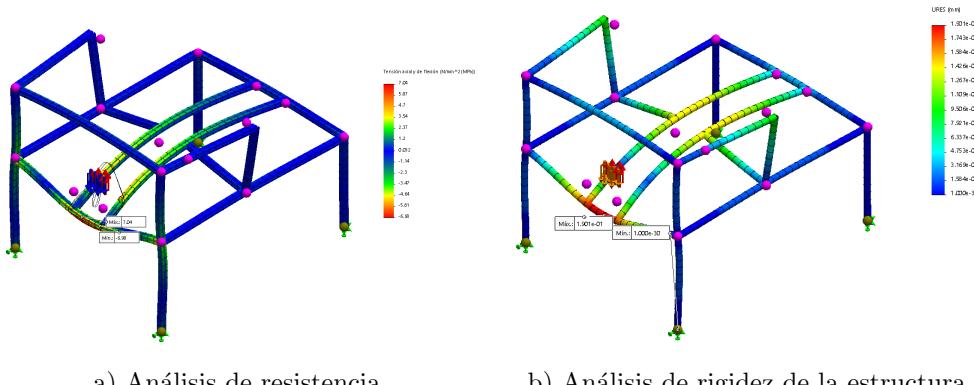
El análisis estático comprende un estudio de resistencia, el cual se muestra en la Figura 2.55a, que indica que el esfuerzo torsional y axial máximo de 7.04[MPa], mientras que, de acuerdo al fabricante[37], el esfuerzo de cedencia es 241[MPa]. Por otro lado, el estudio de rigidez, mostrado en la Figura 2.55b, indica que la deflexión máxima es de 1.9[mm].

Espacio de trabajo

Tomando en cuenta las restricciones de movimiento impuestas por la estructura, la forma del espacio de trabajo del robot es similar al mostrado en la Figura 2.56.(El volumen del espacio de trabajo no está a escala, debido a que la herramienta del software Mathematica® solo permite graficar el espacio de trabajo con longitudes de eslabones preestablecidas).

Posición de reposo/“Home”

Es necesario definir una posición en la que el robot descanse sin caerse cuando se encuentre inactivo, como se muestra en la Figura 2.57a. Para ello se aprovecha la estructura del rover, colocando dos soportes angulares que aseguren el robot desde su segundo eslabón a través de dos ejes sencillos que sirven para mantener la posición, como se muestra en la Figura 2.57b. Aunado a ello, es importante recordar que los encoders utilizados son incrementales, i.e. la posición que se puede obtener de ellos es relativa, por tanto es necesario conocer la configuración inicial del robot al momento de la activación, por lo que la posición de reposo sirve como punto de referencia.



a) Análisis de resistencia

b) Análisis de rigidez de la estructura

Figura 2.55: Análisis de elemento finito de la estructura

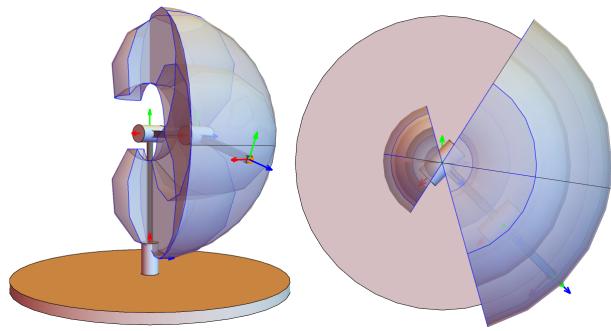


Figura 2.56: Espacio de trabajo del robot

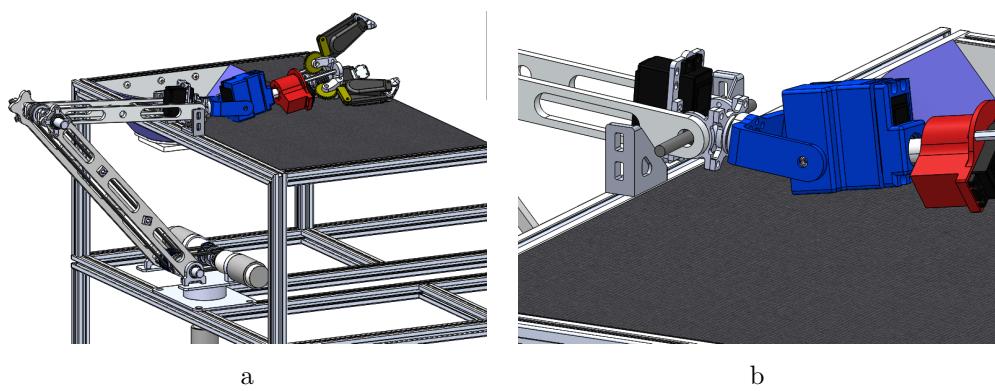


Figura 2.57: Robot en reposo

$$S1 + S5 = SI15$$

Laboratorio

Para fijar el sistema del laboratorio al sistema estructural, se realizan 3 barrenos para utilizar tornillos en el perfil de aluminio de la estructura. El ensamblaje se muestra en la Figura 2.58a.

Validación

La Figura 2.58b muestra que la posición del laboratorio está dentro del espacio de trabajo del robot.

$$SI15 + S4 = SI154$$

Energético

En la Figura 2.59b se muestra la fuente de alimentación seleccionada en la posición determinada en la Figura 2.7, correspondiente al concepto mejorado y elegida para ayudar a equilibrar el peso del sistema robótico.

Para colocar el sistema energético en la estructura, se diseña una plataforma de soporte, mostrada en la Figura 2.59a.

$$SI154 + S3 = SI543$$

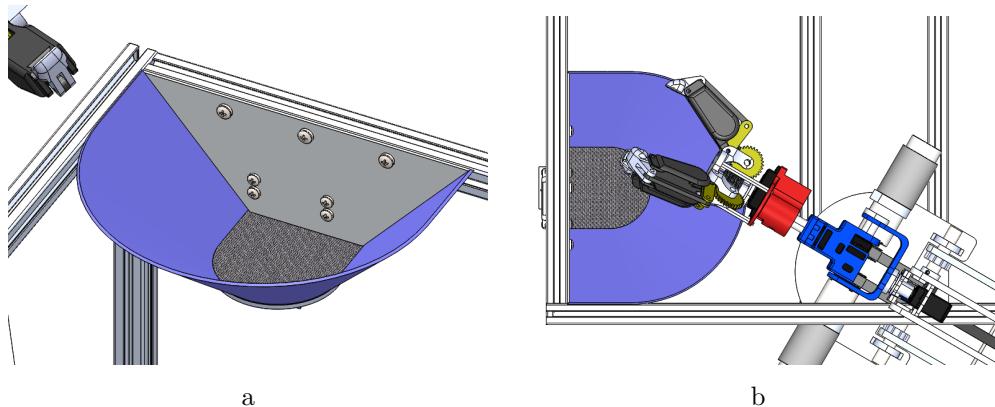
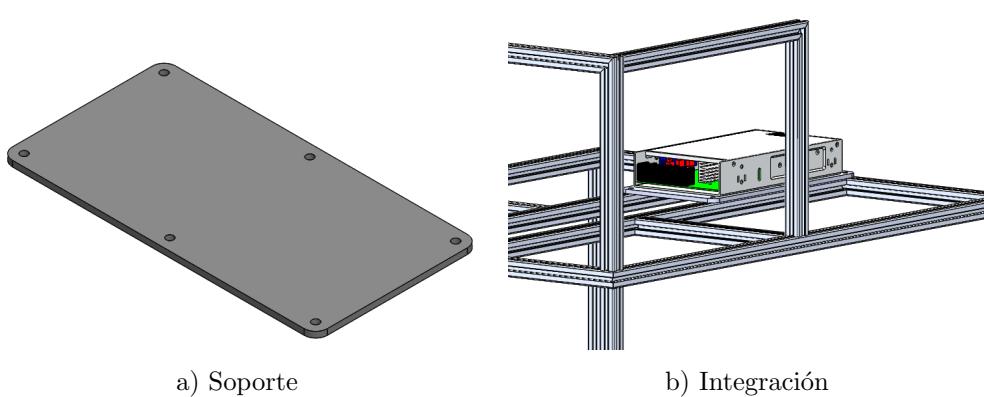


Figura 2.58: Integración del laboratorio con el sistema estructural



a) Soporte

b) Integración

Figura 2.59: Integración del sistema energético

Información

Percepción

Condiciones de operación

Una vez que se conoce la ubicación de los puntos críticos en los que la temperatura alcanza valores altos, se colocan los sensores de temperatura DHT11 seleccionados previamente, indicados con un círculo en la Figura 2.60.

Visión artificial

De acuerdo al concepto mejorado, mostrado en la Figura 2.7, las cámaras se colocan en la parte frontal inferior de la estructura, para lo cual se diseña una pieza que puede ensamblarse dentro del perfil de aluminio, que permite el ajuste del ángulo de inclinación de las cámaras, estas cámaras se muestran en la Figura 2.61.

Procesamiento

Los periféricos que utilizan los componentes se organizan de acuerdo a los requerimientos establecidos en la Tabla 2.16, en la cual se determina el tipo de periférico utilizado, para posteriormente realizar la distribución de pines como se muestra en la Figura 2.62 (Las cámaras están conectadas al mismo puerto SPI, y son activadas por software mediante CS1 y CS2).

Conociendo los pines a utilizar, se diseña una placa de circuito impreso (PCB - Printed Circuit Board por sus siglas en inglés), mostrada en la Figura 2.63a, y cuyo diagrama esquemático se muestra en la Figura 2.63b.

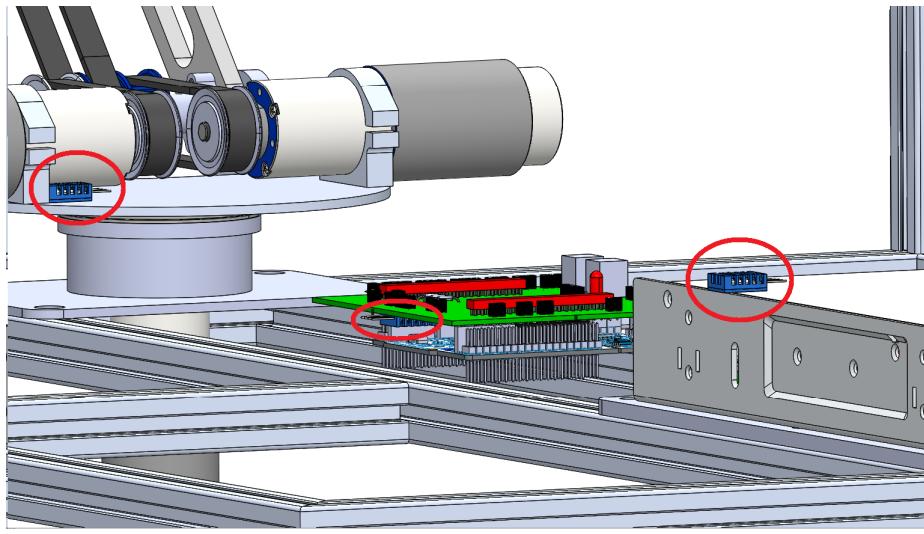


Figura 2.60: Sensores de temperatura y humedad montados en la estructura (Encerrados en círculos)

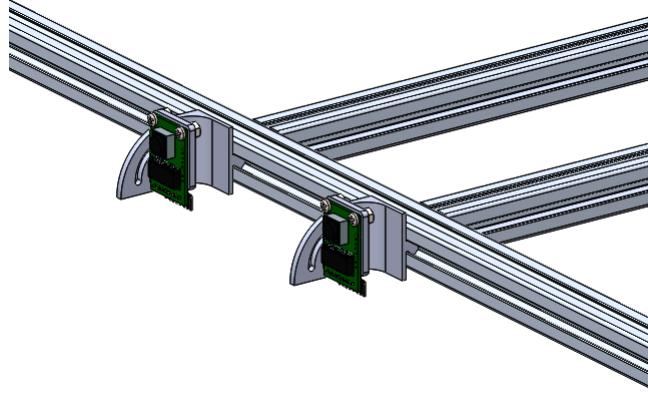


Figura 2.61: Cámaras montadas en la estructura

Tabla 2.16: Conexiones de los periféricos al controlador

Componente	Puertos	Pines
Sensor de fuerza 1	PA0	CN7-28
Sensor de fuerza 2	PA1	CN7-30
Sensor de fuerza 3	PA4	CN7-32
Cámara 1,2	CS1 - PB4	CN10-27
	SCLK - PA5	CN01-11
	MISO - PA6	CN10-13
	MOSI - PA7	CN10-15
	CS2 - PB5	CN10-29
DHT11_A	PA13	CN7-13
DHT11_B	PA14	CN7-15
DHT11_C	PA15	CN7-17
Encoder Motor CD GDL_1	Canal A - PB7	CN7-21
	Canal B - PC13	CN7-23
Motor CD GDL_1	PWM - PA3 (Timer 2 Canal 4)	CN10-37
	Dirección - PC4	CN10-34
Encoder Motor CD GDL_2	Canal A - PC14	CN7-25
	Canal B - PC15	CN7-27
Motor CD GDL_2	PWM - PA2 (Timer 2 Canal 3)	CN10-35
	Dirección - PB13	CN10-30
Encoder Motor CD GDL_3	Canal A - PH0	CN7-29
	Canal B - PH1	CN7-31
Motor CD GDL_3	PWM - PA10 (Timer 1 Canal 3)	CN10-33
	Dirección - PB14	CN10-28
Servomotor GDL_4	PC9 (Timer 3 Canal 4)	CN10-1
Servomotor GDL_5	PB8 (Timer 2 Canal 1)	CN10-3
Servomotor GDL_6	PB9 (Timer 2 Canal 2)	CN10-5
Servomotor Efector	PC8 (Timer 3 Canal 3)	CN10-2
Servomotor Desechador	PC9 (Timer 3 Canal 1)	CN10-4
Módulo de celda de carga	DATA - PC2	CN7-35
	CLK - PC3	CN7-37

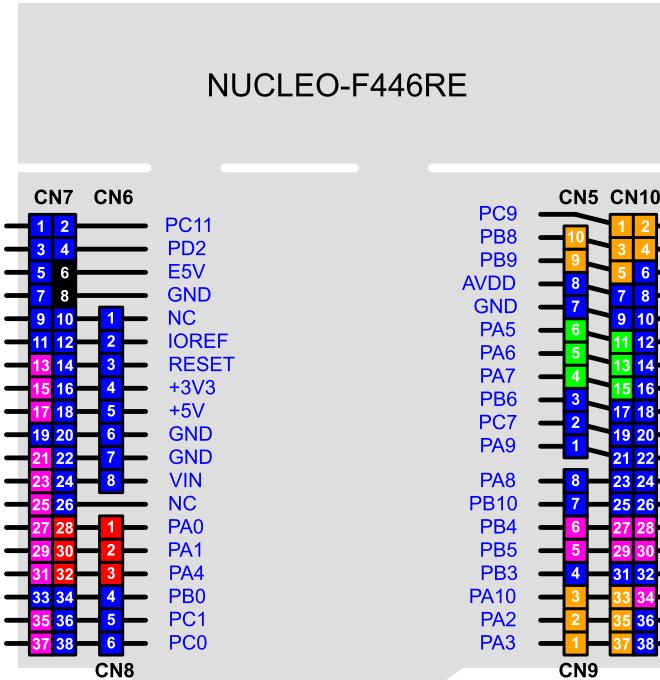


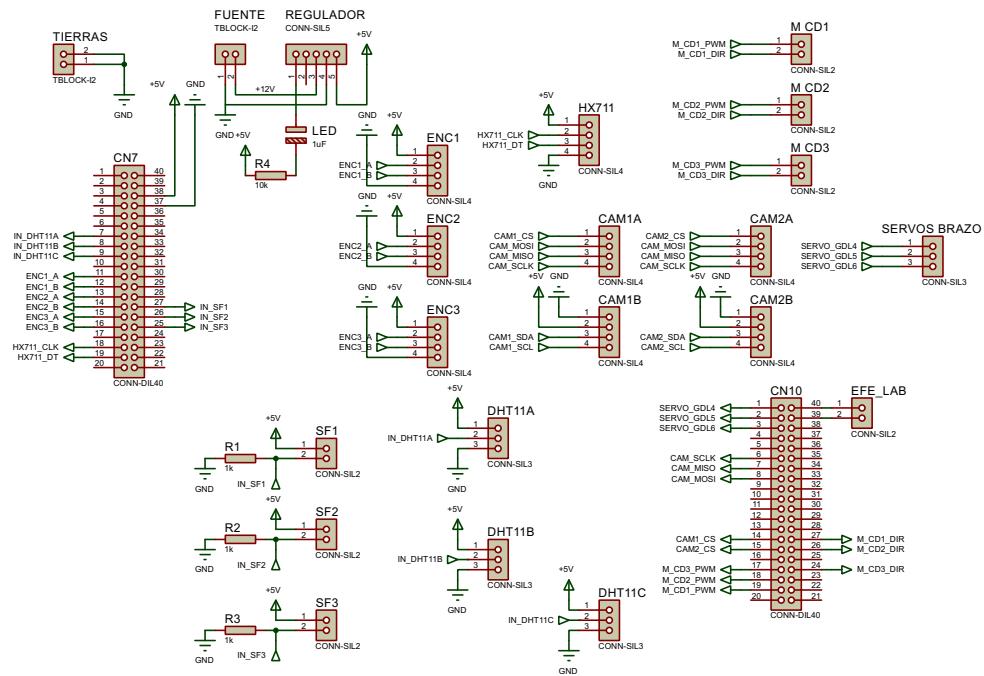
Figura 2.62: Conexión de los periféricos al controlador

La placa se diseña para acoplarse directamente con la tarjeta del microcontrolador, como se muestra en la Figura 2.64a.

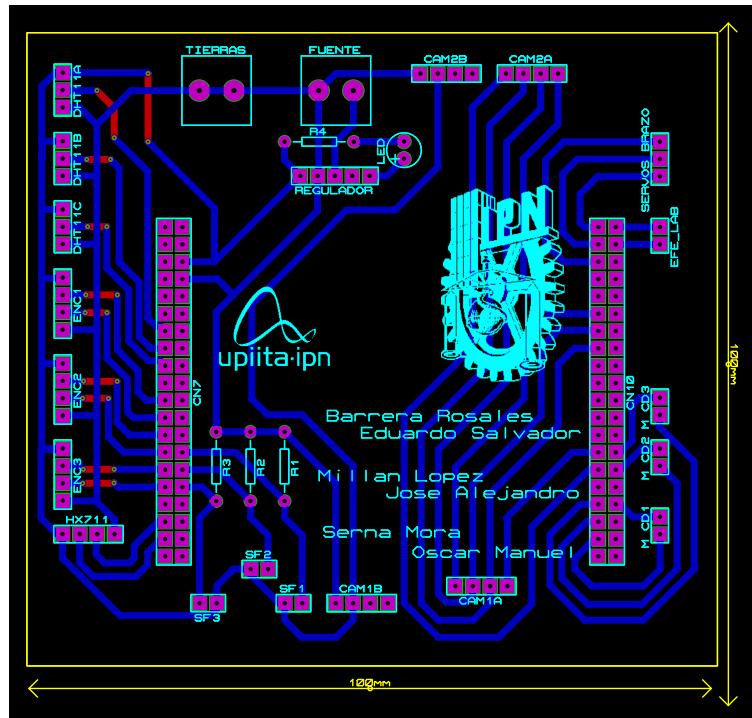
Para colocar el sistema de procesamiento en la estructura, se diseña una plataforma de soporte, mostrada en la Figura 2.64b. El ensamblaje resultante se acopla en la parte central de la estructura de acuerdo a la Figura 2.65.

Debido a que los periféricos de la tarjeta no son capaces de suministrar la corriente necesaria para mover los actuadores, se utilizan controladores para motores de CD basados en conmutadores de estado sólido que permiten el control por PWM, cuyas características son:

- MDD10A (Anexo A. 16)
 - Voltaje de alimentación: 5-30[V]
 - Corriente máxima continua: 5 [A]
 - Corriente pico: 30 [A] por menos de 10 segundos
 - Frecuencia máxima de PWM: 20 [KHz]
- MD20A (Anexo A. 17)
 - Voltaje de alimentación: 6-30[V]
 - Corriente máxima continua: 20 [A]
 - Corriente pico: 60 [A] por menos de 10 segundos



a) Diagrama esquemático



b) Placa de circuito impreso

Figura 2.63: Diseño del circuito del sistema

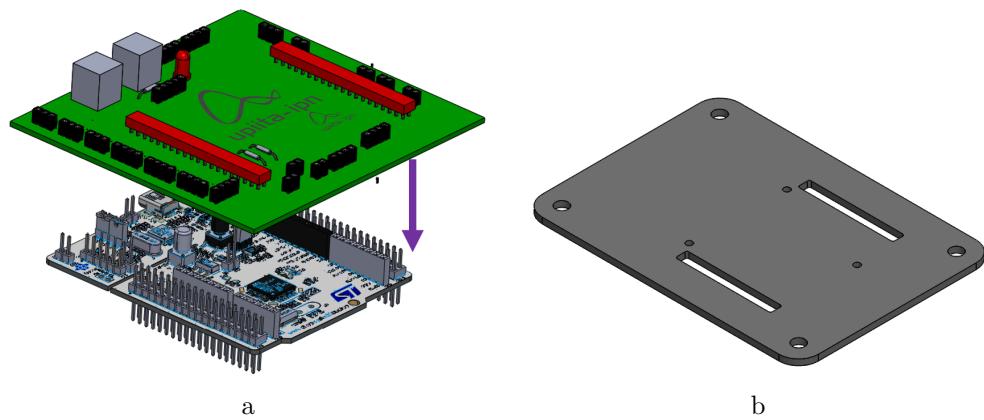


Figura 2.64: Ensamblaje de PCB con microcontrolador y soporte del sistema de información

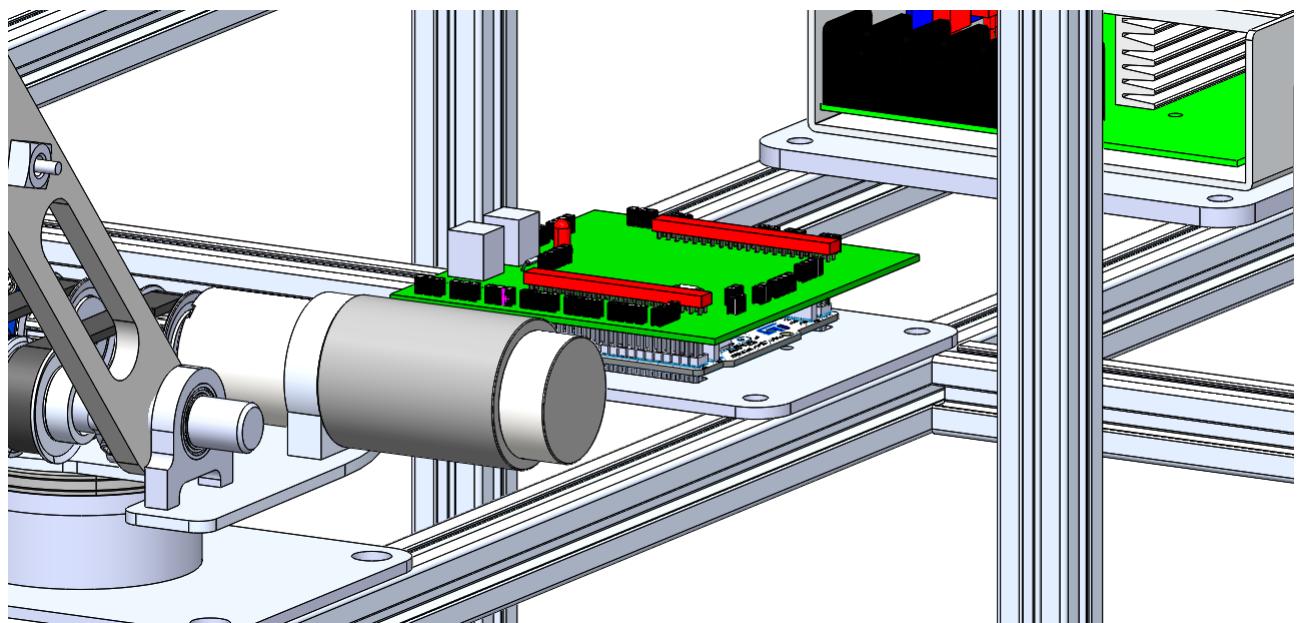


Figura 2.65: Placas colocadas en la estructura

- Frecuencia máxima de PWM: 20 [KHz]

$$SI1543 + S2 = SI5432$$

2.3.2. Integración de software

Según el modelo eFFBD de la Figura 2.3, el funcionamiento del sistema se puede clasificar en procesos realizados por el computador y procesos realizados por el microcontrolador, para entender mejor estos procesos es útil recurrir a un diagrama de flujo, y la redacción de un pseudocódigo que posteriormente facilite su implementación en un lenguaje de programación real.

En la Figura 2.67 se muestra el diagrama de flujo del proceso realizado por el computador, acompañado del pseudocódigo correspondiente. Este algoritmo consiste en recibir la orden del usuario de activar la cámara, tomar una fotografía e interpretarla con la finalidad de obtener los parámetros necesarios para que el robot tome la muestra de interés, y finalmente recibir la información del peso de la muestra.

```

1 Inicio
2 flotantes Q=(q1,q2,q3,q4) // Valores constantes para la corrección de
   perspectiva
3 enteros f,b,           // Distancia focal y distancia entre camaras
4 Booleano salir de proceso = Falso;
5 Iniciar puerto uart usb// Para comunicación con el micro
6 Esperar comando //    del usuario para encendido general
7 Enviar cadena por uart // para encendido
8 salir de proceso =Esperar comando //para tomar muestra O desactivar
   sistema
9 Mientras (salir de proceso == Falso)
10 Enviar cadena por uart //  para toma de fotografías
11 Recepción de cadena de datos// Contiene las dos fotografías
12 Comprobación de cadena// Por CRC
13 Homografía(q1,q2,q3,q4)// Función para corrección de perspectiva
14 Mostrar imagen corregida
15 Recibir un rectángulo de interés// Colocado por el usuario sobre la
   imagen corregida
16 Obtener el centroide del rectángulo
17 (Xc,Yc)=k(xm,ym)// Transformación de coordenadas del espacio de
   cámara al    espacio de trabajo
18 Xi=Ln-Ci      // Diferencia entre el eje neutro y el centroide en la
   imagen izquierda
19 Xd=Ln-Cd      // Diferencia entre el eje neutro y el centroide en la
   imagen derecha
20 zm=f*b/(Xi-Xd) // Coordenada Z de la muestra
21 T=Generación de trayectoria (xh,yh,zh,xm,ym,zm)
22 Ci=Cinemática inversa (T);
23 Envío de las posiciones deseadas (T)
24 Recepción de cadena de datos// Contiene resultado de la operación
25 Si operación exitosa
26   entonces mostrar resultado
27 de otra forma, mostrar alerta y condiciones del entorno
28 Esperar comando // Para tomar otra muestra o desactivarse
29 Si Tomar otra muestra
30   entonces mostrar resultado

```

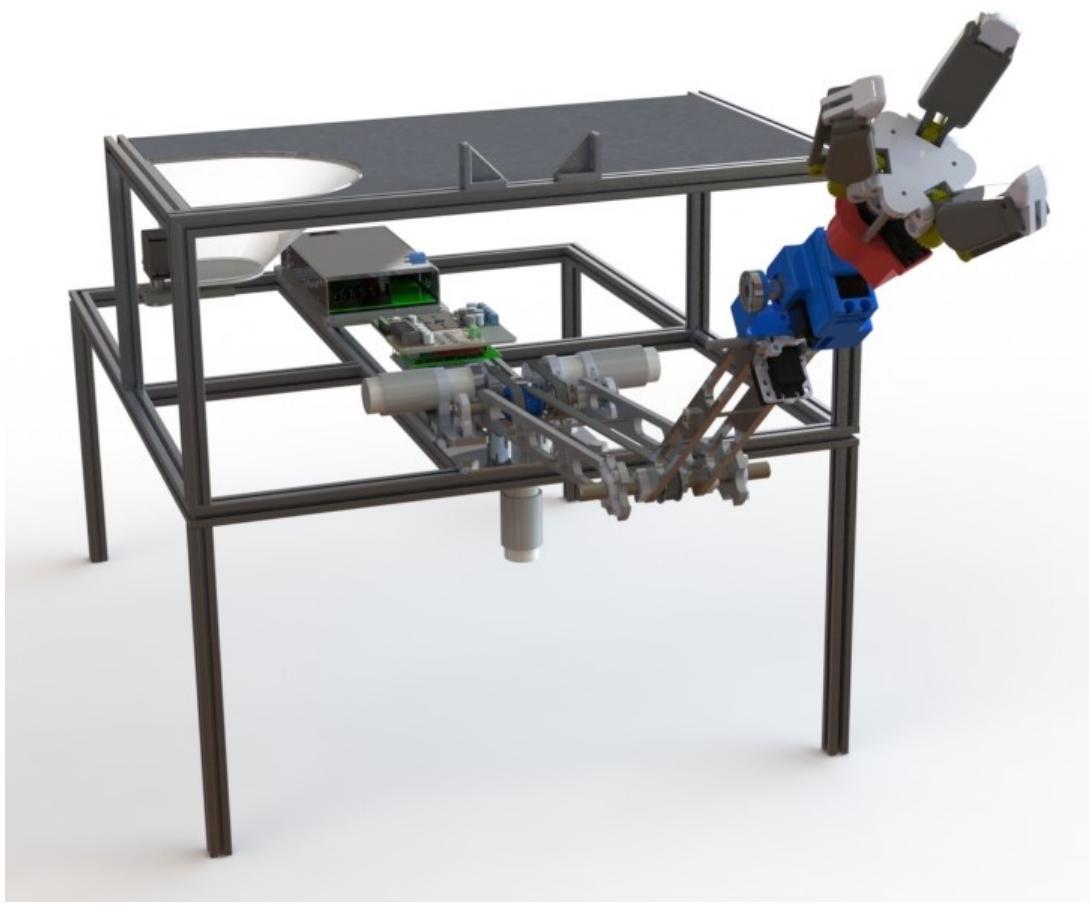


Figura 2.66: Render del sistema completo

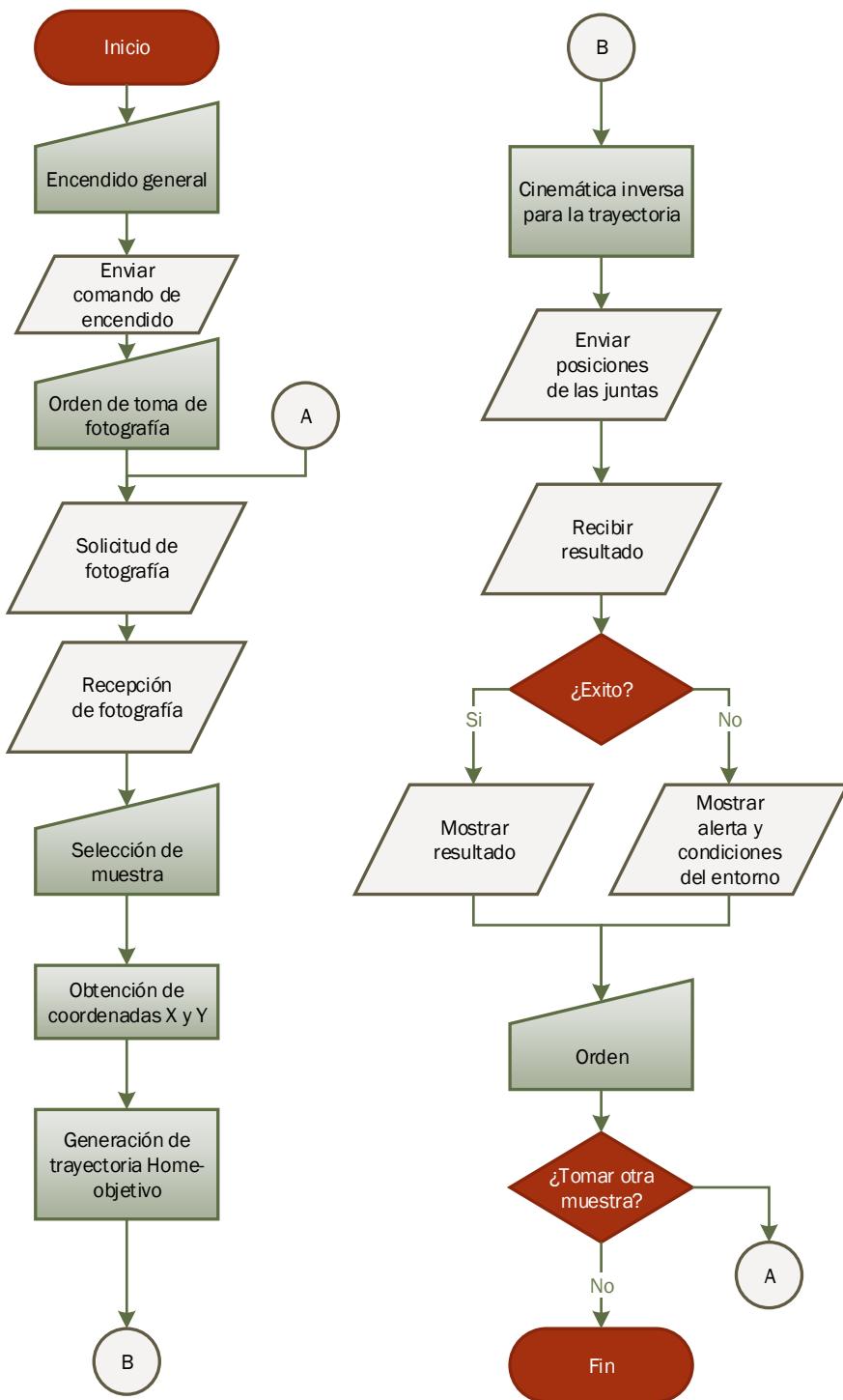


Figura 2.67: Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por la PC

```

31 de otra forma, salir de proceso = verdadero
32 Fin de programa

```

Algoritmo 2.1: Pseudocódigo de la computadora

El diagrama de flujo del microcontrolador se muestra en la Figura 2.68, en el que se puede apreciar que se espera a la orden de activación del usuario, realizada desde el ordenador, en la que también se reciben los parámetros de las juntas de los motores del brazo para trasladarlo a la posición de la muestra una junta a la vez, una vez que la haya tomado la lleva a la posición del laboratorio, la libera, se realiza y envía el resultado de la medición, y finalmente el brazo vuelve a la posición de reposo en espera de una nueva orden.

```

1 Inicio de programa
2 Booleano realizar_proceso //Variable de control que indica si se debe
   tomar la muestra o desactivar el sistema
3 booleano CS1=CS2=1 // ambas cámaras deshabilitadas (lógica negada en
   Chip Select)
4 flotante TH1, TH2, TH3, Temp1, Hum1, Temp2, Hum2, Temp3, Hum3 // 
   Condiciones del entorno
5 entero i,j // Contadores
6 booleano realizar_proceso, PiedraDetectada, banderaTimeOut,
   errorEfector, errorPiedra, errorCondiciones // Banderas de control
7 flotante PesoCelda
8 Iniciar periférico UART // Para comunicación con PC
9 Iniciar periférico SPI // Para comunicación con cámaras
10 Iniciar periférico ADC // Para lectura de sensores de fuerza
11 Configurar timers PWM // Para control de motores de CD y servomotores
12 Configurar i/o digitales // Para leer sensores digitales
13 realizar_proceso = Esperar cadena de comando // La PC transmite la
   orden del usuario de iniciar proceso o desactivar sistema
14 Mientras realizar_proceso == verdadero
15   TH1[2]=lectura DHT11_1 // Arreglo dimensión 2 con temperatura y
   humedad de los sensores DHT11
16   TH2[2]=lectura DHT11_2
17   TH3[2]=lectura DHT11_3
18   Temp1 = TH1[1] //Obtener valor de temperatura del DHT11_A
19   Hum1=TH1[2] // Obtener valor de humedad del DHT11_A
20   Temp2 = TH2[1]
21   Hum2=TH2[2]
22   Temp3 = TH3[1]
23   Hum3=TH3[2]
24   CondicionesEntorno=TH1+TH2+TH3 // Cadena con toda la información de los
   sensores para mostrar al usuario
25 Si (Temp1<tempMax Y Temp2<tempMax Y Temp3<tempMax
26   Y Hum1<HumMax Y Hum2<HumMax Y Hum3<HumMax) // Comprobar que las
   condiciones del entorno están dentro de los límites aceptables
27   CS2=0 // Activar cámara 2
28   desde i=1 hasta i=2 incremento 1 // Ciclo para tomar fotografías
29   CS1=CS2 // Intercambiar el valor de activación de la cámara 1
30   CS2=CS2! // Intercambiar el valor de activación de la cámara 2
31   envío spi de solicitar fotografía // Enviar orden de toma de fotografía
32   Fi[] = recibir spi fotografía // Guardar fotografía i en memoria
33   fin del bucle
34   CS2=1 // Desactivar cámara 2
35   Enviar por uart la cadena con las dos imágenes a la PC (F1,F2)
36   T[] = Recibir de la pc cadena con posiciones de juntas
37   desde j=1 hasta j=6 incremento 1 // Ciclo para implementar el
   control por juntas independientes
38   pwm[j]=control(encoder[j],T[j])
39   fin del bucle

```

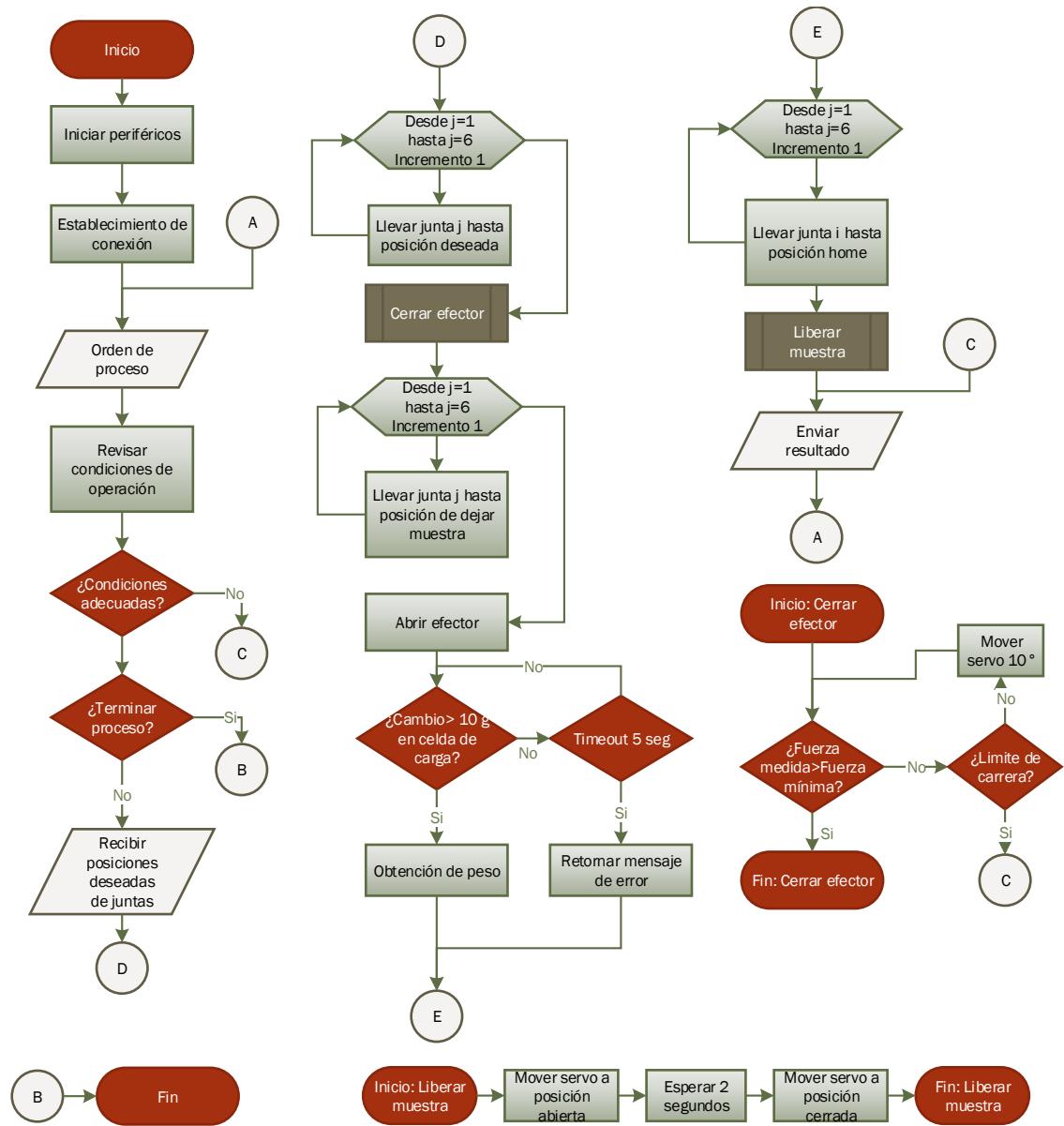


Figura 2.68: Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por el microcontrolador

```

40     hacer // Ciclo de cierre del efecto hasta determinar que la muestra
41     ha sido asegurada
42     F[3]=lectura adc sensores fuerza
43     PwmServo=PwmServo+10° // Continuar cerrando el efecto
44     si PwmServo=límite de cierre entonces
45         errorEfecto=verdadero // El efecto no logró asegurar la muestra
46     mientras (F[0]<Fmin Y F[1]<Fmin Y F[2]<Fmin)
47     si errorEfecto == verdadero entonces
48         Resultado = errorEfecto
49     de otra forma
50         desde j=1 hasta j=6 incremento 1 // Llevar la muestra al laboratorio
51         pwm[j]=control(encoder[j],T_Lab[j])
52     fin del bucle
53     PwmServo=PwmServoTotalAbierto // Abrir efecto para dejar caer la
54     muestra
55     Establecer Timer de timeout // Para esperar un máximo de 5 segundos
56     a que la piedra llegue al área de medición
57     PiedraDetectada=Falso
58     mientras banderaTimeOut==falso y PiedraDetectada=Falso // Si
59     sigue contando o si se detecta la piedra
60         PesoCelda=leer celda de carga
61         si PesoCelda>10g entonces
62             PiedraDetectada=Verdadero
63     fin del bucle
64     si PiedraDetectada=Falso entonces
65         Resultado=ErrorPiedra+condiciones entorno // La muestra no llegó al
66         área de medición
67     de otra forma     Resultado = PesoCelda+condiciones entorno
68
69     desde j=1 hasta j=6 incremento 1 // Llevar el robot a su posición de
70     Home
71         pwm[j]=control(encoder[j],T_Lab_Home[j])
72     fin del bucle
73     PwmDesechador=PwmAbierto // Deshacerse de la muestra
74     Espera 2 segundos
75     PwmDesechador=PwmCerrado // Regresar área de medición a su posición
76     original
77     de otra forma     Resultado=ErrorCondiciones+condiciones entorno // 
78     Condiciones fuera de los límites aceptables
79     Enviar uart Resultado // Enviar información con resultado de la
80     operación, sea exitoso o fallido
81     realizar_proceso = Esperar cadena de comando // Esperar nueva orden
82     para tomar otra muestra o desactivar el sistema
83 Fin del bucle.
84 Fin del programa

```

Algoritmo 2.2: Pseudocódigo del microcontrolador

Estimación de costos

La Tabla 2.17 refleja el costo aproximado del proyecto, considerando los componentes adquiridos y los manufacturados

Tabla 2.17: Estimación de costos

Concepto	Cantidad	Precio unitario USD	Precio total USD
Motor	3	60	180
Servomotor	5	15	75
Abrazadera	4	7	28
Eje de tornillo de fijación	4	5	20
Montaje de cojinete plano	2	7	14
Buje de eje	4	10	40
Buje de servo	1	5	5
Chumacera	2	7	14
Polea 15D	2	9	18
Cople motor	1	5	5
Rodamiento con brida	2	5	10
Bloque portador de carga para servo (Muñeca)	1	28	28
Soporte servo multiusos (Lab)	1	12	12
DHT11	3	5.2	15.6
Camara	2	26	52
Fuente comutada	1	40	40
Regulador 5V	1	6	6
Regulador 7.6 V	2	8.5	17
Driver Dual 10 A	1	19.25	19.25
Driver 20 A	1	17.25	17.25
Polea A 6A 3-15DF03716	2	11.67	23.34
Banda B375-70XL	2	5.70	11.4
Banda B375-290XL	1	6.75	6.75
Eje 0.5in*6in S40PH0-CHS4-012	2	11.36	22.72
Soporte eje 12 mm	1	18	18
TOTAL USD			698.31
CONVERSIÓN MXN (18/06/2020)			15,894.05
Rodamiento axial AXK_4565	1	200 MXN	200 MXN
Rodamiento de rodillos NU_303_ECP	1	500 MXN	500 MXN
Rodamiento D.W_ER1212_2ZS	5	100 MXN	500 MXN
Impresión 3D plástico ingeniería	1	1500 MXN	1,500 MXN
Impresión 3D plástico estándar	1	2000 MXN	2,000 MXN
Solera de aluminio	1	1500 MXN	1,500 MXN
IPS 20x20	8[m]	138.6 MXN	1,108.8 MXN
Total			23,202.85 MXN

Implementación

En este capítulo se describe la construcción realizada, siguiendo la secuencia de integración descrita en el capítulo anterior indicando, de ser necesario, las modificaciones realizadas al diseño original.¹

Para reducir costos, el requerimiento R1 de la Tabla 2.2 fue modificado para tomar una muestra de 100 gramos.

3.1. S5. Estructural

El diseño original contemplaba perfil estructural IPS 2020 de aluminio, sin embargo, se opta por utilizar una estructura soldada de PTR (Perfil Tubular Rectangular) de $1\frac{1}{4}$ " calibre 14, ya que el material es más barato, más pesado (lo cual ayuda a equilibrar las cargas generadas por el brazo), y además es fácil de trabajar con las herramientas típicas de una herrería. Debido a que el material es acero estructural, se le aplica una capa de pintura para proteger el metal de la corrosión, eligiendo un color cromado para ser estéticamente similar al aluminio.

Como se puede apreciar en la Figura 3.1, se modifica la pieza en la que reposa el brazo (mostrada en la Figura 2.57) por un fragmento de PTR que se ranura con el espacio adecuado para apoyar el brazo.

¹Por causas externas al proyecto (COVID-19) fue necesario realizar modificaciones en el diseño, así como una nueva selección de componentes con el fin de reducir costos y simplificar la construcción.



a) Estructura soldada y pintada



b) Acercamiento a la pieza donde reposa el brazo

Figura 3.1: Estructura construida

3.2. S1. Robótico

3.2.1. M1. Manipulador

Base del manipulador

De acuerdo al cambio de material en la estructura (S5), se utilizan tornillos de $\frac{3}{8}$ " , por lo que se modifica el diámetro de los barrenos de la base fija de 10[mm] a $\frac{3}{8}$ ".

La base fija que se une a la estructura junto con el cilindro sobre el que se colocan los rodamientos se muestran en la Figura 3.2a, mientras que la base giratoria sobre la que se colocan los motores del segundo y tercer GDL se observan en la Figura 3.2b.

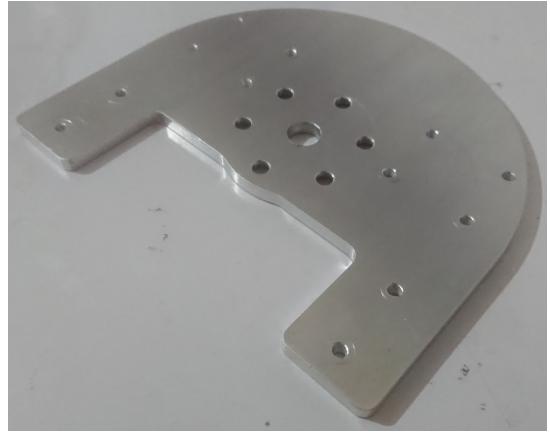
Gracias a que la masa fue reducida a 100 gramos, se puede elegir un motor que ofrezca un menor par, por lo que el modelo seleccionado es el motor de engranes planetarios Yellow Jacket 5202 Series, que proporciona 24.51[Nm] (Anexo XD).

Debido a que hay problemas de compatibilidad entre los ejes de 1/2" y algunos componentes acoplados a estos, se cambian por ejes de acero inoxidable de 12[mm] de diámetro y las piezas compatibles con los mismos, vendidos por ServoCity (Anexo XD2). A estos ejes se les hace un desbastado longitudinal a lo largo de todo el cuerpo para facilitar la colocación y sujeción de accesorios, como se muestra en la Figura 3.3.

Con estas modificaciones, es posible construir la base giratoria que constituye la cintura del manipulador, mostrada en la Figura 3.4, en la que también se puede apreciar la distribución de los motores de CD correspondientes a los GDL 2 y 3.



a) Base fija con el cilindro montado y tapa del cilindro



b) Base giratoria

Figura 3.2: Base del manipulador



a) Desbastado para un lado plano



b) Polea sujetada al eje

Figura 3.3: Ejes desbastados

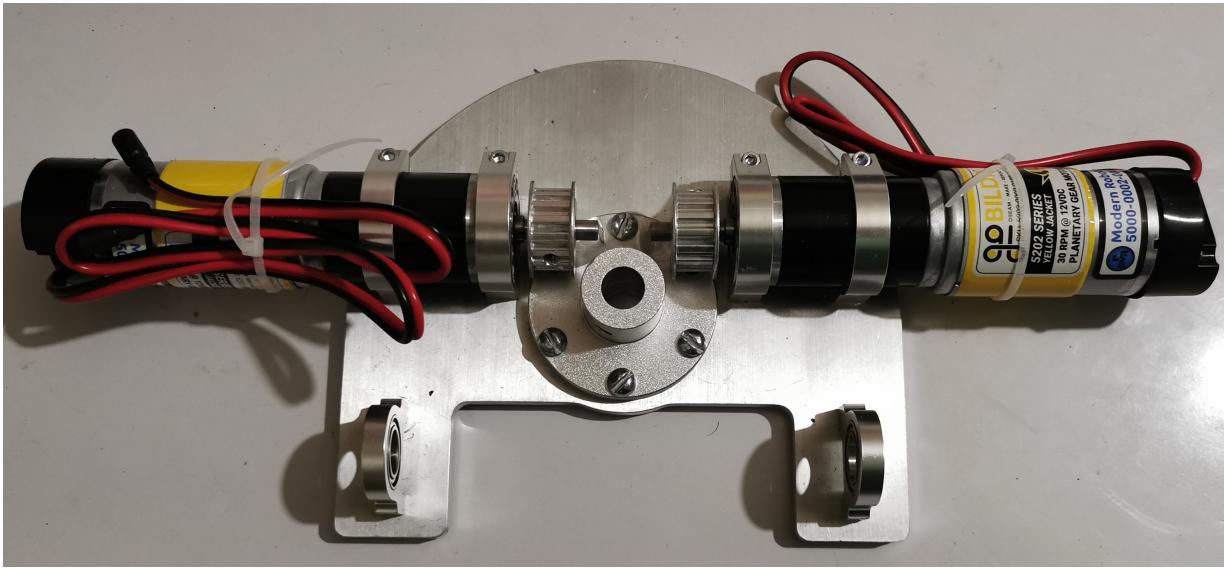


Figura 3.4: Base giratoria con motores

Debido a que el diseño original del ocioso dentado mostrado en la Figura 2.15 contiene bordes complicados de hacer por las impresoras 3D, se modifica el CAD eliminando los mismos, como se puede apreciar en la Figura 3.5a, mientras que la pieza, impresa en HIPS (Poliestireno de alto impacto por sus siglas en inglés *High Impact Polystyrene*) con resolución media, se encuentra en la Figura 3.5b.

La base del manipulador completa se puede apreciar en la Figura 3.6.

Eslabones

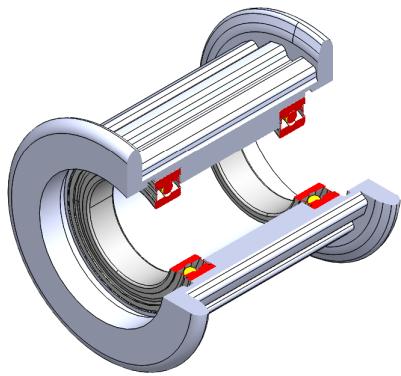
Debido a que no se cuenta con la infraestructura requerida (Fresadora CNC) para la manufactura en aluminio, y que manufacturarlas de manera externa elevaba demasiado el precio, se modificó el material a Alucobond de 4[mm] de grosor.

Con estas modificaciones, el eslabón 1 pesa 0.16 Kg, y el eslabón 2 pesa 0.07 Kg.

Los modelos CAD de los eslabones rediseñados se muestran en las Figuras 3.7a y 3.7b, mientras que los eslabones construidos están en las Figuras 3.7c y 3.7d respectivamente.

Validación

Ya que el Alucobond es un material compuesto de aluminio y un polímero, no existe en la biblioteca de materiales de SOLIDWORKS, por lo que se utiliza acrílico (Módulo elástico = 45 MPa), pues al ser un material más frágil y quebradizo, si este material es capaz de resistir los esfuerzos, el Alucobond también lo será.



a) CAD



b) Impreso

Figura 3.5: Rediseño del ocioso dentado

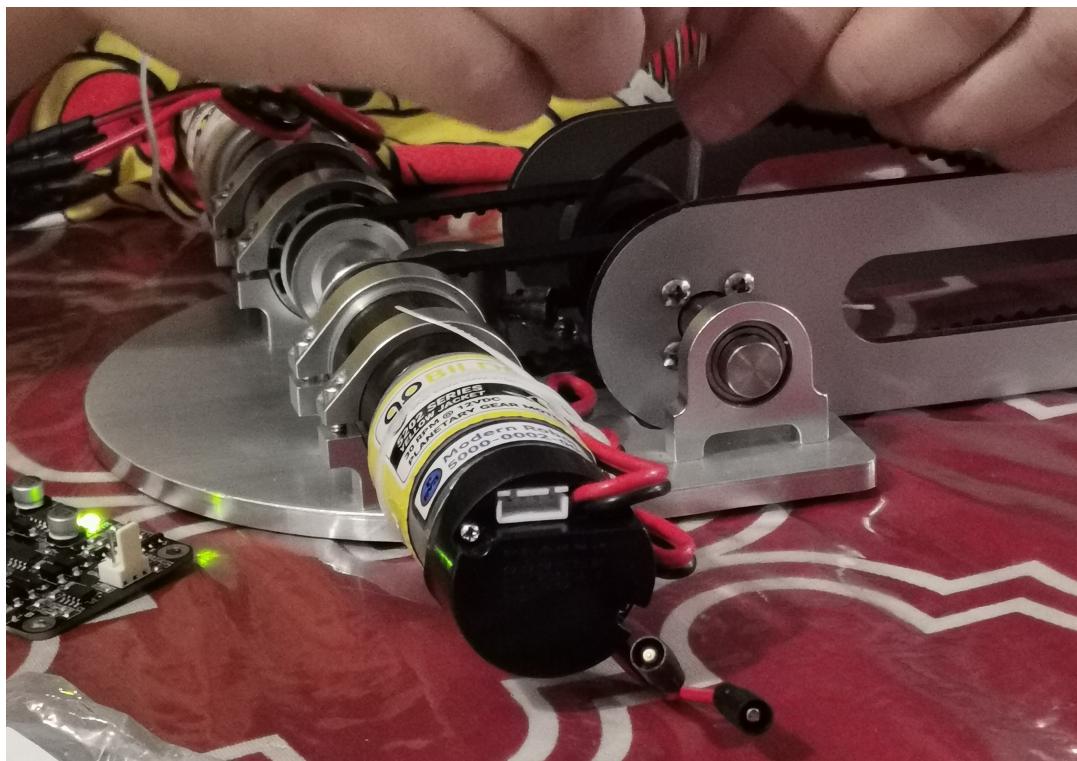


Figura 3.6: Base del manipulador

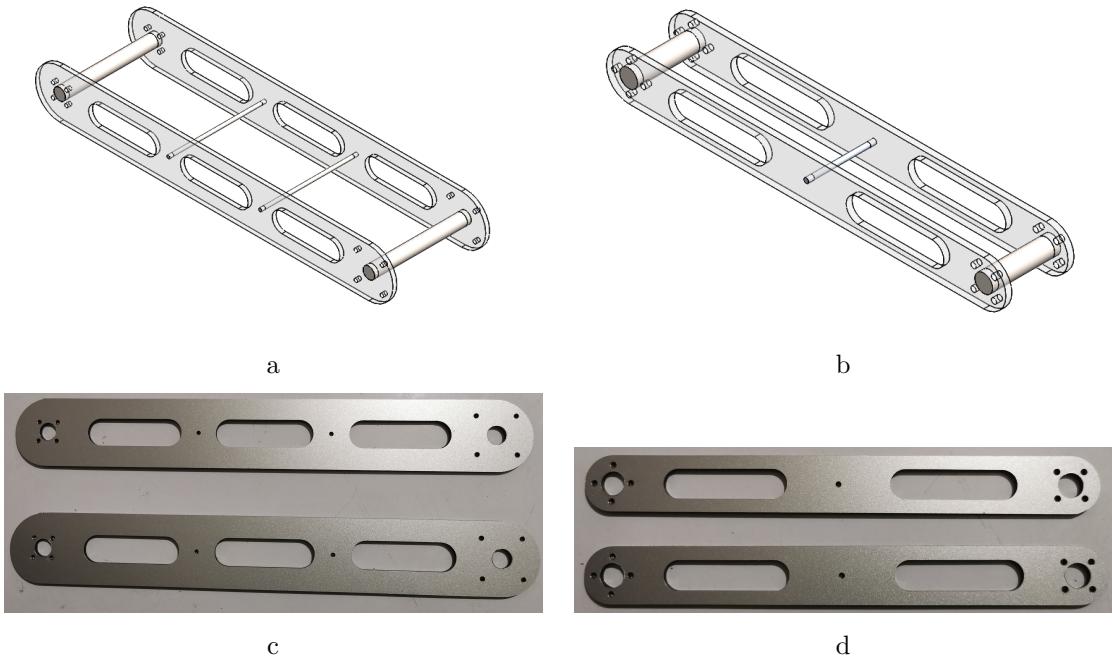


Figura 3.7: Modelos CAD de los eslabones y eslabones construidos

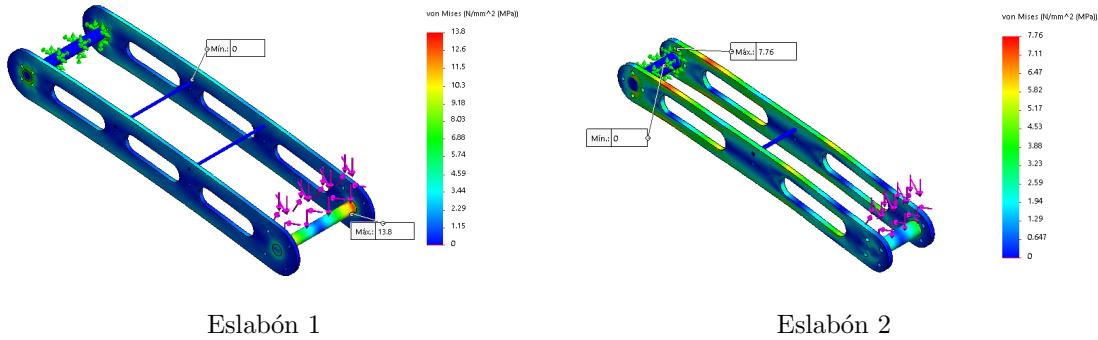


Figura 3.8: Análisis de resistencia de eslabones de acrílico

Las Figuras 3.8a y 3.8b indican que los factores de seguridad son de 3.26 y 5.79 respectivamente, por lo que se concluye que el material resiste las cargas a las que es sometido.

Muñeca esférica

Las piezas realizadas con manufactura aditiva, se imprimieron con ABS al 100 % en resolución estándar, como se muestra en las siguientes Figuras: 1) Pieza en C: Figura 3.9a, 2) Unión de servos: Figura 3.9b, 3) Tapa de unión de servos: Figura 3.9c, 4) Sostén del servo para el primer GDL de la muñeca esférica: Figura 3.9d.

3.2.2. M2. Efecto final

Las piezas del efecto se imprimieron en ABS con alta resolución para los engranes y el tornillo sin fin, estas piezas se muestran en las siguientes Figuras: 1) Tornillo sin fin y engranes: Figura 3.10a, 2) Efecto con palma y 3 dedos: Figura 3.10b, 3) Base del efecto: Figura 3.10c.

Control y movimiento

Como se planeta en el diseño de dominio específico, la aproximación al control del manipulador es mediante juntas independientes. Por medio de pruebas experimentales se determinó que la única junta que requiere el uso de un control retroalimentado de posición es la segunda, ya que es la que está sujeta a una carga mayor. Este es un control proporcional sintonizado experimentalmente.

$$pwm = kp * \theta_e \quad (3.1)$$

En donde kp es la ganancia proporcional, con un valor de 1000, y θ_e es el error entre la posición angular deseada y la posición angular actual.

Para evitar las aceleraciones bruscas, se optó por utilizar un perfil de velocidades trapezoidal para las juntas 1 y 3 a través de un incremento lineal en el ciclo útil del pwm que se envía a los actuadores, mientras que para la junta 2, se dan incrementos de 1 grado cada 0.15 segundos hasta llegar a la posición deseada.



a) Pieza en C



b) Tapa de unión de servos



c) Unión de servos



d) Sostén del servo para el primer GDL de la muñeca

Figura 3.9: Componentes impresos de la muñeca esférica



a) Dados y palma

b) Tornillo sin fin y engranes

c) Base

Figura 3.10: Efecto final impreso

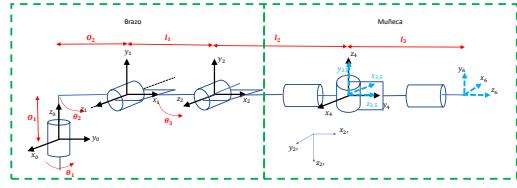
Configuraciones

Los ángulos de las juntas del robot mostrados en la Figura GDLRobot.jpg se miden como se estableció al calcular la cinemática directa mediante la convención de Denavit-Hartemberg.

Cabe señalar que ya que los actuadores del tercer y cuarto grado de libertad están montados en la base del robot y el tercer grado de libertad transmite su movimiento mediante una polea ociosa colocada en el eje del segundo grado de libertad, el movimiento angular del tercer GDL es independiente del segundo GDL, lo que significa que el ángulo medido en esa junta es absoluto con respecto al plano horizontal, a diferencia del ángulo calculado, el cual es relativo al eslabón anterior. Por ello es necesario convertirlo mediante la fórmula $\theta_{2absoluto} = \theta_{2relativo} + \theta_1$.

Para la ejecución de la tarea de "pick and place" se establecen dos configuraciones clave. La configuración de "Dejar muestra" posiciona el efecto para que, al soltar la muestra, esta caiga en el contenedor del laboratorio, esto se puede ver en la Figura 3.12. La otra configuración es "Home" la cual es el reposo del brazo y sirve de referencia de posición al iniciar el movimiento, puesto que se utilizan encoders incrementales como sensor de posición. Los valores de las juntas en dichas posiciones se muestran en la Tabla 3.1.

La posición de home es diferente a la establecida en el diseño de dominio específico, ya que al implementar el Kinect como sistema de percepción, ocupa un lugar en el que corre el riesgo de ser golpeado y por lo tanto estar propenso a enviar información errónea de las coordenadas de la muestra.

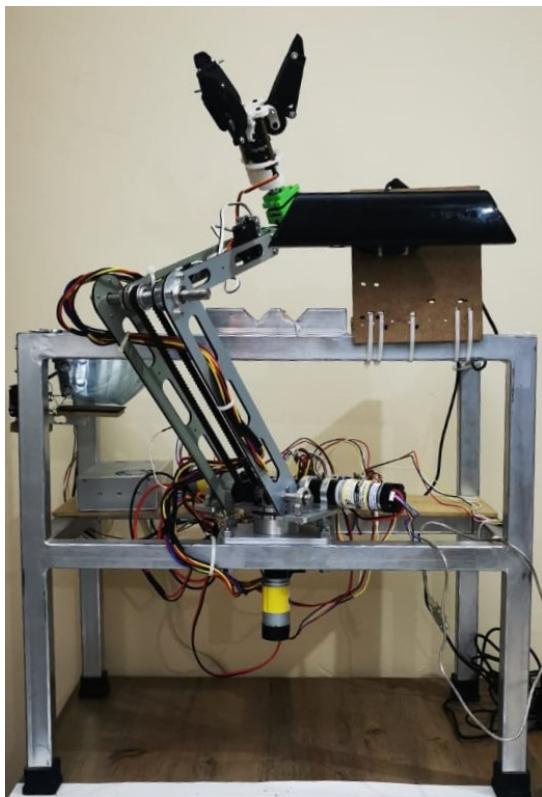


a) Modelo utilizado para la cinemática

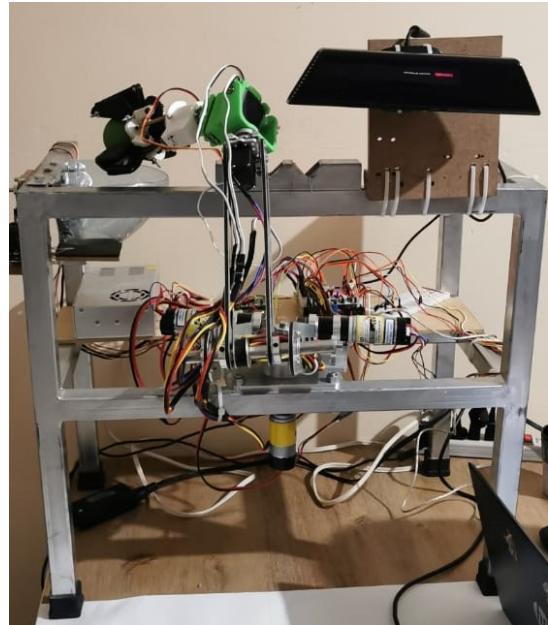


b) Robot en los ángulos cero

Figura 3.11: Comparación del modelo de robot con la implementación



a) Home



b) Laboratorio

Figura 3.12: Configuraciones clave del robot

Tabla 3.1: Configuraciones clave del robot

	Dejar muestra	Home
θ_1	82	59
θ_2	18	53
θ_3	120	158
θ_4	80	10
θ_5	150	10
θ_6	26	75

3.3. S4. Laboratorio

Para la implementación de este sistema, se diseñó un elemento de sujeción hecho de lámina de acero, mostrado en la Figura 3.14 que soporta al sistema de laboratorio y lo mantiene unido al sistema estructural.

El sistema de laboratorio finalizado y sujeto a el sistema estructural se puede ver en las Figuras ??a y ??b.

3.4. S3. Energético

La fuente utilizada es la TDK-Lambda GWS250, que proporciona 20[A], ya que las modificaciones permitieron utilizar esta fuente, perteneciente a compañeros de la carrera.

Así mismo, se utilizan los Drivers Cytron 13 [A] y Cytron dual de 10[A] por canal para alimentar los motores de CD. Para los servomotores se utiliza el regulador Digilent TPS54620, que proporciona 5V a 6[A] de manera continua.

Estos componentes se pueden apreciar en la Figura 3.15, encerrados en círculos.

3.5. S2. Información

3.5.1. M3. Percepción

Con el fin reducir costos y facilitar el algoritmo de visión, se opta por utilizar una cámara RGB-D, la cual es el kinect v1, que se muestra en la Figura 3.16 fabricado por Microsoft®. Para esta plataforma existen varias aplicaciones de código libre, por lo que hay bibliotecas disponibles para la utilización de los datos obtenidos de los sensores[38].

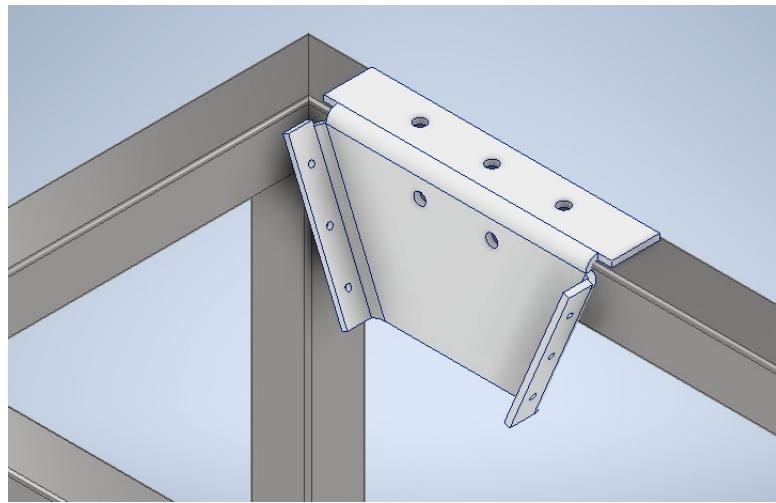
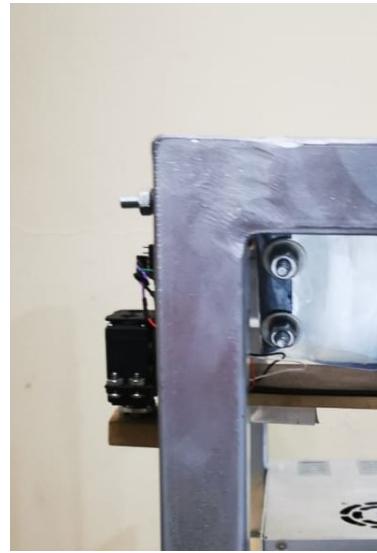


Figura 3.13



a Vista frontal, donde se observa la superficie de medición y la superficie cónica b Vista lateral, donde se muestra el acoplamiento

Figura 3.14: Vistas del sistema de laboratorio

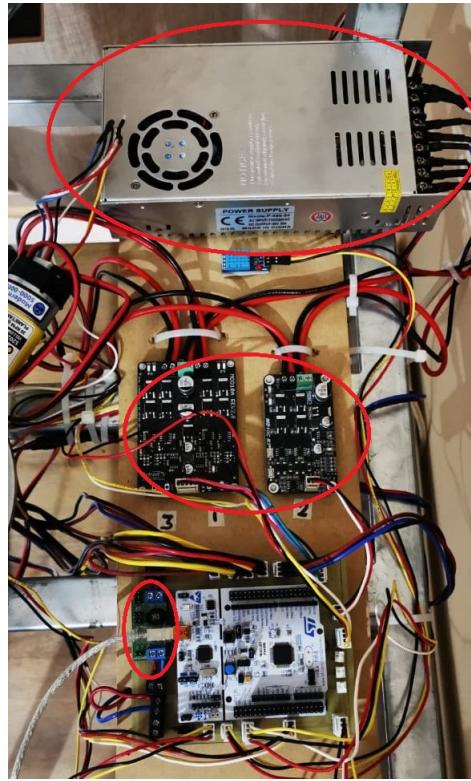


Figura 3.15: Distribución del sistema energético

Ya que se desea obtener la posición en el espacio del objeto a sujetar, es necesario utilizar la información provista por el sensor profundidad, la cual es una representación de los datos de profundidad en un formato de imagen rgb o escala de grises. Cada uno de los pixeles de dicha imagen representa un valor de profundidad. La información de la imagen de profundidad (la cual está limitada al rango de valores que puede tomar el pixel rgb o escala de grises) proviene de otra cadena de datos que contiene los datos de profundidad tal cual los obtiene el sensor. Estos datos no tienen una relación lineal con la profundidad real, por lo que para su conversión a distancia debe tomar en cuenta varios parámetros de fábrica. Estos parámetros ya han sido obtenidos y calibrados, por lo que es posible hacer una función que permita conocer la ubicación espacial de cada pixel que se muestra en la imagen de profundidad[39].

Debido a que el rango de sensibilidad del sensor de profundidad va desde los 48 cm en adelante, fue necesario colocar el kinect a una distancia mayor a la propuesta en el diseño (en la barra inferior de la estructura). La nueva posición es en la parte superior de la estructura, lo más cerca posible del centro. Esto provoca que la posición de home tenga que moverse, ya que de otra forma el manipulador estorbaría a la cámara y correría riesgo



Figura 3.16: Kinect, fabricado por Microsoft®

de ser golpeada por el mismo.

El hecho de que la cámara no esté perfectamente centrada en la estructura provoca que el campo de visión se encuentre recorrido y no abarque todo el espacio de trabajo del robot.

3.5.2. M4. Comunicación

La comunicación con el usuario se realiza a través de una Interfaz Gráfica de Usuario, mostrada en la Figura 3.17 en la que el operador debe seleccionar un punto de la imagen de profundidad que corresponda al objeto que desea tomar. El módulo de percepción obtiene las coordenadas en el espacio de ese punto y las muestra. Esta interfaz se desarrolla utilizando el lenguaje “Processing®” [40], ya que este cuenta con bibliotecas que permiten utilizar el Kinect fácilmente.

EL programa de la interfaz calcula el vector de valores de las juntas del robot según las coordenadas deseadas, las cuales son enviadas a la tarjeta de procesamiento cuando el usuario presiona el botón “Activar”, mientras que esta recolecta los datos de temperatura y peso de la muestra para enviarlos a la computadora.

La comunicación entre la computadora y la tarjeta Núcleo es serial, utilizando el protocolo UART a través del puerto USB de la tarjeta de desarrollo.

3.5.3. M5. Procesamiento

En la tarjeta núcleo existen pines que están reservados para el funcionamiento de los periféricos internos de la misma, lo cual no se tomó en cuenta en el diseño de la Figura 2.62, por esta razón se eligieron nuevamente los pines con base en lo siguiente: a) Los pines



a) Pantalla de inicio

b) Pantalla una vez que se ha seleccionado la muestra

Figura 3.17: Interfaz Gráfica de Usuario

para PWM deben tener como fuente un timer y canal diferente. b) Las interrupciones externas se encuentran interconectadas entre puertos, por lo que se requiere utilizar una interrupción externa por cada pin de los puertos.

Como se puede observar en la Figura 3.18, se utilizan los siguientes pines, los cuales se seleccionan con ayuda de la documentación de la tarjeta, disponibles en [41]:

- Motores de CD
 - PC4: Dirección de motor de CD del 1er GDL - Salida Digital
 - PA10: PWM del motor de CD del 1er GDL - Salida de PWM (imer 1-Canal 3)
 - PB4: Dirección de motor de CD del 2o GDL - Salida Digital
 - PB5: PWM del motor de CD del 2o GDL - Salida de PWM (imer 3-Canal 2)
 - PB13: Dirección de motor de CD del 3er GDL - Salida Digital
 - PB3: PWM del motor de CD del 3er GDL - Salida de PWM (imer 2-Canal 2)
- Encoders
 - PC3: Encoder del motor del 1er GDL (Canal A) - Fuente de interrupción externa
 - PC2: Encoder del motor del 1er GDL (Canal B) - Fuente de interrupción externa
 - PC0: Encoder del motor del 2o GDL (Canal A) - Fuente de interrupción externa
 - PC1: Encoder del motor del 2o GDL (Canal B) - Fuente de interrupción externa
 - PA8: Encoder del motor del 3er GDL (Canal A) - Fuente de interrupción externa
 - PB10: Encoder del motor del 3er GDL (Canal B) - Fuente de interrupción externa
- Servomotores
 - PB9(Alternativo): Servomotor del 4o GDL - Salida de PWM (Timer 4-Canal4)
 - PB8: Servomotor del 5o GDL - Salida de PWM (Timer 4-Canal3)
 - PC9: Servomotor del 6o GDL - Salida de PWM (Timer 3-Canal4)
 - PC8: Servomotor del efecto final - Salida de PWM (Timer 3-Canal3)
 - PC6: Servomotor del mecanismo de desecho del laboratorio - Salida de PWM (Timer 3-Canal1)
- Celda de carga
 - PC10: SCK - Salida Digital
 - PC12: DATA - Entrada digital

- Sensores de temperatura
 - PD2: DHT11A - Entrada Digital
 - PC11: DHT11B - Entrada Digital
 - Interno: Sensor de temperatura interno

Esto conlleva una modificación en el diagrama esquemático y el PCB del circuito diseñado, los cuales se muestran actualizados en las Figuras 3.19a y 3.19b respectivamente, mientras que la placa construida puede observarse en la Figura ??.

3.6. Integración

Debido a que el ángulo cero del robot (mostrado en la Figura 3.12) no coincide con los ángulos cero de los servos en los GDL 4, 5 y 6, es necesario realizar un ajuste por medio del código, el cual es diferente para cada servo, como se muestra en las siguientes fórmulas:

a) Servo 4GDL: $\theta_4 + 90$, b) Servo 5GDL: $\theta_5 + 100$ c) Servo 6GDL: $\theta_6 + 15$.

Por otro lado, para controlar cada junta se realizó una rutina dependiendo de la posición objetivo con ayuda de una posición auxiliar en el 3er GDL, la cual se utiliza para poder modificar la orientación del efecto sin golpear el Kinect ni la estructura, como se puede observar en la Figura 3.21. La rutina que el robot ejecuta es la siguiente:

- Paso 1. Home - Muestra seleccionada: GDL3(Posición auxiliar), GDL1(Posición objetivo), GDL4(Posición deseada), GDL5(Posición deseada), GDL3(Posición objetivo), GDL2(Posición objetivo), Cerrar efector.
 - Paso 2. Muestra seleccionada - Laboratorio: GDL3(Posición auxiliar), GDL1(Posición laboratorio), GDL6(Posición laboratorio), GDL5(Posición laboratorio), GDL4(Posición laboratorio), GDL2(Posición laboratorio), GDL3(Posición laboratorio), Abrir efector, Liberar muestra, Cerrar laboratorio.

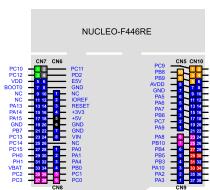
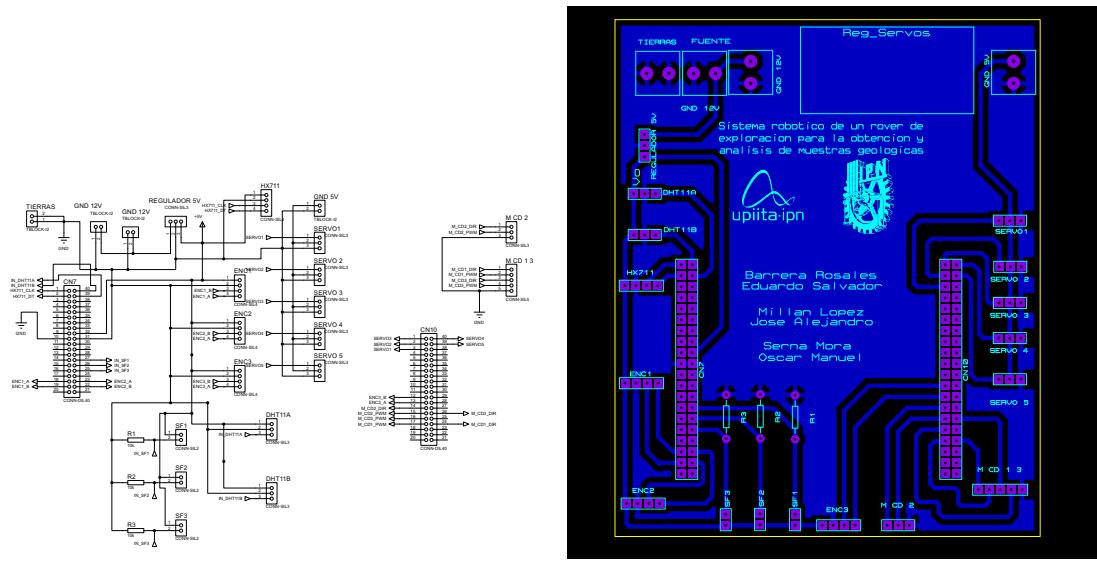


Figura 3.18: Pines utilizados en la núcleo STM32F446RE



a) Diagrama esquemático

b) Placa de circuito impreso

Figura 3.19: Diseño implementado del circuito del sistema

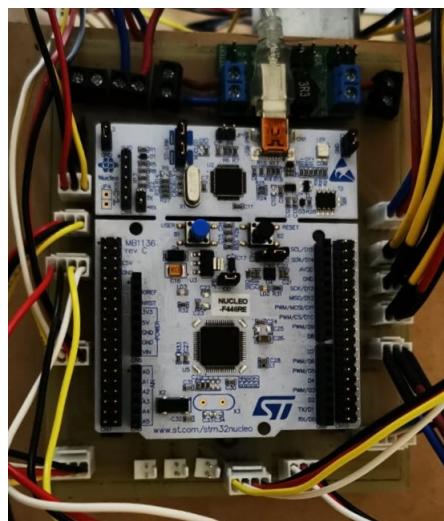


Figura 3.20: PCB construido

- Paso 3. Laboratorio - Home: GDL2(Posición Home), GDL6(Posición Home), GDL4(Posición Home), GDL5(Posición Home), GDL1(Posición Home), GDL3(Posición Home).
- Paso 4. Enviar datos a la computadora y una señal que reactive el botón para una nueva selección de muestra.

El sistema completo se puede apreciar en la Figura 3.22, el cual es muy similar al render mostrado en la Figura 2.66.



Figura 3.21: Posición auxiliar del manipulador

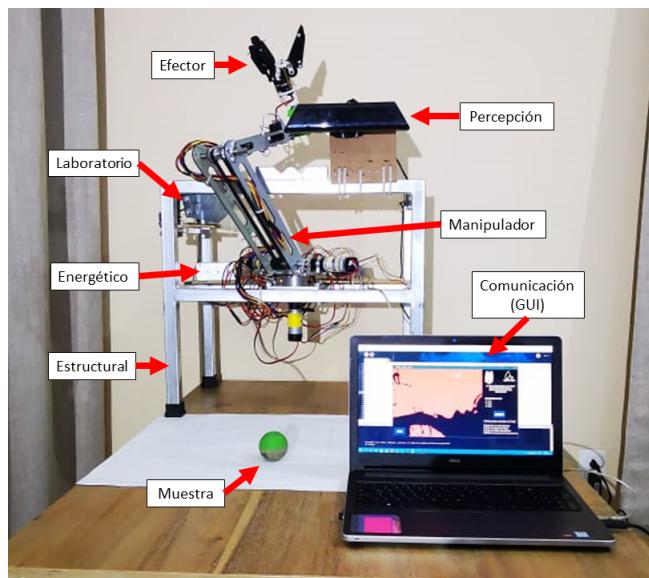


Figura 3.22: Sistema robótico completo

Análisis de resultados

Aquí se describen y evalúan los resultados obtenidos en TT2, comparándolos con los objetivos y requerimientos establecidos.

4.1. Análisis de ingeniería

El análisis de ingeniería se realiza comparando el rendimiento esperado por los módulos para cumplir los objetivos contra el rendimiento obtenido.

- *Implementar el módulo de efecto final que sea capaz de recoger muestras del suelo para su manipulación.*

El módulo fue construido según el diseño reportado y se verificó su agarre de un objeto de forma esférica de 6 cm de diámetro, como se muestra en la Figura ??.

Rendimiento: 100 %

- *Implementar un sistema robótico de 6 grados de libertad que posicione y oriente el efecto para transportar la muestra.*

Los 6 GDL del sistema robótico funcionan de acuerdo al diseño, e incluso es capaz de separar la muñeca del manipulador, lo que permite verificar la posición y orientación por separado.

Rendimiento: 100 %

- *Implementar un módulo de percepción que le permita al sistema reconocer el ambiente para crear un marco de referencia en el espacio, así como identificar la geometría de*

la muestra.

Por medio de visión artificial se obtiene la posición de la muestra en el espacio, lo que permite al sistema establecer un punto objetivo para el efecto. La geometría de la muestra no se toma en cuenta.

Rendimiento: 50 %

- *Implementar un sistema de procesamiento y comunicación que permita el análisis de las muestras para determinar las características del entorno, además de permitir la transmisión y recepción de datos.*

El alcance de el proyecto contempla que de todos los parámetros que se pueden utilizar para determinar las características de un entorno, el único dato que se puede obtener de las muestras es el peso.

La comunicación entre la tarjeta de procesamiento y la GUI desarrollada funciona sin pérdida de información.

Rendimiento: 80 %

- *Realizar pruebas y ajustes necesarios para garantizar que cada módulo trabaja correctamente de manera independiente.*

- S1.M1 - Manipulador: El manipulador robótico es capaz de mover los 6 GDL, con un rango de error de +0.5 grados en los GDL 1,2,4,5,6 y +1 grado en el GDL 3. Además de la capacidad de separar el brazo robótico de la muñeca esférica.

Rendimiento: 100 %

- S1.M2 - Efecto: El efecto es capaz de sujetar las muestras con las que se hicieron las pruebas.

Rendimiento: 100 %

- S2.M3 - Percepción: La visión artificial es capaz de ubicar la posición de las muestras objetivo con un error de 3 %. Además se mide la temperatura exitosamente.

Rendimiento: 100 %

- S2.M4 - Comunicación: No hay pérdida de información en la comunicación

Rendimiento: 100 %

- S2.M5 - Procesamiento: La tarjeta de desarrollo y la computadora son capaces de manejar la información necesaria para crear el marco de referencia, comunicarse y manipular el robot sin pérdidas de información o retrasos.

Rendimiento: 100 %

- S3 - Energético: La fuente es capaz de suministrar la corriente necesaria para activar el sistema, manteniendo una salida constante de 12 Volts. Por otro lado, el regulador que alimenta a los servos es capaz de mantenerlos en movimiento simultáneo.

Rendimiento: 100 %

- S4.M6 - Laboratorio: La celda de carga envía lecturas erróneas.

Rendimiento: 0 %

- S4.M7 - Mecanismo de desecho: El mecanismo de desecho libera exitosamente la muestra.

Rendimiento: 100 %

- S5 - Estructural1: La estructura soporta al sistema completo sin perder el equilibrio ni sufrir vibraciones.

Rendimiento: 100 %

Rendimiento: 88.8 %

- *Integrar secuencialmente los módulos para consolidar el sistema mecatrónico.*

La Figura ?? muestra que todos los módulos se encuentran integrados.

Rendimiento: 100 %

- *Verificar que todos los módulos del sistema mecatrónico trabajen armónicamente para posteriormente realizar pruebas de recolección de muestras en un ambiente análogo que nos permitan comprobar que el sistema cumple con la función principal.*

Todos los módulos trabajan armónicamente, a excepción de la celda de carga y, en el caso del sistema robótico, la posición en la que llega el efecto a la muestra afecta negativamente al agarre.

Rendimiento: 90 %

4.2. Análisis de costos

El presupuesto correspondiente a TT1, mostrado en la Tabla 2.17, no refleja los costos de envío y servicios adicionales, como el maquinado de piezas, ya que se contemplaba utilizar la infraestructura de la escuela, sin embargo, se hicieron cambios que evitaron la compra de la fuente y las cámaras.

Tomando en cuenta estos factores, el presupuesto original fue de \$23202.85 MXN, y el costo del proyecto finalizado es de aproximadamente \$22765 MXN.

Conclusiones

Conforme al análisis de ingeniería realizado se puede concluir que el funcionamiento del sistema es correcto a nivel modular, aunque presenta fallos en la integración. Esto se puede atribuir a diversas causas, por ejemplo, el uso continuo del manipulador provocó holgura mecánica entre sus componentes, lo cual es difícil de corregir sin la infraestructura adecuada. Aún así, el funcionamiento general del sistema se encuentra dentro de parámetros aceptables dadas las condiciones en las que se realizó.

Tomando en cuenta lo anterior y promediando los porcentajes calculados para los objetivos particulares, se determina que el objetivo general se satisface al 86.97 %.

4.3. Trabajo a futuro

El uso de encoders incrementales hace necesario la utilización de una posición inicial conocida. El colocar el robot en dicha posición conocida puede ser un problema que afecta la repetibilidad del sistema ya que no se hace siempre igual. Una manera de mejorar este aspecto es colocando sensores que detecten la posición de Home. También es posible utilizar encoders absolutos, que eliminan la necesidad de tener una posición conocida.

Mejorar el sistema de laboratorio, para obtener más información de la muestra recogida, como la composición química a través de análisis espectrográfico.

Implementar un control más robusto, que sea capaz de reaccionar rápidamente a cambios en la distribución del peso de la muestra tomada, ajustando el par que entrega el motor para evitar caídas repentinas.

Aislamiento de los componentes del robot de las condiciones del entorno, tales como cables,

bandas y motores, a fin de protegerlo ante la temperatura, agua o el polvo, guiándose por la certificación IP 6x para protección contra polvo y agua.

El efecto requería que la muestra estuviera centrada para tener un mejor agarre, por lo que un ligero desvío provocaba que los dedos cerraran de manera dispareja, y al momento de levantarla el dedo que no ejercía la presión necesaria, permitiendo que la muestra cayera, por lo que se requiere un análisis en la longitud de las falanges subactuadas, además de mejorar el rango de movimiento de las mismas, para permitir al efecto abrirse más.

Con la finalidad de restringir el movimiento de los elementos del manipulador y evitar colisiones con el sistema estructural y/o con los mismos elementos del manipulador, se pueden colocar sensores (fin de carrera, capacitivos o inductivos) en puntos estratégicos del sistema, para así mantener la integridad física de los componentes del sistema del manipulador.

La fijación del kinect al sistema estructural puede ser mejorada, tomando en consideración el rango de operación del mismo, es posible modificar el sistema estructural para evitar utilizar extensiones de madera y también mejorar el aspecto del proyecto.

El campo de visión podría ampliarse y abarcar todo el espacio de trabajo del robot si se aplica una rotación al kinect. Con esto se haría necesaria la obtención de una matriz de rotación que incluyese dichas rotaciones sobre los ejes principales para trasladar las coordenadas obtenidas respecto al marco referencial del kinect al marco referencial del robot.

En la interfaz de usuario, el operador solo es capaz de ver la imagen de profundidad, la cual puede ser difícil de interpretar si no se sabe lo que representa, o si el objeto es muy pequeño y cercano al plano del suelo. Es posible mostrar la imagen rgb que la cámara de video del kinect toma, sin embargo, no se corresponde pixel a pixel con la imagen de profundidad, tanto por la diferencia de resolución como por el hecho de que los separa una distancia, sin embargo es posible hacer una función que haga dicha correspondencia.

La holgura mecánica entre los componentes representó un problema en el funcionamiento del sistema, tanto en el manipulador como en el efecto. Esto provoca disminución en la precisión del robot y dificultad para sujetar el objeto. Se encontró que los opresores que sujetan las poleas

Caracterizar el motor con la ayuda de un osciloscopio para hacer un control basado en modelos (Model based control).

Durante las pruebas se hizo patente que es muy posible que el efecto golpee el objeto

durante la aproximación del mismo. Una generación de trayectoria en el espacio de trabajo que hiciera una aproximación vertical a la muestra objetivo permitiría solventar este problema.

Referencias

- [1] National Aeronautics and Space Administration, “Lunokhod 1 - moon: NASA science .” September 2017, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://moon.nasa.gov/resources/37/lunokhod-1/>
- [2] ——, “Mars exploration rovers,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/mars-exploration-rovers/>
- [3] Y. T. KUAT TELEGENOV and A. SHINTEMIROV, “A low-cost open-source 3-d-printed three-finger gripper platform for research and educational purposes,” *IEEE Access*, 2015.
- [4] Enerdrive, “Cable sizing selection chart.” [Online]. Available: <https://enerdrive.com.au/wp-content/uploads/2020/07/cable-table-web.jpg>
- [5] NASA, “Curiosity rover mission overview,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/msl/mission/overview/>
- [6] National Aeronautics and Space Administration, “MARS 2020 rover,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/mars2020/>
- [7] ——, “Rover — Power,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/power/>
- [8] Y. H. Furrer F., Wermelinger M. and G. F., “Autonomous robotic stone stacking with online next best object target pose planning .” 2017.

- [9] C. Robotics, “Ur3e,” 2019. [Online]. Available: https://store.clearpathrobotics.com/products/ur3e?_pos=2&_sid=da3af4811&_ss=r
- [10] Robotiq, “3-finger adaptive robot gripper - robotiq,” 2019. [Online]. Available: https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper?ref=nav_product_new_button
- [11] A. A., “Master thesis: Design of a smart gripper for industrial applications,” 2016.
- [12] O. A. Viscarra Rossel R., Cattle S. and F. Y., “In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis nir spectroscopy.” *Geoderma*, 2009.
- [13] U. D. of Defense, *Systems Engineering Fundamentals*, 2001.
- [14] Federal Information Processing Standards Publication, *Integration Definition for Function Modeling (idef0)*, 1993.
- [15] O. H. R. C. Seidner, *On the Formal Verification of EFFBD Models Using a Structural Translation to Time Petri Nets*, 2007.
- [16] J. J. H. Nathaniel A. Miller, “Correlating particle shape parameters to bulk properties and load stress at two water contents,” vol. 3, pp. 1514–1523.
- [17] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed., Elsevier, Ed., 2011.
- [18] E. M. V. Robert L. Mott and J. Wang, *Design Elements in Mechanical Design*, 6th ed., Pearson, Ed., 2018.
- [19] S. D. P. . S. Instrument, *Handbook of Timing Belts, Pulleys, Chains and Sprockets*.
- [20] “Timing belt pulleys for small power transmission applications.” [Online]. Available: <https://www.sdp-si.com/products/Timing-Belt-Pulleys/>
- [21] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, A. Press, Ed., 2001.
- [22] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 2206 Design methodology for mechatronic systems*, 1st ed., 2004.
- [23] E. Hull, K. Jackson and J. Dick, *Requirements engineering*, 3rd ed. Springer Science and Business Media, 2011.
- [24] D. M. Buede and W. D. Miller, *The engineering design of systems: models and methods*. John Wiley and Sons, 2016.

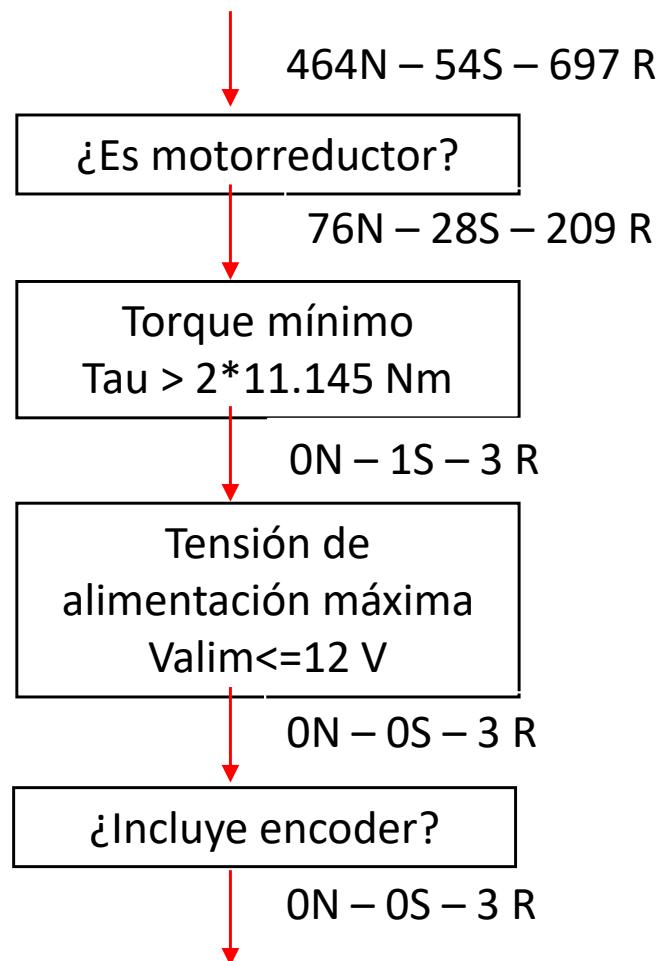
- [25] T. L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process,” *International journal of services sciences*, 2008.
- [26] “Solidworks,” 2018.
- [27] J. Akin, *Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks*. Rice University, Texas, 2009.
- [28] T. MX, “Guia para elegir materiales 3d.” [Online]. Available: <https://www.tridimx.com/materiales/>
- [29] SKF, “Rolling bearings.” [Online]. Available: <https://www.skf.com/us/products/rolling-bearings>
- [30] S. H. Mark W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 1st ed. Wiley, 2005.
- [31] arm Community, “10 steps to selecting a microcontroller.” [Online]. Available: <https://community.arm.com/developer/ip-products/system/b/embedded-blog/posts/10-steps-to-selecting-a-microcontroller>
- [32] J. Yiu, *ARM Cortex-M for Beginners*, 2017.
- [33] arm MBED, “mbed compiler handbook,” <https://os.mbed.com/handbook/mbed-Compiler>.
- [34] L. Yueqing Mingwei Electric Co., “350w switching power supply.” [Online]. Available: http://yqmiwi.com/a/Product/Single_output_series/S_series/2014/1115/44.html
- [35] ——, “500w switching power supply.” [Online]. Available: http://yqmiwi.com/a/Product/Single_output_series/S_series/2014/1127/107.html
- [36] AND, “How should we select a load cell?” [Online]. Available: https://aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/loadcells_qa_08.html
- [37] . Inc., “Part no. 20-2020.” [Online]. Available: <https://8020.net/20-2020.html>
- [38] D. Shiffman, “Openkinect for processing,” GitHub repository, 2018. [Online]. Available: <https://github.com/shiffman/OpenKinect-for-Processing>
- [39] M. Fisher, “Matt’s webcorner - kinect sensor programming,” 2014. [Online]. Available: <http://graphics.stanford.edu/~mdfisher/Kinect.html>

- [40] M. Ben Fry, Casey Reas, “Processing.org,” 2003. [Online]. Available: <https://processing.org/>
- [41] arm MBED, *Núcleo-F446RE*, 2021. [Online]. Available: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F446RE/>
- [42] “Matlab r2020a,” 2020.
- [43] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*, S. Science and B. Media, Eds., 2017. [Online]. Available: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>
- [44] SDP/SI, *Timing belts, pulleys, chains and sprockets*.
- [45] R. Electronics, “Linear vs switching regulators.” [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/products/power-management/linear-vs-switching-regulators.html>
- [46] M. OpenCourseWare, “15. introduction to lagrange with examples.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=zhk9xLjrmI4&feature=youtu.be&t=879>
- [47] A. d. l. E. H. Enrique A. Gutierrez, Gonzalo P. Martisanz, *Conceptos y metodos en Vision por Computador*. Grupo de vision del CEA, 2016.

Apéndices

Apéndice 1: Árboles de decisión

A. 1. Motores de CD

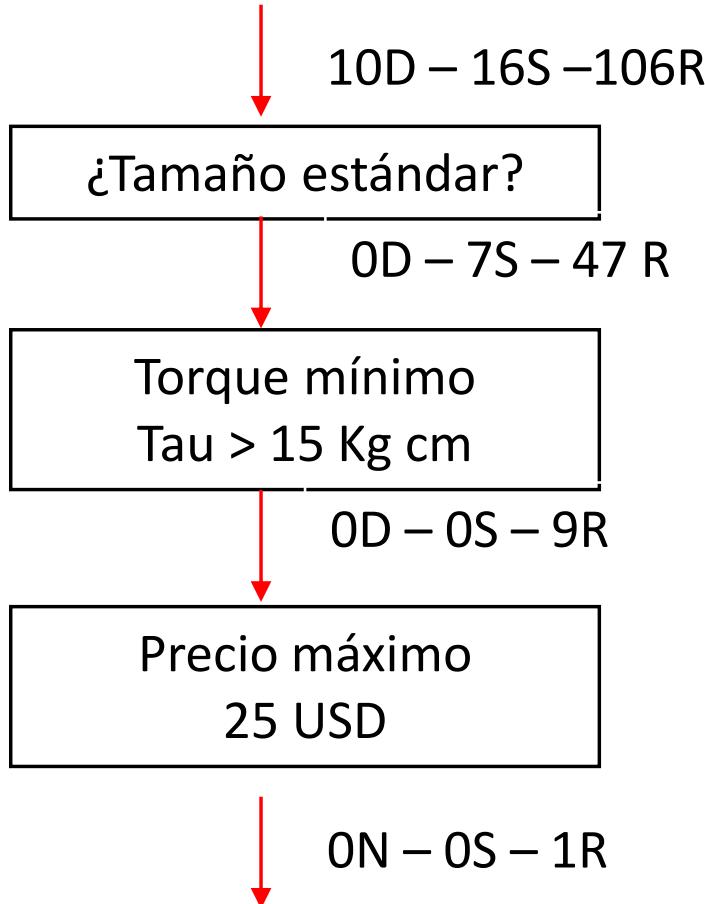


N – Newark

S – Sparkfun

R – Robotshop

A. 2. Servomotores

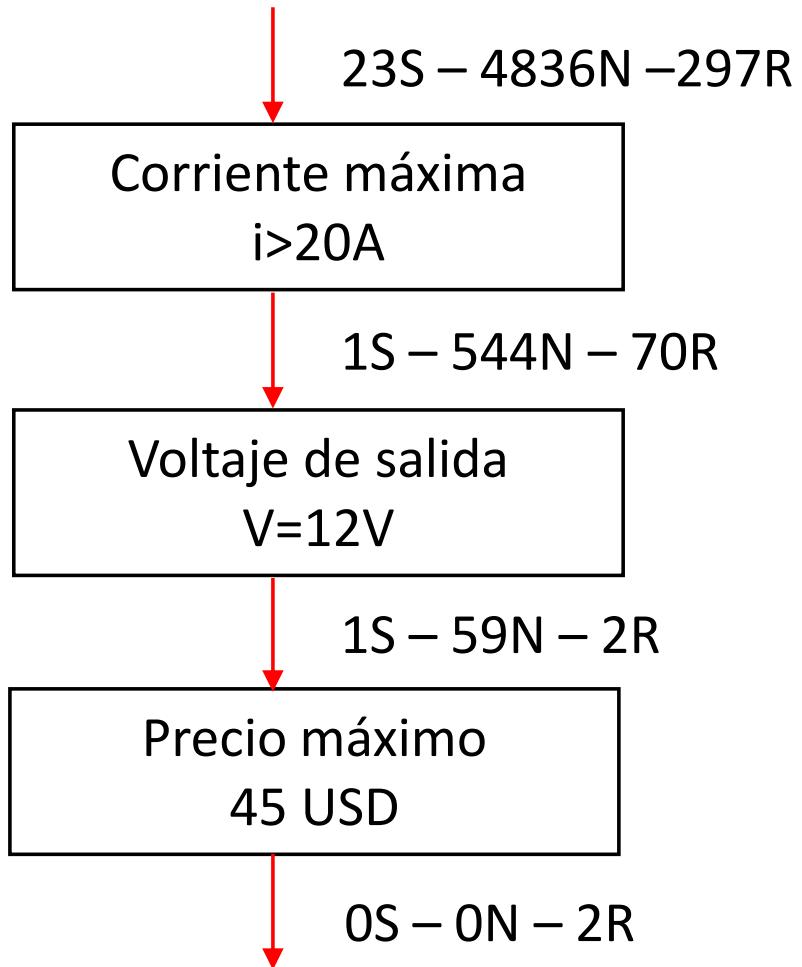


D – Dynamixel

S – Sparkfun

R – Robotshop

A. 3. Fuentes de alimentación

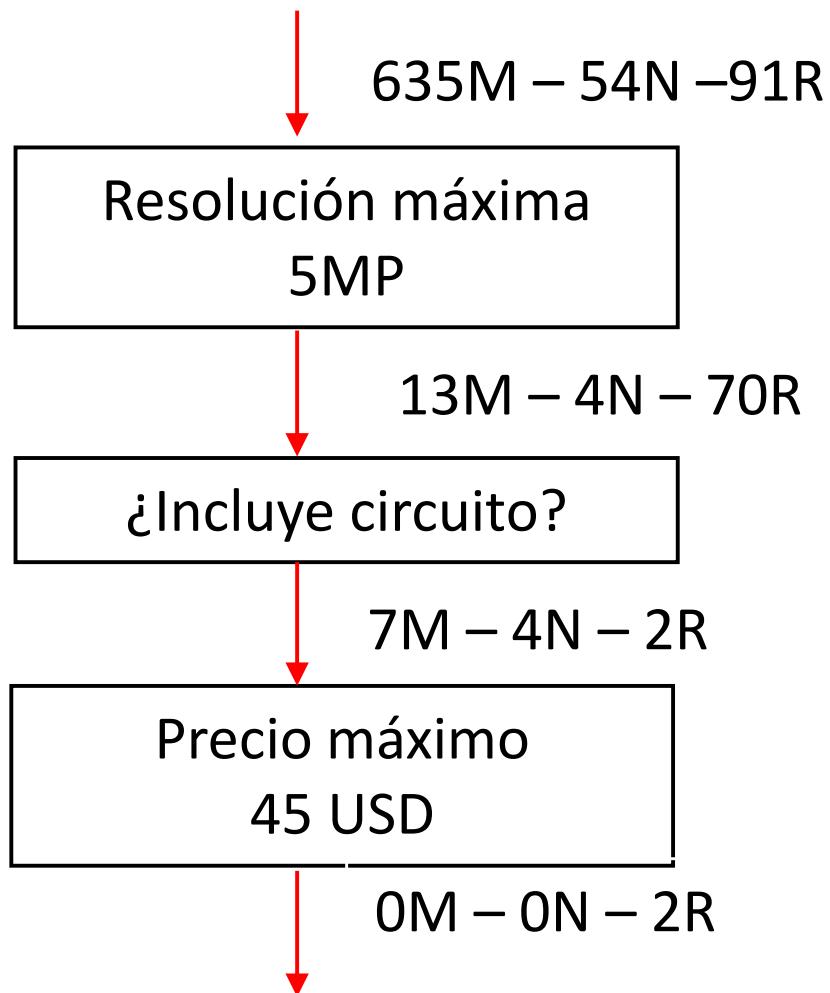


S – Sparkfun

N – Newark

R – Robotshop

A. 4. Cámaras



M – Mouser

N – Newark

R – Robotshop

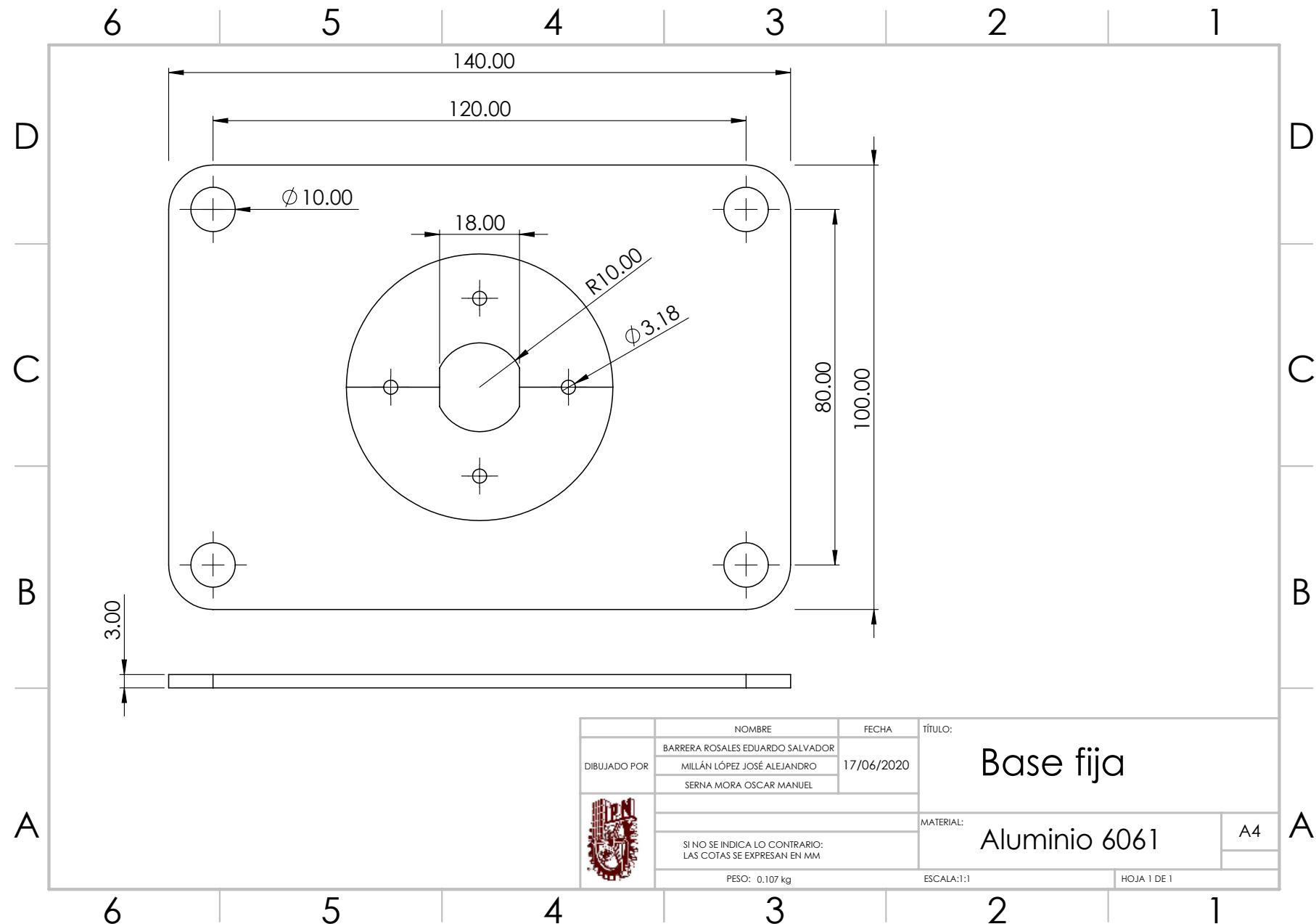
Apéndice 2: Simulación cinemática del robot

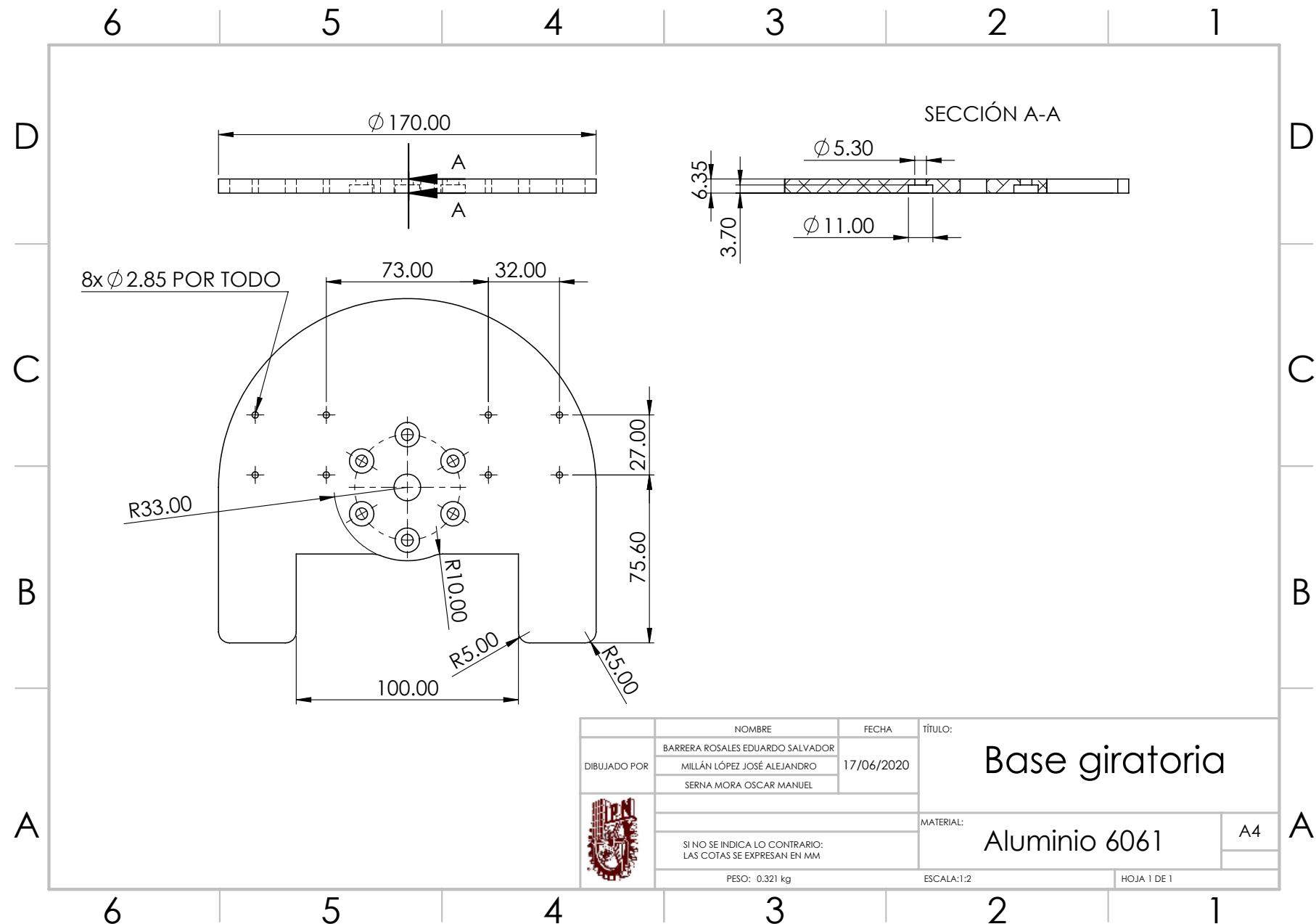
B. 1. Código de simulación de cinemática de robots utilizando el toolbox “Robotics” para MATLAB ®

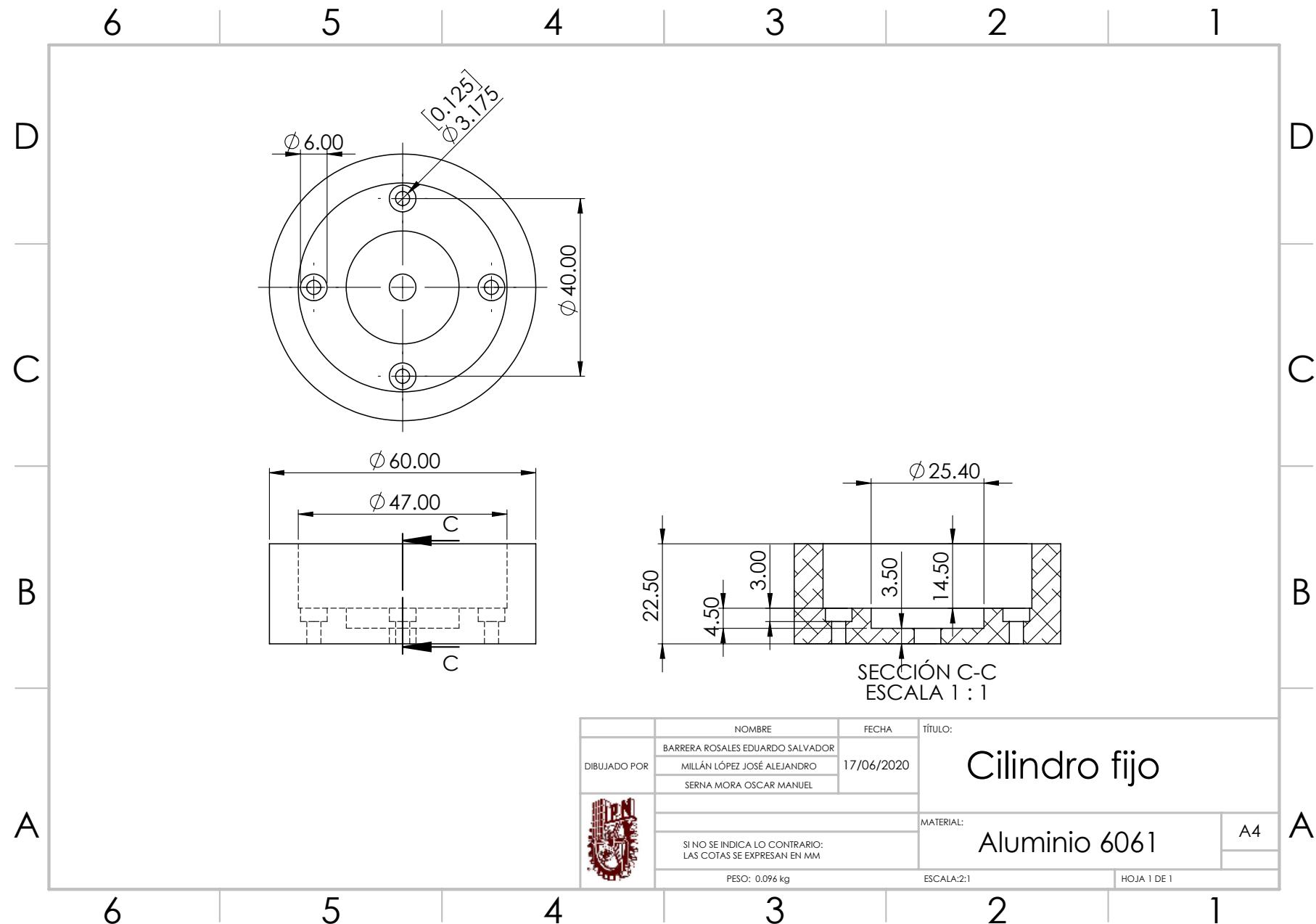
```
1 clc, clear all,close all
2 %% Configuración del robot
3
4 O1 = 5;
5 O2 = 5;
6 L1 = 32;
7 L2 = 24;
8 L3 = 10;
9
10 L(1)=Link('d',O1,'a',O2,'alpha',pi/2); %parámetros de la primer junta y
    eslabón
11 L(2)=Link('d',0,'a',L1,'alpha',0); %parámetros de la segunda junta y
    eslabón
12 L(3)=Link('d',0,'a',L2,'alpha',pi/2);
13 L(4)=Link('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2,'offset',-pi/2); %%%%%%%%%% Link
14 L(5)=Link('d',0,'a',0,'alpha',pi/2,'offset',pi); %%%%%%%%%% Link
15 L(6)=Link('d',0,'a',0,'alpha',pi/2,'offset',pi); %%%%%%%%%% Link
16 L(7)=Link('d',L3,'a',0,'alpha',0); %%%%%% Link
17
18
19 qli=[-pi pi;-pi pi;-pi pi;0 0 0;-pi pi;-pi pi;-pi pi]; %definición de los
    límites de las juntas
20 qz=[0 0 0 0]; %matriz con vectores articulares renglón
21 %%qfinal=[-pi/2 0 pi/2];
22 antropom=SerialLink(L,'name','antrop','qlim',qli); %construcción del
    objeto polar,
23 antropom.teach;
24 %={'workspace', [-6 6 -6 6 -6 6]}; %opción del método plot,
25
26 %% Trazado de la trayectoria
27 %path = [ -4 1 2; -2.82 1 4.82; 0 1 6; 2.82 1 4.82; 4 1 2]; % secuencia de
    puntos en R^3
28 %plot3(path(:,1), path(:,2), path(:,3), 'color', 'k', 'LineWidth', 2)
29 %grid on
30 %hold on
31
32 %% Seguimiento de trayectoria con el robot
33 %d=interp_mia(path,50); %trayectoria en R^3 y tamaño de paso
34 %q=antrop(d); %mapeo de la trayectoria de d \in R^3 a q \in R^n
```

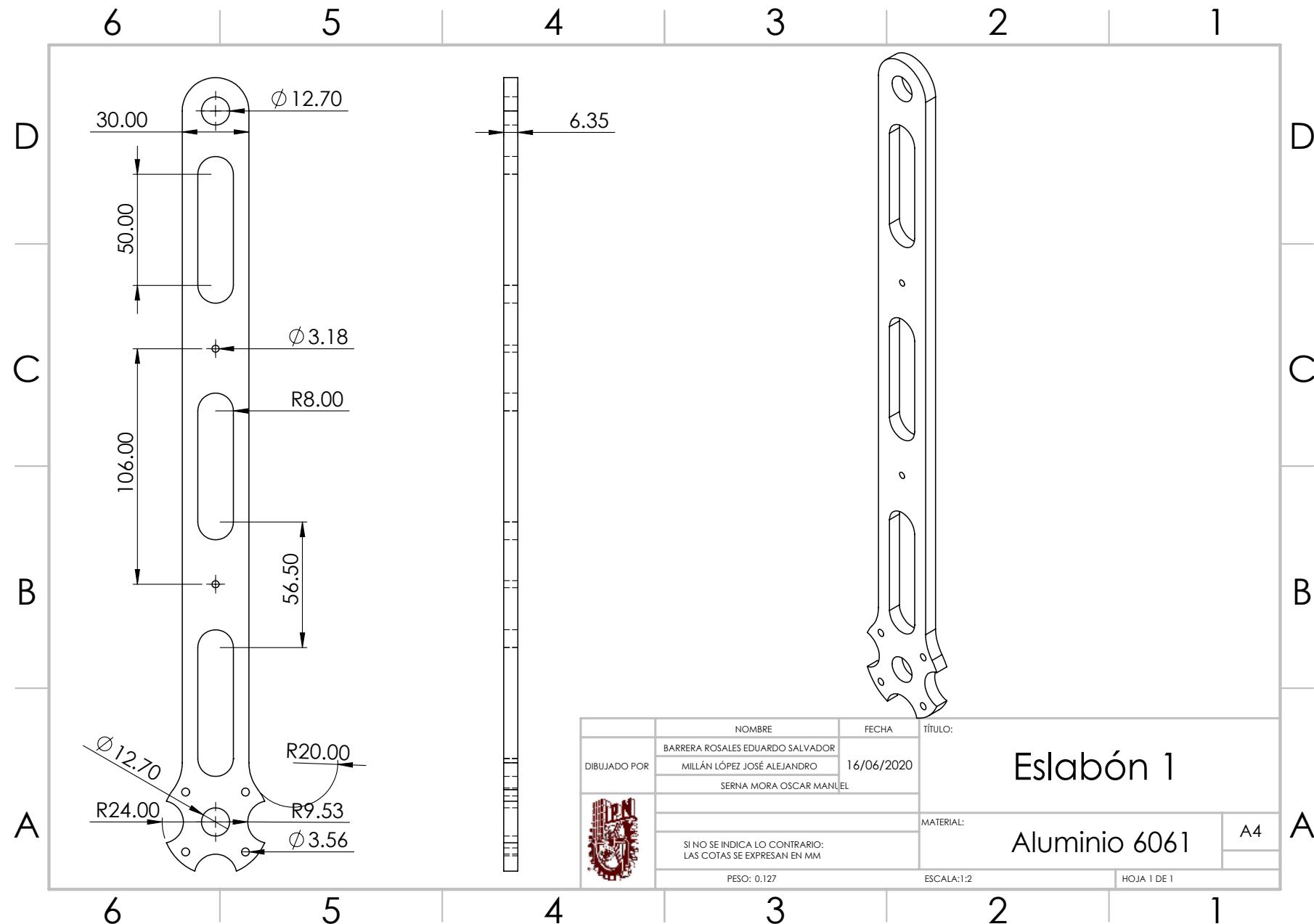
```
35 %qal=iantrop(path)
36 %q=interp_mia(qal,50)
37 %antropom.plot(q) % grafica del seguimiento
38
39 hold off
```

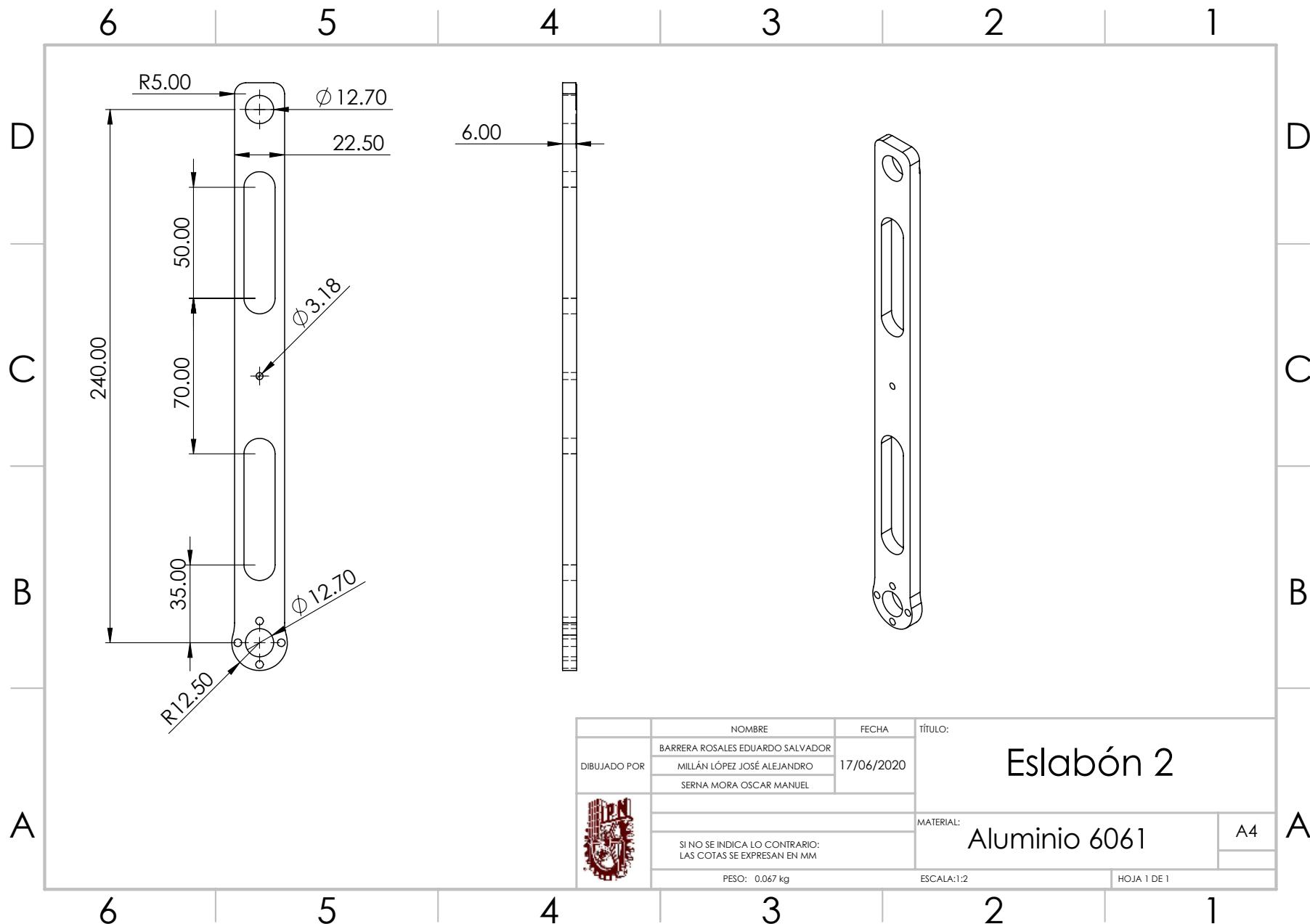
Apéndice 3: Planos normalizados



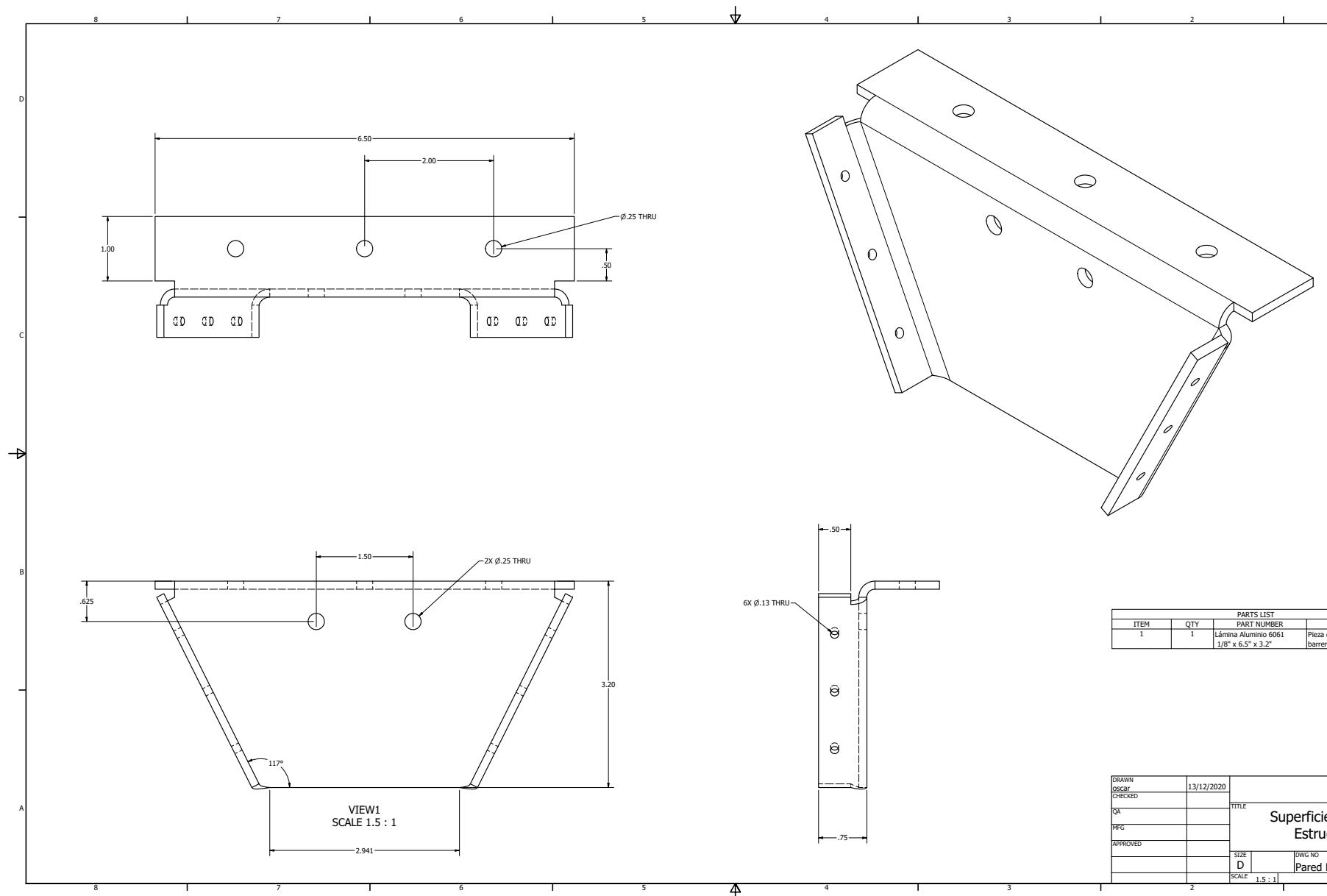


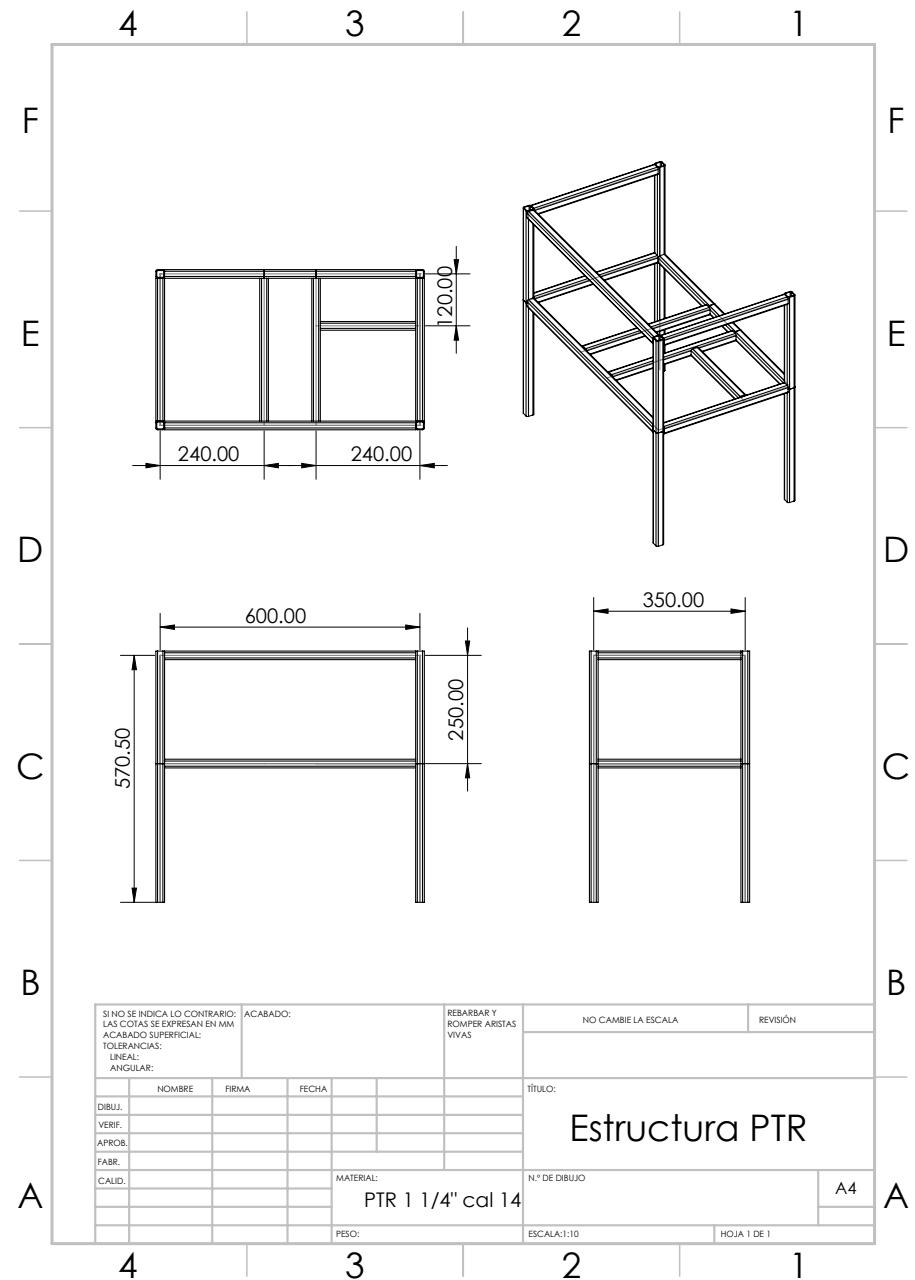












Apéndice 4: Herramienta de selección multicriterio

D. 1. Criterios de selección

- Módulo de manipulador robótico

Cr1 **Potencia requerida:** Potencia necesaria para que el manipulador efectúe movimiento.

Cr2 **Complejidad de la transmisión de movimiento angular:** Cantidad de piezas y complejidad de las mismas, que transmiten la potencia desde el actuador hasta el elemento que debe mover.

Cr3 **Facilidad de acoplamiento al rover:** Cantidad de piezas necesarias y su complejidad, para asegurar el manipulador a la estructura del *rover*.

Cr4 **Riesgo de daño a la estructura del rover:** La generación de esfuerzos excesivos en los puntos de acoplamiento puede provocar que la estructura se deforme y falle.

Cr5 **Espacio de trabajo:** Puntos en el espacio que son alcanzables por el efecto final del brazo.

Cr6 **Modificación de equilibrio al rover por el manipulador:** Reducción de la posibilidad de volcadura del *rover* debida a un brazo de palanca excesivo producido por el manipulador.

Cr7 **Facilidad de acoplamiento entre el eslabón y el actuador:** Cantidad de piezas y complejidad de las mismas, para transmitir la potencia desde el actuador hasta el elemento que debe mover.

- Módulo del efecto final

Cr8 Generación de reacción a los actuadores del manipulador: Potencia requerida por los actuadores del manipulador a causa del peso propio del efecto.

Cr9 Transmisión de fuerza al punto de contacto con la muestra: La fuerza generada por el actuador debe aplicarse al punto de contacto con la piedra para permitir la sujeción.

Cr10 Eficiencia en la sujeción: La sujeción debe ser tal que se obtenga máximo agarre con la menor fuerza posible.

Cr11 Facilidad de colocación de los sensores de fuerza: Los sensores de fuerza deben colocarse en espacios que no afecten a la eficiencia de sujeción.

Cr12 Complejidad de la transmisión de fuerza: Cantidad de componentes y complejidad de los mismos en la transmisión de fuerza desde el actuador al punto de contacto.

Cr13 Riesgo de daños a la muestra o efecto: Confiabilidad de que la muestra no se dañe o se dañe el efecto al intentar tomarla.

■ Módulo de información

Cr14 Colocación de las cámaras: Por su posición procurar que no haya elementos que obstruyan el campo de visión.

Cr15 Pérdida de información: La pérdida por desconexión o por longitud excesiva de cableado.

Cr16 Precisión de medición de temperatura: Proximidad del valor real de temperatura al valor medido.

Cr17 Influencia de los cambios térmicos del ambiente a los componentes: Capacidad del sistema para evitar que la temperatura afecte al comportamiento de los componentes.

Cr18 Confiabilidad de sujeción: Sujeción adecuada de los componentes en la estructura.

■ Módulo de laboratorio

Cr19 Efectividad del mecanismo de desecho: Asegurar que la muestra no permanezca en el rover.

Cr20 Complejidad del mecanismo de desecho: Cantidad de piezas y complejidad de las mismas, para efectuar la tarea de deshacerse de la muestra una vez analizada.

Cr21 Aprovechamiento del espacio ocupado por el mecanismo de desecho

Cr22 **Aseguramiento de la muestra:** Garantizar que la muestra permanezca en el lugar donde puede obtenerse información de ella.

Cr23 **Aprovechamiento del espacio ocupado por el sistema de medición de peso**

- Sistema de administración energética

Cr24 **Distribución del peso:** Modificación del centro de masa del sistema debido a la posición de los componentes.

Cr25 **Aprovechamiento del espacio ocupado:** Aprovechamiento del espacio debido al tamaño.

Cr26 **Pérdidas energéticas:** Pérdidas ocasionadas por la longitud de los cables.

Cr27 **Riesgo de daños a las baterías:** Posibilidad de que las baterías se dañen por efectos del ambiente.

D. 2. Selección de concepto mediante AHP

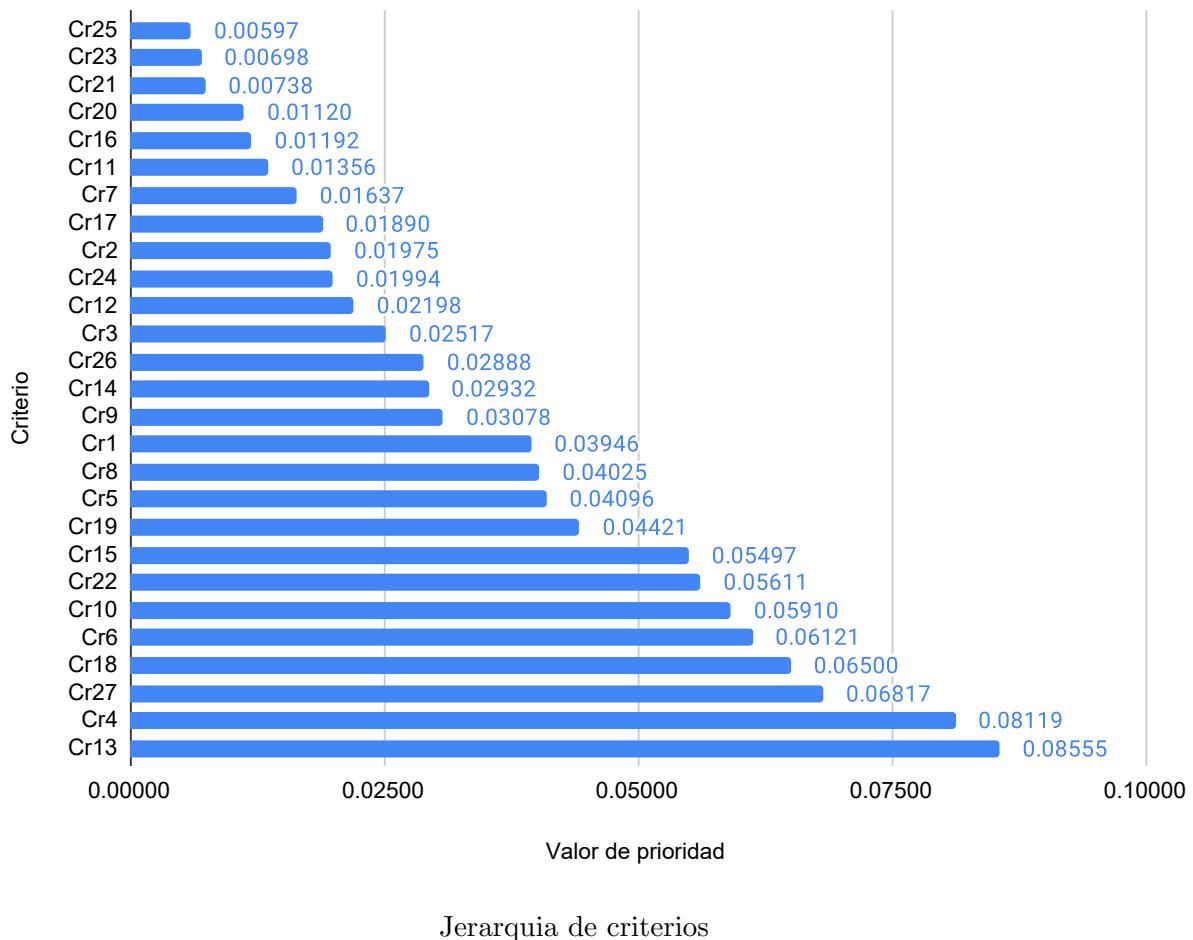
Vector de prioridad de criterios

Vector de prioridad de criterios

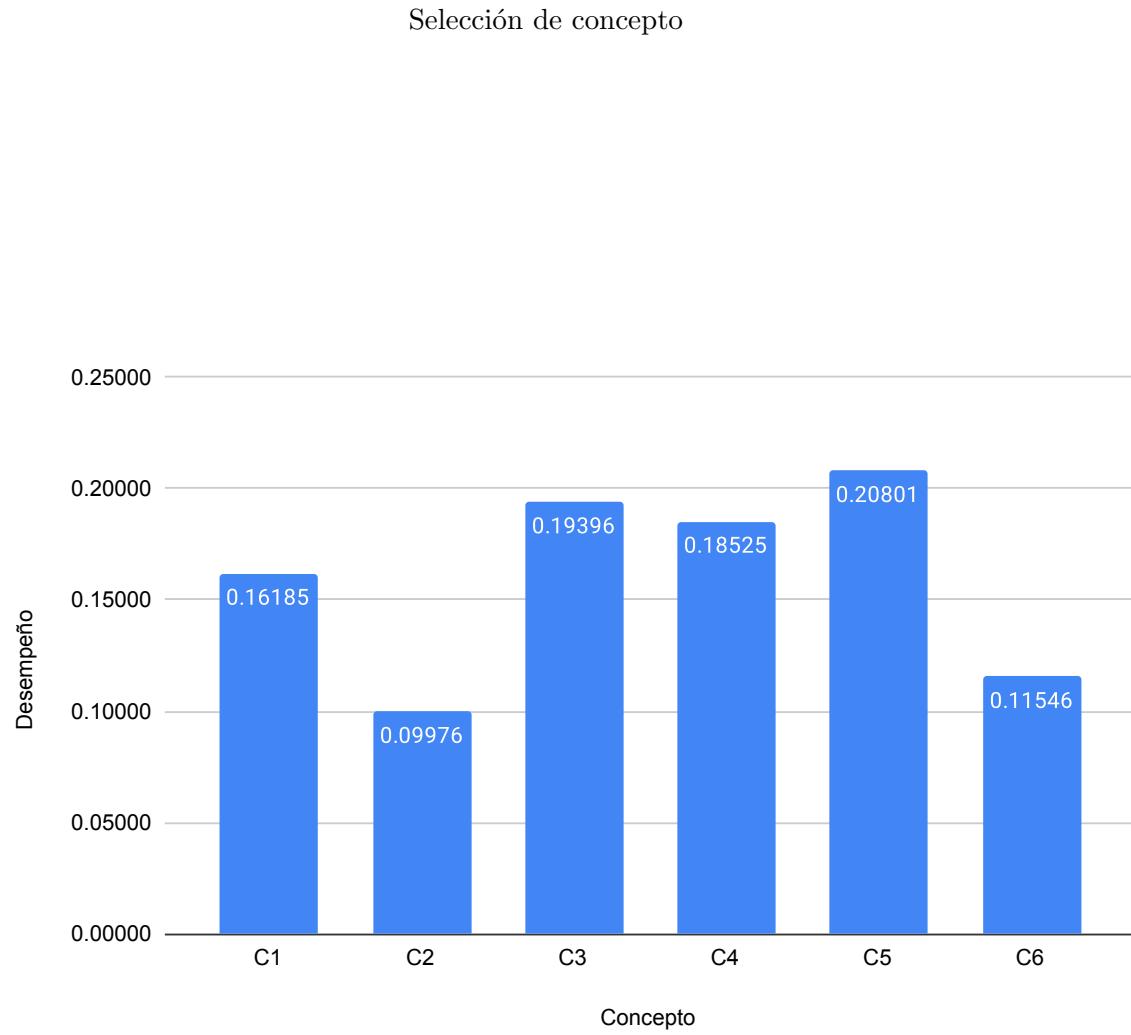
Vector de prioridad de criterios

Criterio	Valor de prioridad
Cr1	0.03946
Cr2	0.01975
Cr3	0.02517
Cr4	0.08119
Cr5	0.04096
Cr6	0.06121
Cr7	0.01637
Cr8	0.04025
Cr9	0.03078
Cr10	0.05910
Cr11	0.01356
Cr12	0.02198
Cr13	0.08555
Cr14	0.02932

Criterio	Valor de prioridad
Cr15	0.05497
Cr16	0.01192
Cr17	0.01890
Cr18	0.06500
Cr19	0.04421
Cr20	0.01120
Cr21	0.00738
Cr22	0.05611
Cr23	0.00698
Cr24	0.01994
Cr25	0.00597
Cr26	0.02888
Cr27	0.06817



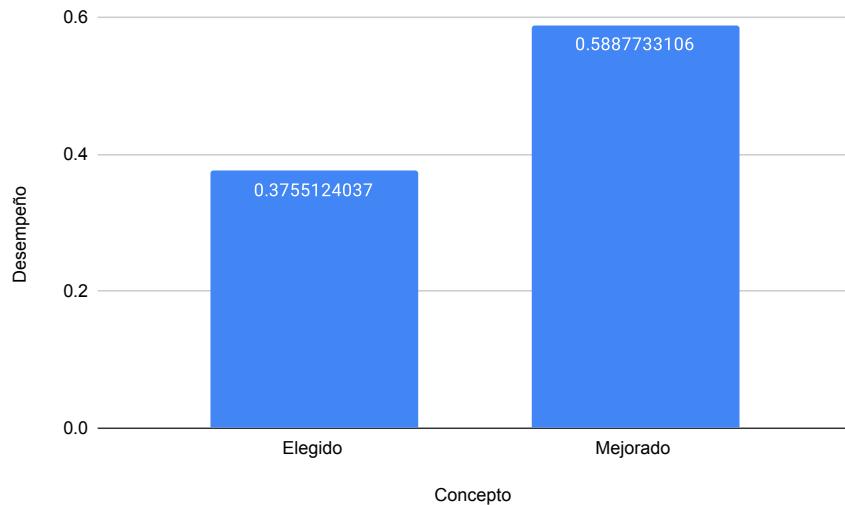
Selección de concepto



Desempeño general de los conceptos solución

Desempeño general: Ce vs Cm

Evaluación final del concepto elegido contra el concepto mejorado



Apéndice 5: Códigos implementados

E. 1. Código para la Interfaz Gráfica de Usuario

```
1 import controlP5.*;
2 import org.openkinect.freenect.*;
3 import org.openkinect.processing.*;
4 import processing.serial.*; // Importing the serial library to
   communicate with the Arduino
5
6 Serial myPort; // Initializing a variable named 'myPort' for serial
   communication
7
8 ControlP5 cp5;
9 PFont font,font2;
10 PImage ipn,upiita;
11
12 // Kinect Library object
13 Kinect kinect;
14
15 String received_data ; // Variable for changing the background color
16 String[] datos_rec;
17
18 boolean recived;
19
20 // We'll use a lookup table so that we don't have to repeat the math over
   and over
21 float[] depthLookUp = new float[2048];
22
23 int CurX;
24 int CurY;
25
26 float Xc,Yc,Zc;
27 float Xr,Yr,Zr;
28 float[] qs = new float[7];
29 int[] q = new int[7];
30
31 float Xo,Yo,Zo;
32
33 PVector v;
34
35 int myColor = color(0);
36
37 int c1,c2;
38
39 float n,n1;
```

```

40
41 float O1=2.5;
42 float O2=4.5;
43 float l1=32;
44 float l2=31.5;
45 float l3=30;
46
47 float temp1=0,temp2=0,temp3=0,peso=0;
48
49 void setup() {
50   size(880,480);
51
52   myPort = new Serial (this, "COM5", 250000); // Set the com port and
      the baud rate according to the Arduino IDE
53   myPort.bufferUntil ( '\n' );    // Receiving the data
54   noStroke();
55   cp5 = new ControlP5(this);
56   font = createFont("Impact",18);
57   font2 = loadFont("Square721BT-Roman-48.vlw");
58
59   // create a new button with name 'buttonA'
60   cp5.addButton("Activar")
61   .setBroadcast(false)
62   .setValue(0)
63   .setPosition(710,290)
64   .setSize(80,50)
65   .setFont(font)
66   .setBroadcast(true)
67 ;
68
69   // create a new button with name 'buttonA'
70   cp5.addButton("Salir")
71   .setBroadcast(false)
72   .setValue(0)
73   .setPosition(10,420)
74   .setSize(80,50)
75   .setFont(font)
76   .setBroadcast(true)
77 ;
78
79   ipn = loadImage("ipn_inv.png");
80   upiita = loadImage("upiita_inv.png");
81   kinect = new Kinect(this);
82
83   kinect.initDepth();
84   kinect.enableColorDepth(true);
85
86   // Lookup table for all possible depth values (0 - 2047)
87   for (int i = 0; i < depthLookUp.length; i++) {
88     depthLookUp[i] = rawDepthToMeters(i);
89   }
90
91
92 }
93
94 void draw() {
95   background(myColor);
96   // background(0);
97   image(kinect.getDepthImage(), 0, 0);
98
99   image(ipn,650,10,60,90);
100  image(upiita,780,10,80,90);
101  textAlign(CENTER);
102  textSize(12);
103  text("SISTEMA ROBOTICO DE UN ROVER \n DE EXPLORACION PARA LA \n OBTENCION
      DE MUESTRAS \n GEOLOGICAS", 760, 120);
104
105  // Get the raw depth as array of integers
106  int[] depth = kinect.getRawDepth();

```

```

107
108 CurX = mouseX;
109 CurY = mouseY;
110
111 int offset = CurX + CurY*kinect.width;
112
113 // Convert kinect data to world xyz coordinate
114 int rawDepth = depth[offset];
115 v = depthToWorld(CurX, CurY, rawDepth);
116 textAlign(LEFT);
117 textFont(font2);
118 textSize(15);
119 text("COORDENADAS", 650, 210);
120 text(" X: " + Xr +"\n Y: "+Yr+"\n Z: "+Zr, 650, 230);
121 textSize(17);
122 text("Ultimo peso medido: "+peso+" [g]", 640, 370);
123 textSize(15);
124 text("Temperatura del sistema: \n"+temp1+" Segundo motor \n"+temp2+
" Fuente de energia \n"+temp3+" Tarjeta de procesamiento", 640, 400);
125
126 }
127
128 public void controlEvent(ControlEvent theEvent) {
129     if(theEvent.getController().getName() == "Activar"){
130         myPort.clear();
131
132         myPort.write(q[0]+", "+q[1]+", "+q[6]+", "+q[3]+", "+q[4]+", "+q[5]+"a");
133         println(q[0]+", "+q[1]+", "+q[6]+", "+q[3]+", "+q[4]+", "+q[5]+"a");
134         // myPort.write(75+", "+ -16+", "+ -7 + ", "+8+", "+25+", "+15+"\n");
135     }
136     else if(theEvent.getController().getName() == "Salir"){
137         myPort.clear();
138         myPort.stop();
139         exit();
140     }
141 }
142
143
144
145 void mouseClicked() {
146
147     if((CurX<640) && (CurY<480)){
148         XC=v.x+(v.x/15);
149         YC=v.y+(v.y/15);
150         Zc=v.z+(v.z*7/129);
151
152         Xr=-11.9+XC;
153         Yr=14-YC;
154         Zr=34-Zc;
155
156         qs = cinematicaInversa(Xr,Yr,Zr);
157         for (int i = 0; i < qs.length; i++) { // For each element,
158             q[i] = int(round((qs[i] * 180/PI))); // divide the value by 2
159         }
160         if (qs[3]<90) qs[3]=qs[3]+360;
161         println("Angulos: " + q[0] + ", " + q[1] + ", "+ q[6] +", " + q[3] + ", "
162             + q[4] + ", "+ q[5] );
163     }
164
165 // These functions come from: http://graphics.stanford.edu/~mdfisher/
166 // Kinect.html
167 float rawDepthToMeters(int depthValue) {
168     if (depthValue < 2047) {
169         return (float)(1.0 / ((double)(depthValue) * -0.0030711016 +
170         3.3309495161));
171     }
172     return 0.0f;
173 }
```

```

172 // Only needed to make sense of the ouput depth values from the kinect
173 PVector depthToWorld(int x, int y, int depthValue) {
175
176     final double fx_d = 1.0 / 5.9421434211923247e+02;
177     final double fy_d = 1.0 / 5.9104053696870778e+02;
178     final double cx_d = 3.3930780975300314e+02;
179     final double cy_d = 2.4273913761751615e+02;
180
181 // Drawing the result vector to give each point its three-dimensional
182 // space
183 PVector result = new PVector();
184 depth = depthLookUp[depthValue];//rawDepthToMeters(depthValue
185 );
186 result.x = (float)((x - cx_d) * depth * fx_d)*100;
187 result.y = (float)((y - cy_d) * depth * fy_d)*100;
188 result.z = (float)(depth)*100;
189 return result;
190 }
191
192 void serialEvent (Serial myPort) {
193 received_data = myPort.readStringUntil ('\\n') ; // leer puerto
194 serial
195 println(received_data);
196 datos_rec = split(received_data,',');
197 temp1=float(datos_rec[0]);
198 temp2=float(datos_rec[1]);
199 temp3=float(datos_rec[2]);
200 peso=float(datos_rec[3]);
201 received = true;
202 }
203
204 float[] cinematicaInversa(float X, float Y, float Z)
205 {
206     X=X-(0);
207     Y=Y-(0);
208     Z=Z-(-20);
209     float [][] R = {{-1,0,0},{0,1,0},{0,0,-1}};
210     float r = sqrt(sq(X)+sq(Y))-O2;
211     float s = Z-O1;
212     float c = sq(s) + sq(r);
213     float Dd=(c-sq(l1)-sq(l2))/(2*l1*l2);
214     float[] res = new float[7]; // q1,q2,q3,q4,q5,q6,gamma
215     res[0]=atan2(Y,X);
216     //println(res[0]);
217     res[2]=atan2(-sqrt(1-sq(Dd)),Dd);
218     res[1]=atan2(s,r)-atan2(l2*sin(res[2]),l1+l2*cos(res[2]));
219     res[4]=-atan2((sqrt(1-sq((R[0][2])*cos(res[0]))*cos(res[1]+res[2]))+(R
220 [1][2])*sin(res[0])*cos(res[1]+res[2])+(R[2][2])*sin(res[1]+res[2]))),
221     ((R[0][2])*cos(res[0])*cos(res[1]+res[2]) + (R[1][2])*sin(res[0])*cos
222     (res[1]+res[2]) + (R[2][2])*sin(res[1]+res[2]) );
223     res[3]=atan2((R[2][2])*cos(res[1]+res[2])-(R[0][2])*cos(res[0])*sin(
224     res[1]+res[2])-(R[1][2])*sin(res[0])*sin(res[1]+res[2]), (sqrt(sq(sin
225     (res[4]))-sq((R[2][2])*cos(res[1]+res[2])-(R[0][2])*cos(res[0])*sin(
226     res[1]+res[2])-(R[1][2])*sin(res[0])*sin(res[1]+res[2]))));
227
228     if(floor(abs(res[3]))==0){
229     res[3]=-PI/2;
230     }
231     res[5]=atan2((R[0][1])*cos(res[0])*cos(res[1]+res[2])+(R[1][1])*cos(
232     res[1]+res[2])*sin(res[0])+(R[2][1])*sin(res[1]+res[2]),abs(sqrt(sq(
233     sin(res[4])) - sq((R[0][1])*cos(res[0])*cos(res[1]+res[2])+(R[1][1])*cos
234     (res[1]+res[2])*sin(res[0])+(R[2][1])*sin(res[1]+res[2]))));
235     res[6]=res[2]+res[1]; // Gamma, o Angulo absoluto del segundo eslabon
236     respecto a la horizontal.
237     //println(X, " ",Y, " ",Z);
238     for (int i = 0; i < qs.length; i++) { // For each element,
239         q[i] = int(round((res[i] * 180/PI))); // divide the value by 2
240     }

```

```

228     println("Angulos: " + q[0] + ", " + q[1] + ", " + q[2] + ", " + q[3] + ", "
229         " + q[4] + ", " + q[5] + ", " + q[6] );
230 }

```

E. 2. Código implementado en la tarjeta Núcleo

```

1 #include "mbed.h"
2 // Biblioteca para lectura de DHT11 creada por Wim De Roeve, disponible en
3 // https://os.mbed.com/users/Wimpie/code/DHT/
4 #include "DHT.h"
5 // Biblioteca para lectura de HX711 de la celda de carga, creada por
6 // Stephen Laskowski, disponible en https://os.mbed.com/users/laskowsk/
7 // code/HX711/
8 #include "HX711.h"
9
10 // Comunicacion serial mediante protocolo UART
11 Serial pc(USBTX, USBRX);
12 char dato;
13 char *token;
14 const int kMaxBufferSize = 100;
15 char buffer[kMaxBufferSize];
16 int len = 0;
17
18 Ticker deltaT; // Ticker que genera interrupcion cada 1 ms
19
20 // PINES SERVOS
21
22 PwmOut Servol(PB_8); // TIMER 2 - CANAL 1
23 PwmOut Servo2(PC_9); // TIMER 3 - CANAL 4
24 PwmOut Servo3(PC_8); // TIMER 3 - CANAL 3
25 PwmOut ServoEffecto(PB_9_ALT0); // TIMER 4 - CANAL 4
26 PwmOut ServoLab(PC_6); // TIMER 3 - CANAL 1
27
28 // PINES MOTORES CD
29
30 // Motor 1
31 DigitalOut DIR_CD_1(PC_4);
32 PwmOut PWM_CD_1(PA_10); // TIMER 1 - CANAL 3
33 // ENCODER 1
34 InterruptIn ENC_1A(PC_3);
35 InterruptIn ENC_1B(PC_2);
36
37 // Motor 2
38 DigitalOut DIR_CD_2(PB_4);
39 PwmOut PWM_CD_2(PB_5); // TIMER 3 - CANAL 2
40 // ENCODER 2
41 InterruptIn ENC_2A(PC_0);
42 InterruptIn ENC_2B(PC_1);
43
44 // Motor 3
45 DigitalOut DIR_CD_3(PB_13);
46 PwmOut PWM_CD_3(PB_3); // TIMER 2 - CANAL 2
47 // ENCODER 3
48 InterruptIn ENC_3A(PA_8);
49 InterruptIn ENC_3B(PB_10);
50
51 // Sensores de temperatura
52
53 AnalogIn adc_temp(ADC_TEMP);
54 DHT DHT11_MOTORES(PD_2,SEN11301P); // Use the SEN11301P sensor
55 DHT DHT11_FUENTE(PC_11,SEN11301P); // Use the SEN11301P sensor
56
57 // Celda de carga
58 //HX711::HX711(PinName pinData, PinName pinSck, uint8_t gain)

```

```

56 HX711 celda(PC_12, PC_10, 128);
57
58 // Declaracion de variables
59
60 // Valores de temperatura
61
62 float TempInterna;
63 float TempMotores;
64 float TempFuente;
65
66 // Valor de masa de la muestra
67 float masa = 0;
68
69 // Activacion de rutina
70
71 bool orden = 0;
72
73 // Numero de pulsos por revolucoon como encoder de cuadratura
74 double PPRQ = 5264.0;
75
76 // Posiciones angulares de los motores
77
78 // Angulos iniciales
79
80 // Valores de Home
81 double theta1Home = 59.293313;
82 double theta2Home = 53.001526;
83 double theta3Home = 158.867781;
84 double theta4Home = 10;
85 double theta5Home = 10;
86 double theta6Home = 75;
87
88 double theta3Inter = 80.0; // Posicion auxiliar
89
90
91 // Valores de laboratorio
92
93 double theta1Lab = 82.135258;
94 double theta2Lab = 18.601824;
95 double theta3Lab = 120.706687;
96 double theta4Lab = 80;
97 double theta5Lab = 150;
98 double theta6Lab = 26;
99
100 // Ciclo util del PWM del motor
101 uint16_t pwm = 0;
102
103 // Angulos del Servo en posiciones Home
104
105 int pulse;
106
107 int LaboratorioCerrado = 50;
108 int LaboratorioAbierto = 0;
109
110 int EfectorAbierto = 95;
111 int EfectorCerrado = 85;
112 int EfectorDetenido = 90;
113
114 // Inicializacion de variables
115
116 // Valores crudos del encoder
117 volatile double encVal1 = -1.0*((theta1Home*PPRQ)/360.0);
118 volatile double encVal2 = -1.0*((theta2Home*PPRQ)/360.0);
119 volatile double encVal3 = 1.0*((theta3Home*PPRQ)/360.0);
120
121 double theta1 = theta1Home;
122 double theta2 = theta2Home;
123 double theta3 = theta3Home;
124 double theta4 = theta4Home;

```

```

125 double theta5 = theta5Home;
126 double theta6 = theta6Home;
127
128 // Posiciones objetivo para recoger la muestra, recibidos de la GUI por
   serial
129
130 double theta1D;
131 double theta2D;
132 double theta3D;
133 double theta4D;
134 double theta5D;
135 double theta6D;
136
137 double theta4aux;
138 double theta5aux;
139 double theta6aux;
140
141 // Variables usadas por el control PID
142
143 double theta2D_P = theta2Home;
144 double theta2aux;
145 double eP = 0.0; // Error que utiliza el control P
146 double PWM_P = 0.0;
147 double kp = 1000.0; // Ganancia Proporcional
148
149 // Variables auxiliares para errores anteriores
150
151 double prv_error = 0.0;
152
153 // Valores auxiliares de angulos
154
155 double DT; // Diferencia entre angulo inicial y deseado
156 double DTabs; // El perfil de velocidad funciona con valores positivos
157 double Te; // Error entre el angulo actual y el deseado
158 double TE; // DT - Te - Te decrece del error maximo a 0, en el control se
   requiere que crezca de 0 al error maximo
159
160 double EA = 0.5; // Error aceptable
161
162
163 // Vectores de interrupcion
164
165 // Encoders motor CD_1
166
167 void ENC_1A_RISE()
168 {
169     if(ENC_1B == 1) encVal1--; // CCW
170     else encVal1++; // CW
171 }
172
173 void ENC_1A_FALL()
174 {
175     if(ENC_1B == 1) encVal1++; // CW
176     else encVal1--; // CCW
177 }
178
179 void ENC_1B_RISE()
180 {
181     if(ENC_1A == 1) encVal1++; // CW
182     else encVal1--; // CCW
183 }
184
185 void ENC_1B_FALL()
186 {
187     if(ENC_1A == 1) encVal1--; // CCW
188     else encVal1++; // CW
189 }
190
191 // Encoders motor CD_2

```

```

192
193 void ENC_2A_RISE()
194 {
195     if(ENC_2B == 1) encVal2--;// CCW
196     else encVal2++;// CW
197 }
198
199 void ENC_2A_FALL()
200 {
201     if(ENC_2B == 1) encVal2++;// CW
202     else encVal2--;// CCW
203 }
204
205 void ENC_2B_RISE()
206 {
207     if(ENC_2A == 1) encVal2++;// CW
208     else encVal2--;// CCW
209 }
210
211 void ENC_2B_FALL()
212 {
213     if(ENC_2A == 1) encVal2--;// CCW
214     else encVal2++;// CW
215 }
216
217 // Encoders motor CD_3
218
219 void ENC_3A_RISE()
220 {
221     if(ENC_3B == 1) encVal3--;// CCW
222     else encVal3++;// CW
223 }
224
225 void ENC_3A_FALL()
226 {
227     if(ENC_3B == 1) encVal3++;// CW
228     else encVal3--;// CCW
229 }
230
231 void ENC_3B_RISE()
232 {
233     if(ENC_3A == 1) encVal3++;// CW
234     else encVal3--;// CCW
235 }
236
237 void ENC_3B_FALL()
238 {
239     if(ENC_3A == 1) encVal3--;// CCW
240     else encVal3++;// CW
241 }
242
243 void P()
244 {
245     theta2 = (-360.0)*(encVal2/PPRQ); // Conversion a posicion angular
246     eP = theta2D_P - theta2;
247     PWM_P = kp * eP;
248
249     if(PWM_P < 0)
250     {
251         PWM_P = -1.0 * PWM_P;
252         DIR_CD_2 = 1; // CW
253     }
254     else DIR_CD_2 = 0; // CCW
255
256     if (PWM_P > 3000) PWM_P = 3000; // 15% del ciclo o'til
257
258     PWM_CD_2.pulsewidth_us(PWM_P);
259 }
260

```

```

261 void callback()
262 {
263     // Recepcion de cadena caracter por caracter
264     dato = pc.getc();
265
266     buffer[len++] = dato;
267     buffer[len] = '\0';
268
269     // Separacion de string en posiciones angulares deseadas
270     if (dato == 'a') // Caracter de fin de cadena
271     {
272         pc.printf("%s\t",buffer);
273         len = 0;
274
275         token = strtok(buffer, ",;");
276         theta1D = atoi(token);
277
278         token = strtok(NULL, ",;");
279         theta2D = atoi(token);
280
281         token = strtok(NULL, ",;");
282         theta3D = atoi(token);
283
284         token = strtok(NULL, ",;");
285         theta4D = 90 + atoi(token);
286
287         token = strtok(NULL, ",;");
288         theta5D = 100 + atoi(token);
289
290         token = strtok(NULL, ",;");
291         theta6D = 15 + atoi(token);
292
293         orden = 1; // Hay una orden por atender
294     }
295 }
296
297 // Funciones auxiliares
298
299 // Posicion de servos
300 void ServoWrite(int Servo, int angle)
301 {
302     pulse = 600 + 10*angle;
303     if (Servo == 1) Servo1.pulsewidth_us(pulse);
304     else if (Servo == 2) Servo2.pulsewidth_us(pulse);
305     else if (Servo == 3) Servo3.pulsewidth_us(pulse);
306     else if (Servo == 4) ServoEfector.pulsewidth_us(pulse);
307     else if (Servo == 5) ServoLab.pulsewidth_us(pulse);
308 }
309
310 void ControlServo(int Servo, int angle)
311 {
312     if (Servo == 1)
313     {
314         theta4aux = theta4;
315         Te = angle - theta4aux;
316
317         while ((Te < -1.0*EA) || (Te > EA)) // Repetir hasta que el error se
318         encuentre en el rango aceptable
319         {
320             if (Te<0)
321             {
322                 theta4aux--;
323             }
324             else
325             {
326                 theta4aux++;
327             }
328         }
329         Te = floor(angle - theta4aux);
330         ServoWrite(Servo,theta4aux);
331     }
332 }
```

```

329         wait(0.05);
330     }
331     theta4 = theta4aux;
332 }
333 else if (Servo == 2)
334 {
335     theta5aux = theta5;
336     Te = angle - theta5aux;
337
338     while ((Te < -1.0*EA) || (Te > EA)) // Repetir hasta que el error se
339     encuentre en el rango aceptable
340     {
341         if(Te<0)
342         {
343             theta5aux--;
344         }
345         else
346         {
347             theta5aux++;
348         }
349         Te = floor(angle - theta5aux);
350         ServoWrite(Servo,theta5aux);
351         wait(0.05);
352     }
353     theta5 = theta5aux;
354 }
355 else if (Servo == 3)
356 {
357     theta6aux = theta6;
358     Te = angle - theta6aux;
359
360     while ((Te < -1.0*EA) || (Te > EA)) // Repetir hasta que el error se
361     encuentre en el rango aceptable
362     {
363         if(Te<0)
364         {
365             theta6aux--;
366         }
367         else
368         {
369             theta6aux++;
370         }
371         Te = floor(angle - theta6aux);
372         ServoWrite(Servo,theta6aux);
373         wait(0.05);
374     }
375     theta6 = theta6aux;
376 }
377 ServoWrite(Servo,angle);
378 }
379 void AbrirEfector()
380 {
381     ServoWrite(4,EfectorAbierto);
382     wait(5);
383     ServoWrite(4,EfectorDetenido);
384 }
385 void CerrarEfector()
386 {
387     ServoWrite(4,EfectorCerrado);
388     wait(7);
389     ServoWrite(4,EfectorDetenido);
390 }
391
392 // Rutina de control
393
394 void Control(int Motor, double ThD, int pwmMAX, int pwmMIN)
395 {

```

```

396     if(Motor == 1)
397     {
398         theta1 = (-360.0)*(encVal1/PPRQ); // Conversion a posicion
399         angular
400         Te = ThD - theta1;
401         DT = Te;
402
403         if(DT < 0) DTabs = -1.0 * DT; // El programa funciona con valores
404         positivos
405         else DTabs = DT;
406
407         while ((Te < -1.0*EA) || (Te > EA))// Repetir hasta que el error se
408         encuentre en el rango aceptable
409         {
410             // Determinacion de sentido de giro
411             if (Te < 0) // Error negativo - Girar en sentido antihorario
412             {
413                 DIR_CD_1 = 0;
414             }
415             else
416             {
417                 DIR_CD_1 = 1;
418             }
419
420             TE = DT - Te;
421
422             if(TE < 0) TE = -1.0 * TE; // El programa funciona con
423             valores positivos
424
425             if( (0 <= TE) && (TE < (DTabs/3)) )
426             {
427                 if(pwm < pwmMAX) pwm++;
428             }
429             else if( ((DTabs/3) <= TE) && (TE < (2*DTabs/3)) )
430             {
431                 pwm = pwmMAX;
432             }
433             else if( ((2*DTabs/3) <= TE) && (TE <= DTabs) )
434             {
435                 if(pwm > pwmMIN) pwm--;
436             }
437
438             PWM_CD_1.pulsewidth_us(pwm);
439
440             theta1 = (-360.0)*(encVal1/PPRQ);
441
442             Te = ThD - theta1;
443         }
444         PWM_CD_1.pulsewidth_us(0);
445     }
446     else if(Motor == 2)
447     {
448         theta2aux = theta2;
449         Te = ThD - theta2aux;
450
451         while ((Te < -1.0*EA) || (Te > EA))// Repetir hasta que el error se
452         encuentre en el rango aceptable
453         {
454             if(Te<0)
455             {
456                 theta2aux--;
457             }
458             else
459             {
460                 theta2aux++;
461             }
462
463             theta2D_P = theta2aux;
464             Te = floor(ThD - theta2D_P);

```

```

        wait(0.15);
    }
}
else if(Motor == 3)
{
    theta3 = (360.0)*(encVal3/PPRQ); // Conversion a posicion
angular
    Te = ThD - theta3;
    DT = Te;

    if(DT < 0) DTabs = -1.0 * DT; // El programa funciona con valores
positivos
    else DTabs = DT;

    while ((Te < -2.0*EA) || (Te > 4.0*EA)) // Repetir hasta que el
error se encuentre en el rango aceptable
    {
        // Determinacion de sentido de giro
        if (Te < 0) // Error negativo - Girar en sentido antihorario
        {
            DIR_CD_3 = 0;
        }
        else
        {
            DIR_CD_3 = 1;
        }

        TE = DT - Te;

        if(TE < 0) TE = -1.0 * TE; // El programa funciona con
valores positivos

        if( (0 <= TE) && (TE < (DTabs/3)) )
        {
            if(pwm < pwmMAX) pwm+=2;
        }
        else if( ((DTabs/3) <= TE) && (TE < (2*DTabs/3)) )
        {
            pwm = pwmMAX;
        }
        else if( ((2*DTabs/3) <= TE) && (TE <= DTabs) )
        {
            if(pwm > pwmMIN) pwm-=2;
        }

        PWM_CD_3.pulsewidth_us(pwm);
        pc.printf("T3: %lf \t DT: %lf \t Te: %lf \t TE: %lf \t pwm:
%ld \t \r", theta3, DT, Te, TE, pwm);
        theta3 = (360.0)*(encVal3/PPRQ);

        Te = ThD - theta3;
    }
    PWM_CD_3.pulsewidth_us(0);
}
}

void setup()
{
    // Configuracion de Ticker para Control P

    deltaT.attach(&P, 0.001); // Interrupcion generada cada 1ms para
realizar el control P

    // Configuracion de comunicacion serial
    pc.baud(250000);
    pc.format(8, SerialBase::None, 1);
    pc.attach(&callback);

    // Interrupciones Encoders
}

```

```

523     ENC_1A.rise(&ENC_1A_RISE);
524     ENC_1A.fall(&ENC_1A_FALL);
525
526     ENC_1B.rise(&ENC_1B_RISE);
527     ENC_1B.fall(&ENC_1B_FALL);
528
529     ENC_2A.rise(&ENC_2A_RISE);
530     ENC_2A.fall(&ENC_2A_FALL);
531
532     ENC_2B.rise(&ENC_2B_RISE);
533     ENC_2B.fall(&ENC_2B_FALL);
534
535     ENC_3A.rise(&ENC_3A_RISE);
536     ENC_3A.fall(&ENC_3A_FALL);
537
538     ENC_3B.rise(&ENC_3B_RISE);
539     ENC_3B.fall(&ENC_3B_FALL);
540
541 // Establecimiento de periodo de la señal de pwm
542
543 Servo1.period_ms(20);
544 Servo2.period_ms(20);
545 Servo3.period_ms(20);
546 ServoEfector.period_ms(20);
547 ServoLab.period_ms(20);
548
549 ControlServo(1,theta4Home);
550 ControlServo(2,theta5Home);
551 ControlServo(3,theta6Home);
552 ServoWrite(4, EfectorDetenido);
553 ServoWrite(5, LaboratorioCerrado);
554
555 float calibration_factor = 8597230; // Valor obtenido de la
556 calibracion
557 celda.setScale(0);
558 celda.tare(); // Reiniciar el peso a 0
559 celda.setScale(calibration_factor); // Ajustar con el valor de
560 calibacion obtenido
561 }
562 void loop()
563 {
564     if (orden == 1) // Atender la orden recibida
565     {
566         // Mover a posicion deseada
567         Control(3,theta3Inter,2500, 1000);
568         Control(1,theta1D,1500, 600);
569         ControlServo(1,theta4D);
570         ControlServo(2,theta5D);
571
572         Control(3,theta3D,2000, 1200);
573         Control(2,theta2D,0, 0); // El segundo GDL se controla en la
574         interrupcion de control P
575
576         CerrarEfector();
577         wait(3);
578
579         // Mover a laboratorio
580         Control(3,theta3Inter,3000, 2000);
581         Control(1,theta1Lab,1500, 600);
582
583         ControlServo(3,theta6Lab);
584         ControlServo(2,theta5Lab);
585         ControlServo(1,theta4Lab);
586
587         Control(2,theta2Lab,0, 0);
588         Control(3,theta3Lab,3000, 2000);
589
590     }

```

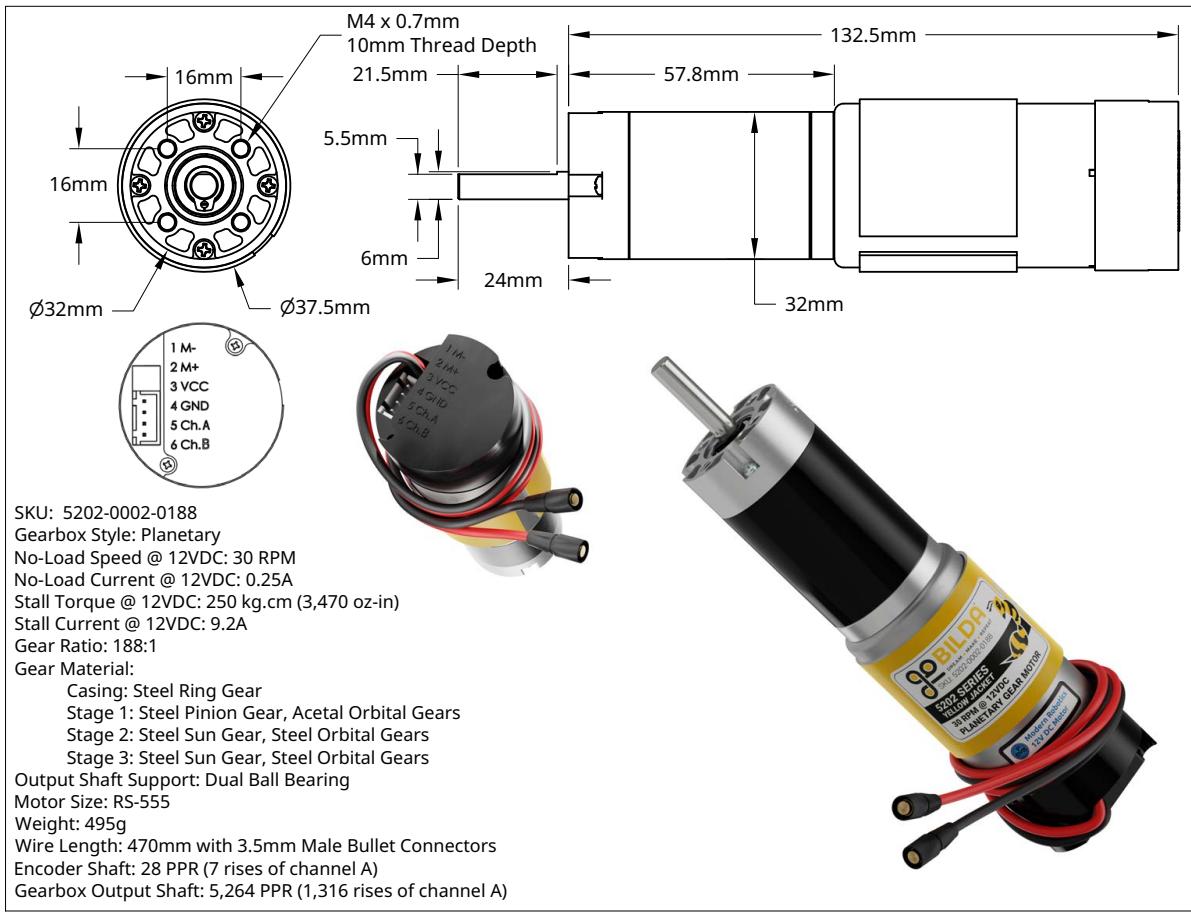
```

589     AbrirEfector();
590
591     // Lectura de peso con la celda de carga
592     masa = celda.getGram();
593     wait(3);
594
595     // Liberar muestra
596     ServoWrite(5,LaboratorioAbierto);
597     wait(0.5);
598     ServoWrite(5,LaboratorioCerrado);
599
600
601     // Regresar a Home
602
603     Control(2,theta2Home,0,0);
604
605     ControlServo(3,theta6Home);
606     ControlServo(1,theta4Home);
607     ControlServo(2,theta5Home);
608
609     Control(1,theta1Home,1500, 600);
610     Control(3,theta3Home,2000, 1200);
611
612     // Rutina terminada
613
614     // Lectura de temperatura
615     DHT11_MOTORES.readData();
616     DHT11_FUENTE.readData();
617
618     TempInterna = adc_temp.read()*100;
619     TempMotores = DHT11_MOTORES.ReadTemperature(CELCIUS);
620     TempFuente = DHT11_FUENTE.ReadTemperature(CELCIUS);
621
622     // Enviar datos obtenidos a la computadora y notificar que termino
623     // la rutina para esperar nueva orden
624
625     pc.printf("%f, %f, %f, %f\n", TempMotores,TempFuente,TempInterna
626     ,masa);
627
628     orden = 0; // Se atendio la orden
629 }
630
631 int main()
632 {
633     setup();
634     while(1) {
635         loop();
636     }
637 }
```

Anexos

Anexo 1: Hojas de datos

**A. 1. Motor Planetario goBilda 5202 YellowJacket, 30RPM,
3470oz-in**



A. 2. Servomotor

Ez

Robot

0007

Includes

- 1 x EZ-Robot Heavy Duty Digital Servo



Product Dimensions

Width 4.5 cm

Length 3.5 cm

Height 2.0 cm

Weight 0.0700 kg

Shipping Dimensions

Width 10.0 cm

Length 12.0 cm

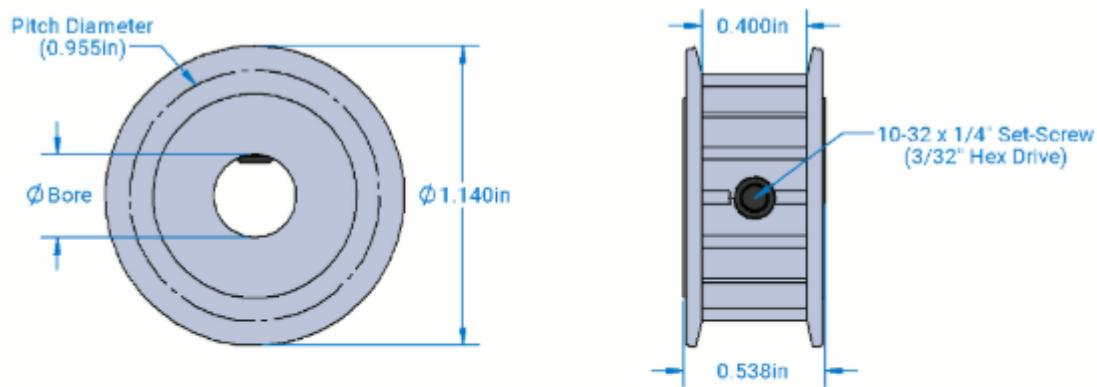
Height 10.0 cm

Weight 0.1700 kg

SKU: 0007

A. 3. Polea

15D



Material	Aluminum
Shaft Mount Style	10-32 Set Screw
Max Timing Belt Width	0.375" (3/8)
Tooth Count	15

A. 4. Polea

A

6A

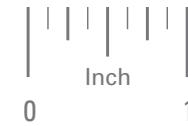
3-15DF03716

XL TIMING BELT PULLEYS • 1/5" PITCH

SDP/SI

**FOR 3/8" BELTS
DOUBLE FLANGE**

PHONE: 516.328.3300 • FAX: 516.326.8827 • WWW.SDP-SI.COM



> MATERIAL:
Aluminum Alloy

> FINISH:
Clear Anodized

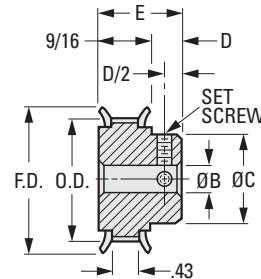
> SPECIFICATIONS:

O.D. Tolerance: 10 to 16 grooves is +.002/-0.000
17 to 20 grooves is +.003/-0.000

2

Pulleys with 10 & 11 grooves have 1 set screw;
others have 2 set screws at 90°.

3



4

INCH COMPONENT

Catalog Number	No. of Grooves	P.D.	O.D.	F.D. ± 1/64	B Bore +.001 -.000	E Length ± 1/64	C Hub Dia. ± 1/64	D Hub Proj.	Set Screw
A 6A 3-10DF03706	10	.637	.617	7/8	.1875	13/16	7/16	1/4	#6-40
A 6A 3-10DF03708	10	.637	.617	7/8	.250	13/16	7/16	1/4	#8-32
A 6A 3-11DF03706	11	.700	.680	15/16	.1875	13/16	1/2	1/4	#6-40
A 6A 3-11DF03708	11	.700	.680	15/16	.250	13/16	1/2	1/4	#8-32
A 6A 3-12DF03706	12	.764	.744	1	.1875	13/16	1/2	1/4	#6-40
A 6A 3-12DF03708	12	.764	.744	1	.250	13/16	1/2	1/4	#8-32
A 6A 3-12DF03710	12	.764	.744	1	.3125	13/16	1/2	1/4	#8-32
A 6A 3-13DF03708	13	.828	.808	1-1/16	.250	13/16	9/16	1/4	#8-32
A 6A 3-14DF03708	14	.891	.871	1-3/32	.250	13/16	9/16	1/4	#8-32
A 6A 3-14DF03710	14	.891	.871	1-3/32	.3125	13/16	9/16	1/4	#8-32
A 6A 3-15DF03708	15	.955	.935	1-3/16	.250	13/16	5/8	1/4	#8-32
A 6A 3-15DF03710	15	.955	.935	1-3/16	.3125	13/16	5/8	1/4	#8-32
A 6A 3-15DF03712	15	.955	.935	1-3/16	.375	13/16	3/4	1/4	#8-32
A 6A 3-15DF03716	15	.955	.935	1-3/16	.500	13/16	3/4	1/4	#8-32
A 6A 3-16DF03708	16	1.019	.999	1-1/4	.250	13/16	11/16	1/4	#8-32
A 6A 3-16DF03710	16	1.019	.999	1-1/4	.3125	13/16	11/16	1/4	#8-32
A 6A 3-16DF03712	16	1.019	.999	1-1/4	.375	13/16	11/16	1/4	#8-32
A 6A 3-17DF03708	17	1.082	1.062	1-5/16	.250	13/16	3/4	1/4	#8-32
A 6A 3-18DF03708	18	1.146	1.126	1-3/8	.250	13/16	13/16	1/4	#8-32
A 6A 3-18DF03710	18	1.146	1.126	1-3/8	.3125	13/16	13/16	1/4	#8-32
A 6A 3-18DF03712	18	1.146	1.126	1-3/8	.375	13/16	13/16	1/4	#8-32
A 6A 3-19DF03708	19	1.210	1.190	1-7/16	.250	13/16	7/8	1/4	#8-32
A 6A 3-20DF03708	20	1.273	1.253	1-1/2	.250	7/8	15/16	5/16	#8-32
A 6A 3-20DF03710	20	1.273	1.253	1-1/2	.3125	7/8	15/16	5/16	#8-32
A 6A 3-20DF03712	20	1.273	1.253	1-1/2	.375	7/8	15/16	5/16	#10-32
A 6A 3-20DF03716	20	1.273	1.253	1-1/2	.500	7/8	15/16	5/16	#10-32

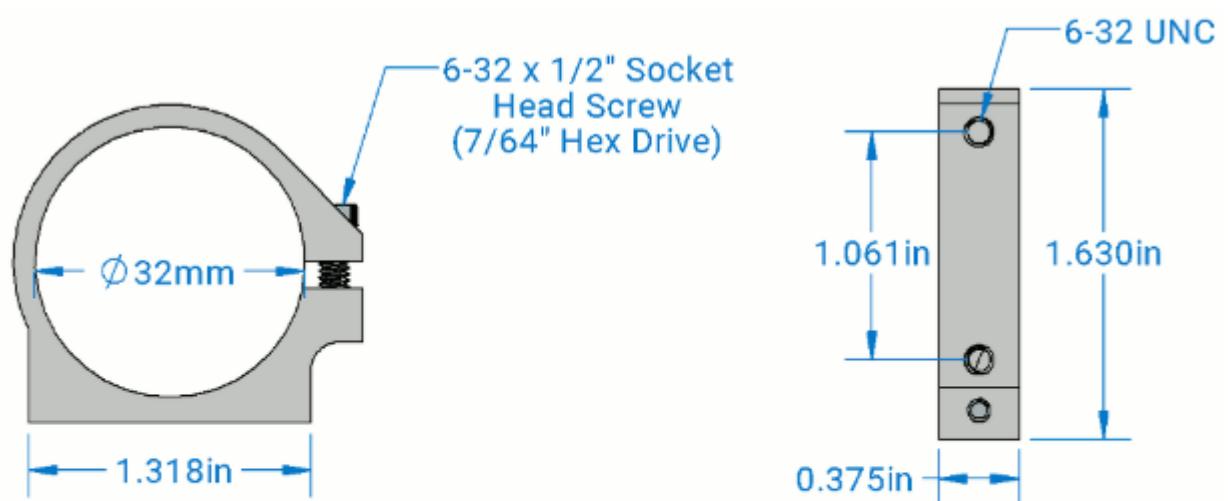
Continued on the next page

14

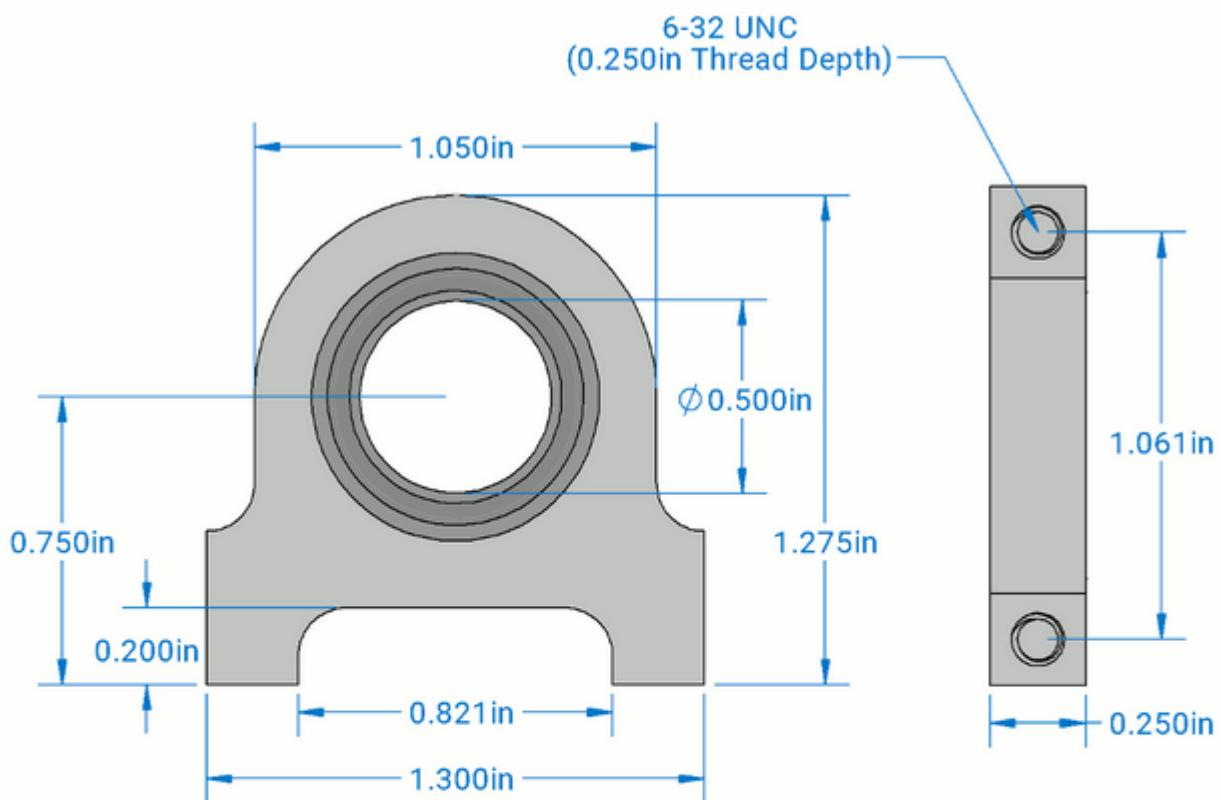
15

16

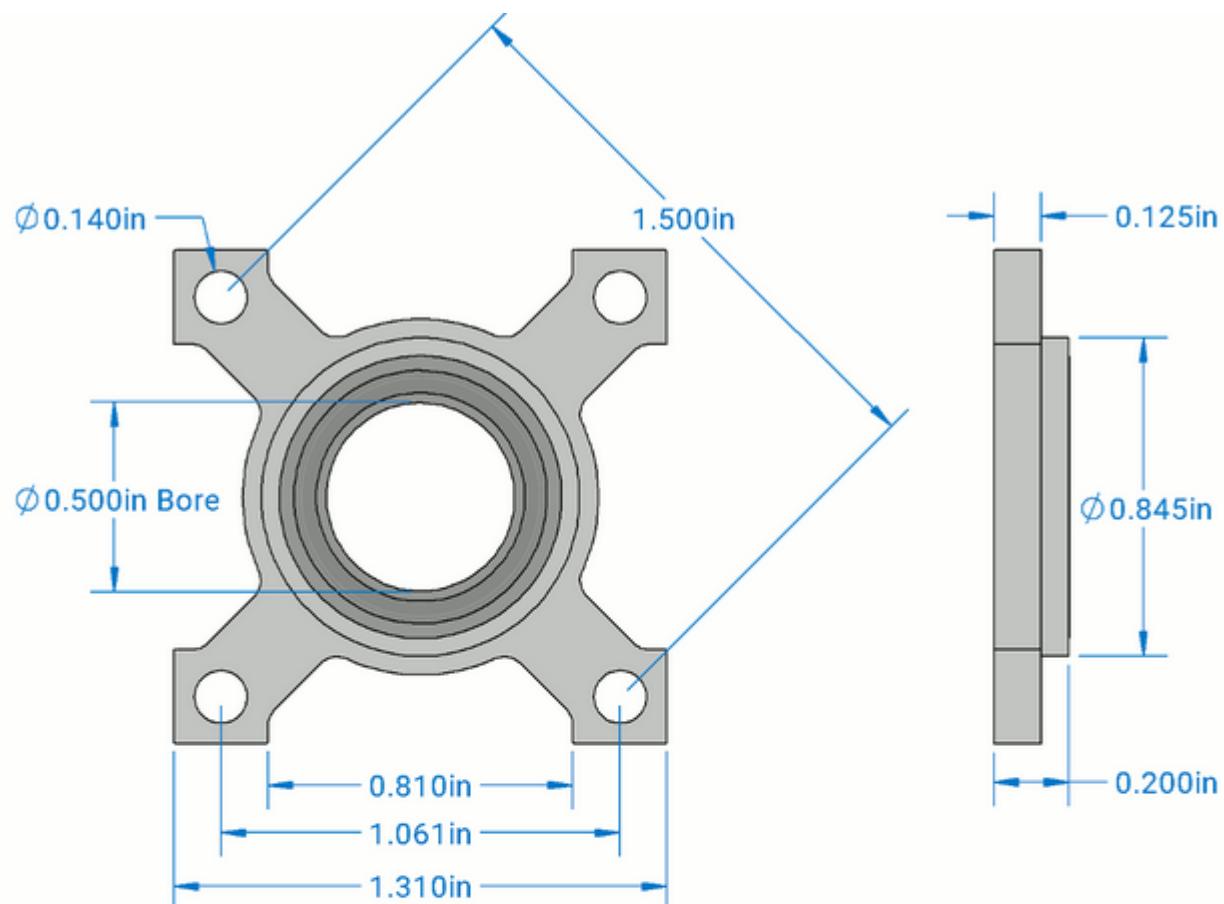
A. 5. Piezas adquiridas para ensamblar el manipulador



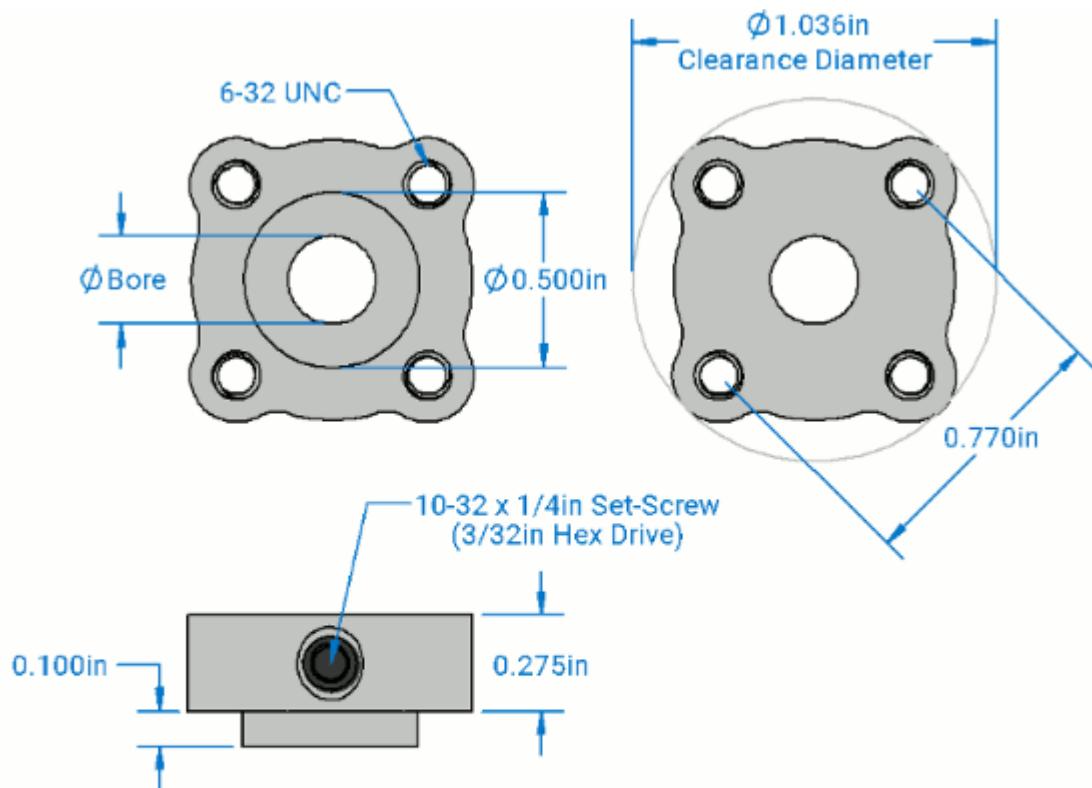
Material	Aluminum
Bore	32mm
Hole Pattern Compatibility	<u>1.50"</u>



Product Weight	0.40 oz
Material	Aluminum
Bearing ID	0.500"
Bearing Material	52100 Chrome Steel
Static Load	114 lbs
Dynamic Load	200 lbs
Max RPM	24,000

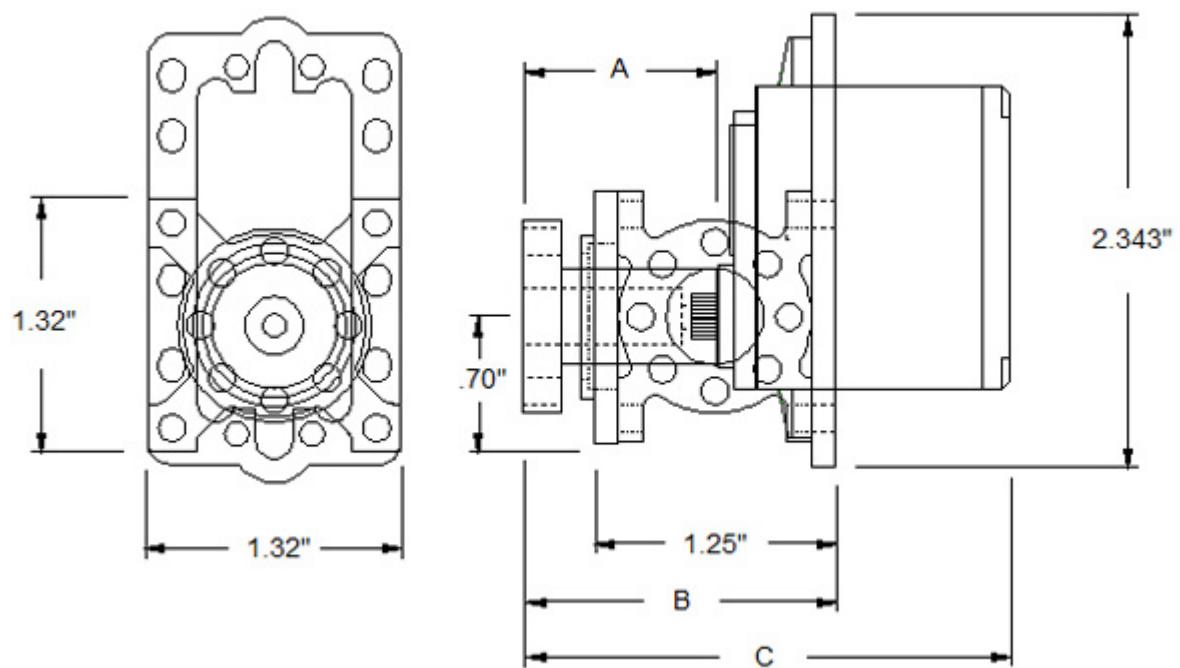


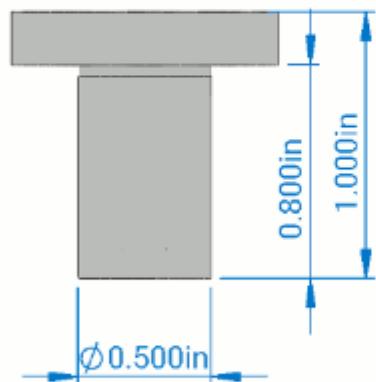
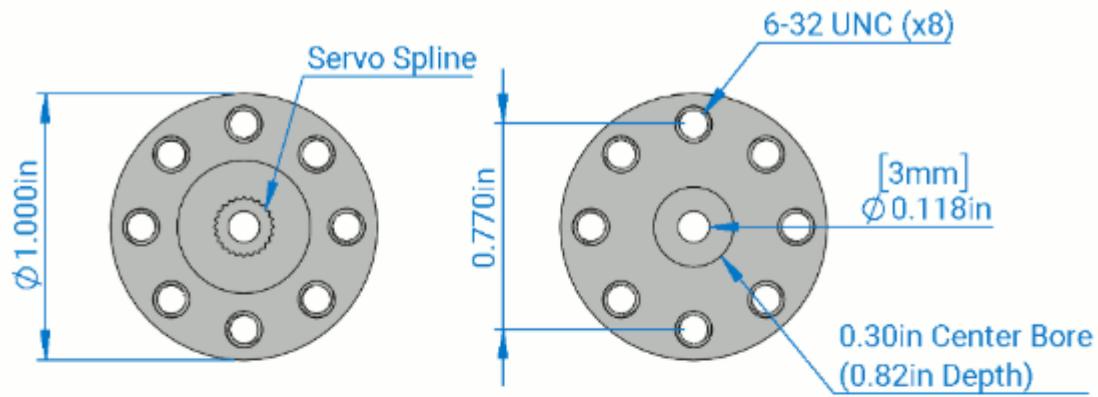
Product Weight	0.20 oz
Material	Aluminum
Bearing ID	0.500"
Bearing Material	52100 Chrome Steel
Static Load	114 lbs
Dynamic Load	200 lbs
Max RPM	24,000



Product Weight	0.0125 oz
Material	Aluminum
Coupling Style	Set Screw
Hole Pattern	<u>0.770"</u>

A. 6. Piezas adquiridas para ensamblar la muñeca esférica





Product Weight	0.35 oz
Material	Aluminum
Hole Pattern	<u>0.770"</u>
Servo Spline Compatibility	24 Tooth (C1) Spline or 25 Tooth (3F/H25T) Spline



Ball Bearing with Flange - 3mm ID (pair)

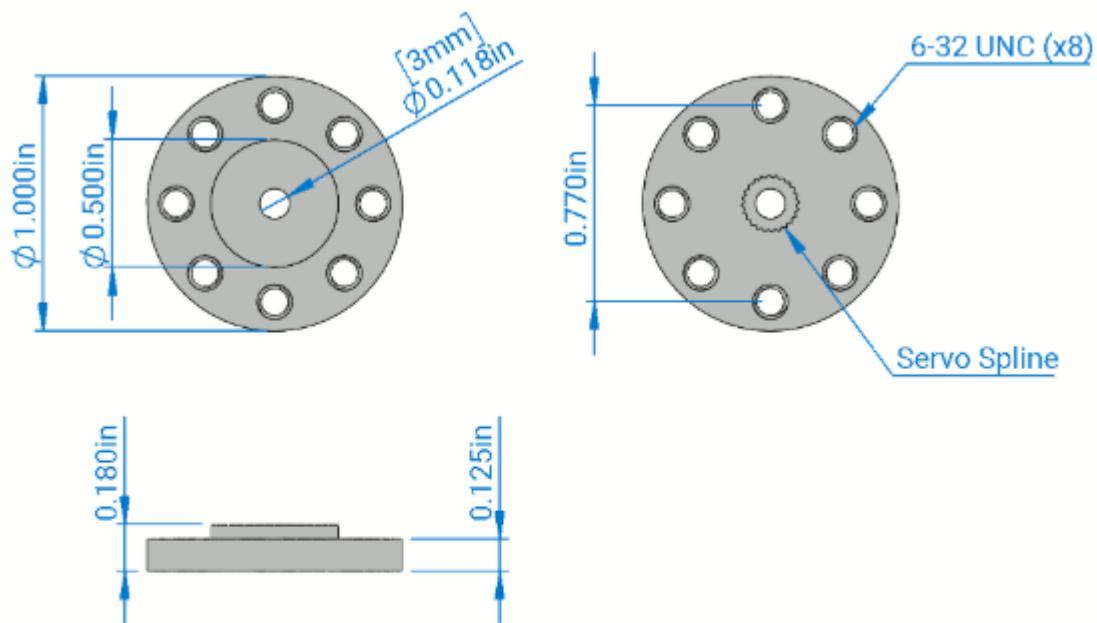
Inside Diameter = 3mm
Outside Diameter = 8mm
Thickness = 4mm

Shop on [Robotshop](#)

Information

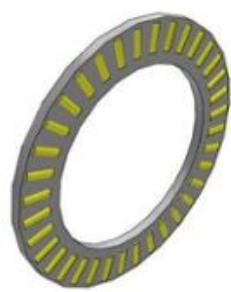
These bearings are perfect for adding to our older servo hinges, or your cool design. By [enlarging](#) the small hole on the older "C" brackets, the ball bearing assembly can be added with ease. Adding this ball bearing assembly improves the performance of the older servo brackets, making them virtually friction-free.

A. 7. Buje para el servo del efector



Product Weight	0.10 oz
Material	Aluminum
Hole Pattern	<u>0.770"</u>
Servo Spline Compatibility	24 Tooth (C1) Spline or 25 Tooth (3F/H25T) Spline

A. 8. Rodamiento axial de agujas AXK 4565



AXK 4565

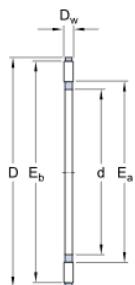
Popular item

Needle roller thrust bearings

Bearing data, Design considerations Bearing interfaces
[Tolerances, table](#), values, [Seat tolerances for standard conditions](#)
[Design considerations, table](#)

Technical specification

DIMENSIONS



d	45 mm
D	65 mm
D _w	3 mm
E _a	min. 50 mm
E _b	max. 63 mm

CALCULATION DATA

Basic dynamic load rating	C	27 kN
Basic static load rating	C ₀	127 kN
Fatigue load limit	P _u	15.3 kN
Reference speed		2600 r/min
Limiting speed		5300 r/min

MASS

Mass roller and cage thrust assembly	0.018 kg
--------------------------------------	----------

A. 9. Rodamiento radial de rodillos NU 303



NU 303 ECP

Popular item
SKF Explorer

Cylindrical roller bearings, single row

Bearing data

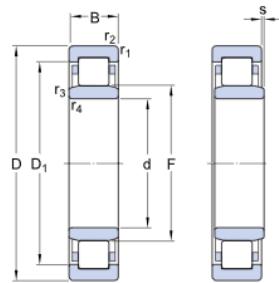
[Tolerances](#),
Normal (metric), P6, Normal (inch),
[Radial internal clearance](#),
cylindrical bore, tapered bore,
[Axial internal clearance](#),
NUP, NJ + HJ

Bearing interfaces

[Seat tolerances for standard conditions](#),
[Tolerances and resultant fit](#)

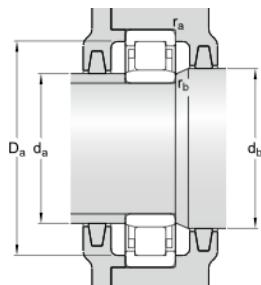
Technical specification

DIMENSIONS



d	17 mm
D	47 mm
B	14 mm
D ₁	≈ 36.75 mm
F	24.2 mm
r _{1,2}	min. 1 mm
r _{3,4}	min. 0.6 mm
s	max. 1 mm

ABUTMENT DIMENSIONS



d _a	min. 21.1 mm
d _a	max. 23.1 mm
d _b	min. 26 mm
D _a	max. 41.7 mm
r _a	max. 1 mm
r _b	max. 0.6 mm

CALCULATION DATA

Basic dynamic load rating	C	28.5 kN
Basic static load rating	C_0	20.4 kN
Fatigue load limit	P_u	2.55 kN
Reference speed		17000 r/min
Limiting speed		20000 r/min
Calculation factor	k_r	0.15
Limiting value	e	0.2
Axial load factor	γ	0.6

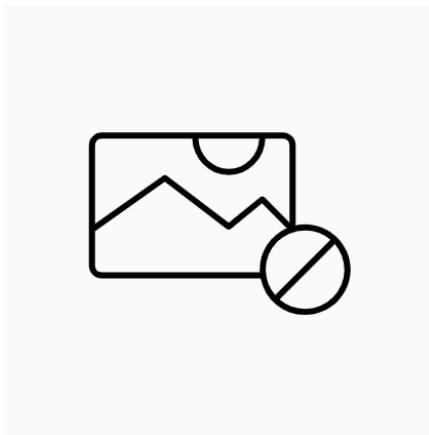
MASS

Mass bearing	0.12 kg
--------------	---------

More information

Product details	Engineering information	Tools
Designs and variants	Principles of rolling bearing selection	SimPro Quick
Bearing data	General bearing knowledge	Bearing Select
Loads	Bearing selection process	Engineering Calculator
Temperature limits	Bearing failure and how to prevent it	LubeSelect for SKF greases
Permissible speed		Heater selection tool
Design considerations		Oil Injection Method Program
Designation system		Rolling bearings mounting and dismounting instructions

A. 10. Rodamiento radial de bolas DW ER1212 2ZS



D/W ER1212-2ZS

Deep groove ball bearings

Bearing data

Tolerances,

Normal (metric), P6, P5, Normal (inch),

Radial internal clearance,

Matched bearing pairs, Stainless steel

$d < 10$ mm, Other bearings

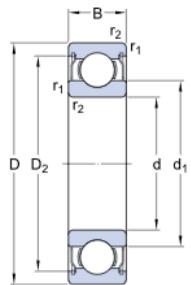
Bearing interfaces

Seat tolerances for standard conditions,

Tolerances and resultant fits

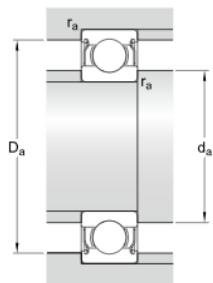
Technical specification

DIMENSIONS



d	12.7 mm
D	19.05 mm
B	3.967 mm
d ₁	≈ 14.5 mm
D ₂	≈ 17.3 mm
r _{1,2}	min. 0.25 mm

ABUTMENT DIMENSIONS



d _a	min. 14 mm
d _a	max. 14 mm
D _a	max. 17.5 mm
r _a	max. 0.25 mm

CALCULATION DATA

Basic dynamic load rating	C	0.52 kN
Basic static load rating	C_0	0.27 kN
Fatigue load limit	P_u	0.011 kN
Reference speed		75000 r/min
Limiting speed		36000 r/min
Calculation factor	k_r	0.015
Calculation factor	f_0	8.3

MASS

Mass bearing	0.0032 kg
--------------	-----------

A. 11. Sensor de temperatura y humedad DHT11

Detailed Specifications:

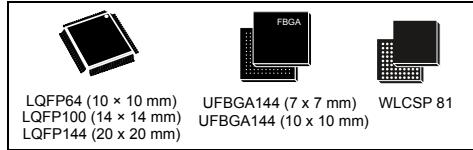
Parameters	Conditions	Minimum	Typical	Maximum
Humidity				
Resolution		1%RH	1%RH	1%RH
			8 Bit	
Repeatability			± 1%RH	
Accuracy	25°C		± 4%RH	
	0-50°C			± 5%RH
Interchangeability	Fully Interchangeable			
Measurement Range	0°C	30%RH		90%RH
	25°C	20%RH		90%RH
	50°C	20%RH		80%RH
Response Time (Seconds)	1/e(63%)25°C , 1m/s Air	6 S	10 S	15 S
Hysteresis			± 1%RH	
Long-Term Stability	Typical		± 1%RH/year	
Temperature				
Resolution		1°C	1°C	1°C
		8 Bit	8 Bit	8 Bit
Repeatability			± 1°C	
Accuracy		± 1°C		± 2°C
Measurement Range		0°C		50°C
Response Time (Seconds)	1/e(63%)	6 S		30 S

Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 225 DMIPS, up to 512 KB Flash/128+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, seventeen TIMs, three ADCs and twenty communication interfaces

Datasheet - production data

Features

- Core: Arm® 32-bit Cortex®-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 180 MHz, MPU, 225 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), and DSP instructions
- Memories
 - 512 Kbytes of Flash memory
 - 128 Kbytes of SRAM
 - Flexible external memory controller with up to 16-bit data bus: SRAM, PSRAM, SDRAM/LPSDR SDRAM, NOR/NAND Flash memories
 - Dual mode QuadSPI interface
- LCD parallel interface, 8080/6800 modes
- Clock, reset and supply management
 - 1.7 V to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, PVD and BOR
 - 4 to 26 MHz crystal oscillator
 - Internal 16 MHz factory-trimmed RC (1% accuracy)
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 32 kHz RC with calibration
- Low power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{BAT} supply for RTC, 20×32 bit backup registers plus optional 4 KB backup SRAM
- 3×12-bit, 2.4 MSPS ADC: up to 24 channels and 7.2 MSPS in triple interleaved mode
- 2×12-bit D/A converters
- General-purpose DMA: 16-stream DMA controller with FIFOs and burst support
- Up to 17 timers: 2x watchdog, 1x SysTick timer and up to twelve 16-bit and two 32-bit timers up to 180 MHz, each with up to four IC/OC/PWM or pulse counter
- Debug mode
 - SWD and JTAG interfaces
 - Cortex®-M4 Trace Macrocell™



- Up to 114 I/O ports with interrupt capability
 - Up to 111 fast I/Os up to 90 MHz
 - Up to 112 5 V-tolerant I/Os
- Up to 20 communication interfaces
 - SPDIF-Rx
 - Up to 4 × I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to four USARTs and two UARTs (11.25 Mbit/s, ISO7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
 - Up to four SPIs (45 Mbit/s), three with muxed I²S for audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
 - 2 x SAI (serial audio interface)
 - 2 × CAN (2.0B Active)
 - SDIO interface
 - Consumer electronics control (CEC) I/F
- Advanced connectivity
 - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
 - USB 2.0 high-speed/full-speed device/host/OTG controller with dedicated DMA, on-chip full-speed PHY and ULP
 - Dedicated USB power rail enabling on-chip PHYs operation throughout the entire MCU power supply range
- 8- to 14-bit parallel camera interface up to 54 Mbytes/s
- CRC calculation unit
- RTC: subsecond accuracy, hardware calendar
- 96-bit unique ID

Table 1. Device summary

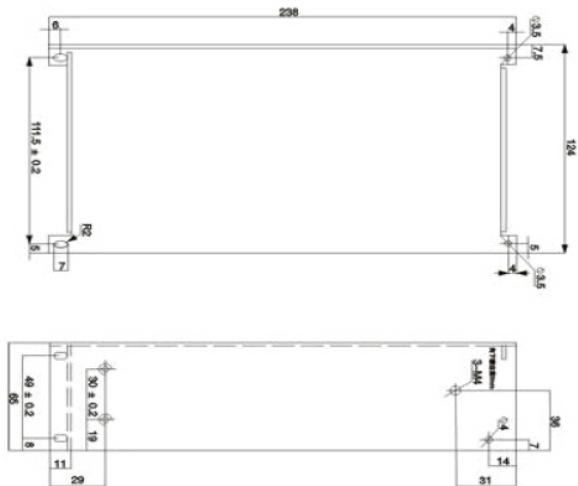
Reference	Part numbers
STM32F446xC/E	STM32F446MC, STM32F446ME, STM32F446RC, STM32F446RE, STM32F446VC, STM32F446VE, STM32F446ZC, STM32F446ZE.

A. 13. Fuente de alimentación TDK-Lambda GWS250

Product Overview		Send Inquiry					
1.Features							
<ul style="list-style-type: none"> ·Protections: short circuit/over load/over voltage /over temp ·AC input voltage range selected by switch ·Small volume, low weight, high efficiency ·100% full load burn-in test ·2 Year warranty ·Built-in cooling DC fan ·Cooling fan ON-OFF auto control ·LED indicator for power on 							
2. Specification							
Model	Specification	S-500-12	S-500-15	S-500-24	S-500-48		
OUTPUT	DC output voltage	12V	15V	24V	48V		
	Output voltage tolerance	±1%	±1%	±1%	±1%		
	Rated output current	41.5A	33A	20.8A	10.5A		
	Output current range	0~41.5A	0~33A	0~20.8A	0~10.5A		
	Ripple & noise	200mVp-p	200mVp-p	240mVp-p	240mVp-p		
	DC adjustable voltage range	10~13.2V	13.5~18V	20~26.4V	41~56V		
	DC output power	500W	495W	500W	504W		
	Inlet stability	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%		
	Load stability	±1%	±0.5%	±0.5%	±0.5%		
Setup rise hold up time		200ms,50ms,20ms					
INPUT	AC input voltage range	90~132VAC/180~264VAC selected by switch, 248~370VDC					
	Frequency range	47~63Hz;					
	Input current	6.5A/115V 4A/230V					
	AC impulse current	25A/115V 50A/230V					
	Leakage current	<3.5mA/240VAC					
	Efficiency	78%	81%	83%	84%		
PROTECTION	Overload protection	105%~135%. Type,PULSING HICCUP SHUTDOWN; Reset,auto recovery					
	Over-voltage protection	13.8~16.2V	18~21V	27.6~32V	57.6~67.2V		
	High-temperature protection	RTH3>=65°C FAN ON<=55°C FAN OFF>=80°C Cut off output(5~15V)					
		RTH3>=70°C FAN ON<=60°C FAN OFF>=85°C Cut off output(24~48V)					
ENVIRONMENT	Temperature coefficient	±0.03%°C(0~50°C)					
	Vibration	10~500Hz,2G 10min./1cycle,Period for 60min,EACH AXES					
	Isolation resistance	Input & output interval,Input & enclosure,Output & enclosure,500VAC/100M Ohms					
	Working temp & humidity	-10°C~+50°C,20~90%RH					
	Store tempe & humidity	-20°C~+85°C,10~95%RH					
SAFETY & EMC Note 8	Withstand voltage	Input & output interval,1.5KVAC,Input & enclosure,1.5KVAC, Output & enclosure,0.5KVAC					

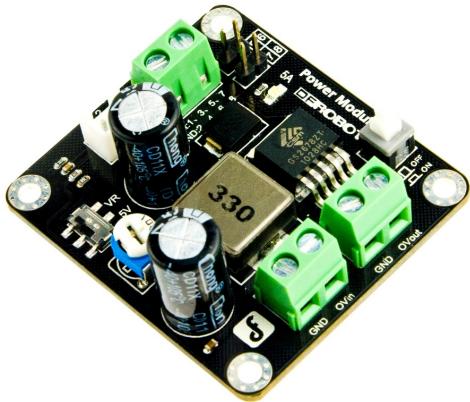
	Safety standards	Design refer to UL1012, EN60950-1,EN61347-1,EN-61347-2 approved
	EMC standards	EN55015,EN55022,EN55024,EN61000-2,EN61000-3,EN61547 approved
OTHERS	Overall dimension	(L×W×H) 241*124*65 mm
	Weight	1.4Kgs /10pcs per carton

3. Mechanical Dimension



4. Please Note

- 1.The testing condition for the parameter above is,230VAC input, rated load,25°C 70%Rh,Humidity
- 2.Error,include the setting error, line stability and load stability.(Note,5)
- 3.Wave test,adopting"A12"double wire for 20MHz,and 0.1uF&uF capacitor short-circuit for interrupting
- 4.Inlet voltage stability test, when is over load, the lowest voltage of inlet is representative to the highest voltage.
- 5.Load stability test: The load is from 0% to 100%,others 60%.
- 6.C2,3,11must be knocked down



(<https://www.dfrobot.com/search-DFR0205.html>)

Introduction

This Power Module is a small size 5A 350KHz 25V Buck DC to DC Converter. It can convert any DC voltage between 3.6V-25V to a selectable voltage from 3.3V to 25V.

You can choose 5V direct output voltage with the switch or adjust the output voltage by the blue&white resistor. It is convenient for you to choose three different interfaces of output. The Ovout interface can output the original voltage of input so that can be used as the power of other module.

The ON/OFF button on the board can be pulled high to turn the converter module on and low to turn it off.

Note: The input voltage must be higher than output voltage.

Specification

- Input voltage range: 3.6V-25V
- Output adjustable range: 3.3V-25V
- Constant output current: 5A@5V
- Max Output Power: 25W
- Switching Frequency: 350KHZ
- Three different output interface
 - One interface of original voltage output

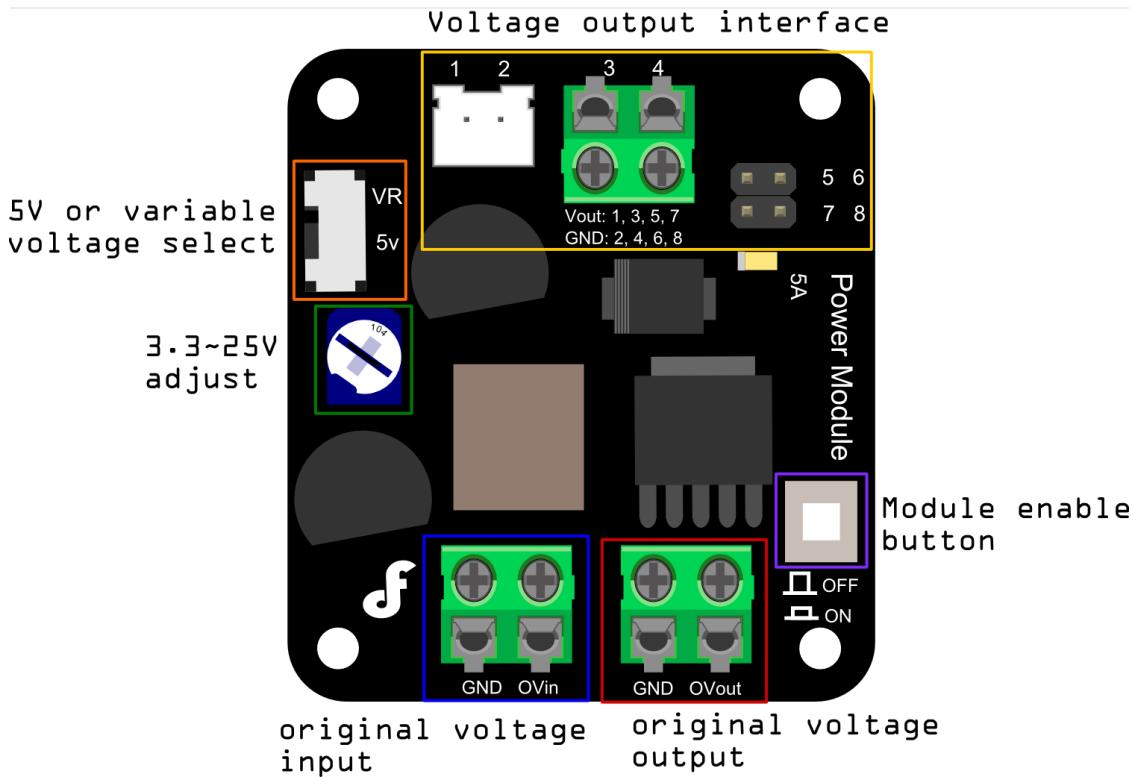
https://wiki.dfrobot.com/Power_Module_SKU_DFR0205_

1/3

- The interface of original voltage output

- Size:46x50x20mm

Board Overview



Trouble shooting

Any question and more cool ideas to share, please visit **DFRobot Forum**
(<https://www.dfrobot.com/forum/>)

More

- GS2678 datasheet (<https://www.dfrobot.com/image/data/DFR0205/GS2678%20datasheet.pdf>)
- Schematic
(<https://www.dfrobot.com/image/data/DFR0205/Power%20Module%20Schematic.pdf>)

Get DC-DC Power Module 25W (<https://www.dfrobot.com/product-752.html>) from DFRobot Store or DFRobot Distributor. (<https://www.dfrobot.com/index.php?route=information/distributorslogo>)

A. 15. S9V11F3S5

[Description](#) [Specs \(10\)](#) [Pictures \(14\)](#) [Resources \(3\)](#) [FAQs \(0\)](#) [On the blog \(1\)](#)

Dimensions

Size: 0.5" × 0.6" × 0.17"¹

Weight: 0.7 g¹

General specifications

Minimum operating voltage: 2 V²

Maximum operating voltage: 16 V

Maximum output current: 1.5 A³

Output voltage: 3.3 V⁴

Reverse voltage protection?: N

Maximum quiescent current: 1 mA⁵

Identifying markings

PCB dev codes: reg20b

Other PCB markings: 0J10534

Notes:

1 Without included optional headers.

2 Note: the minimum startup voltage is 3V, but the regulator can operate down to 2V after startup.

3 Under typical conditions, where the input voltage is close to the output voltage. Maximum output current can be higher when stepping down and lower when stepping up.

4 Output can be changed to 5 V by driving the SEL pin over 1.1 V.

5 With no load. Actual quiescent current depends on input voltage; it is typically under 300 μ A when the input voltage is close to the output voltage.

A. 16. Driver

MDD10A

3. PRODUCT SPECIFICATION AND LIMITATIONS

Absolute Maximum Rating

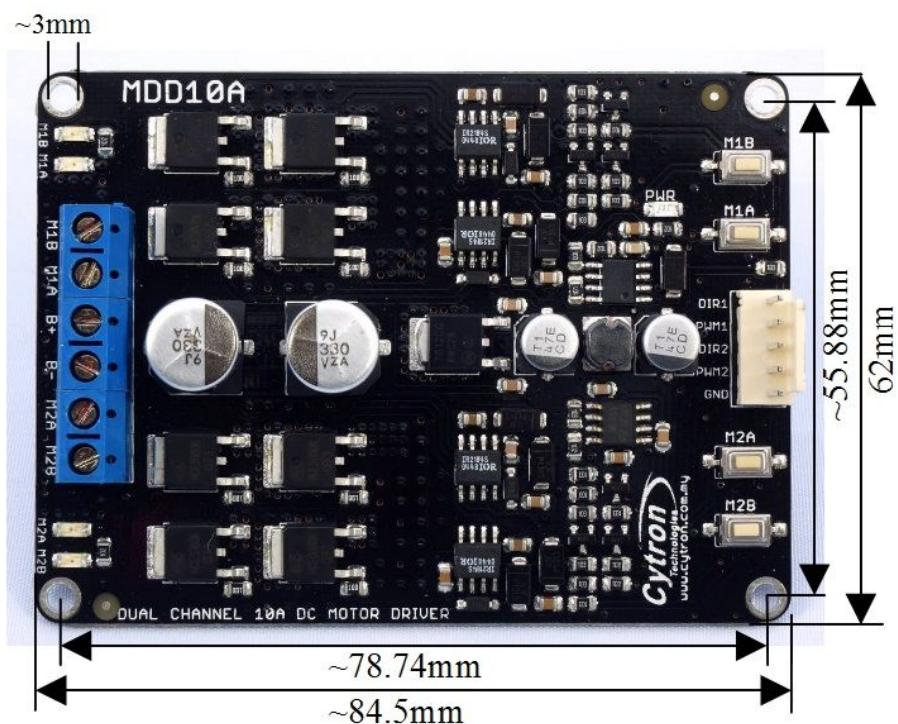
No.	Parameters	Min	Typical	Max	Unit
1	Power Input Voltage***	5	-	30	V
2	I_{MAX} (Maximum Continuous Motor Current)*	-	-	10	A
3	I_{PEAK} – (Peak Motor Current) **	-	-	30	A
4	V_{IOH} (Logic Input – High Level)	3	-	5.5	V
5	V_{IOL} (Logic Input – Low Level)	0	0	0.5	V
6	Maximum PWM Frequency	-	-	20	KHz

* Tested in room temperature at 25°C

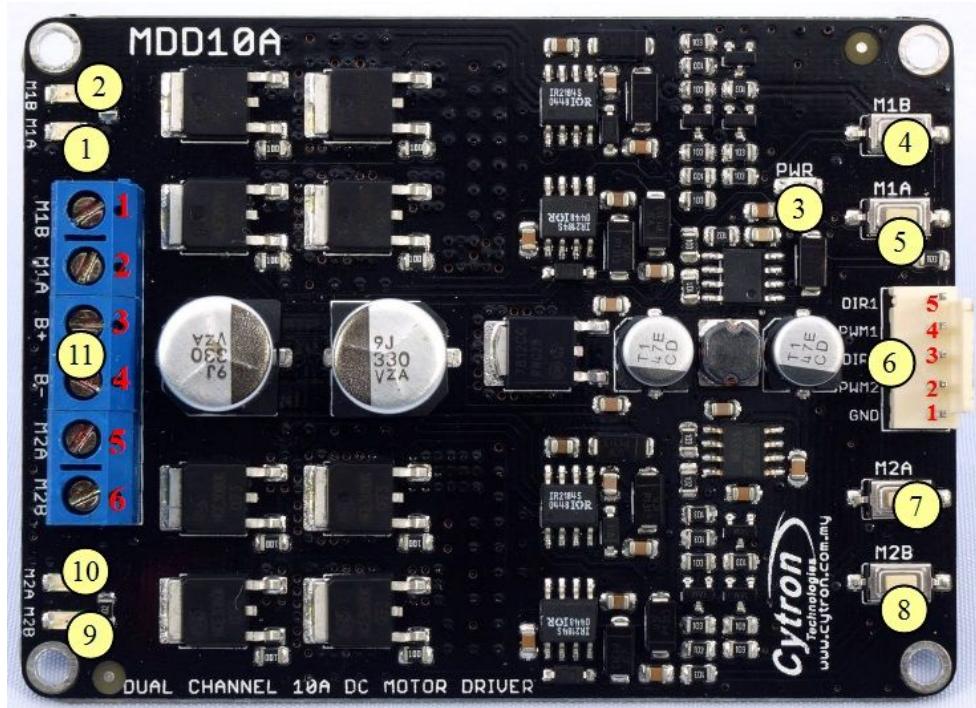
** Must not exceed 10 seconds.

*** Rev2.0 has upgraded to support 30V maximum power input voltage

4. DIMENSION



5. BOARD LAYOUT



1. Red LED M1A – Turns on when the output M1A is high and output M1B is low. Indicates the current flows from output M1A to M1B.
2. Red LED M1B – Turns on when the output M1A is low and output M1B is high. Indicates the current flows from output M1B to M1A.
3. Green LED – Power LED. Should be on when the board is powered on.
4. Test Button M1B – When this button is pressed, current flows from output M1B to M1A and motor will turn CCW (or CW depending on the connection).
5. Test Button M1A – When this button is pressed, current flows from output M1A to M1B and motor will turn CW (or CCW depending on the connection).

6. Input

Pin No.	Pin Name	Description
1	GND	Ground
2	*PWM2	PWM input for speed control (Motor 2)
3	DIR2	Direction input (Motor 2)
4	*PWM1	PWM input for speed control (Motor 1)
5	DIR1	Direction input (Motor 1)

*Note that it is not for RC PWM

The truth table for the control logic for motor 1 and motor 2 are as follow:

PWM	DIR	Output A	Output B
Low	X(Don't care)	Low	Low
High	Low	High	Low
High	High	Low	High

7. Test Button M2A – When this button is pressed, current flows from output M2A to M2B and motor will turn CW (or CCW depending on the connection).
8. Test Button M2B – When this button is pressed, current flows from output M2B to M2A and motor will turn CCW (or CW depending on the connection).
9. Red LED M2B – Turns on when the output M2A is low and output M2B is high.
Indicates the current flows from output M2B to M2A.
10. Red LED M2A – Turns on when the output M2A is high and output M2B is low.
Indicates the current flows from output M2A to M2B.

11. Terminal Block – Connect to motor and power source.

Pin No	Pin Name	Description
1	Motor 1 Output B	Connect to motor 1 terminal B
2	Motor 1 Output A	Connect to motor 1 terminal A
3	POWER +	Positive Supply (positive terminal of battery)
4	POWER -	Negative Supply (negative terminal of battery)
5	Motor 2 Output A	Connect to motor 2 terminal A
6	Motor 2 Output B	Connect to motor 2 terminal B

1. BOARD LAYOUT & FUNCTION

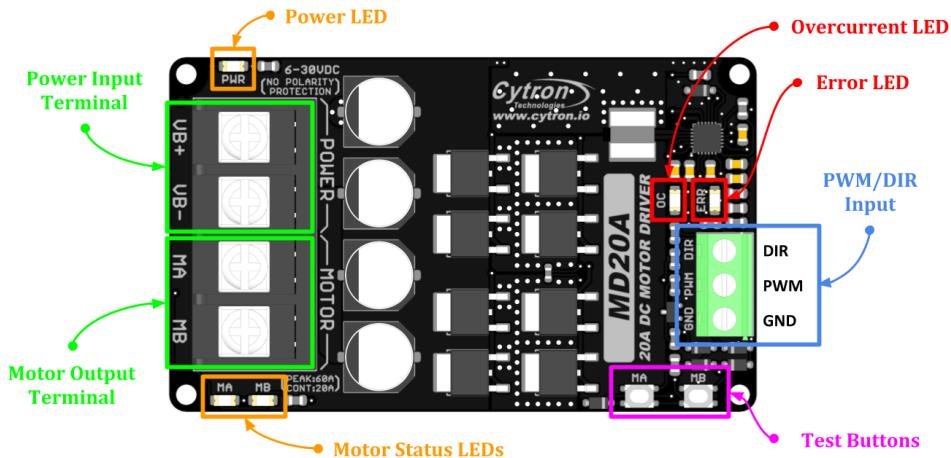


Figure 1: MD20A Board Functions

Function	Description
Power Input Terminal	Connect to battery. • VB+ : Positive • VB- : Negative <i>Warning : Connecting in reverse polarity will damage the motor driver instantaneously.</i>
Motor Output Terminal	Connect to motor terminal. Motor direction is depending on the polarity.
Power LED	Turn on when power up.
Motor Status LEDs	Turn on when the motor is running. • MA : Forward* • MB : Backward*
Error LED	Turn on during undervoltage shutdown or hardware fault. Please contact support@cytron.io for more information.
OC (Overcurrent) LED	Turn on when current limiting is in action. Current limit threshold is depending on the board temperature.
Test Buttons	Press to test the functionality of the motor driver. Motor will run at full speed. • MA : Forward* • MB : Backward*
PWM/DIR Input	Control the motor with PWM & DIR signal. • DIR : Direction input. • PWM : PWM input for motor speed control. • GND : Signal ground.

Table 1: MD20A Board Functions

* Actual motor direction is depending on the motor connection.
Swapping the connection (MA & MB) will reverse the direction.

2. SPECIFICATIONS

No	Parameters	Min	Max	Unit
1	Power Input Voltage	6	30	V
2	Maximum Motor Current	Continuous	-	A
		Peak *1	-	A
3	Logic Input Voltage (PWM & DIR)	Low Level	0	0.8 V
		High Level	1.5	15 V
4	PWM Frequency (Output frequency is same as input frequency)	Standard	DC	KHz
		Extended *2	20	KHz

Table 2: MD20A Absolute Maximum Ratings

*1 Peak current is limited by the overcurrent protection circuit. Actual current limit is depending on board temperature. Value shown is at room temperature (25 - 30 degree Celsius).

*2 When the PWM operates in extended frequency range, continuous motor current will be reduced.

3. DIMENSION

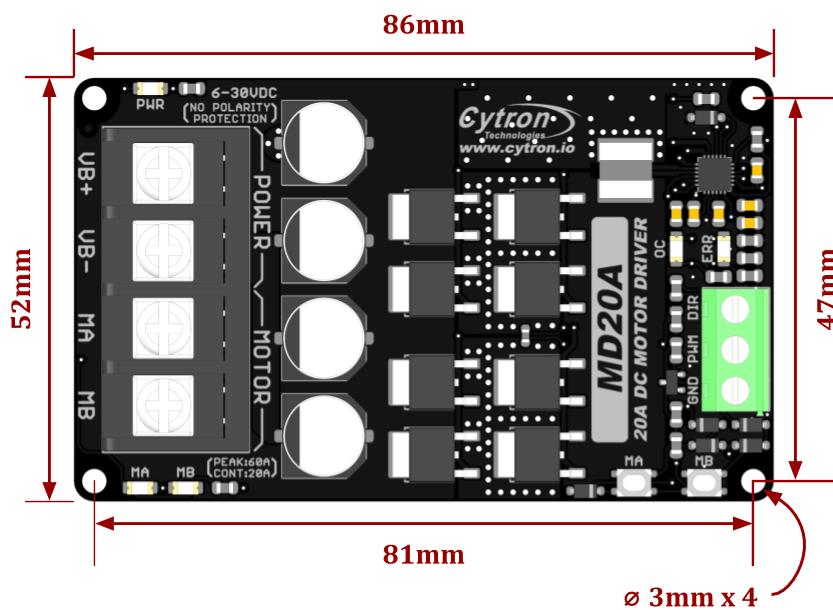


Figure 2: MD20A Dimension

4. INTERFACE

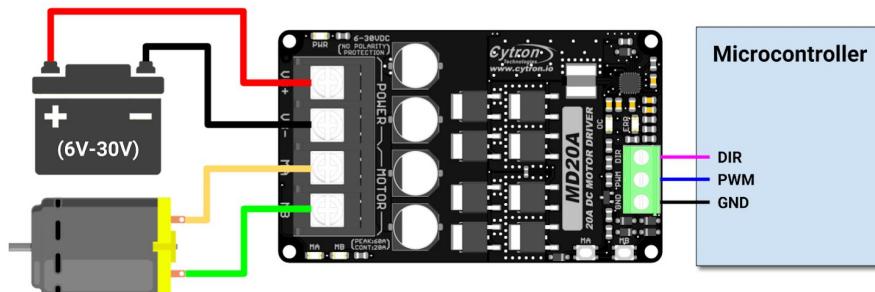


Figure 3: PWM & DIR Input Connection Diagram

PWM	DIR	Output A (MA)	Output B (MB)	Motor
Low	X (Don't Care)	Low	Low	Brake
High	Low	High	Low	Forward*
High	High	Low	High	Backward*

Table 3: PWM/DIR Input Truth Table

* Actual motor direction is depending on the motor connection.
Swapping the connection (MA & MB) will reverse the direction.

Anexo 2 (Anexo2)

Das Appendix (Anhang) Fragment wird einmal an der gewünschten Position im Dokument eingefügt. Weitere Anhänge können dann mittels der Zuweisung von Abschnitten (sections) erzeugt werden.

Ab hier beginnt der backmatter.

Anexo 3(Anexo 3)

Das Appendix (Anhang) Fragment wird einmal an der gewünschten Position im Dokument eingefügt. Weitere Anhänge können dann mittels der Zuweisung von Abschnitten (sections) erzeugt werden.

Ab hier beginnt der backmatter.

