







# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

*Trabajo Terminal I*

**“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:

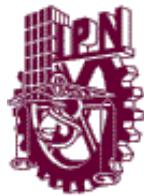
Dr. Flores Hernández Diego Alonso

Dr. Luviano Juárez Alberto

Dr. Sossa Azuela Juan Humberto



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

## *Trabajo Terminal I*

**“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

---

<b>Resumen</b>	<b>XVII</b>
<b>Nomenclatura y simbología</b>	<b>XIX</b>
<b>Introducción</b>	<b>XXVII</b>
<b>1. Marco de referencia</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción de forma de partículas . . . . .	1
1.2. Diseño mecánico . . . . .	1
1.2.1. Selección de materiales . . . . .	1
1.2.2. Diseño de transmisión por bandas . . . . .	2
1.2.3. Diseño de ejes . . . . .	5
1.2.4. Selección de rodamientos . . . . .	7
1.3. Cinemática de robots . . . . .	8
1.3.1. Cinemática directa . . . . .	8

1.3.2. Cinemática inversa . . . . .	10
1.3.3. Cinemática diferencial - El Jacobiano . . . . .	11
1.4. Dinámica de robots . . . . .	14
1.4.1. Energía cinética . . . . .	16
1.4.2. Energía potencial . . . . .	18
1.4.3. Ecuaciones de movimiento . . . . .	19
1.5. Dinámica de actuadores . . . . .	23
1.6. Convertidores CD-CD . . . . .	24
1.7. Selección de cables . . . . .	25
1.8. Visión artificial . . . . .	26
1.9. Metodología mecatrónica . . . . .	32
<b>2. Diseño del sistema</b>	<b>35</b>
2.1. Necesidades . . . . .	35
2.2. Requerimientos . . . . .	36
2.3. Arquitectura funcional . . . . .	38
2.4. Arquitectura física . . . . .	47
2.5. Concepto solución . . . . .	52
2.6. Concepto Final . . . . .	68
<b>3. Diseño de dominio específico</b>	<b>73</b>
3.1. Sistema robótico (S1) . . . . .	73
3.1.1. Módulo de manipulador (M1) . . . . .	73
3.1.2. Módulo de efecto (M2) . . . . .	127
3.1.3. Modelo matemático del sistema robótico . . . . .	135
3.2. Sistema de Información (S2) . . . . .	151
3.2.1. Módulo de percepción (M3) . . . . .	151
3.2.2. Módulo de comunicación (M4) . . . . .	153
3.2.3. Módulo de procesamiento (M5) . . . . .	155

3.3. Sistema energético (S3) . . . . .	156
3.3.1. Acondicionamiento . . . . .	160
3.3.2. Distribución . . . . .	160
3.4. Sistema del laboratorio (S4) . . . . .	161
3.5. Sistema estructural (S5) . . . . .	167
<b>4. Integración del sistema mecatrónico</b>	<b>169</b>
4.1. Integración de hardware . . . . .	170
4.2. Integración de software . . . . .	189
<b>5. Análisis de resultados</b>	<b>197</b>
5.1. Sistema 1: Robótico . . . . .	197
5.2. Sistema 2: Información . . . . .	198
5.3. Sistema 3: Energético . . . . .	199
5.4. Sistema 4: Laboratorio . . . . .	199
5.5. Sistema 5: Estructural . . . . .	199
<b>Conclusiones</b>	<b>201</b>
<b>Referencias</b>	<b>203</b>
<b>Apéndices</b>	<b>207</b>
<b>Apéndice 1: Árboles de decisión</b>	<b>209</b>
A. 1. Motores de CD . . . . .	209
A. 2. Servomotores . . . . .	211
A. 3. Fuentes de alimentación . . . . .	213
A. 4. Cámaras . . . . .	215

<b>Apéndice 2: Simulación cinemática del robot</b>	<b>217</b>
B. 1. Código de simulación de cinemática de robots utilizando el toolbox “Robotics” para MATLAB ® . . . . .	217
<b>Apéndice 3: Planos normalizados</b>	<b>219</b>
<b>Apéndice 4: Herramienta de selección multicriterio</b>	<b>231</b>
D. 1. Selección de concepto mediante AHP . . . . .	231
<b>Anexos</b>	<b>285</b>
<b>Anexo 1: Hojas de datos</b>	<b>287</b>
A. 1. Motor Planetario Premium HD 12V, 23RPM 4166.2oz-in . . . . .	288
A. 2. Servomotor Ez Robot 0007 . . . . .	291
A. 3. Polea 15D . . . . .	292
A. 4. Polea A 6A 3-15DF03716 . . . . .	293
A. 5. Piezas adquiridas para ensamblar el manipulador . . . . .	295
A. 6. Piezas adquiridas para ensamblar la muñeca esférica . . . . .	299
A. 7. Buje para el servo del efecto . . . . .	302
A. 8. Rodamiento axial de agujas AXK 4565 . . . . .	303
A. 9. Rodamiento radial de rodillos NU 303 . . . . .	305
A. 10. Rodamiento radial de bolas DW ER1212 2ZS . . . . .	308
A. 11. Sensor de fuerza FSR 402 . . . . .	311
A. 12. Sensor de temperatura y humedad DHT11 . . . . .	314
A. 13. Cámara ArduCAM-M-2MP . . . . .	316
A. 14. Núcleo STM32F446RE . . . . .	322
A. 15. Fuente de alimentación S-500-12 . . . . .	324
A. 16. Regulador DFR0205 . . . . .	327
A. 17. S9V11F3S5 . . . . .	330
A. 18. Driver MDD10A . . . . .	332

A. 19Driver MD20A . . . . .	337
-----------------------------	-----



---

## Índice de figuras

---

1.	Rover soviético Lunokhod 1, NASA . . . . .	XXVIII
2.	Rover Opportunity, Spirit y Curiosity, NASA . . . . .	XXIX
1.1.	Cuadro cualitativo para determinar visualmente la forma de una partícula .	2
1.2.	Gráfico que relaciona el módulo de elasticidad de los materiales contra su densidad, Ashby. . . . .	3
1.3.	Guía de selección de paso de bandas . . . . .	4
1.4.	Guía de selección para calibre de cables, Blue Sea Systems . . . . .	27
1.5.	Imagen original tomada en perspectiva . . . . .	29
1.6.	Imagen corregida por la homografía . . . . .	30
1.7.	Comparación de la imagen original contra la corregida . . . . .	30
1.8.	Diagrama de referencia para la estereopsis . . . . .	31
1.9.	Modelo V como metodología para el diseño mecatrónico(VDI 2206) . . . . .	33
2.1.	Desglose gráfico de funciones a través de un modelo FBS . . . . .	41
2.2.	Modelo IDEF0 del sistema . . . . .	44

2.3. Modelo mejorado del diagrama a bloques de flujo funcional . . . . .	46
2.4. Arquitectura física que muestra la interacción de los sistemas y módulos . . . . .	51
2.5. Modelo tridimensional del concepto 1 . . . . .	53
2.6. Acercamiento a la transmisión de movimiento del concepto 1 . . . . .	53
2.7. Modelo tridimensional del concepto 2 . . . . .	55
2.8. Modelo tridimensional del concepto 3 . . . . .	57
2.9. Acercamiento al laboratorio del concepto 3 . . . . .	57
2.10. Modelo tridimensional del concepto 4 . . . . .	59
2.11. Acercamiento al ensamblaje de la cintura del concepto 4 . . . . .	59
2.12. Modelo tridimensional del concepto 5 . . . . .	61
2.13. Modelo tridimensional del concepto 6 . . . . .	63
2.14. Jerarquía de criterios de selección de concepto . . . . .	67
2.15. Desempeño general de los conceptos . . . . .	68
2.16. Modelo tridimensional del concepto mejorado . . . . .	72
 3.1. Alcance máximo del sistema . . . . .	74
3.2. Rango de materiales elegibles para el eslabón . . . . .	78
3.3. Modelo CAD del primer eslabón. . . . .	78
3.4. Modelo CAD del segundo eslabón. . . . .	80
3.5. Cargas aplicadas al sistema . . . . .	81
3.6. Cargas aplicadas al eslabón 1. . . . .	81
3.7. Cargas aplicadas al eslabón 2. . . . .	82
3.8. Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 1 . . . . .	82
3.9. Estudio de resistencia del eslabón 1 sólido . . . . .	83
3.10. Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 2 . . . . .	83
3.11. Estudio de resistencia del eslabón 2 sólido . . . . .	84
3.12. Modelo CAD del primer eslabón con travesaños. . . . .	85
3.13. Modelo CAD del segundo eslabón con travesaños. . . . .	85

3.14. Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 1 con travesaños . . . . .	86
3.15. Estudio de resistencia del eslabón 1 con travesaños . . . . .	86
3.16. Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 2 con travesaños . . . . .	87
3.17. Estudio de resistencia del eslabón 2 con travesaños . . . . .	87
3.18. Modelo CAD del primer eslabón ranurado. . . . .	88
3.19. Modelo CAD del segundo eslabón ranurado. . . . .	89
3.20. Cargas aplicadas al sistema con eslabones ranurados . . . . .	90
3.21. Cargas aplicadas al eslabón 1 ranurado. . . . .	90
3.22. Cargas aplicadas al eslabón 2 ranurado. . . . .	91
3.23. Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 1 ranurado	91
3.24. Estudio de resistencia del eslabón 1 ranurado . . . . .	92
3.25. Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 2 ranurado	92
3.26. Estudio de resistencia del eslabón 2 ranurado . . . . .	93
3.27. Diagrama de cargas aplicadas al motor del primer eslabón . . . . .	94
3.28. Diagrama de cargas aplicadas al motor del segundo eslabón . . . . .	94
3.29. Vista de sección del ocioso con dientes . . . . .	100
3.30. Diagramas de cargas del eje 1 . . . . .	100
3.31. Plano frontal de cargas del eje 1 . . . . .	101
3.32. Plano superior de cargas del eje 1 . . . . .	102
3.33. Diagramas de cargas del eje 2 . . . . .	105
3.34. Plano frontal de cargas del eje 2 . . . . .	106
3.35. Plano superior de cargas del eje 2 . . . . .	107
3.36. Diagrama de cargas para el eje . . . . .	109
3.37. Modelo CAD de la plataforma giratoria . . . . .	113
3.38. Vistas de referencia para la plataforma giratoria . . . . .	113
3.39. Modelo CAD del cilindro base . . . . .	114
3.40. Modelo CAD de la base fija del manipulador . . . . .	114

3.41. Cilindro base acoplado a la base fija . . . . .	115
3.42. Características de la malla del análisis estático de la plataforma . . . . .	115
3.43. Análisis estático de resistencia de la plataforma giratoria . . . . .	116
3.44. Análisis estático de rigidez de la plataforma giratoria . . . . .	117
3.45. Características de la malla del análisis estático del cilindro base . . . . .	117
3.46. Análisis estático de resistencia del cilindro base . . . . .	118
3.47. Análisis estático de rigidez del cilindro base . . . . .	119
3.48. Características de la malla del análisis estático de la base fija . . . . .	119
3.49. Análisis estático de resistencia de la base fija . . . . .	120
3.50. Análisis estático de rigidez de la base fija . . . . .	121
3.51. Modelo CAD de la base del manipulador . . . . .	122
3.52. Vista explosionada del modelo CAD de la base del manipulador . . . . .	123
3.53. Vista explosionada de la estructura de carga del primer grado de libertad de la muñeca . . . . .	124
3.54. Estructura de carga ensamblada . . . . .	124
3.55. Vista explosionada de la estructura del segundo y tercer GDL . . . . .	125
3.56. Estructura del segundo y tercer GDL ensamblada . . . . .	125
3.57. Modelo CAD de la muñeca esférica . . . . .	126
3.58. Reacción máxima para el primer grado de libertad de la muñeca . . . . .	127
3.59. Reacción máxima para el segundo grado de libertad de la muñeca . . . . .	127
3.60. Elementos del mecanismo del gripper, IEEE . . . . .	128
3.61. Secuencia de movimientos del mecanismo del gripper, IEEE . . . . .	129
3.62. Ensamblaje de una falange del gripper, IEEE . . . . .	129
3.63. Agarre del gripper con una pelota esférica, IEEE . . . . .	130
3.64. Diagrama simplificado de un dedo y la muestra objetivo . . . . .	131
3.65. Diagrama simplificado de un dedo y la muestra objetivo . . . . .	132
3.66. Distribución de los dedos del efecto . . . . .	132
3.67. Mecanismo subactuado del efecto . . . . .	132
3.68. Ensamble de sensor de presión en la falange del efecto . . . . .	133

3.69. Ensamble final del efecto	134
3.70. Vista explosionada del efecto	134
3.71. Análisis geométrico del agarre del efecto con muestra de 3[mm] de diámetro	135
3.72. Análisis geométrico del agarre del efecto con muestra de 7[mm] de diámetro	135
3.73. Asignación de los marcos de referencia a las articulaciones del robot	136
3.74. Modelo tridimensional del sistema robótico desarrollado en el toolbox Robotics de Peter Corke para MATLAB®	139
3.75. Proyección del centro de la muñeca en el plano $x_0 - y_0$	140
3.76. Proyección del centro de la muñeca en el plano formado por los eslabones	141
3.77. Diagrama de comunicación entre módulos	153
3.78. Elementos básicos de la interfaz de usuario	155
3.79. Familia de procesadores ARM, ARM	156
3.80. Contenedor de la muestra	163
3.81. Superficie de medición	163
3.82. Mecanismo de desecho	164
3.83. Vista lateral del laboratorio	164
3.84. Vista explosionada del laboratorio	165
3.85. Laboratorio ensamblado	165
3.86. Características de mallado del análisis dinámico	166
3.87. Análisis dinámico de impacto de la muestra sobre la superficie de medición del laboratorio	166
3.88. Estructura modificada del banco de pruebas	167
4.1. Integración del manipulador a través de la muñeca	171
4.2. Integración del sistema robótico con el sistema estructural	172
4.3. Características del mallado del análisis estático del sistema estructural	172
4.4. Análisis de resistencia de la estructura	173
4.5. Análisis de rigidez de la estructura	174
4.6. Espacio de trabajo del robot	175

4.7.	Robot en posición de reposo . . . . .	176
4.8.	Soporte para el eslabón en posición de reposo . . . . .	177
4.9.	Soporte para el efecto final en posición de reposo . . . . .	177
4.10.	Integración del laboratorio con el sistema estructural . . . . .	178
4.11.	Integración del laboratorio con el sistema estructural . . . . .	178
4.12.	Soporte del sistema energético . . . . .	179
4.13.	Integración del sistema energético con el sistema estructural . . . . .	180
4.14.	Sensores de temperatura y humedad montados en la estructura . . . . .	180
4.15.	Pieza de acoplamiento para cámara . . . . .	181
4.16.	Cámaras montadas en la estructura . . . . .	182
4.17.	Conexión de los periféricos al controlador . . . . .	182
4.18.	Placa de circuito impreso . . . . .	184
4.19.	Diagrama esquemático de la placa de circuito impreso . . . . .	185
4.20.	Ensamblaje de PCB con microcontrolador . . . . .	186
4.21.	Soporte del sistema de información . . . . .	186
4.22.	Placas colocadas en la estructura . . . . .	187
4.23.	Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por la PC . . . . .	190
4.24.	Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por el microcontrolador . . . . .	192

---

## Índice de Tablas

---

1.	Antecedentes . . . . .	XXXIII
1.1.	Guía de selección de reguladores de tensión . . . . .	25
2.1.	Necesidades que el sistema debe cumplir . . . . .	36
2.2.	Requerimientos técnicos del sistema . . . . .	37
2.3.	Matriz de trazabilidad para la validación de requerimientos respecto a necesidades . . . . .	38
2.4.	Matriz de trazabilidad para la validación de funciones respecto a requerimientos . . . . .	42
2.5.	Matriz de trazabilidad para la validación de módulos respecto a funciones .	49
2.6.	Tabla de comparación de características contrarias para el mejoramiento del concepto elegido . . . . .	71
3.1.	Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 T6 . . . . .	77
3.2.	Masas de los elementos del brazo robótico . . . . .	110

3.3.	Parámetros de Denavit-Hartenberg . . . . .	136
3.4.	Requerimientos de comunicación . . . . .	154
3.5.	Características de los procesadores ARM, STM . . . . .	157
3.6.	Consumo energético de los componentes . . . . .	157
4.1.	Conexiones de los periféricos al controlador . . . . .	183
4.2.	Estimación de costos . . . . .	196

---

## 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>	Funtional 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

$Cr_n$	Criterio $n$ para AHP
$FSR$	Force-sensing resistor (Sensor Sensible a Fuerza)
$HD$	Heavy Duty (Alto Rendimiento)
$IEEE$	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)
$IPS$	Industrial Profile Systems (Sistemas de perfil industrial)
$MEMS$	Micro Electro-Mechanical Systems (Sistemas Micro Electro-Mecánicos)
$NASA$	National Aeronautics and Space Administration(Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)
$PC$	Polycarbonate (Policarbonato)
$PCB$	Printed Circuit Board (Tabla de circuito impreso)
$PET$	Polyethylene Terephthalate (Tereftalato de polietileno)
$PLA$	Polylactic Acid (Ácido Poliláctico)
$PVC$	Polyvinyl Chloride (Cloruro de polivinilo)
$PWM$	Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso)
$RPM$	Revoluciones por minuto
$USD$	U.S. dollar (dólar estadounidense)
$XL$	Extra Light (Extra Ligero)

### Símbolos

$\delta\theta$	Desplazamientos virtuales
$\delta W^{NC}$	Trabajo virtual asociado a las fuerzas generalizadas

$\mathbb{J}$	Tensor de inercia
$\mathcal{Q}$	Conjunto de fuerzas generalizadas
$\omega$	Vector de velocidad angular
$\phi$	Flujo magnético debido al estator
$\tau_0$	Par a rotor bloqueado
$\tau_m$	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
$J_\omega$	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
$\alpha$	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
$\omega$	Velocidad angular
$\rho$	Densidad del eslabón
$\tau$	Torque
$\theta$	Conjunto de coordenadas generalizadas
$\theta_i$	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

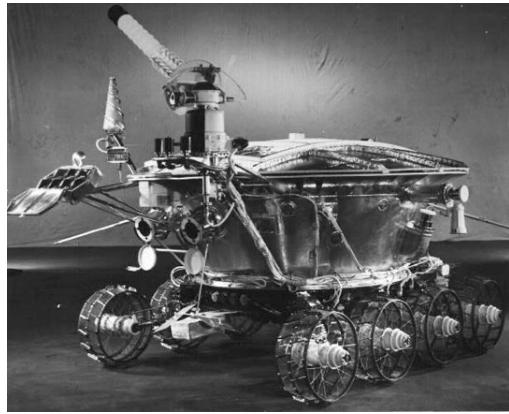


Figura 1: Rover soviético Lunokhod 1, NASA

y Spirit[2], junto al Curiosity[3] y el Mars 2020[4] 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, 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

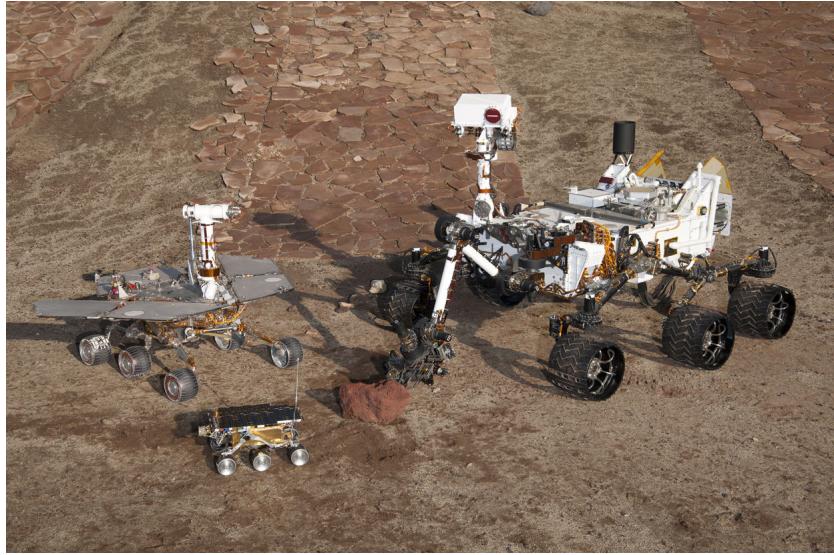


Figura 2: Rover Opportunity, Spirit y Curiosity, NASA

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 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[5] 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.[6]	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"> <li>■ Manipulador y efecto comerciales.</li> <li>■ Sistema de escaneo óptico 3D para caracterizar geométricamente las rocas (Proceso fuera de línea).</li> <li>■ Algoritmo de búsqueda de la posición adecuada para el apilamiento de la piedra (Proceso en línea)</li> </ul>	Suiza	ETH Zurich	Artículo de conferencia
2 Brazo robótico UR5[7]	Módulo de brazo robótico que se adapta al robot Husky para generar una plataforma de manipulación móvil.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Norma = ISO 10218-1, ISO 13849-1, Cat. 3, PL d.</li> <li>■ Clasificación IP = IP54</li> <li>■ Grados de libertad = 6</li> <li>■ Rango de trabajo de cada eje = 360°</li> <li>■ Carga máxima = 3 Kg</li> <li>■ Alcance = 500 mm</li> <li>■ Consumo energético = 100 W (Típicamente)</li> <li>■ Rango de temperatura de trabajo = 0°C - 50°C</li> <li>■ Peso total = 11.2 Kg</li> <li>■ Materiales = Aluminio, acero, plástico</li> </ul>	Canadá	Clearpath Robotics	Producto
3 3-Finger Adaptive Robot Gripper[8]	Gripper de 3 dedos adaptativos para manufatura avanzada e investigación robótica	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Apertura de gripper: 0 - 155 mm</li> <li>■ Peso: 2.3 kg</li> <li>■ Carga máxima recomendada: 10 kg</li> <li>■ Fuerza de agarre: 30 - 70 N</li> <li>■ Modos de agarre</li> <li>■ Puntual</li> <li>■ Ancho</li> <li>■ Tijeras</li> <li>■ Básico</li> </ul>	Canadá	Robotiq	Producto
4 Design of a smart gripper for industrial applications[9]	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"> <li>■ Fuerza (Galga extensiométrica)</li> <li>■ Torsión en la muñeca (Sensor de fuerza y torsión de 6 ejes)</li> <li>■ Temperatura</li> <li>■ Dentro del gripper (LM35)</li> <li>■ Pinzas de sujeción (DS18B20)</li> <li>■ Visión desde el gripper:</li> <li>■ Cámara (Dragonfly 2 con cabeza extendida)</li> </ul> <p>Peso de objetos a manipular: 15 kg</p> <p>Tipo de agarre del gripper:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dentro del gripper (LM35)</li> <li>■ Pinzas de sujeción (DS18B20)</li> </ul>	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).[10]	Ánálisis de propiedades del suelo in situ mediante el uso de espectroscopía infrarroja.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Rango de vis-NIR = 400 - 2500 nm</li> <li>■ Tamaño de grano de la muestra de polvo = 2mm</li> </ul>	Australia Francia	-Bruce E. Butler Laboratory -University of Sydney -UMR SAS INRA-Agrocampus Renneser Laborator	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[11], IDEF0[12] y eFFBD[13]. 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. 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 [14], una escala como esta es usada en la norma ASTM F1632 2003, como se muestra en la Figura 1.1.

### 1.2. Diseño mecánico

#### 1.2.1. 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,

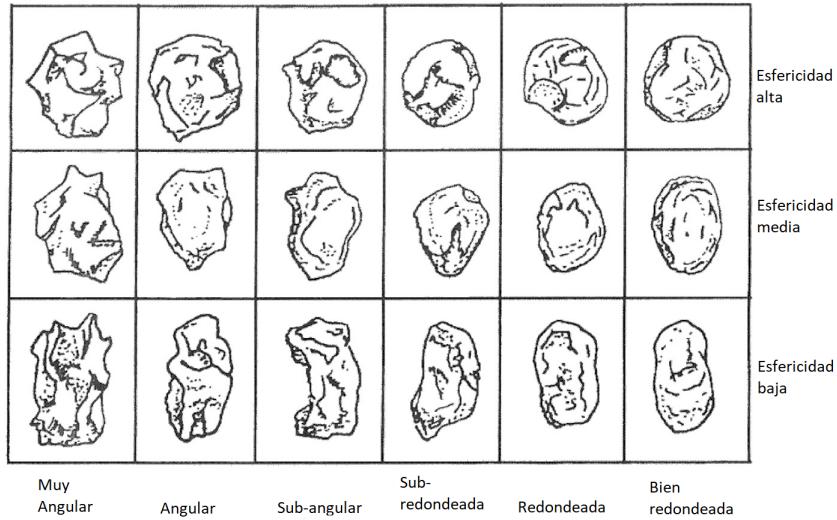


Figura 1.1: Cuadro cualitativo para determinar visualmente la forma de una partícula

por lo que se utiliza la relación entre el módulo de Young y la densidad[15], mostrada gráficamente en la Figura 1.2.

### 1.2.2. 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[16], con base en la aplicación, el tipo de motor y el tiempo de operación, calculando la potencia de diseño con la ecuación 1.3.

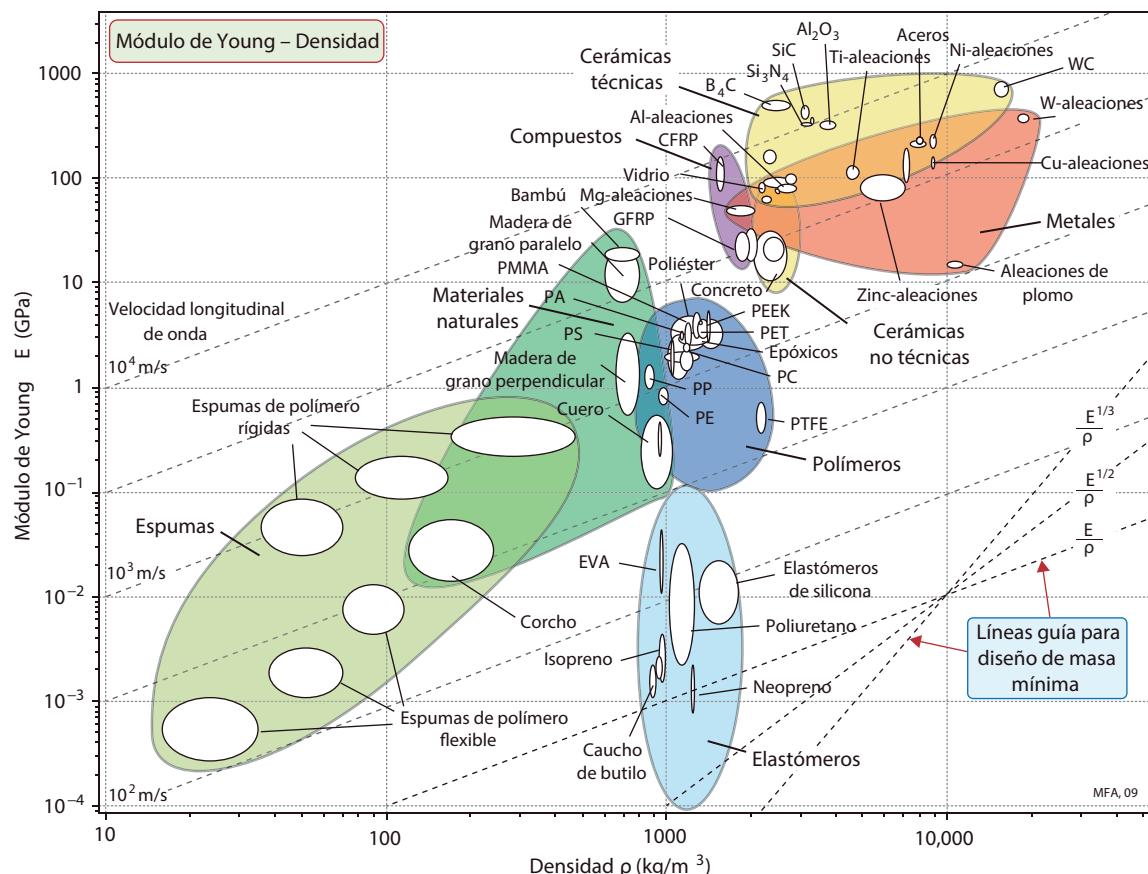


Figura 1.2: Gráfico que relaciona el módulo de elasticidad de los materiales contra su densidad, Ashby.

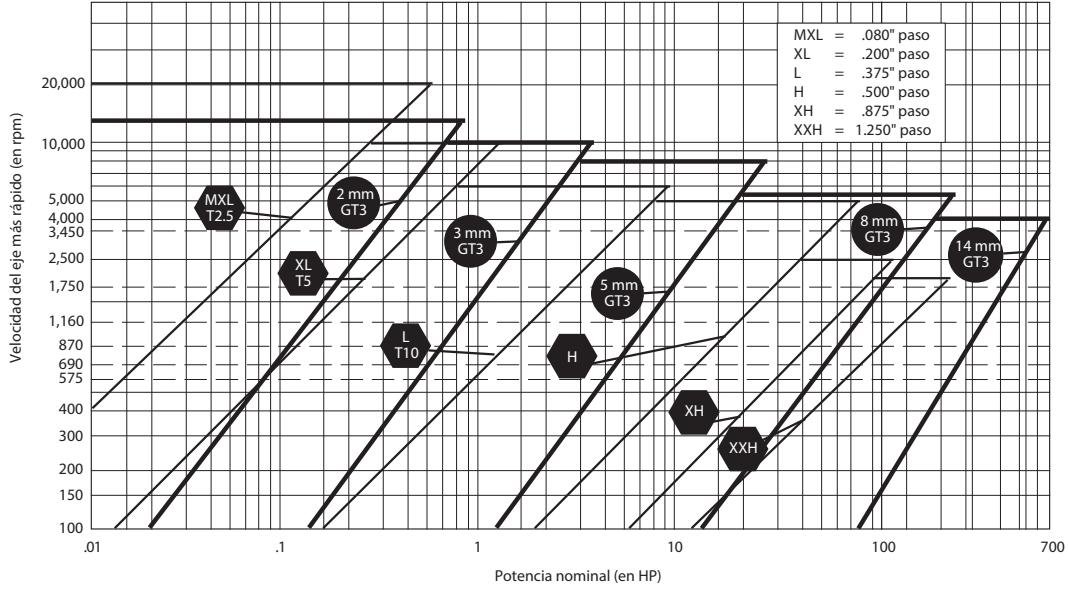


Figura 1.3: Guía de selección de paso de bandas

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

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

Posteriormente, se determina el paso requerido de la banda utilizando la guía de selección de perfil del proveedor[17], mostrada en la Figura 1.3.

Seleccionar la combinación de poleas que producen la relación de velocidad especificada, basándose en el catálogo de proveedores [18], 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:

$L_b$  = Longitud de la banda.

$C$  = Distancia entre centros.

$N_{polea}$  = Número de dientes de la polea.

$PD$  = Paso.

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

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

Potencia base nominal \* 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:

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

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

### 1.2.3. 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[16]. 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:

$F_n$  = Fuerza neta asociada al torque transmitido

$F_s$  = Fuerza flexionante

$T_{banda}$  = Torque transmitido por la banda

$r$  = 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:

$S_n$  = Límite de fatiga

$S_u$  = Esfuerzo último a la tensión

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

En donde:

$S'_n$  = Límite de fatiga modificado

$C_m$  = Factor de material

$C_{st}$  = Factor de tipo de esfuerzo

$C_R$  = Factor de confiabilidad

$C_s$  = 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:

$D$  = Diámetro mínimo del eje

$N$  = Factor de seguridad

$K_t$  = Factor de concentración de esfuerzos

$M$  = Momento flexionante

$T$  = Esfuerzo torsionante

$S_y$  = Esfuerzo de cedencia

#### 1.2.4. 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:

$C_{dinámica}$  = Capacidad de carga dinámica mínima del rodamiento

$P_d$  = Carga de diseño

$L_d$  = Vida de diseño del rodamiento, en número de revoluciones

$k_{rod} = 3.33$  para rodamientos de rodillos

### 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.

#### 1.3.1. 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 lo siguiente:

- El eje  $x_1$  es perpendicular al eje  $z_0$
- El eje  $x_1$  se interseca con el eje  $z_0$

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:

$\theta$  = Ángulo de la junta, formado entre  $x_{i-1}$  y  $x_i$  sobre el eje  $z_{i-1}$ .

$a$  = Longitud del eslabón, definido como la distancia sobre el eje  $x_i$

desde el punto de intersección de  $z_{i-1}$  con  $x_i$  hasta el origen  $O_i$ .

$d$  = 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  $x_i$ .

$\alpha$  = Ángulo de giro del eslabón, formado entre  $z_{i-1}$  y  $z_i$  sobre el eje  $x_i$ .

### 1.3.2. 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

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

$$o = \begin{bmatrix} ox \\ oy \\ oz \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

### 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:

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

### Cinemática inversa de orientación

Conociendo  $R_3^0$  se puede calcular  $\theta_1, \theta_2$  y  $\theta_3$ , permitiendo resolver la ecuación 1.21 para conocer  $\theta_4, \theta_5$  y  $\theta_6$

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

#### 1.3.3. 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 las cuales el Jacobiano pierde rango se llaman singularidades, y su identificación es importante porque:

- a) Pueden representar configuraciones para las cuales ciertas direcciones de movimiento son inalcanzables.
- b) La velocidad de movimiento de las juntas puede diverger conforme se acercan a una posición singular.
- c) 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:

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

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  $d$ .

## 1.4. Dinámica de robots

Mientras que la cinemática de robots describe el movimiento de robots sin considerar las fuerzas y torques involucrados, las ecuaciones dinámicas relacionan explícitamente estas fuerzas con el movimiento.

Si el lector desea conocer a detalle la deducción analítica de los términos tratados tanto en esta sección como en la de cinemática, en [19] se desarrolla ampliamente.

En este documento se aborda el tema de dinámica de robots a través del enfoque de Euler-Lagrange, que calcula la dinámica a través de la diferencia entre la energía cinética y potencial del sistema con la ecuación 1.28, aunque se puede encontrar fácilmente en la literatura el enfoque de Newton-Euler, que realiza este cálculo a través de las reacciones presentes en los cuerpos[19].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = \mathcal{Q} \quad (1.28)$$

En donde:

$\mathcal{L}$  = Lagrangiano del sistema

$\theta$  = Conjunto de coordenadas generalizadas

$\mathcal{Q}$  = Conjunto de fuerzas generalizadas

Las coordenadas generalizadas  $\theta$  son aquellas que describen el movimiento del robot, y tienen las siguientes características [20]:

- No necesitan ser cartesianas
- No necesitan ser inercialmente simétricas, i.e. sus momentos de inercia pueden describirse con matrices no diagonales.
- Deben ser independientes, i.e. si se fijan todas la coordenadas generalizadas excepto por una, el grado de libertad descrito por esa coordenada aún tiene un rango continuo de movimiento.
- Deben ser completas, i.e. siempre son capaces de localizar todas las partes del robot.
- Deben ser holonómicas, i.e. el número de coordenadas generalizadas es igual al número de grados de libertad del robot.

De acuerdo al desarrollo de la cinemática directa, es posible comprobar que los parámetros de Denavit-Hartenberg cumplen con estas características y, por lo tanto, sirven como un conjunto de coordenadas generalizadas[19].

Para encontrar las fuerzas generalizadas  $Q_i$  ligadas a las coordenadas generalizadas  $\theta_i$ , resulta útil utilizar el *Principio de Trabajo Virtual*, que indica que el trabajo realizado por fuerzas externas (no conservativas) correspondiente a cualquier conjunto de desplazamientos virtuales es igual a cero[19].

$$\delta W_i^{NC} = Q_i \delta_{\theta_i} = 0 \quad (1.29)$$

En donde:

$\delta W^{NC}$  = Trabajo virtual asociado a las fuerzas generalizadas  $Q$

$\delta\theta$  = Desplazamientos virtuales

Para calcular las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento del robot utilizando el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden presentado en la ecuación 1.28, es necesario expresar las energías cinética y potencial en términos de las coordenadas y fuerzas generalizadas  $\theta$  y  $Q$  respectivamente. A continuación se desarrollan las fórmulas necesarias para lograr esto.

#### 1.4.1. Energía cinética

La energía cinética de un cuerpo rígido es la suma de la energía traslacional obtenida al concentrar la masa del cuerpo en su centro de masa, y la energía rotacional alrededor del mismo. Esta suma se presenta en la ecuación 1.30.

$$K = \frac{1}{2}mv^Tv + \frac{1}{2}\omega^T\mathcal{J}\omega \quad (1.30)$$

En donde:

$K$  = Energía cinética

$m$  = Masa total

$v$  = Vector de velocidad lineal

$\omega$  = Vector de velocidad angular

$\mathcal{J}$  = Tensor de inercia

El tensor de inercia  $\mathcal{J}$  es una matriz simétrica de  $3 \times 3$  expresado en el marco inercial del objeto, por lo depende de la configuración del mismo. Es por esto que se utiliza el tensor de inercia  $I$  expresado en el marco del cuerpo, ubicado en el centro de masa del mismo, por lo que es constante y no depende de la configuración. La ecuación 1.31 relaciona  $\mathcal{J}$  con  $I$  de la forma a través de una matriz de rotación  $R$  como sigue

$$\mathcal{I} = RIR^T \quad (1.31)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

En la literatura existen muchos recursos para calcular el tensor de inercia  $I$  sin embargo, para que el lector pueda aprovechar esto al máximo, es recomendable diseñar piezas que tengan geometrías sencillas, pues la simetría de estas ayuda a simplificar el cálculo, debido a que la distribución uniforme de masa provoca que los elementos fuera de la diagonal principal, conocidos como **Momentos cruzados de inercia** se hagan cero, quedando solamente por calcular los **Momentos Principales de Inercia**  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  e  $I_{zz}$ .

Para conocer los vectores de velocidad  $v$  y  $\omega$  se puede utilizar el Jacobiano, recordando que este se calcula con base en los parámetros de Denavit-Hartenberg, que son utilizados como coordenadas generalizadas.

En la ecuación 1.22 los componentes de las filas superiores representan las velocidades lineales, mientras que las inferiores representan velocidades angulares, quedando

$$J = \begin{bmatrix} J_{v_i} \\ J_{\omega_i} \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

Para un manipulador con  $n$  elementos, las velocidades se calculan de la siguiente manera:

$$v_i = J_{v_i}(\theta)\dot{\theta} \quad \omega_i = J_{\omega_i}(\theta)\dot{\theta} \quad (1.34)$$

Vale la pena destacar que para calcular las velocidades  $J_v$  y  $J_\omega$  del  $i$ -ésimo eslabón, solo se toman en cuenta las velocidades que van de los eslabones 1 hasta  $i$ , mientras que los elementos del jacobiano relacionados con velocidades de eslabones posteriores toman un valor de 0. Además, se utiliza la distancia al centro de masa  $l_{cm}$  en lugar de la longitud total del eslabón  $l$ .

Asumiendo que el  $i$ -ésimo eslabón tiene una masa  $m_i$  y un tensor de inercia  $I_i$ , la energía cinética del manipulador es igual a

$$K = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(\theta)^T J_{v_i}(\theta) + J_{\omega_i}(\theta)^T R_i(\theta) I_i R_i^T J_{\omega_i}(\theta)] \dot{\theta} \quad (1.35)$$

Lo que es igual a

$$K = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T D(\theta) \dot{\theta} \quad (1.36)$$

En donde  $D(\theta)$  es una matriz simétrica definida positiva llamada **Matriz de inercia**, lo que indica que depende de la configuración del robot.

#### 1.4.2. Energía potencial

En la mayoría de robots, en los que se consideran cuerpos rígidos, la única fuente de energía potencial es la gravedad, aunque puede darse el caso de robots con elementos flexibles, tales como resortes, que también sean una fuente de energía potencial. Sin embargo, este no es el caso del manipulador presentado en este documento, por lo que la energía potencial se calcula concentrando toda la masa en su centro de masa, quedando lo siguiente

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n g^T r_{ci} m_i \quad (1.37)$$

En donde:

$g$  = Vector de dirección de la gravedad en el marco inercial

$r_{ci}$  = Coordenadas del centro de masa

### 1.4.3. Ecuaciones de movimiento

El desarrollo de las ecuaciones de movimiento con las ecuaciones de Euler-Lagrange orientadas a sistemas mecánicos requiere que se cumpla lo siguiente:

1. La energía cinética es una función cuadrática del vector  $\dot{\theta}$  de la forma

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n d_{ij}(\theta) \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j := \frac{1}{2} \dot{\theta}^T D(\theta) \dot{\theta} \quad (1.38)$$

En donde  $d_{ij}$  es el  $ij$ -ésimo elemento de la matriz de inercia de  $n \times n$   $D(\theta)$  de la forma

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}$$

2. La energía potencial  $P = P(\theta)$  es independiente de  $\dot{\theta}$ , lo cual es fácilmente demostrable con la ecuación 1.37, en la que el único término está asociado al centro de masa.

El Lagrangiano se puede calcular como

$$\mathcal{L} = K - P = \frac{1}{2} \sum_{ij} d_{ij}(\theta) \quad (1.39)$$

Sustituyendo 1.39 en 1.28 queda

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial P}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial K}{\partial \theta} + \frac{\partial P}{\partial \theta} = \Omega \quad (1.40)$$

De la condición 2 sabemos que

$$\frac{\partial P}{\partial \dot{\theta}} = 0$$

Por lo que la ecuación de la dinámica para sistemas mecánicos queda como se indica en la ecuación 1.41.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial K}{\partial \theta} + \frac{\partial P}{\partial \theta} = \Omega \quad (1.41)$$

Para obtener el primer término de la ecuación 1.41, se deriva parcialmente respecto a la velocidad del GDL de interés  $k$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_k} = \sum_j d_{kj} \dot{\theta}_j \quad (1.42)$$

Derivando 1.42 respecto del tiempo, aplicando la regla de la cadena y recordando que

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$$

se tiene

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_k} &= \sum_j d_{kj} \ddot{\theta}_j + \sum_j \frac{d}{dt} d_{kj} \dot{\theta}_j \\ &= \sum_j d_{kj} \ddot{\theta}_j + \sum_{i,j} \frac{\partial d_{kj}}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j \end{aligned} \quad (1.43)$$

Para el segundo término de la ecuación 1.41, se tiene

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial d_{ij}}{\partial \theta_k} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j - \frac{\partial P}{\partial \theta_k} \quad (1.44)$$

Agrupando términos semejantes de 1.43 y 1.44

$$\sum_j d_{kj} \ddot{\theta}_j + \sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial \theta_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial \theta_k} \right\} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j - \frac{\partial P}{\partial \theta_k} = \Omega_k \quad (1.45)$$

Intercambiando el orden de adición y aprovechando la simetría

$$\sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial \theta_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial \theta_k} \right\} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j = \sum_{i,j} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial \theta_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial \theta_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial \theta_k} \right\} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j \quad (1.46)$$

En la ecuación 1.46, los términos que multiplican a  $\dot{\theta}_i \dot{\theta}_j$  son conocidos como **Símbolos de Christoffel**, y se identifican por  $c_{ijk}$ .

Como el subíndice indica, los símbolos de Christoffel son componentes de una matriz de dimensiones  $n \times n \times n$  que se deriva directamente de la matriz de inercia  $D(\theta)$  y, por lo tanto, depende solo de la configuración del robot, como se muestra en la ecuación 1.47.

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial \theta_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial \theta_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial \theta_k} \right\} \quad (1.47)$$

Nótese que en el cálculo de  $c_{ijk}$ , los subíndices de las derivadas parciales se invierten en los dos primeros términos.

Debido a que se derivan de la matriz de inercia  $D$  y, aprovechando la simetría de la misma, al fijar  $k$  se tiene que

$$c_{ijk} = c_{jik}$$

Lo cual significa que es necesario calcular solo la mitad de los símbolos de Christoffel para conocerlos todos, reduciendo el esfuerzo requerido para realizar el desarrollo matemático.

Finalmente, se define

$$\phi_k = \frac{\partial P}{\partial \theta_k} \quad (1.48)$$

Con todos los términos calculados, las ecuaciones dinámicas quedan

$$\sum_i d_{kj}(\theta) \ddot{\theta}_j + \sum_{ij} c_{ijk}(\theta) \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j + \phi_k(\theta) = \Omega_k, \quad k = 1, \dots, n \quad (1.49)$$

De 1.49 se pueden reconocer tres tipos de términos, siendo los primeros los relacionados con la segunda derivada de las coordenadas generalizadas, i.e. **aceleraciones**. Los segundos términos son funciones cuadráticas de la primera derivada de  $\theta$ , cuyos coeficientes pueden o no depender de  $\theta$ . Estos términos se subdividen en dos tipos: los términos **centrífugos**, fácilmente identificables por tener un producto del tipo  $\theta_i^2$ , y los términos de **Coriolis**, los cuales implican el producto de las velocidades de dos eslabones distintos.

Finalmente, el último tipo de los términos es aquel que se refiere a la energía potencial del sistema.

Estos términos son más fáciles de identificar en la forma matricial de la ecuación 1.41, para lo cual es necesario calcular la matriz  $C(\theta, \dot{\theta})$  de  $n \times n$  utilizando los términos de Christoffel, sumando todos los  $jk$ -ésimos componentes que coinciden con el subíndice  $i$  como se muestra en la ecuación 1.50.

$$C_{kj} = \sum_{i=1}^n c_{ijk}(\theta) \dot{\theta} \quad (1.50)$$

Una vez que se ha calculado la matriz  $C$ , es posible construir la forma matricial de las ecuaciones de Euler-Lagrange, mostrada en la ecuación 1.51.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = Q \quad (1.51)$$

En donde:

$D(\theta)$  = Matriz de inercia del sistema

$C(\theta, \dot{\theta})$  = Vector de fuerzas/pares centrífugas y de Coriolis

$g(\theta)$  = Vector de fuerzas/pares gravitacionales y potencial

## 1.5. Dinámica de actuadores

En un motor de CD, el par generado es proporcional a la corriente de armadura y a la fuerza del campo magnético, como se muestra en la ecuación.

$$\tau_m = K_1 \phi i_a \quad (1.52)$$

En donde:

$\tau_m$  = Par generado

$K_1$  = Constante física

$\phi$  = Flujo magnético debido al estator

$i_a$  = Corriente de armadura

En un motor de imanes permanentes, se considera que el campo magnético  $\phi$  es constante, por lo que  $K_1\phi$  es igual a una constante de par motor  $K_m$ , como lo indica la ecuación

$$\tau_m = K_m i_a \quad (1.53)$$

Cuando el rotor se bloquea, el par del rotor a un voltaje determinado  $V_r$  se calcula como sigue

$$K_m = \frac{R_a \tau_0}{V_r} \quad (1.54)$$

En donde:

$\tau_0$  = Par a rotor bloqueado

$R_a$  = Resistencia de armadura

Pero

$$V_r = R i_a$$

Entonces

$$K_m = \frac{\tau_0}{i_a} \quad (1.55)$$

## 1.6. 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 conmutados.

Mientras que los reguladores lineales trabajan en su región activa, los reguladores conmutados se basan en interruptores semiconductores de electrónica de potencia que trabajan

Tabla 1.1: Guía de selección de reguladores de tensión

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

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.

## 1.7. 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 1.4, desarrollada por Enerdrive[\[22\]](#) 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.
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.

## 1.8. 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.

Dos técnicas útiles para obtener esto son la visión estereoscópica, conocida como estereopsis, y la corrección de perspectiva, conocida como homografía.

### Homografía

Una homografía es una matriz que mapea las coordenadas de una imagen tomada en una perspectiva que no es normal a la superficie que se desea observar a una imagen no distorsionada con una perspectiva normal.

$$\tilde{P}_2 \simeq H_m \tilde{P}_1 \quad (1.56)$$

2. Tipo de circuito		1. Corriente en CD															
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 del cable en metros	0-6 m	0-2 m															
	6-9 m	2-3 m															
	9-15 m	3-4.5 m															
	15-19 m	4.5-6 m															
	19-24 m	6-7.5 m															
	24-30 m	7.5-9 m															
	30-40 m	9-12 m															
	40-51 m	12-15 m															
	51-61 m	15-18 m															
	18-21 m																
	21-24 m																
	24-27 m																
	27-30 m																
	30-33 m																
	33-37 m																
	37-40 m																

Estándar		Unidad															
AWG	0000	000	00	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16				
Diámetro (mm)	11.68	10.40	9.27	8.25	7.35	6.54	5.19	4.11	3.26	2.59	2.05	1.63	1.29				
Sección transversal (mm) <sup>2</sup>	107.1	84.9	67.5	53.5	42.4	33.6	21.2	13.3	8.4	5.3	3.3	2.1	1.3				
Código de color																	

Figura 1.4: Guía de selección para calibre de cables, Blue Sea Systems

En donde:

$$\tilde{P}_1 = \text{Imagen original}$$

$$\tilde{P}_2 = \text{Imagen corregida}$$

$$H_m = \text{Matriz de homografía}$$

Por ejemplo, suponga que toma una foto de una catedral a nivel del suelo, lo cual resulta en una imagen distorsionada por la perspectiva, mostrada en la Figura 1.5.

Para corregirla, se seleccionan cuatro puntos de la imagen, como se muestra en el trapecio morado de coordenadas  $X_i, Y_i$  de la imagen. Este trapecio se mapea al rectángulo rojo con vértices en las coordenadas  $x_i, y_i$ , resolviendo el sistema de ecuaciones para obtener la matriz de homografía[23].

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 \\ X_2 & Y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -x_2Y_2 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & 1 & -y_2X_2 & -y_2Y_2 \\ X_3 & Y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3X_3 & -x_3Y_3 \\ 0 & 0 & 0 & X_3 & Y_3 & 1 & -y_3X_3 & -y_3Y_3 \\ X_4 & Y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4X_4 & -x_4Y_4 \\ 0 & 0 & 0 & X_4 & Y_4 & 1 & -y_4X_4 & -y_4Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix}$$

La matriz  $H_m$  es de la forma<sup>1</sup>

$$H_m = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix}$$

---

<sup>1</sup>El valor de  $h_{33}$  se fija igual a 1 para que se pueda resolver el sistema de ecuaciones

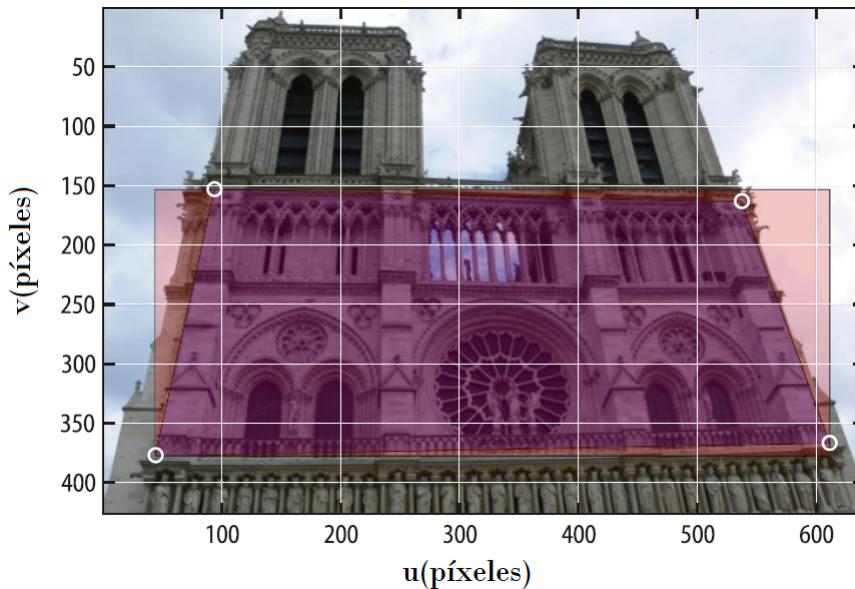


Figura 1.5: Imagen original tomada en perspectiva

## Estereopsis

La visión estereoscópica implica tomar dos imágenes de un mismo objeto desde 2 puntos de vista distintos para estimar la distancia que hay entre las cámaras y el objeto. Normalmente se colocan dos cámaras iguales con sus ejes ópticos paralelos separados por una distancia conocida referida como línea base de las cámaras[24].

Con ayuda del diagrama mostrado en la Figura 1.8, se calcula la profundidad como sigue:

Por triángulos semejantes

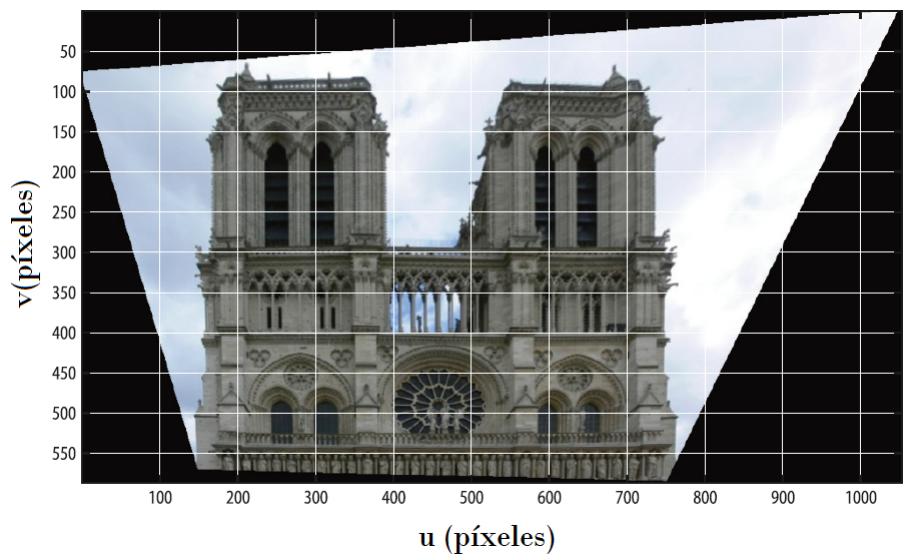


Figura 1.6: Imagen corregida por la homografía

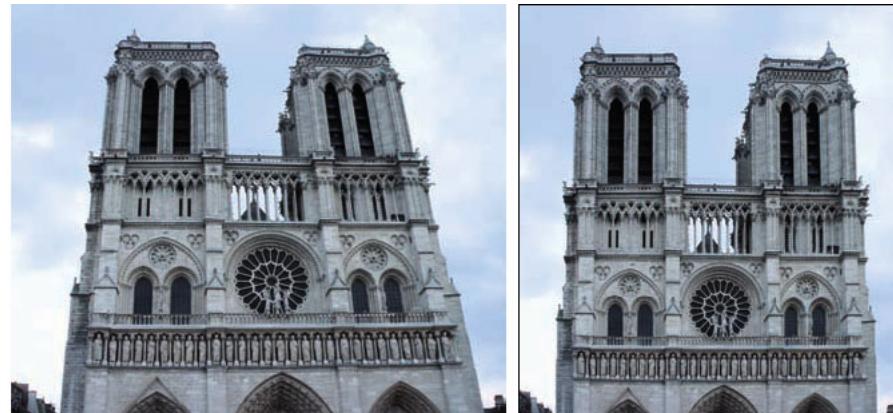


Figura 1.7: Comparación de la imagen original contra la corregida

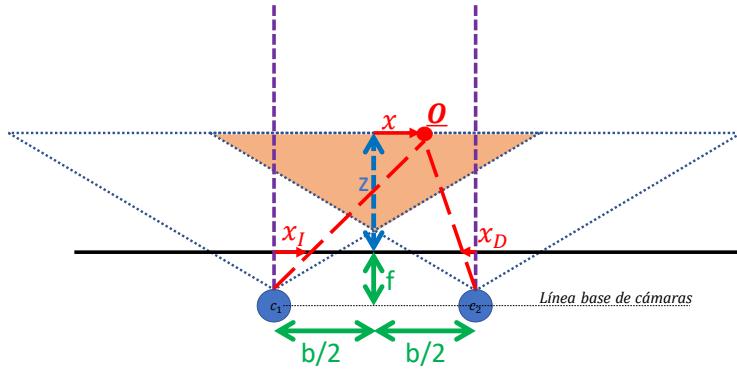


Figura 1.8: Diagrama de referencia para la estereopsis

$$\frac{x_I}{f} = \frac{\frac{b}{2} + x}{z}$$

$$x_I = f \left( \frac{\frac{b}{2} + x}{z} \right)$$

$$\frac{-x_D}{f} = \frac{\frac{b}{2} - x}{z}$$

$$-x_D = f \left( \frac{\frac{b}{2} - x}{z} \right)$$

Luego

$$x_I - x_D = \frac{fb}{z}$$

$$z = \frac{fb}{x_I - x_D}$$

En donde:

$x_I$  = # de pixeles desde el origen hasta el centro del objeto en la imagen izquierda

$x_D$  = # de pixeles desde el origen hasta el centro del objeto en la imagen derecha

$z$  = Profundidad

$b$  = Distancia entre cámaras

$x$  = Distancia real

## 1.9. Metodología mecatrónica

La metodología de diseño mecatrónico que se utiliza es el modelo V, descrito en el estándar VDI 2206[25], 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

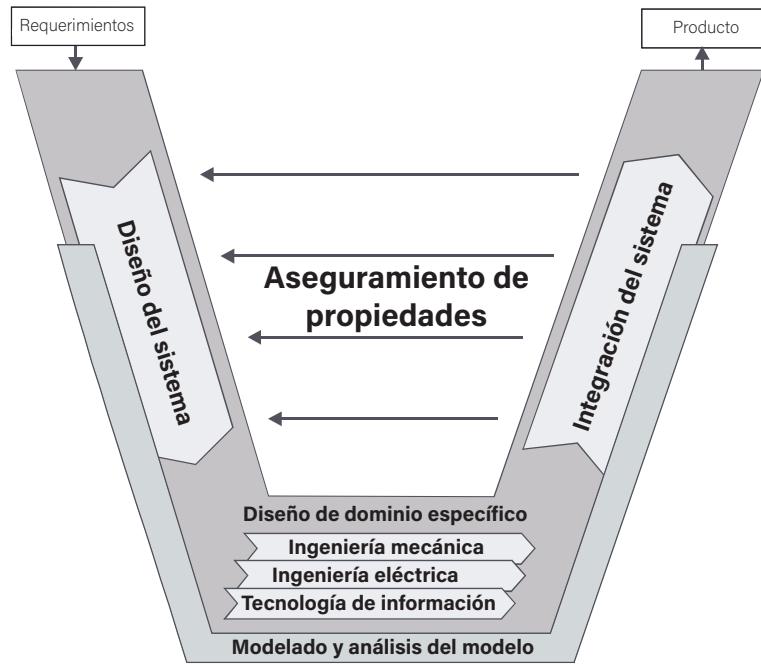


Figura 1.9: Modelo V como metodología para el diseño mecatrónico(VDI 2206)

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.



---

# 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. Necesidades

Para dar comienzo con el diseño del sistema, es preciso determinar cuales son las **necesidades**[26] 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.

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.

## 2.2. Requerimientos

Una vez que se han establecido las necesidades que el sistema debe satisfacer, es posible establecer los **requerimientos**[26] 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.

### Validación de requerimientos

Para evaluar si los requerimientos cubren todas las necesidades establecidas, se utiliza la matriz de trazabilidad[26].

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

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

tomar en cuenta las características físicas de la misma, como son, masa(R1), diámetro (R2), esfericidad[14](R3), angularidad[14](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).

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		✓								✓

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).

### 2.3. 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

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[11] (*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.

Función general: Analizar muestras *in situ*.

f1 Manipular la muestra: Trasladar la muestra de su lugar de origen al laboratorio.

f1.1 Posicionar brazo: Cambiar la posición del efecto.

f1.2 Orientar efecto: Cambiar la orientación del efecto.

f1.3 Tomar/dejar muestra: Activar y desactivar el efecto para sujetar la muestra.

f1.4 Deshacerse de la muestra: Desechar la muestra después de ser analizada.

f2 Administrar energía: Asegurar que cada elemento obtenga la energía necesaria para realizar su tarea.

f2.1 Distribuir energía: Suministrar la energía que cada elemento requiere.

f2.2 Acondicionar energía: Adaptar la energía suministrada a la que los elementos necesiten.

f3 Analizar información: Obtener datos y, a partir de estos, tomar decisiones.

f3.1 Determinar modos de operación: Decidir las acciones que el sistema realizará de acuerdo a las condiciones de trabajo.

f3.2 Comunicar: Intercambiar información.

f3.2.1 Comunicar internamente: Intercambiar información entre los elementos que conforman el sistema.

f3.2.2 Comunicar externamente: Intercambiar la información con los elementos externos al sistema.

f3.2.2.1 Intercambiar información: Transmitir información al usuario y recibir órdenes.

f3.2.2.2 Interactuar con *rover*: Intercambiar información con el vehículo de exploración.

f3.3 Caracterizar la muestra: Obtener información de la muestra de interés.

f3.4 Conocer condiciones del entorno: Obtener información del ambiente.

## 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).

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

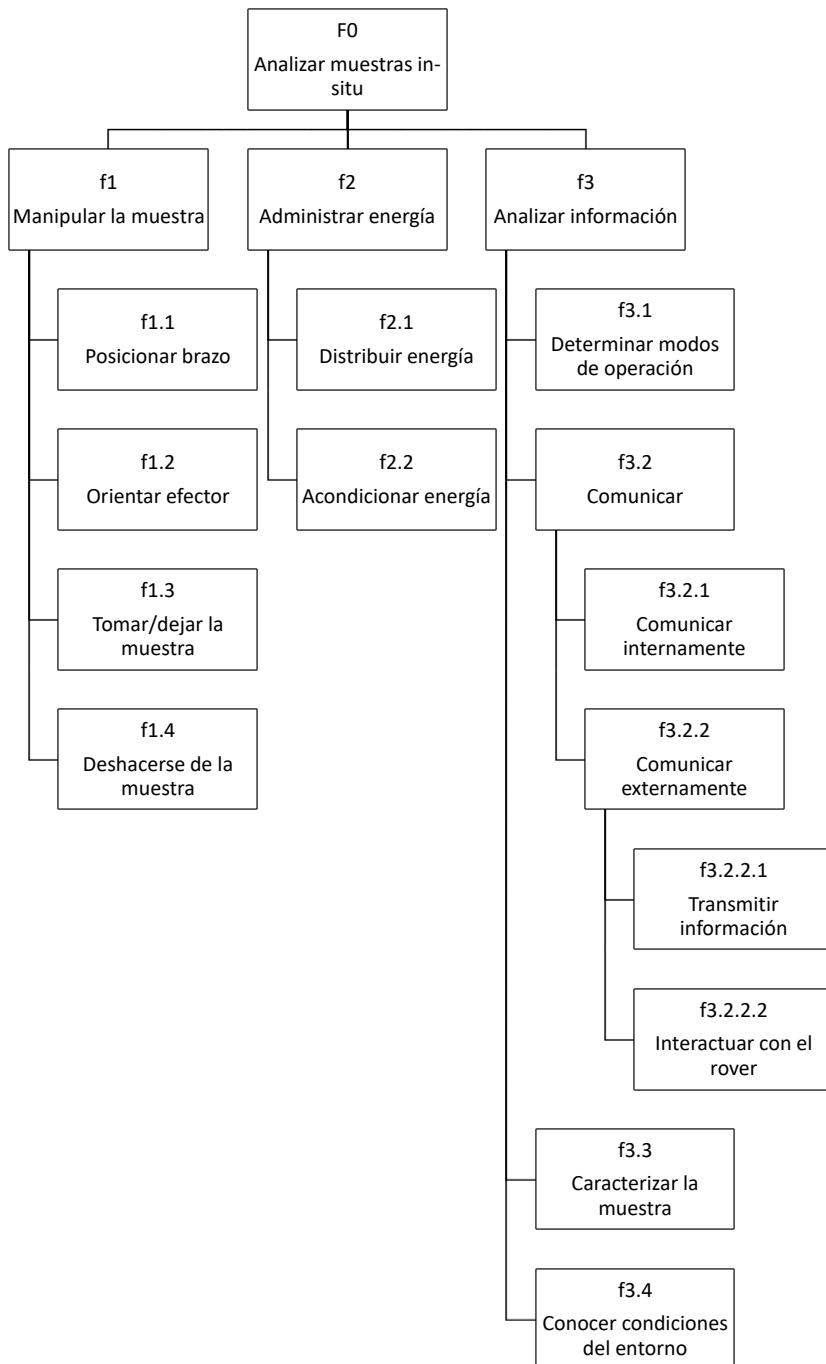


Figura 2.1: Desglose gráfico de funciones a través de un modelo FBS

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										✓	✓	✓	

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[12]. 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.

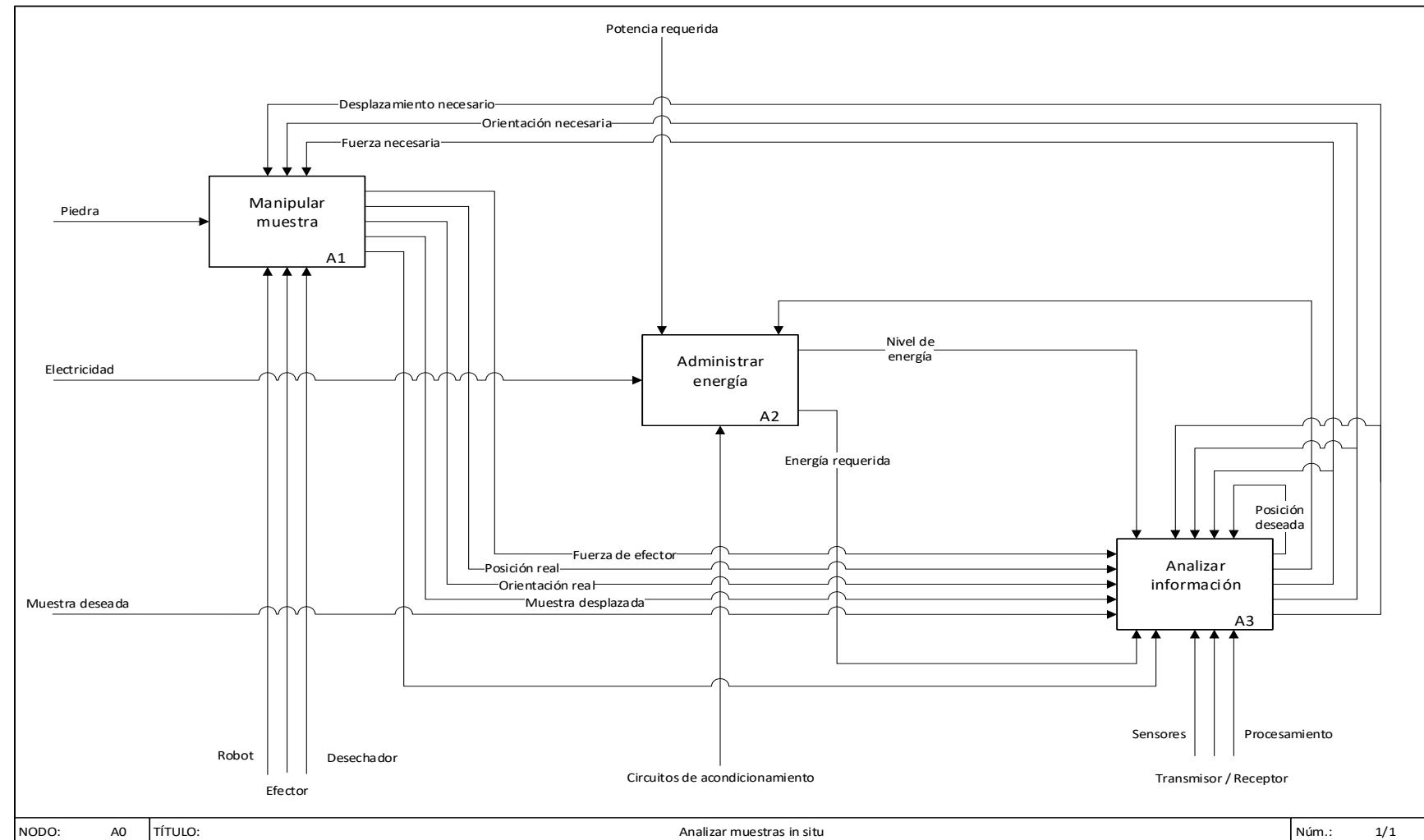


Figura 2.2: Modelo IDEF0 del sistema

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)[13]. 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.

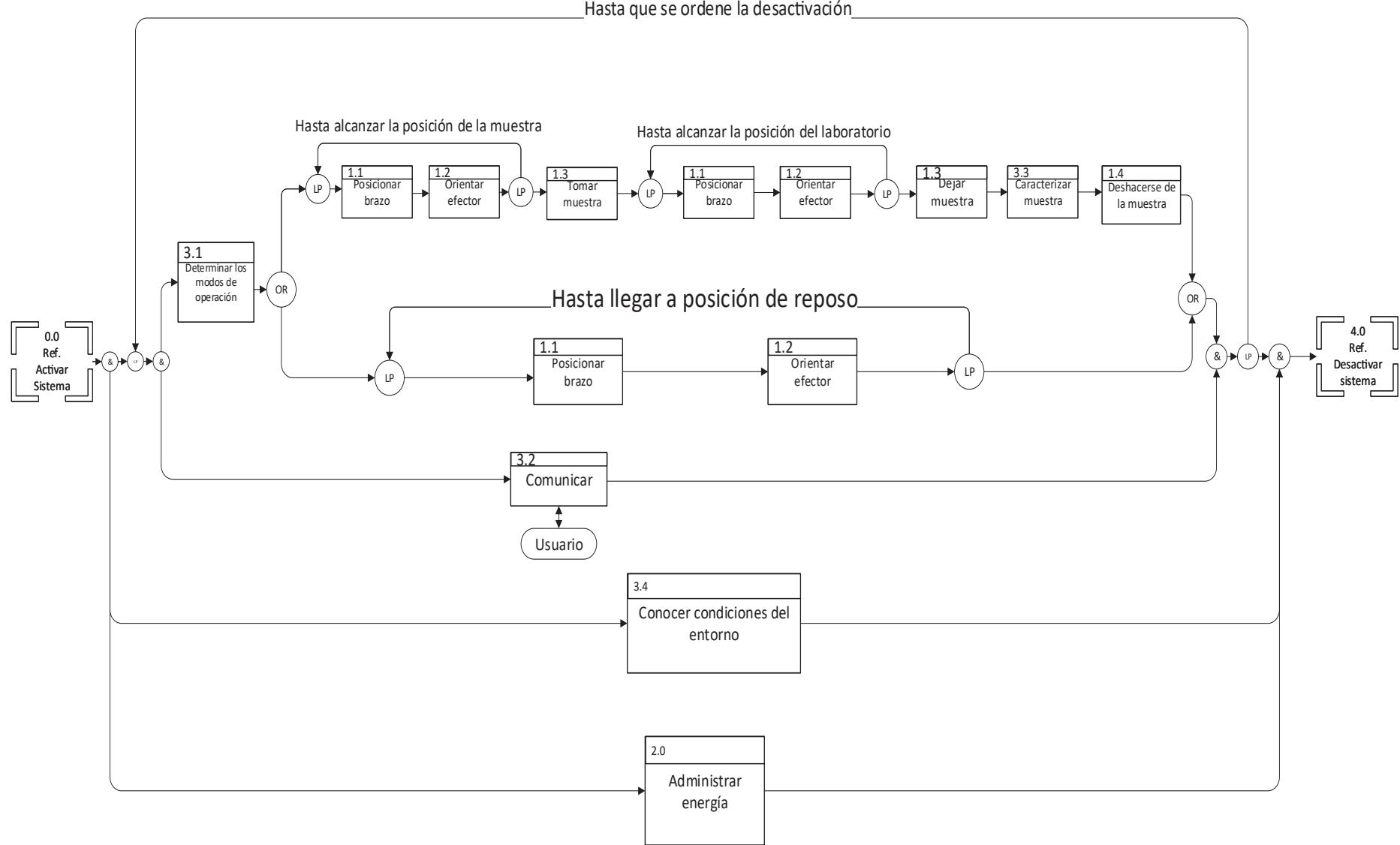


Figura 2.3: Modelo mejorado del diagrama a bloques de flujo funcional

## **2.4. 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.

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	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

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*[27], de manera que resulte más sencillo analizar la interacción entre estos para dar 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 desechar, que devuelve la muestra al ambiente

una vez que ha sido analizada.

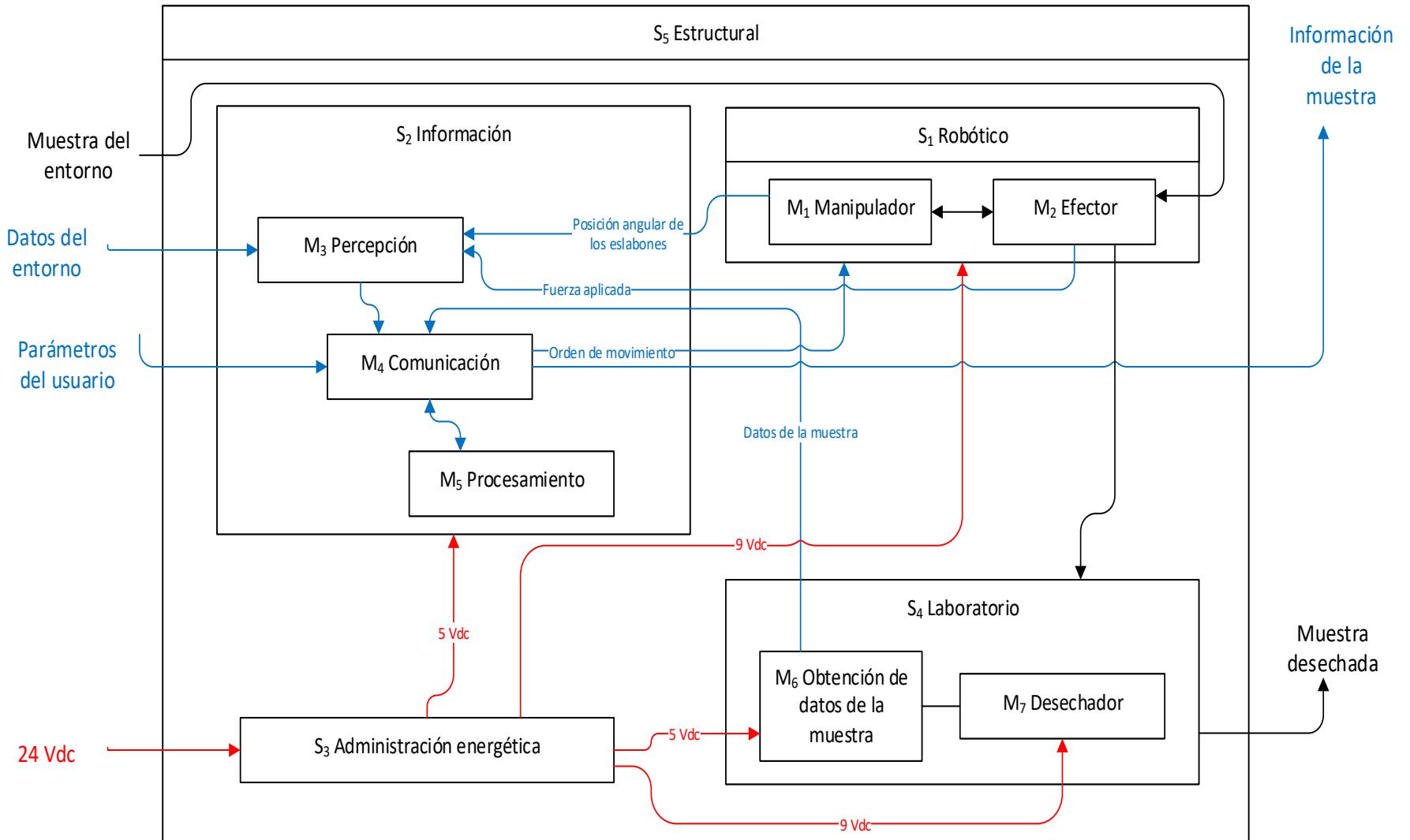


Figura 2.4: Arquitectura física que muestra la interacción de los sistemas y módulos

## 2.5. 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.

Las Figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 muestran los modelos tridimensionales de las soluciones propuestas.

**Nota:** Los modelos mostrados en la Figura 2.5, 2.8, 2.10, 2.12 y 2.13 contemplan un recubrimiento protector a los componentes internos (tales como actuadores y transmisiones, entre otros), con el fin de que los aíslle de las condiciones hostiles del ambiente, sin reducir su movilidad.

Los elementos que son comunes a todos los conceptos son los siguientes:

S2 Información

M3 Percepción

- Cámaras colocadas en la estructura del banco de pruebas.

M4 Comunicación

- Comunicación realizada por medio de cables.

S3 Administración energética

- La generación de energía se realiza mediante una batería recargable, ubicada en la estructura.

S5 Estructural

- Similar a la estructura del rover.

■ Concepto 1

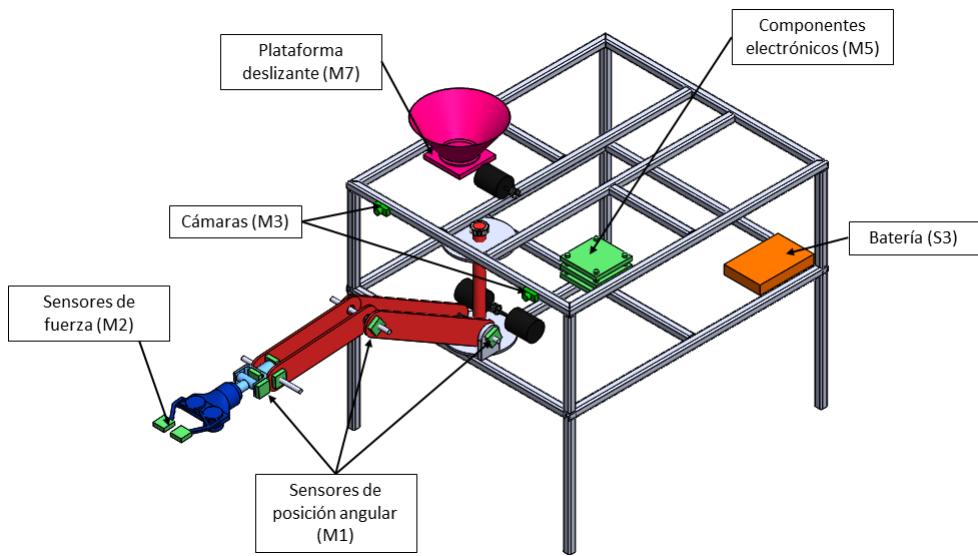


Figura 2.5: Modelo tridimensional del concepto 1

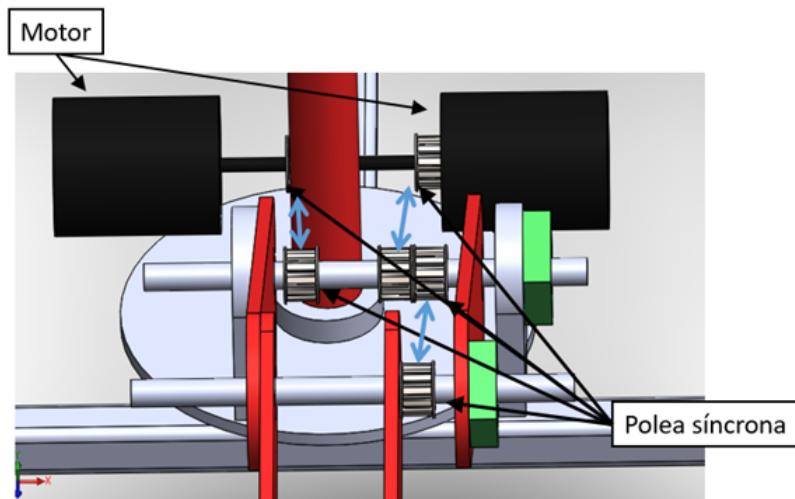


Figura 2.6: Acercamiento a la transmisión de movimiento del concepto 1

## S1 Robótico

### M1 Manipulador

- Brazo de codo planar con los motores de los primeros dos eslabones en la base de la cadera.
- Transmisión de movimiento por medio de bandas síncronas.
- La estructura del brazo está conformada por dos segmentos planos paralelos.
- En la cintura (primer GDL) un motor en la parte superior de la estructura transmite movimiento mediante una banda síncrona a un eje vertical que mueve una plataforma donde se colocan los demás motores y sus transmisiones.
- Los sensores de posición angular se encuentran acoplados al eje de movimiento y no al motor.

### M2 Efector

- El efector es un gripper de 2 dedos a modo de pinza.

## S2 Información

### M5 Procesamiento

- Las tarjetas de electrónica están dispuestas una sobre otra cerca del centro de la estructura.

## S4 Laboratorio

- El laboratorio se ubica sobre la estructura, del lado derecho de la misma.

### M6 Obtención de datos de la muestra

- El cono trunco guía la muestra hacia el área de obtención de datos.

### M7 Desechador

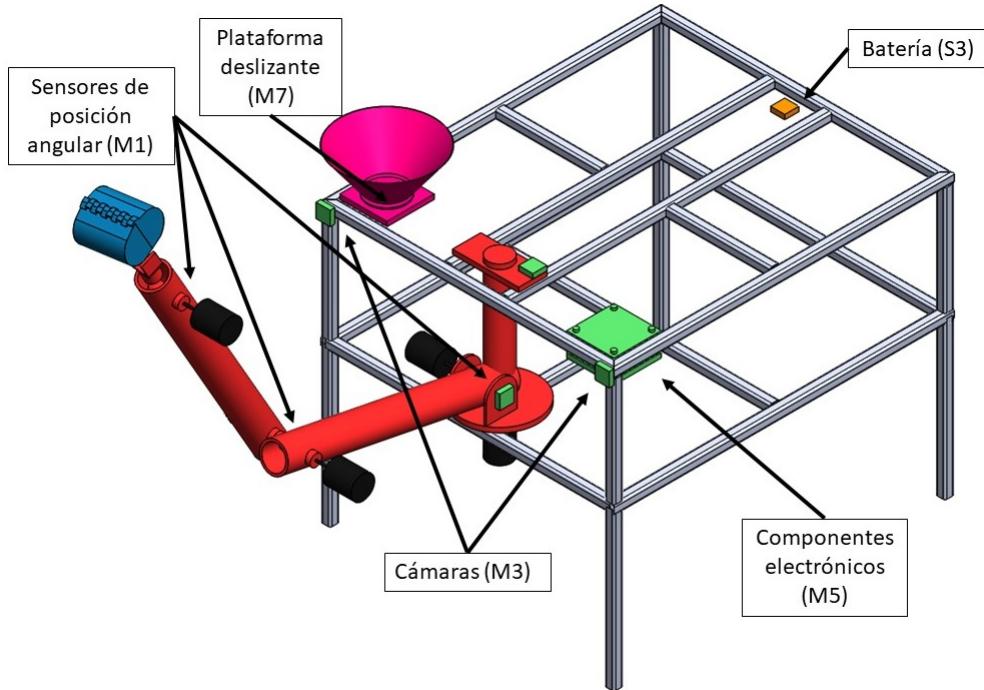


Figura 2.7: Modelo tridimensional del concepto 2

- El cilindro del área de obtención se mueve lateralmente para dejar caer la piedra, mientras el cono trunco se queda fijo.

■ Concepto 2

S1 Robótico

M1 Manipulador

- Brazo de codo planar de eslabones tubulares.
- Motores acoplados directamente en cada junta.
- 2 GDL en la cintura y uno más en el codo.
- Muñeca esférica de 3 GDL.

- En la cintura (primer GDL) un motor en la parte inferior de la estructura mueve un eje rotatorio sobre el que existe una plataforma en la que se coloca el motor que mueve el primer eslabón.
- Los sensores de posición angular se encuentran ubicados directamente en el acoplamiento del eslabón con el motor.

#### M2 Efector

- Efector similar a los presentes en las excavadoras.

#### S2 Información

#### M5 Procesamiento

- Las tarjetas de electrónica están dispuestas una sobre otra en la esquina superior izquierda (vista superior).

#### S4 Laboratorio

- El laboratorio se ubica sobre la estructura, del lado derecho y hasta el frente de la misma.

#### M6 Obtención de datos de la muestra

- El cono trunco guía la muestra hacia el área de obtención de datos.

#### M7 Desechador

- El cilindro del área de obtención se mueve lateralmente para dejar caer la piedra, mientras el cono trunco se queda fijo.

### ■ Concepto 3

#### S1 Robótico

#### M1 Manipulador

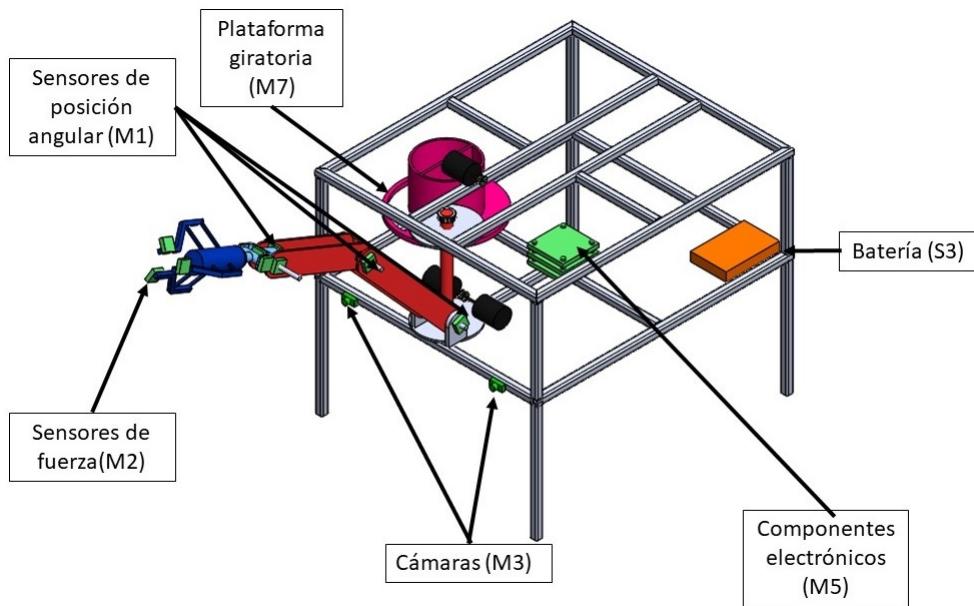


Figura 2.8: Modelo tridimensional del concepto 3

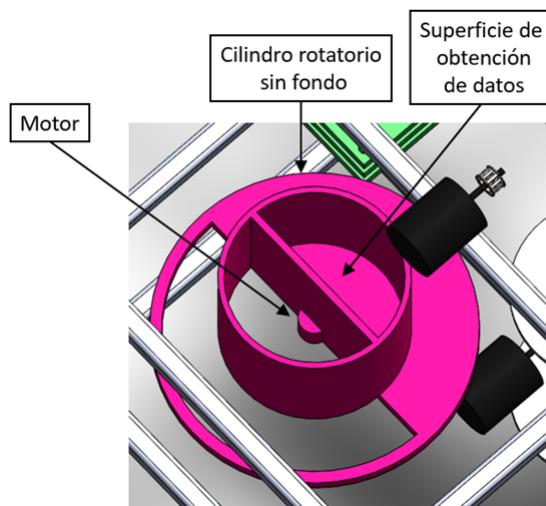


Figura 2.9: Acercamiento al laboratorio del concepto 3

- Brazo de codo planar con los motores de los primeros dos eslabones en la base de la cadera.
- Transmisión de movimiento por medio de bandas síncronas.
- La estructura del brazo está conformada por dos segmentos planos paralelos.
- En la cintura (primer GDL) un motor en la parte superior de la estructura transmite movimiento mediante una banda síncrona a un eje vertical que mueve una plataforma donde se colocan los demás motores y sus transmisiones.
- Los sensores de posición angular se encuentran acoplados al eje de movimiento y no al motor.

#### M2 Efector

- Un gripper de 3 dedos.

#### S2 Información

#### M5 Procesamiento

- Las tarjetas de electrónica están dispuestas una sobre otra cerca del centro de la estructura.

#### S4 Laboratorio

- El laboratorio se ubica dentro de la estructura, del lado derecho de la misma.

#### M6 Obtención de datos de la muestra

- El laboratorio es un cilindro rotatorio sin fondo. Debajo existe una superficie donde se colocan los sensores y un hueco.

#### M7 Desechador

- Al girar 180°, el cilindro deja caer la muestra.

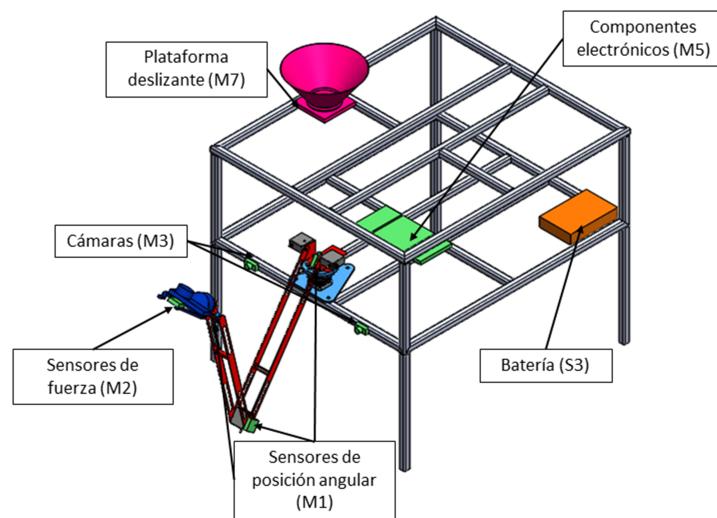


Figura 2.10: Modelo tridimensional del concepto 4

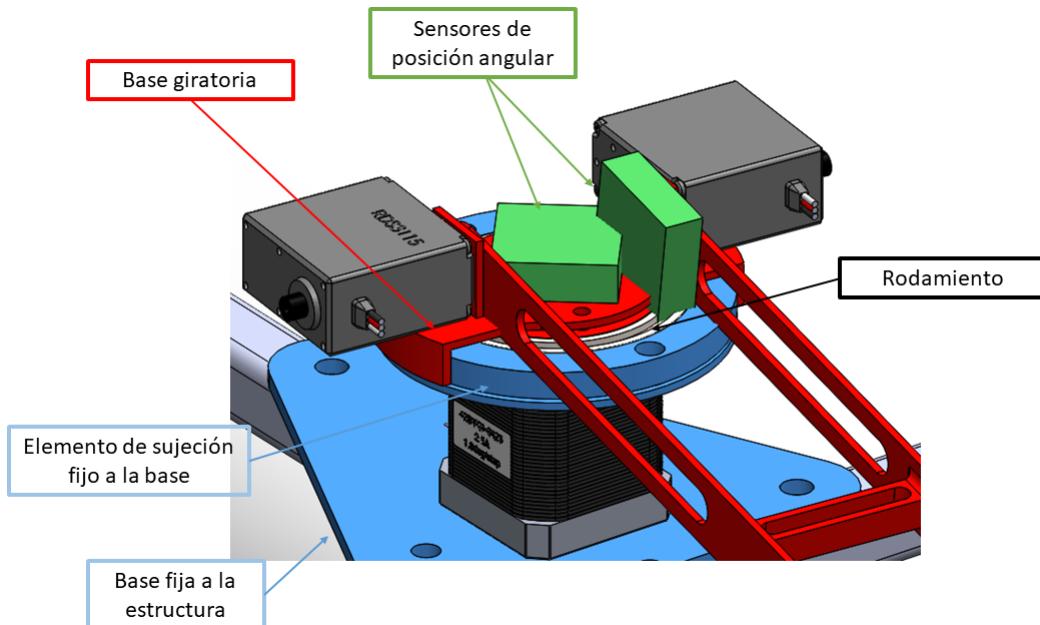


Figura 2.11: Acercamiento al ensamblaje de la cintura del concepto 4

- Concepto 4

- S1 Robótico

- M1 Manipulador

- Brazo de codo planar con actuadores en cada eslabón y con la cintura del brazo antropomórfico sujeta a una base y acoplada con un rodamiento.
    - La cintura (GDL 1) está conformada por elementos fijos unidos a la estructura, acoplados con un rodamiento para permitir el giro de los demás eslabones del manipulador.
    - Los sensores de posición angular se encuentran ubicados directamente en el acoplamiento del eslabón con el motor.

- M2 Efecto

- El efecto es un gripper de 2 dedos a modo de pinza.

- S2 Información

- M5 Procesamiento

- Las tarjetas de electrónica están dispuestas una a lado de la otra.

- S4 Laboratorio

- El laboratorio se ubica sobre la estructura, del lado derecho de la misma.

- M6 Obtención de datos de la muestra

- El cono trunco guía la muestra hacia el área de obtención de datos.

- M7 Desechador

- La base del área de obtención se mueve lateralmente para dejar caer la piedra, mientras el cono trunco se queda fijo.

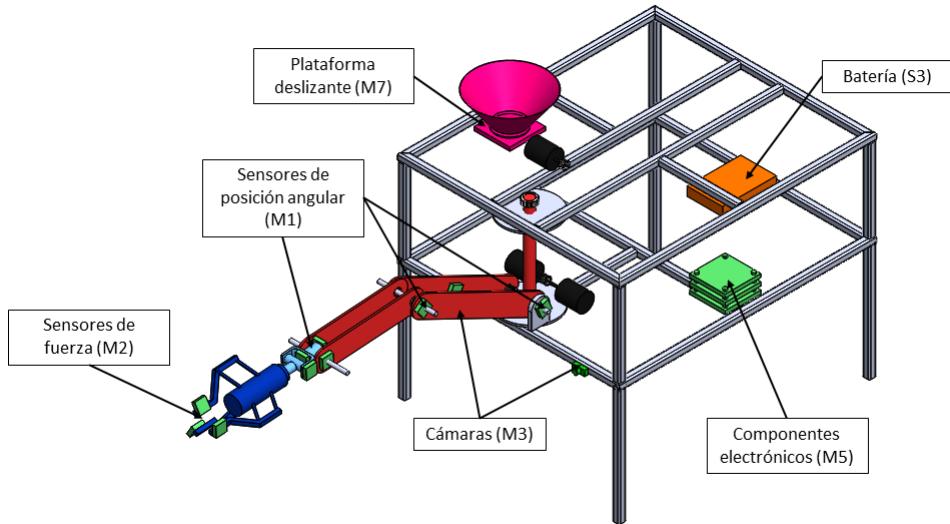


Figura 2.12: Modelo tridimensional del concepto 5

■ Concepto 5

S1 Robótico

M1 Manipulador

- Brazo de codo planar con los motores de los primeros dos eslabones en la base de la cadera, con transmisión de movimiento por medio de bandas síncronas. La estructura del brazo está conformada por dos segmentos planos paralelos.
- En la cintura (primer GDL) un motor en la parte superior de la estructura transmite movimiento mediante una banda síncrona a un eje vertical que mueve una plataforma donde se colocan los demás motores y sus transmisiones.
- Los sensores de posición angular se encuentran ubicados directamente en el acoplamiento del eslabón con el motor.

M2 Efecto

- Un gripper de 3 dedos.

## S2 Información

### M5 Procesamiento

- Las tarjetas de electrónica están dispuestas una sobre otra cerca del centro del lado izquierdo de la estructura.

## S4 Laboratorio

- El laboratorio se ubica sobre la estructura, del lado derecho de la misma.

### M6 Obtención de datos de la muestra

- El cono trunco guía la muestra hacia el área de obtención de datos.

### M7 Desechador

- La base del área de obtención se mueve lateralmente para dejar caer la piedra, mientras el cono trunco se queda fijo.

## ■ Concepto 6

## S1 Robótico

### M1 Manipulador

- Brazo de codo planar con actuadores en la cintura, la cual se sujet a una base y se acopla al brazo con un rodamiento.
- La cintura (GDL 1) está conformada por elementos fijos unidos a la estructura del lado derecho, acoplados con un rodamiento para permitir el giro de los demás eslabones del manipulador.
- Los sensores de posición angular se encuentran ubicados directamente en el acoplamiento del eslabón con el motor.

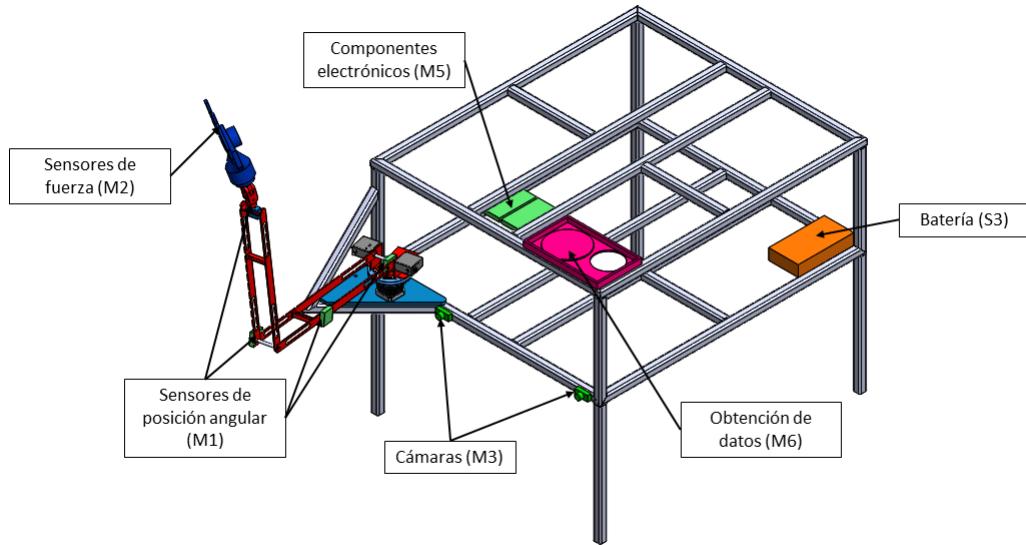


Figura 2.13: Modelo tridimensional del concepto 6

#### M2 Efecto

- El efecto es un gripper de 2 dedos a modo de pinza.

#### S2 Información

#### M5 Procesamiento

- Las tarjetas de electrónica están dispuestas una a lado de la otra dentro de la estructura, del lado derecho.

#### S4 Laboratorio

- El laboratorio se encuentra sobre la estructura, en la esquina superior izquierda (vista superior).

#### M6 Obtención de datos de la muestra

- El efecto deposita la muestra directamente sobre el área de recolección de datos.

## M7 Desechador

- La base del laboratorio se inclina para que la piedra ruede hacia el agujero y caiga.

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)[28]; la cual se ayuda de criterios originados a partir del análisis de las diferencias que hay entre ellas.

- 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.

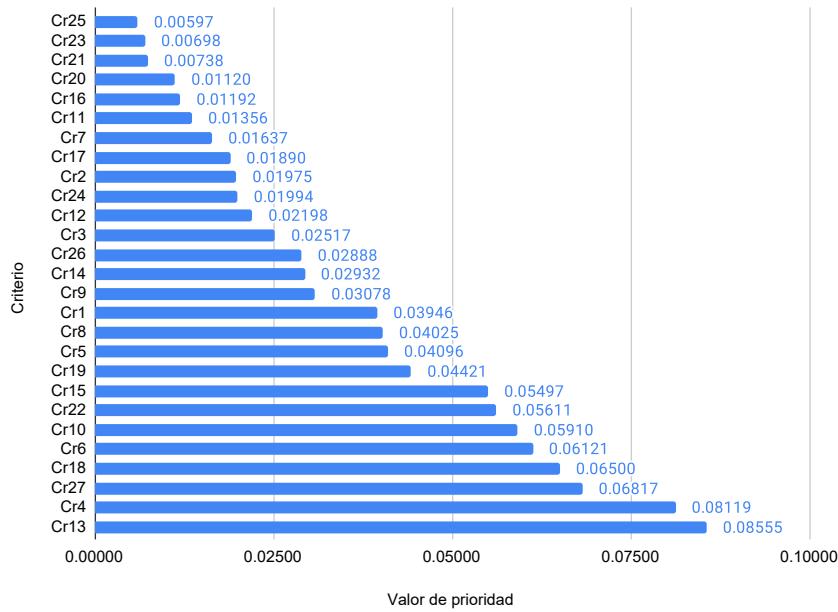


Figura 2.14: Jerarquía de criterios de selección de concepto

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 2.14.

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 2.15, donde se observa que el mayor valor pertenece al concepto número 5, presentado en la figura 2.12.

El proceso completo se encuentra en el Apéndice D. 1.

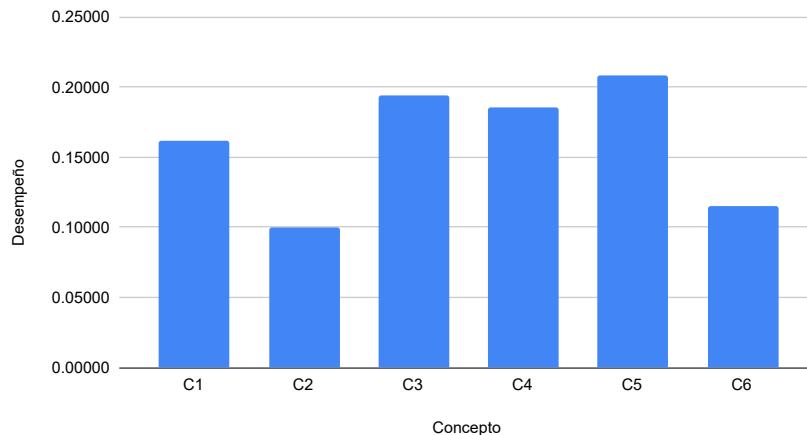


Figura 2.15: Desempeño general de los conceptos

## 2.6. 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.

A continuación se analizan los criterios en los que el **Ce** no obtuvo el mejor desempeño, para identificar las características del concepto que sí lo obtuvo.

### Cr1 Potencia requerida - Concepto mejor evaluado: Concepto 6

- Eslabones ranurados para reducir la masa.
- Actuadores ubicados en la base, haciendo uso de una transmisión.

### Cr2 Complejidad de transmisión de movimiento angular - Concepto mejor evaluado: Concepto 4

- Motores acoplados directamente a la junta.

**Cr3 Facilidad de acoplamiento al *rover* - Concepto mejor evaluado: Concepto**

**4**

- Se vale de una placa en la que se encuentran todos los componentes y puntos de sujeción.

**Cr4 Riesgo de daño a la estructura del *rover* - Concepto mejor evaluado: Concepto 6**

- Utiliza más elementos de soporte.
- El manipulador es más ligero y utiliza menos componentes de sujeción.

**Cr7 Facilidad de acoplamiento entre eslabón y actuador - Concepto mejor evaluado: Concepto 4**

- Actuadores acoplados directamente a las juntas.

**Cr8 Generación de reacción a los actuadores del manipulador - Conceptos mejor evaluados: Conceptos 1 y 4**

- Gripper de 2 dedos, es más sencillo y, por lo tanto, menos pesado.

**Cr11 Facilidad de colocación de los sensores de fuerza - Conceptos mejor evaluados: Conceptos 1, 4 y 6**

- Tiene menos dedos, por lo que requiere menos sensores.

**Cr12 Complejidad de la transmisión de fuerza - Conceptos mejor evaluados: Conceptos 1 y 4**

- Tiene menos dedos.

**Cr15 Pérdida de información - Concepto mejor evaluado: Concepto 3**

- Componentes electrónicos en el centro.

**Cr16 Precisión de la medición de temperatura - Concepto mejor evaluado: Concepto 4**

- Utiliza más sensores.
- Se mide directamente la temperatura de los componentes de interés.

**Cr17 Influencia de los cambios térmicos del ambiente a los componentes - Concepto mejor evaluado: Concepto 3**

- Los componentes se encuentran dentro de la estructura, además de que están más cerca entre ellos.

**Cr18 Confiabilidad de sujeción - Conceptos mejor evaluados: Conceptos 1 y 3**

- Componentes electrónicos en el centro.

**Cr20 Complejidad del mecanismo de desecho - Concepto mejor evaluado: Concepto 3**

- El cilindro tiene menos piezas, realizando únicamente un movimiento angular.

**Cr21 Aprovechamiento del espacio ocupado por el mecanismo de desecho - Concepto mejor evaluado: Concepto 6**

- El laboratorio es más pequeño y simple.

**Cr23 Aprovechamiento del espacio ocupado por el módulo de medición de peso - Concepto mejor evaluado: Concepto 3**

- El cilindro no requiere de más espacio para deshacerse de la muestra.

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

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
Efecto de 2 dedos	Cr8,Cr11,Cr12	0.04,0.013,0.021	0.074
Efecto de 3 dedos	Cr9,Cr10,Cr13	0.03,0.059,0.085	0.174

características con sus criterios asociados y sus valores, realizando una suma directa de 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.

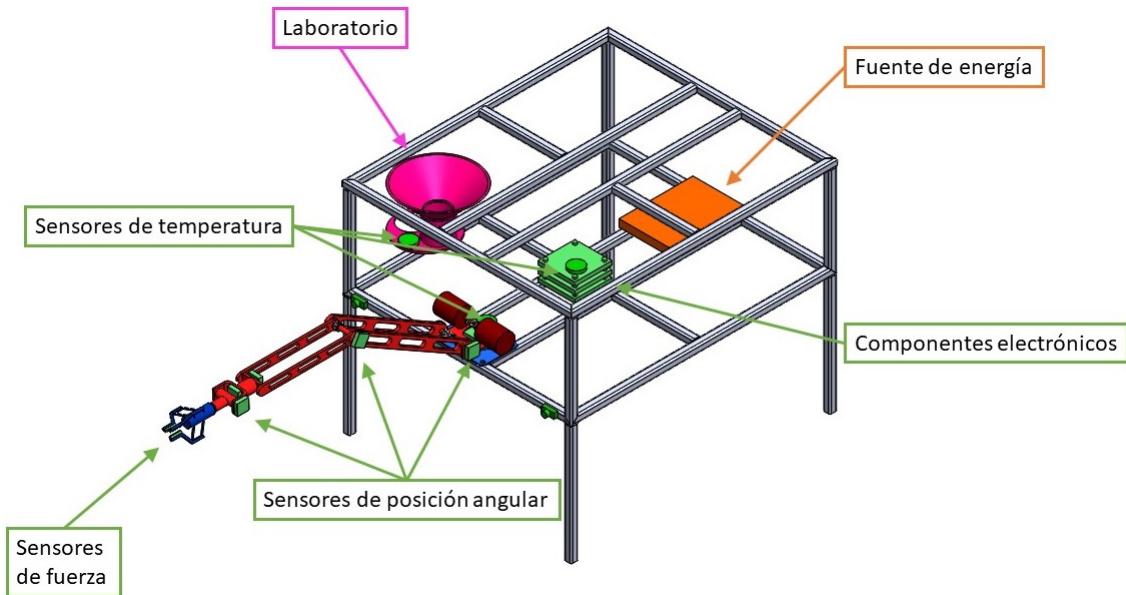


Figura 2.16: Modelo tridimensional del concepto mejorado

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

---

## 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.

### 3.1. Sistema robótico (S1)

#### 3.1.1. 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 3.1, 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 3.1.

$$BH = \sqrt{BT^2 - BV^2} \quad (3.1)$$

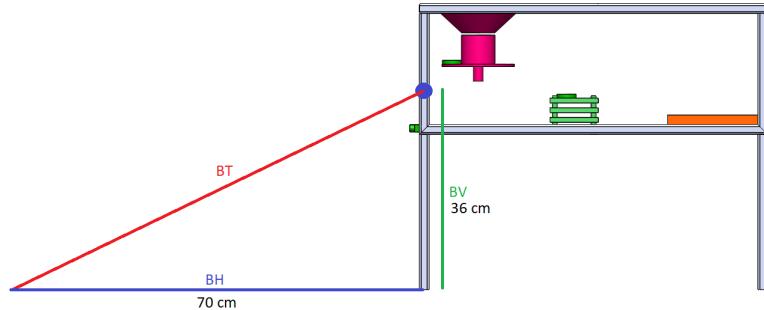


Figura 3.1: Alcance máximo del sistema

En donde:  $BH$  = Distancia horizontal al punto más lejano.

$BT$  = Longitud del brazo totalmente estirado.

$BV$  = 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.

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  $l_1 = 33.81\text{cm}$  y  $l_2 = 25.35\text{cm}$ . Los números enteros más cercanos que cumplen esta relación son  $l_1 = 32\text{cm}$  y  $l_2 = 24\text{cm}$ , los cuales son seleccionados con fines de simplicidad en la manufactura.

De esta manera, las longitudes quedan como se muestra a continuación:

$$BT = 76\text{cm}$$

$$BH = 66.38\text{cm}$$

$$BV = 37\text{cm}$$

## 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[29], 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:

- Eslabón 1: 3.5 Kg.
- Eslabón 2: 2.5 Kg.
- Muñeca: 1.5 Kg.
- Efecto final: 2 Kg.
- Muestra: 500 g.

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[15], el cual puede ser observado en la Figura 1.2.

## Diseño de geometría de los eslabones

La geometría del primer eslabón está determinada por las siguientes dimensiones:

- Longitud: 32 cm.
- Espesor: 8 mm.
- Alto: 3 cm.
- 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 3.2

$$V_e = 2t_e(h_e l_e + \pi r_e^2 - 50\pi) + 400\pi \quad (3.2)$$

En donde:  $V_e$  = Volumen ocupado por el eslabón.

$t_e$  = Espesor del perfil del eslabón.

$h_e$  = Altura del perfil del eslabón.

$l_e$  = Longitud del perfil del eslabón.

$r_e$  = Radio del chaflán del eslabón.

Sustituyendo  $t_{e1}, h_{e1}, l_1$  y  $r_{e1}$  en la ecuación 3.2, queda lo siguiente:

$$\begin{aligned} V_{e1} &= 2t_e(h_{e1}l_1 + \pi r_{e1}^2 - 50\pi) + 400\pi = 2*(0.008m)*(0.03m*0.32m + \pi*0.015m^2 - 50\pi) + 400\pi \\ &V_{e1} = 174.962e - 6 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

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 3.3, recordando que el concepto solución contempla dos placas paralelas, por lo que el peso determinado debe distribuirse equitativamente.

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 T6

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

$$\rho_e = \frac{m_e}{2V_e} \quad (3.3)$$

En donde:  $m_e$  = Masa del eslabón.

$\rho_e$  = Densidad del eslabón.

Sustituyendo  $m_{e1}$  y  $V_{e1}$  en la ecuación 3.3, queda lo siguiente:

$$\rho_{e1} = \frac{m_{e1}}{2V_{e1}} = \frac{3.5Kg}{2*174.962e-6m^3} = 10002.17 \text{ Kg/m}^3$$

Una vez que se conoce la densidad máxima  $\rho_{e1}$  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 3.2, 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 3.1 se muestran las principales propiedades mecánicas del mismo[30].

La Figura 3.3 muestra el modelo CAD del primer eslabón, generado en el software SolidWorks ®[30], con el que se realizan todos los modelos CAD.

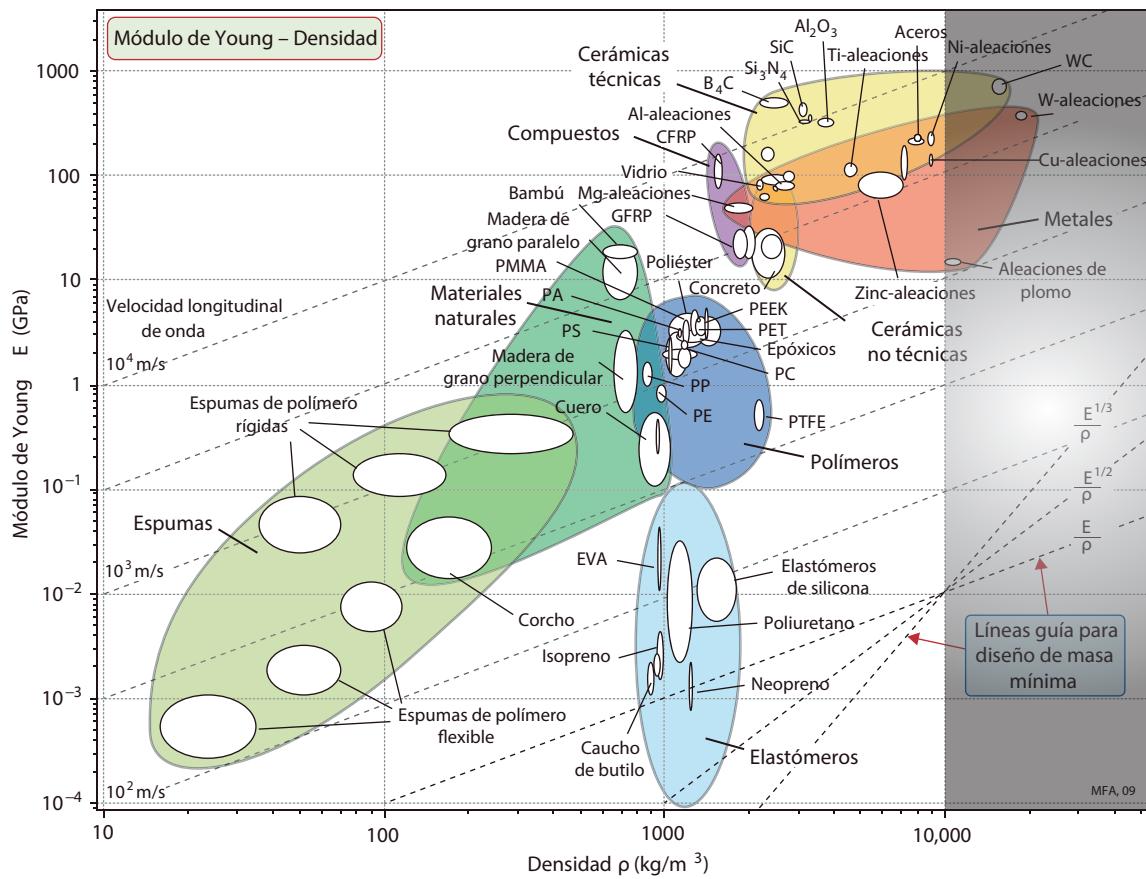


Figura 3.2: Rango de materiales elegibles para el eslabón



78

Figura 3.3: Modelo CAD del primer eslabón.

Para seleccionar el material del segundo eslabón se sigue el mismo procedimiento, utilizando las dimensiones determinadas, las cuales son:

- Longitud: 24 cm.
- Espesor: 6 mm.
- Alto: 2.25 cm.
- Radio de chaflán: 1.125 cm.

Con estos datos se calcula el volumen y la densidad sustituyéndolos en las ecuaciones 3.2 y 3.3 como sigue:

$$\begin{aligned}
 V_{e_2} &= 2t_e(h_{e_2}l_2 + \pi r_{e_2}^2 - 50\pi) + 400\pi = \\
 &2 * (0.006m) * (0.0225m * 0.24m + \pi * 0.0125m^2 - 50\pi) + 400\pi \\
 V_{e_2} &= 80.252e - 6 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{e_2} &= \frac{m_{e_2}}{2V_{e_2}} = \frac{2.5Kg}{2*80.252e-6m^3} \\
 \rho_{e_2} &= 15575.93 \text{ Kg/m}^3
 \end{aligned}$$

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.

La Figura 3.4 muestra el modelo CAD del segundo eslabón.

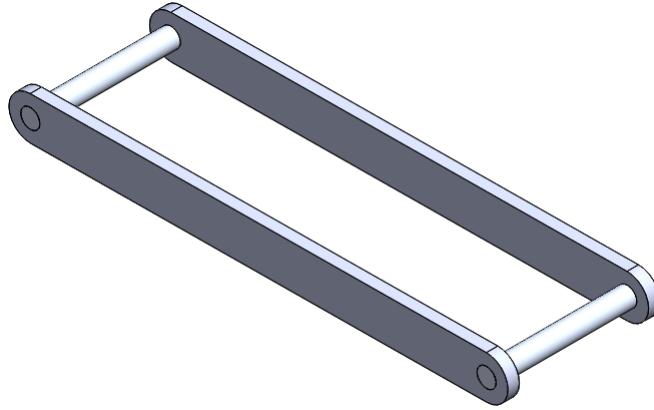


Figura 3.4: Modelo CAD del segundo eslabón.

Con la densidad descrita en la Tabla 3.1, se calcula la magnitud real de la masa, despejando la masa  $m_e$  de la ecuación 3.3, obteniendo como resultado  $m_{e1} = 0.472 \text{ Kg}$  y  $m_{e2} = 0.216 \text{ Kg}$ .

### Validación de la selección

Para comprobar el rendimiento del material frente a las cargas aplicadas se ejecuta un análisis de elemento finito estático[31] realizando un estudio de resistencia a cada elemento en el software SolidWorks 2018(R)[30].

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 3.4 la correspondiente a la suma de fuerzas y la ecuación 3.5 a la suma de momentos.

$$\uparrow \sum F_y = 0 \quad (3.4)$$

En donde:  $F_y$  = Fuerzas existentes en el eje Y.

$$\circlearrowleft \sum M_o = 0 \quad (3.5)$$

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

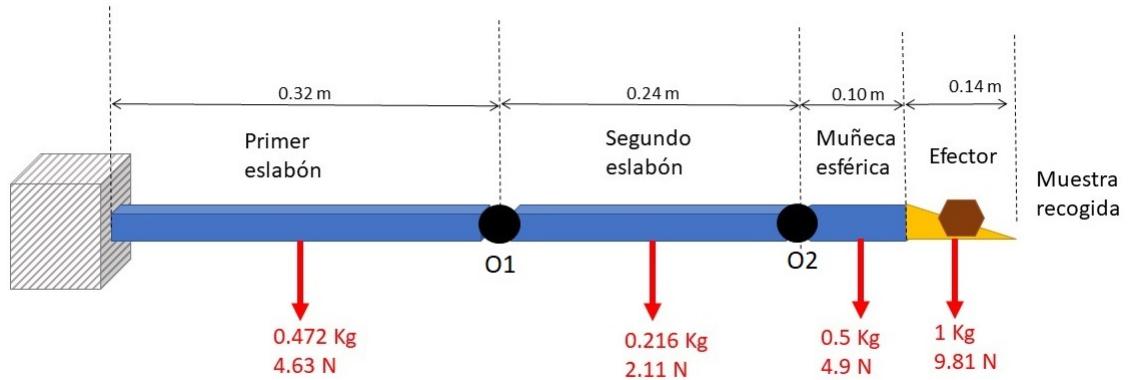


Figura 3.5: Cargas aplicadas al sistema

En la Figura 3.5 se pueden apreciar las cargas a las que está sometido el sistema, analizando las cargas aplicadas en el eslabón 1 en la Figura 3.6, mientras que las cargas aplicadas al eslabón 2 son mostradas en la Figura 3.7. Estos datos proporcionan la información necesaria para hacer las simulaciones.



Figura 3.6: Cargas aplicadas al eslabón 1.



Figura 3.7: Cargas aplicadas al eslabón 2.

El estudio del eslabón 1, mostrado en la Figura 3.9, se realizó con una malla cuyas características se muestran en la figura 3.8.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	5.21213 mm
Tolerancia	0.260606 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	20759
Número total de elementos	11879
Cociente de aspecto máximo	4.4323
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.7
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	

Figura 3.8: Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 1

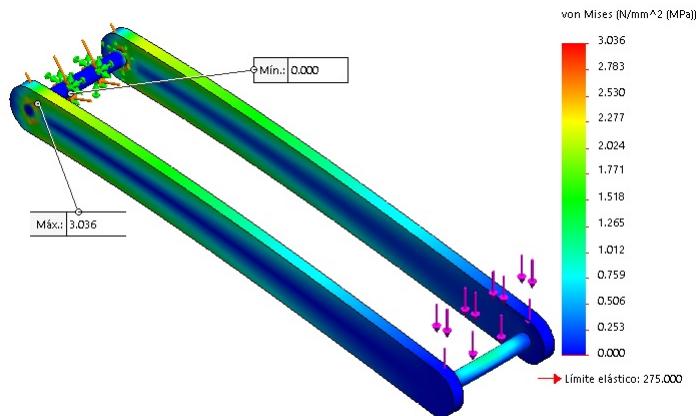


Figura 3.9: Estudio de resistencia del eslabón 1 sólido

El estudio del eslabón 2, mostrado en la Figura 3.11, se realizó con una malla cuyas características se muestran en la figura 3.10.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	análisis eslabón [-Predeterminado-]
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.31476 mm
Tolerancia	0.215738 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	14586
Número total de elementos	8190
Cociente de aspecto máximo	3.669
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.7
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla [hh:mm:ss]	00:00:02
Nombre de computadora	LAPTOP OSCAR

Figura 3.10: Características de malla del estudio de resistencia del eslabón 2

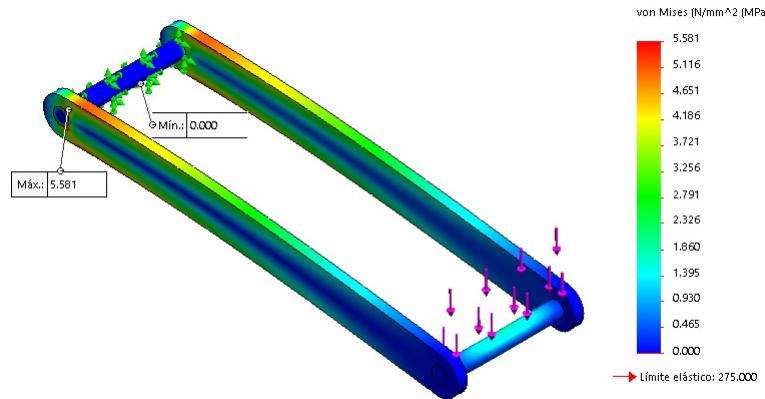


Figura 3.11: Estudio de resistencia del eslabón 2 sólido

Los resultados de los estudios indican que el esfuerzo von Mises máximo en el primer eslabón, mostrado en la Figura 3.9, es 3.036 MPa, mientras que en el segundo estudio (Figura 3.11 es 5.581 MPa. Dado que el límite elástico del aluminio 6061 T6 es igual a 275 MPa, los factores de seguridad para cada elemento son 90.58 y 49.27 respectivamente, por lo que se puede concluir que el material no fallará.

### **Rediseño orientado a integridad estructural**

Debido a que los resultados de la validación son favorables, existe la oportunidad de mejorar el diseño con el objetivo de incrementar la integridad estructural, lo cual se logra al añadir travesaños a lo largo del eslabón, cuyos modelos CAD se muestran en las Figuras 3.12 y 3.13 respectivamente.

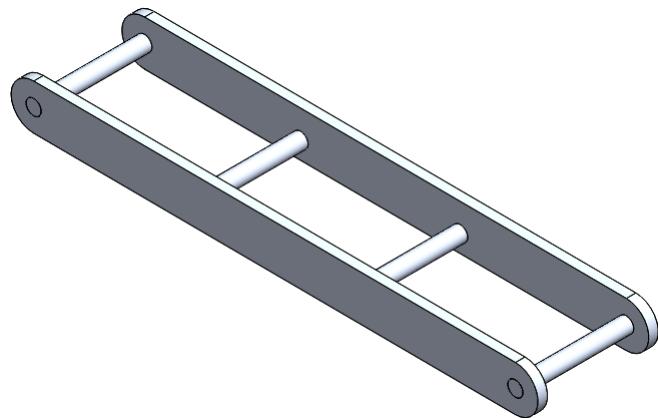


Figura 3.12: Modelo CAD del primer eslabón con travesaños.

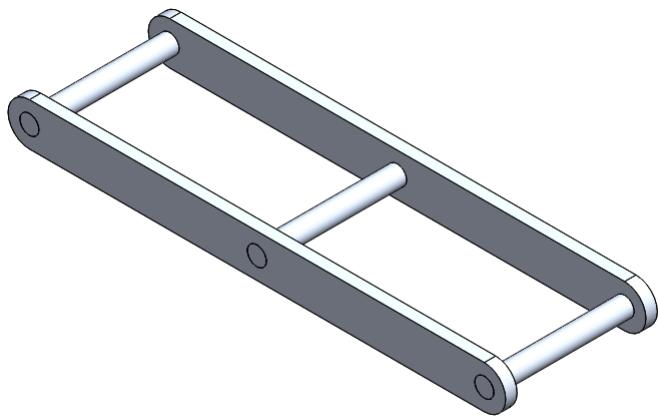


Figura 3.13: Modelo CAD del segundo eslabón con travesaños.

### Validación del rediseño

Ya que se realizaron cambios al diseño original, es necesario volver a comprobar el rendimiento del material frente a las cargas aplicadas, como se muestra a continuación.

El estudio del eslabón 1 rediseñado, mostrado en la Figura 3.15, se realizó con una mallado cuyas características se muestran en la figura 3.14.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 travesaños (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	5.15623 mm
Tolerancia	0.257811 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	21810
Número total de elementos	12262
Cociente de aspecto máximo	8.9468
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.6
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.14: Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 1 con travesaños

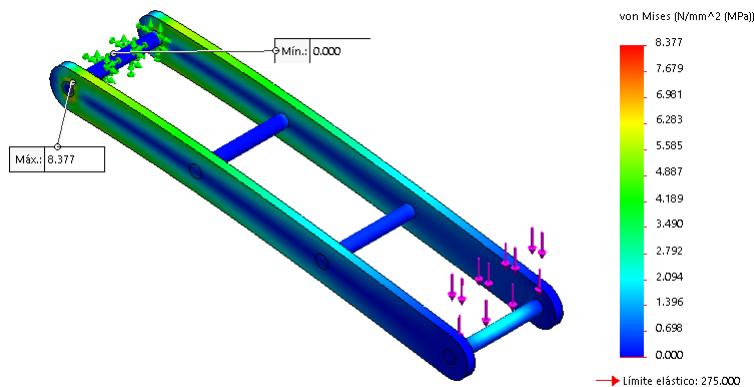


Figura 3.15: Estudio de resistencia del eslabón 1 con travesaños

El estudio del eslabón 1 rediseñado, mostrado en la Figura 3.17, se realizó con una mallado cuyas características se muestran en la figura 3.16.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis travesaño (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.40841 mm
Tolerancia	0.220421 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	15082
Número total de elementos	8469
Cociente de aspecto máximo	4.1012
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.5
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:02
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.16: Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 2 con travesaños

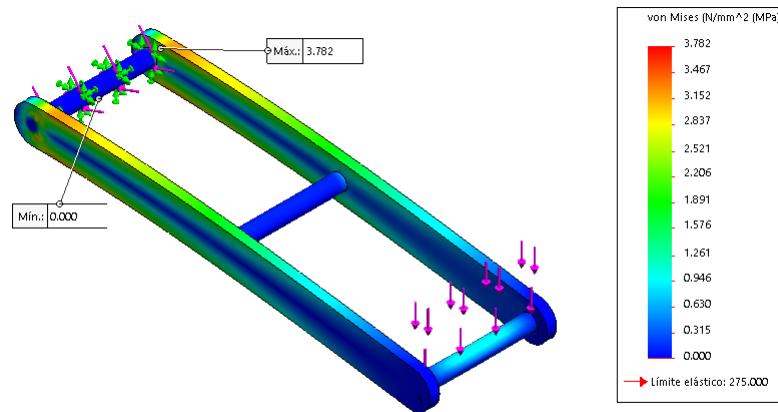


Figura 3.17: Estudio de resistencia del eslabón 2 con travesaños

Este nuevo resultado indica que el esfuerzo von Mises máximo en el primer eslabón es 8.377 MPa, mientras que en el segundo es 3.782 MPa. Aunque estos valores hayan

aumentado respecto de los obtenido con el diseño original, los factores de seguridad (32.82 y 72.71) siguen siendo favorables.

### Rediseño orientado a la reducción de masa

Considerando que los factores de seguridad son grandes, y dado que uno de los objetivos del proyecto es reducir el consumo energético del sistema, se propone reducir la cantidad de material utilizado 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 las Figuras 3.18 y 3.19.

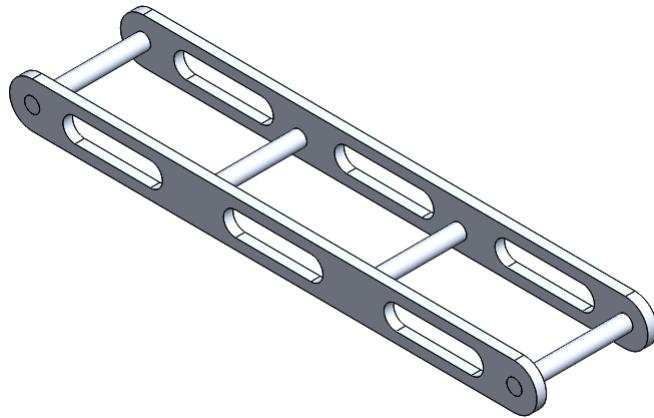


Figura 3.18: Modelo CAD del primer eslabón ranurado.

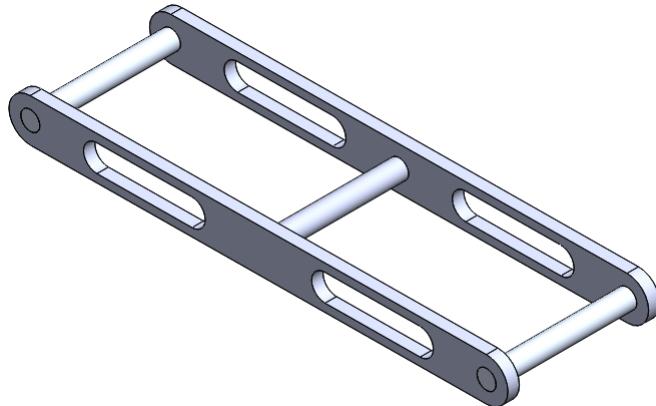


Figura 3.19: Modelo CAD del segundo eslabón ranurado.

Estos cambios provocan una reducción en el volumen ocupado por los eslabones y, por ende, en la masa de los mismos.

- $V_{e1} = 113.899e - 6m^3$

- $V_{e2} = 65.098e - 6m^3$

- $m_{e1} = 307.53g$

- $m_{e2} = 175.77g$

### Validación del rediseño

Finalmente, es necesario validar de nuevo, calculando nuevas reacciones debidas al cambio en la masa de los eslabones, como se muestra a continuación:

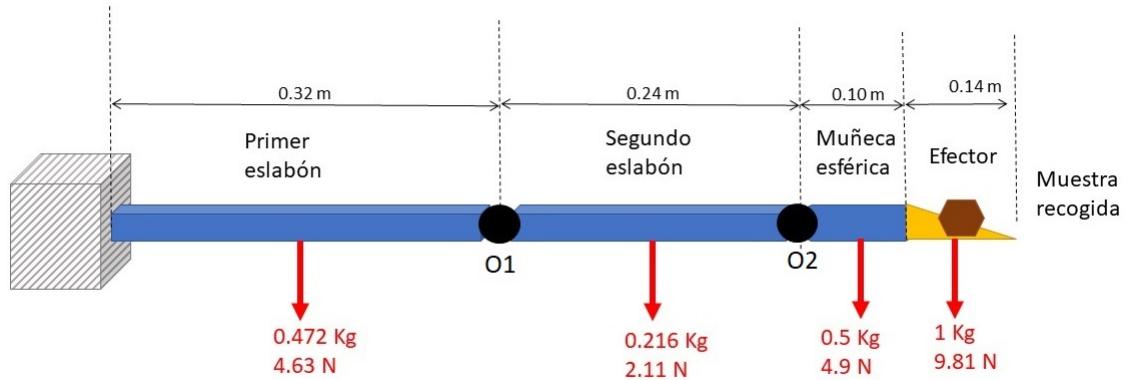


Figura 3.20: Cargas aplicadas al sistema con eslabones ranurados

En la Figura 3.20 se pueden apreciar las cargas a las que está sometido el sistema, analizando las cargas aplicadas en el eslabón 1 en la Figura 3.21, mientras que las cargas aplicadas al eslabón 2 son mostradas en la Figura 3.22. Estos datos proporcionan la información necesaria para hacer las simulaciones.



Figura 3.21: Cargas aplicadas al eslabón 1 ranurado.



Figura 3.22: Cargas aplicadas al eslabón 2 ranurado.

El estudio del eslabón 1 rediseñado, mostrado en la Figura 3.24, se realizó con una malla cuyas características se muestran en la figura 3.23.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis travesaños-ranuras (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.84148 mm
Tolerancia	0.242074 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	15522
Número total de elementos	8182
Cociente de aspecto máximo	4.9048
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	98.8
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	LAPTOP OSCAR

Figura 3.23: Características de malla del estudio de resistencia del eslabón 1 ranurado

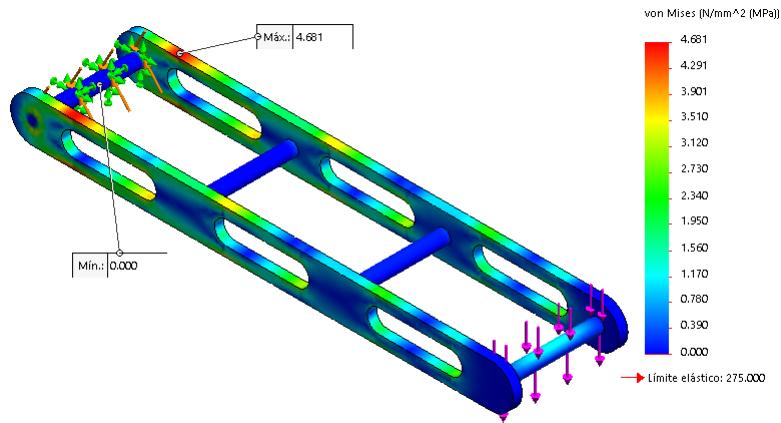


Figura 3.24: Estudio de resistencia del eslabón 1 ranurado

El estudio del eslabón 1 rediseñado, mostrado en la Figura 3.26, se realizó con una malla cuyas características se muestran en la figura 3.25.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis eslabón 2 ranurado (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.02406 mm
Tolerancia	0.201203 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	15937
Número total de elementos	8694
Cociente de aspecto máximo	4.3628
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.25: Características de mallado del estudio de resistencia del eslabón 2 ranurado

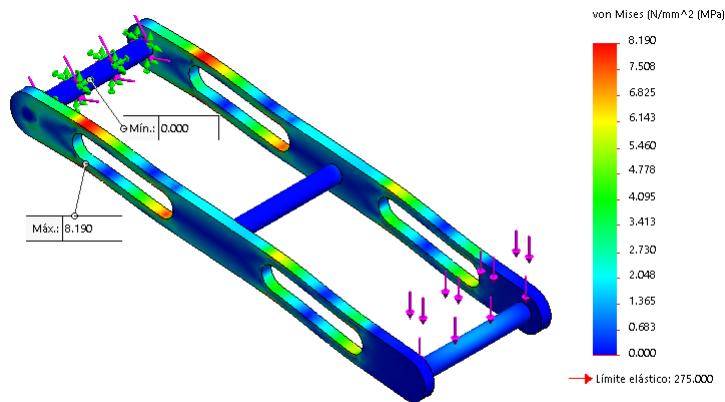


Figura 3.26: Estudio de resistencia del eslabón 2 ranurado

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 % 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 3.27 para el segundo GDL, y la Figura 3.28 para el tercer GDL.

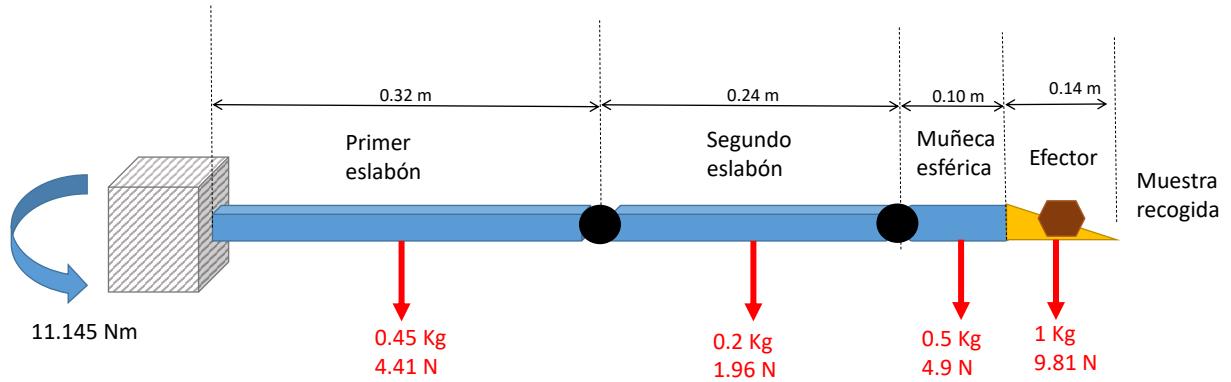


Figura 3.27: Diagrama de cargas aplicadas al motor del primer eslabón

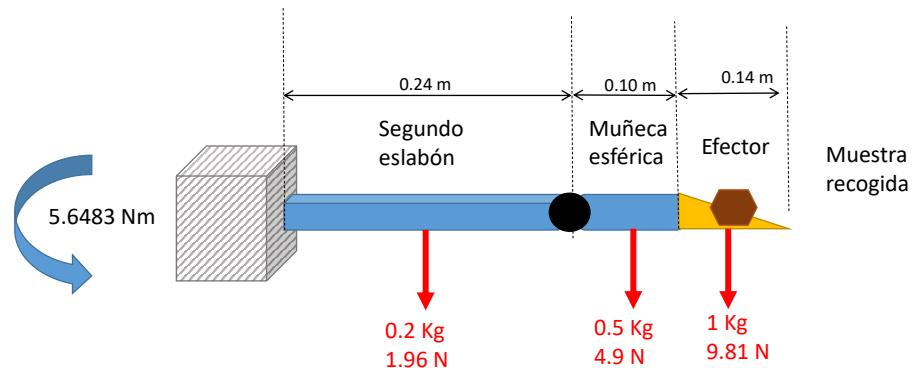


Figura 3.28: Diagrama de cargas aplicadas al motor del segundo eslabón

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
- 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 1.55.

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

### 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 tercero GDL = 5.6483 Nm ; FS = 5.208*

Con estos pares calculados, y despejando para  $i_a$  de la ecuación 1.55, se puede calcular la corriente esperada.

$$i_a = \frac{\tau_0}{K_m} = \frac{11.145\text{N} - m}{1.475^{\text{N-m/A}}} = 7.55[\text{A}] \quad (3.6)$$

### Transmisión mecánica

Las bandas síncronas son cada vez más utilizadas en aplicaciones donde antes se consideraba utilizar engranes o cadenas[16], 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:

- Velocidad de movimiento del efecto:  $0.05\text{m/s}$

- Relación 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 3.27 y 3.28 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 períodos de 8 horas diarias (servicio intermitente)[16], 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[32], 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.

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

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

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<sup>[16]</sup> 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.

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

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

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[16], se comprueba que las bandas no operan con ruido.

A continuación, se resumen las características de los componentes seleccionados:

*Primer eslabón*

Banda

- Modelo: B375-70XL
- Paso: 0.200[in] (XL)
- Material: Neopreno
- Número de ranuras: 35
- Material tensor: Fibra de vidrio
- Ancho: 0.375[in]
- Largo: 7[in]

*Segundo eslabón*

Banda

- Modelo: B375-290XL
- Paso: 0.200[in] (XL)
- Material: Neopreno
- Número de ranuras: 145
- Material tensor: Fibra de vidrio
- Ancho: 0.25[in]

- Largo: 29[in]

## Poleas

- Material: Aluminio 6061 T6
- Ancho máximo de banda: 0.375[in]
- Diámetro de paso: 0.637[in]
- Modo de sujeción: Retenedor 10-32\*1/8[in]
- Diámetro de barreno: 6[mm] para la polea conductora, y 0.5[in] para la polea conducida.

Estas poleas 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 3.29, 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 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 [33], como es el Nylon12, PC, Ultem y Antero.

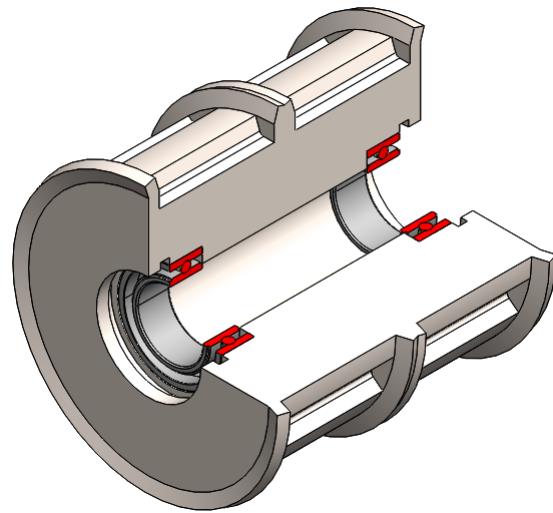


Figura 3.29: Vista de sección del ocioso con dientes

### 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 3.30.

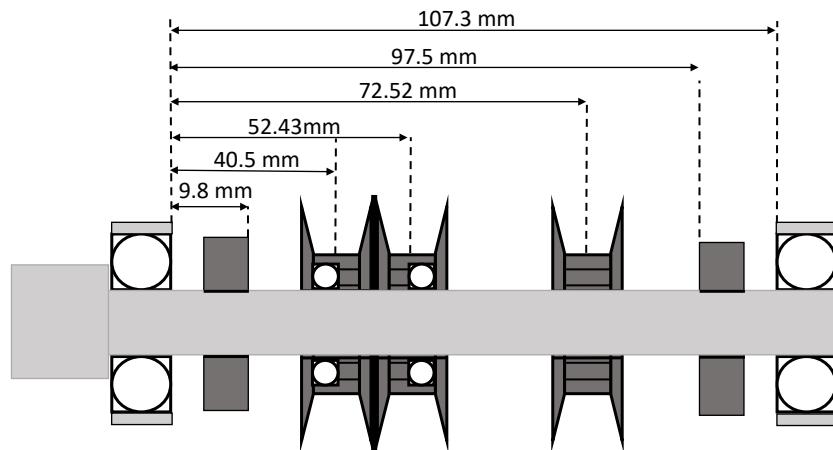


Figura 3.30: Diagramas de cargas del eje 1

Para conocer la magnitud del momento flector y el momento torsionante, se analiza el eje como viga en dos planos, mostrados en las Figuras 3.31 y 3.32.

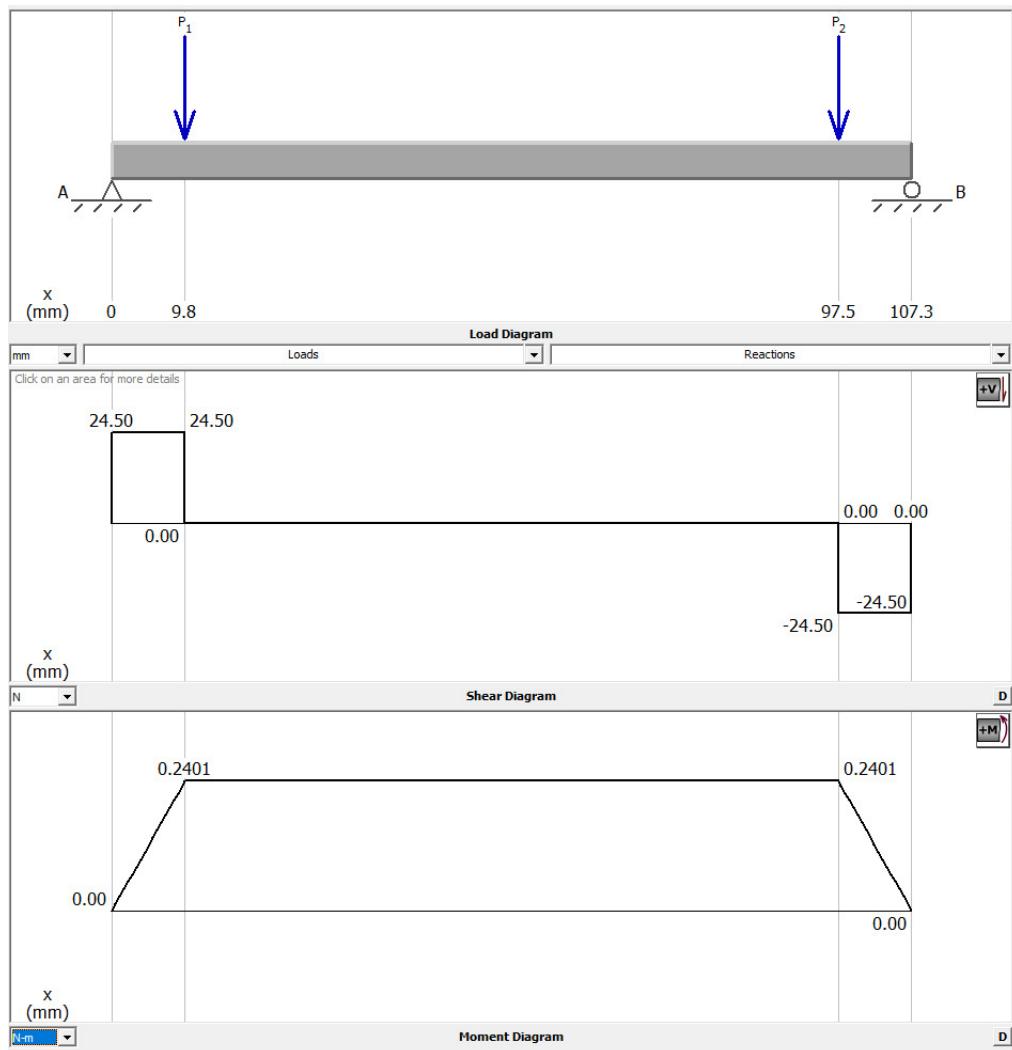


Figura 3.31: Plano frontal de cargas del eje 1

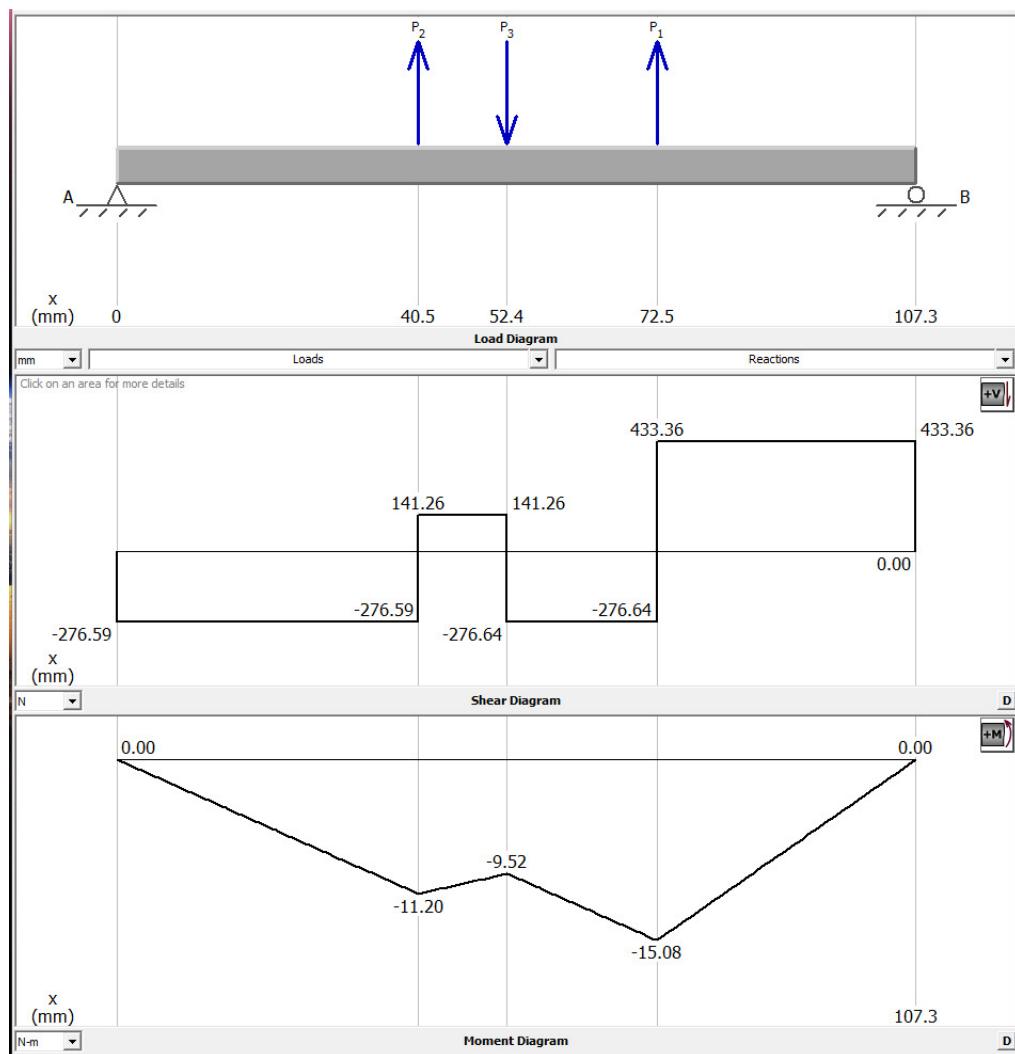


Figura 3.32: Plano superior de cargas del eje 1

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.

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

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

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

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

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

- Densidad:  $7850\text{Kg/m}^3$
- 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[16]

- 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:  $C_s = 0.95$

$$S_n = 0.5 * 814MPa = 407MPa$$

$$S'_n = 407MPa * 0.8 * 1 * 0.9 * 0.95 = 278MPa$$

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

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt[3]{\frac{32 * 2.5}{\pi}} \sqrt{\left[\frac{15.08Nm^2}{278MPa}\right] + \frac{3}{4} \left[\frac{11.24Nm}{485MPa}\right]^2} \\ &= 0.0113m \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} C_{eje-1} &= 110.6N \left(\frac{4.002 \times 10^6}{10^6}\right)^{1/3.33} = 166.823N \\ C_{eje-2} &= 105.75N \left(\frac{4.002 \times 10^6}{10^6}\right)^{1/3.33} \\ &= 160.377N \end{aligned}$$

### *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 3.33.

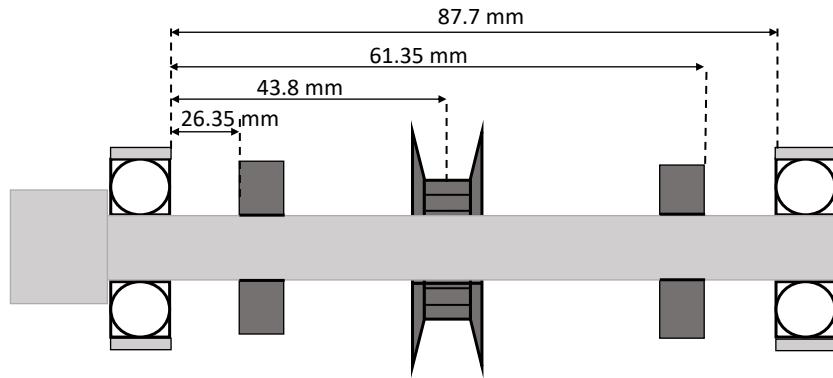


Figura 3.33: Diagramas de cargas del eje 2

Como se puede ver en las Figuras 3.34 y 3.35., solo la polea y los eslabones producen fuerzas sobre el eje, el cual también está apoyado en dos rodamientos.

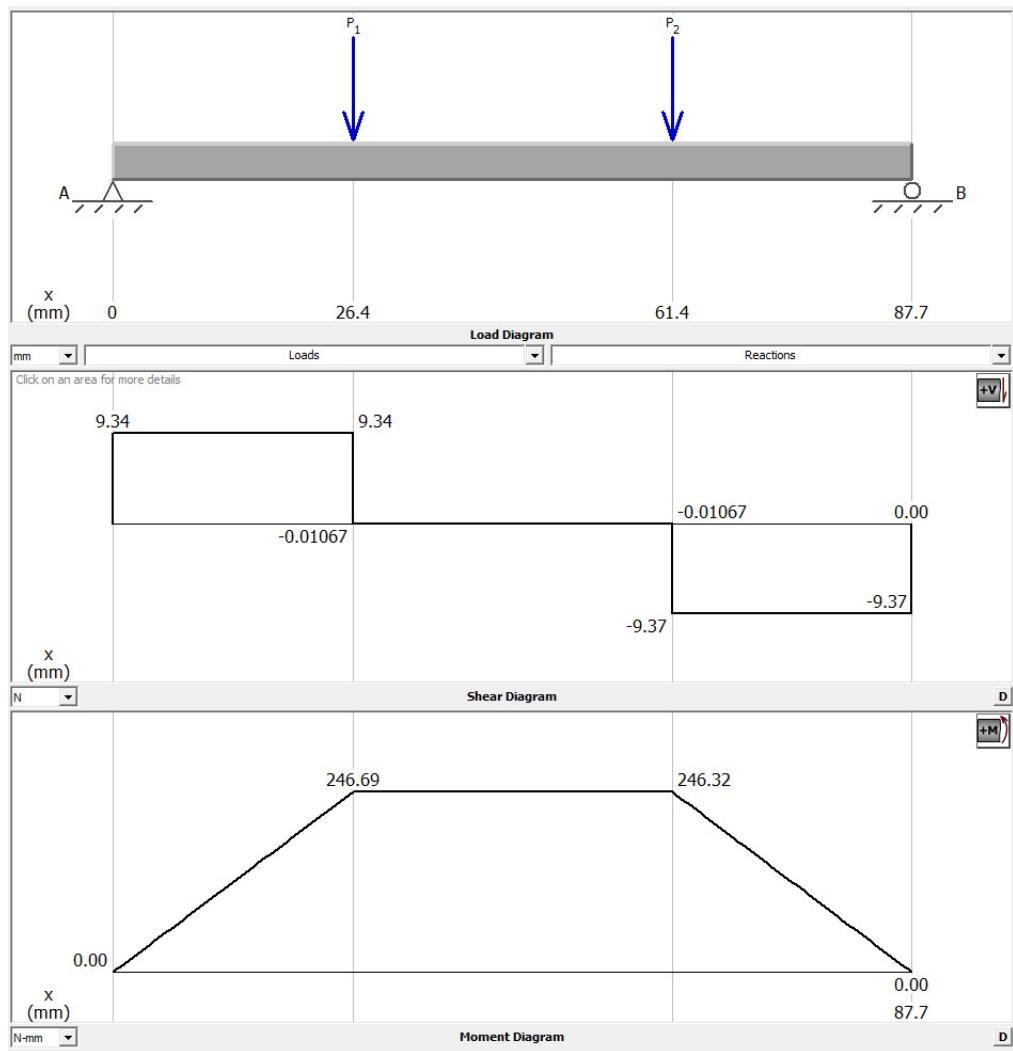


Figura 3.34: Plano frontal de cargas del eje 2

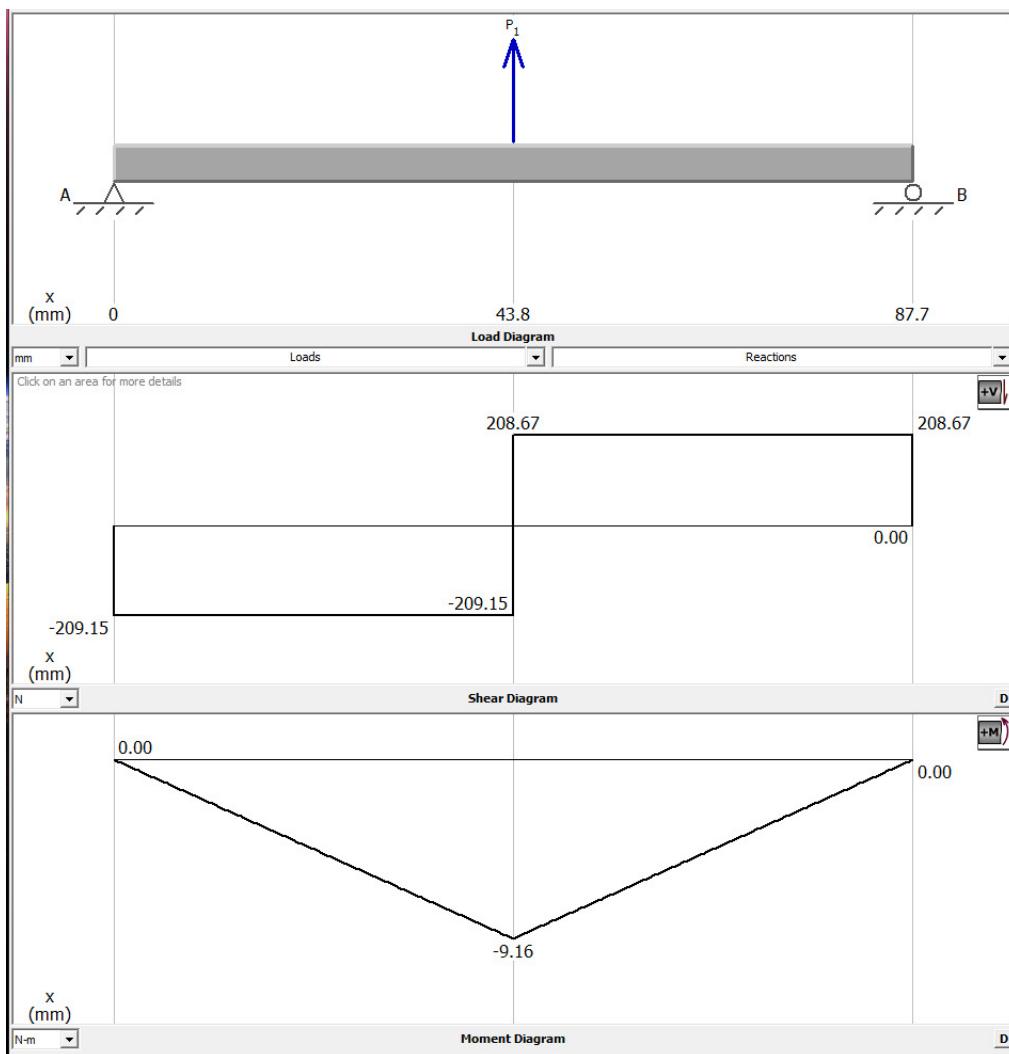


Figura 3.35: Plano superior de cargas del eje 2

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:

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{32 * 5}{\pi} \sqrt{\left[ \frac{9.16 Nm^2}{278 MPa} \right] + \frac{3}{4} \left[ \frac{6.616}{485 MPa} \right]^2}} \\ = 0.0096 m$$

Finalmente, las reacciones obtenidas se utilizan en la ecuación 1.13

$$C_1 = 62.65N \left( \frac{4.002 \times 10^6}{10^6} \right)^{1/3.33} = 95.013N$$

$$C_2 = 62.8N \left( \frac{4.002 \times 10^6}{10^6} \right)^{1/3.33} \\ = 95.240N$$

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.

### **Base del manipulador**

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 3.36, las cuales se distribuyen a rodamientos específicos para cada tipo de carga.

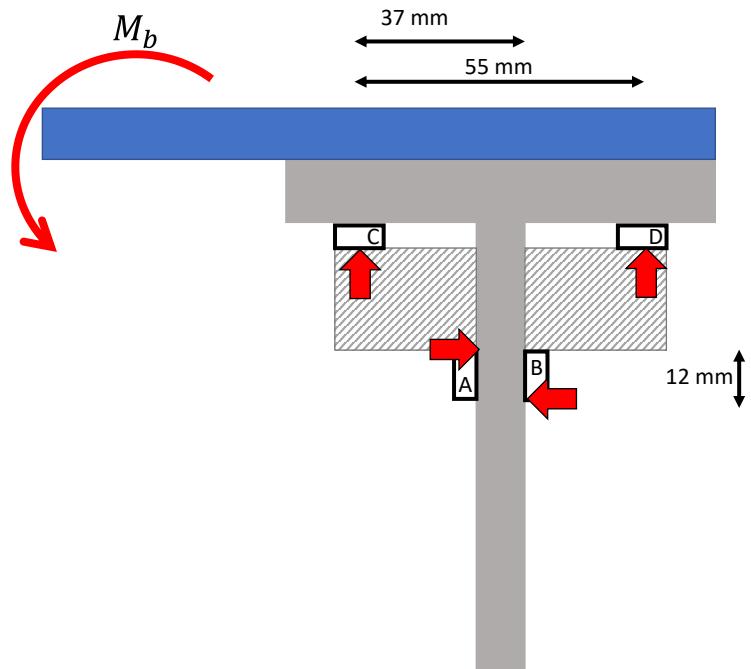


Figura 3.36: Diagrama de cargas para el eje

La Tabla 3.2 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.

Tabla 3.2: Masas de los elementos del brazo robótico

	Símbolo	Masa [kg]	Distancia [m]
Muestra	$m_{piedra}$	0.5	0.96
Efecto 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

Las reacciones de los rodamientos se calculan como sigue:

$$\rightarrow + \sum F_x = R_A - R_B = 0$$

$$\uparrow + \sum F_y = R_C + R_D - W_{total} = 0$$

$$\circlearrowleft + \sum M_D = 0.96W_{piedra} + 0.885W_{ef} + 0.775W_{muñeca} + \dots \\ \dots + 0.535W_2 + 0.255W_1 + 0.095W_{soporte} + \dots \\ \dots - 0.055R_C + 0.0275W_{base} = 0$$

$$\circlearrowleft + \sum M_D = 0.96m * 4.905N + 0.885m * 4.905N + 0.775m * 6.15N + \dots \\ \dots + 0.535m * 2.75N + 0.255m * 6.15N + 0.095m * 4.905N + \dots \\ \dots - 0.055m * R_C + 0.0275m * 23.3N = 0$$

$$\circlearrowleft + \sum M_B = 0.96W_{piedra} + 0.885W_{ef} + 0.775W_{muñeca} + \dots \\ \dots + 0.535W_2 + 0.255W_1 + 0.095W_{soporte} + \dots \\ \dots + 0.0275W_{base} - 0.055R_C - 0.012R_A = 0$$

$$\circlearrowleft + \sum M_B = 0.96m * 4.905N + 0.885m * 4.905N + 0.775m * 6.15N + \dots \\ \dots + 0.535m * 2.75N + 0.255m * 6.15N + 0.095m * 4.905N + \dots \\ \dots + 0.0275m * 23.3N - 0.055m * 326.58N - 0.012R_A = 0$$

$$R_A = 488.6N$$

$$R_B = 488.6N$$

$$R_C = 326.58N$$

$$R_D = -273.51N$$

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.

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

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

$$S_n = 0.5 * 620 MPa = 310 MPa$$

$$S'_n = 310 MPa * 0.8 * 1 * 0.9 * 0.95 = 212 MPa$$

$$\begin{aligned} D &= \sqrt[3]{\frac{32 * 5}{\pi} \sqrt{\left[\frac{6.8 Nm}{212 MPa}\right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{29.4 Nm}{240 MPa}\right]^2}} \\ &= 0.0178 m \end{aligned}$$

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.

$$C_{axial} = 327N \left( \frac{4.002 \times 10^6}{10^6} \right)^{1/3.33} = 496N$$

$$C_{radial} = 489N \left( \frac{4.002 \times 10^6}{10^6} \right)^{1/3.33} = 742N$$

De acuerdo al catálogo en línea del fabricante SKF[34], 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 3.37, 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 y a la vista superior, mostradas en la Figura 3.38.

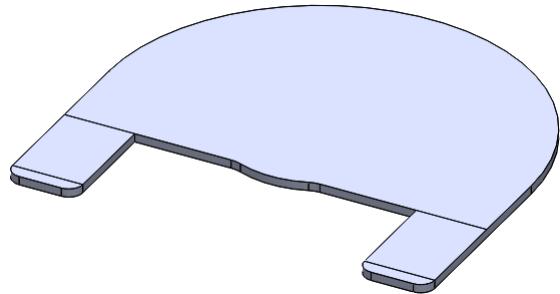


Figura 3.37: Modelo CAD de la plataforma giratoria

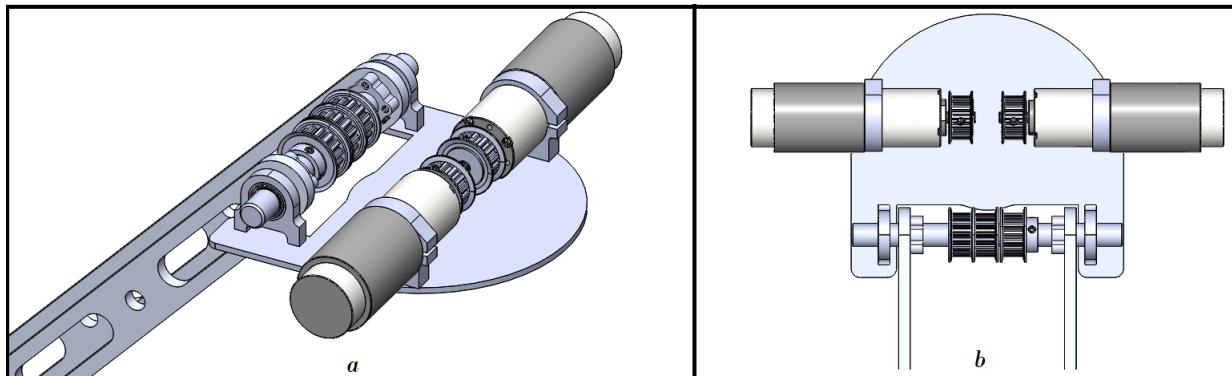


Figura 3.38: Vistas de referencia para la plataforma giratoria

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 3.39.

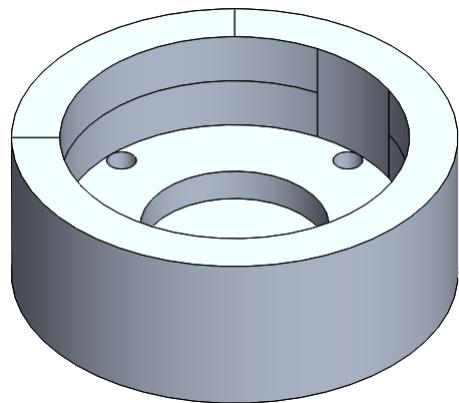


Figura 3.39: Modelo CAD del cilindro base

Finalmente, la base fija, mostrada en la Figura 3.40, es aquella que debe soportar los esfuerzos generados por todo el manipulador, en la que se acopla el cilindro base de la Figura 3.39 a la placa, como se muestra en la Figura 3.41.

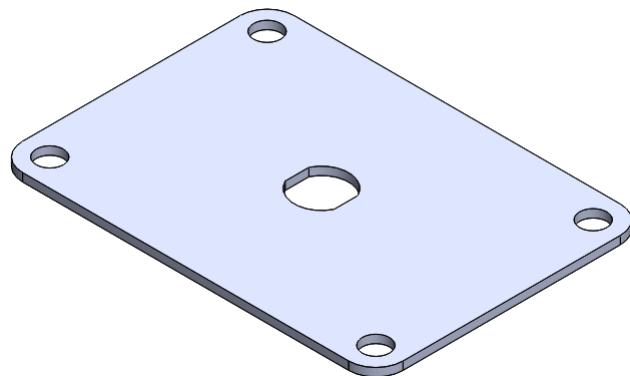


Figura 3.40: Modelo CAD de la base fija del manipulador

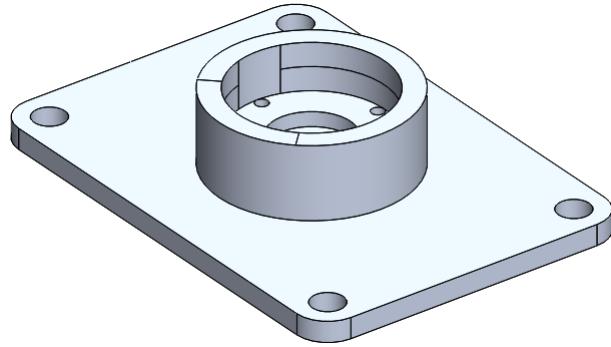


Figura 3.41: Cilindro base acoplado a la base fija

### Validación de la base

Para comprobar la integridad mecánica de las piezas que conforman la base, se realiza un análisis de elemento finito[31] en SolidWorks®, utilizando como material el aluminio 6061 (propiedades disponibles en la Tabla 3.1).

#### *Plataforma giratoria*

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	3.6459 mm
Tolerancia	0.192295 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	15961
Número total de elementos	7926
Cociente de aspecto máximo	7.8675
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.1
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:04
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.42: Características de la malla del análisis estático de la plataforma

Para la plataforma giratoria, que tiene una masa de 0.128[Kg], el análisis con carac-

terísticas mostradas en la Figura 3.42 queda como sigue:

La Figura 3.43 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 3.44 muestra que la deformación máxima es 0.8[mm].

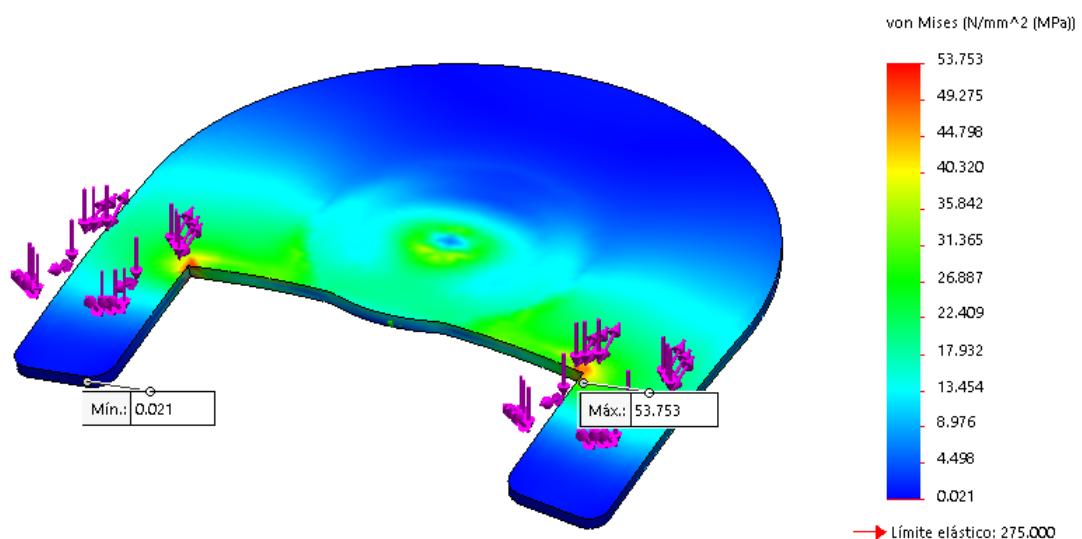


Figura 3.43: Análisis estático de resistencia de la plataforma giratoria

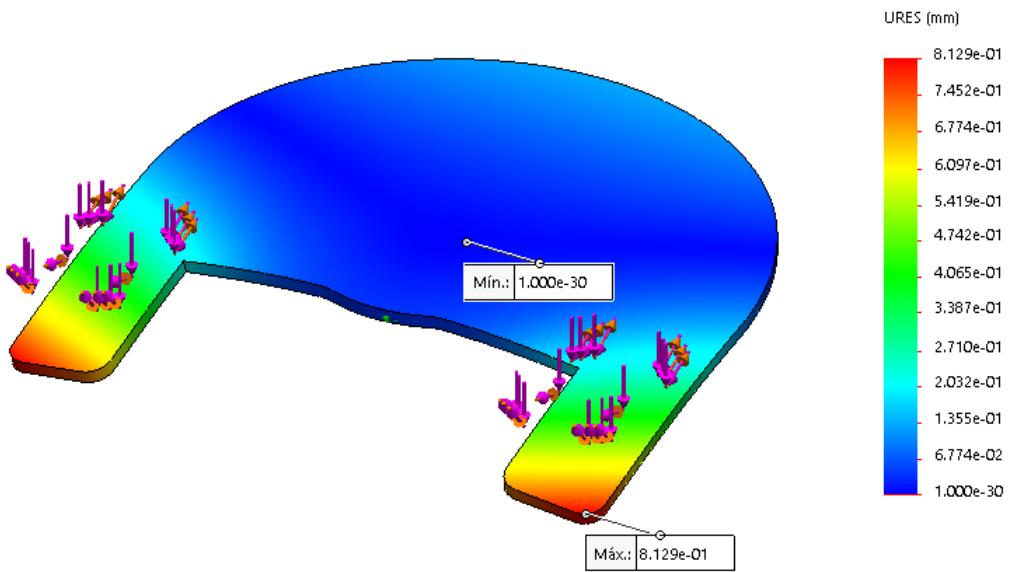


Figura 3.44: Análisis estático de rigidez de la plataforma giratoria

#### *Cilindro base*

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (Predeterminado)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño máx. de elemento	3.29322 mm
Tamaño mín. de elemento	1.09773 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	20733
Número total de elementos	12921
Cociente de aspecto máximo	5.8829
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.4
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.45: Características de la malla del análisis estático del cilindro base

Para el cilindro base, que tiene una masa de 0.096[Kg], el análisis con características mostradas en la Figura 3.45 queda como sigue:

La Figura 3.46 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 3.47 muestra que la deformación máxima es 0.004[mm].

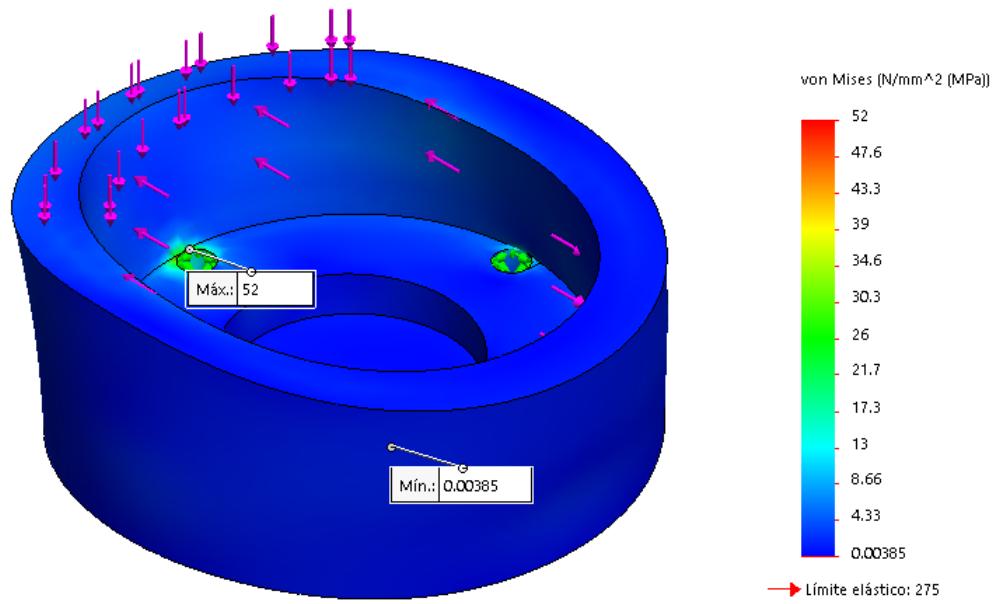


Figura 3.46: Análisis estático de resistencia del cilindro base

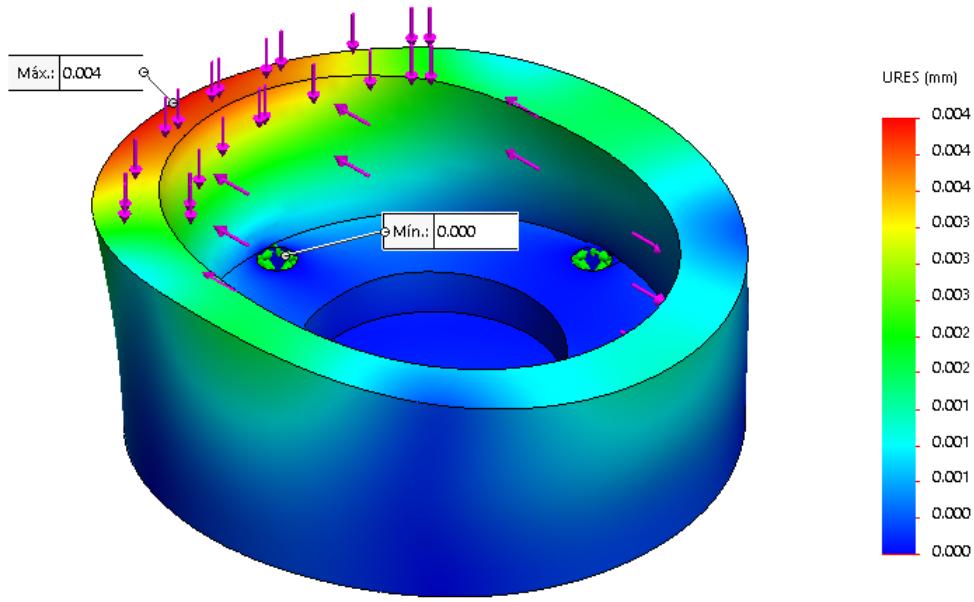


Figura 3.47: Análisis estático de rigidez del cilindro base

*Base fija*

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 2 (Predeterminado)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.94373 mm
Tolerancia	0.247187 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	18348
Número total de elementos	10826
Cociente de aspecto máximo	11.14
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	97.4
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0.00924
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.48: Características de la malla del análisis estático de la base fija

Para la base fija, que tiene una masa de .230[Kg], el análisis con características mos-

tradas en la Figura 3.48 queda como sigue:

La Figura 3.49 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 3.50 muestra que la deformación máxima es 0.028[mm].

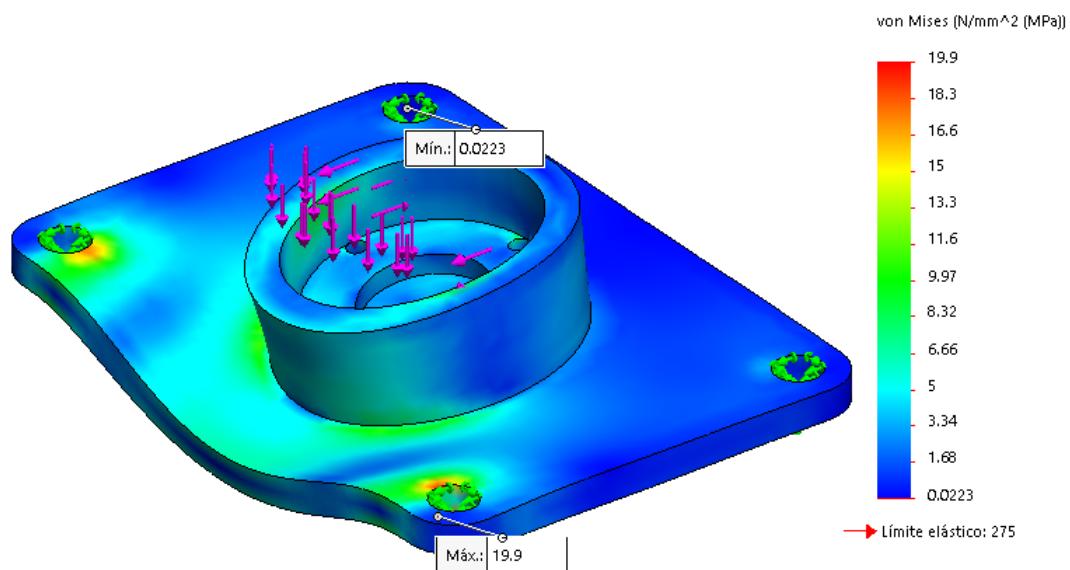


Figura 3.49: Análisis estático de resistencia de la base fija

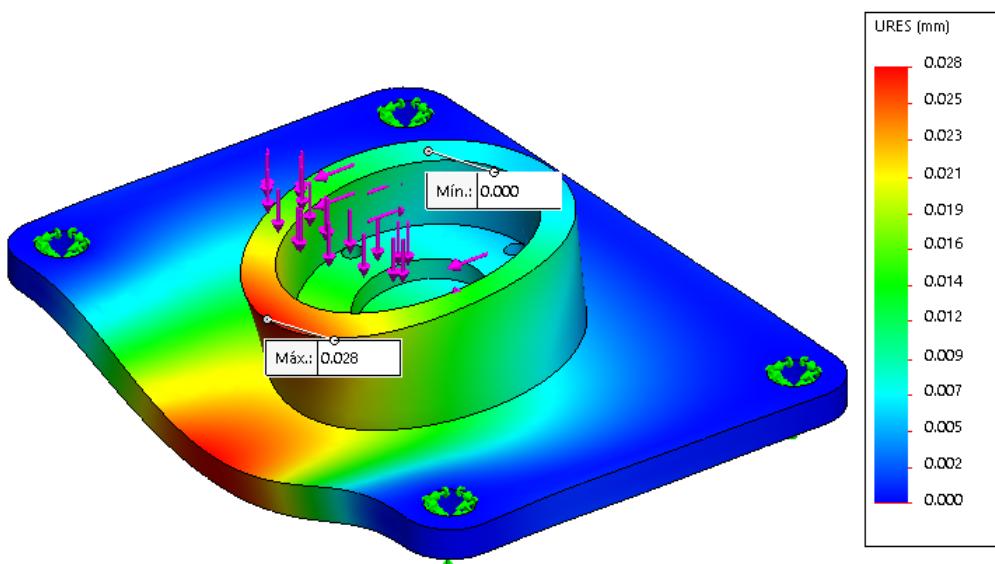


Figura 3.50: Análisis estático de rigidez de la base fija

### Diseño final de la base fija

La Figura 3.51 muestra la configuración final de la mesa ensamblada, mientras que la Figura 3.52 muestra una vista explosionada que permite apreciar los elementos que la conforman.

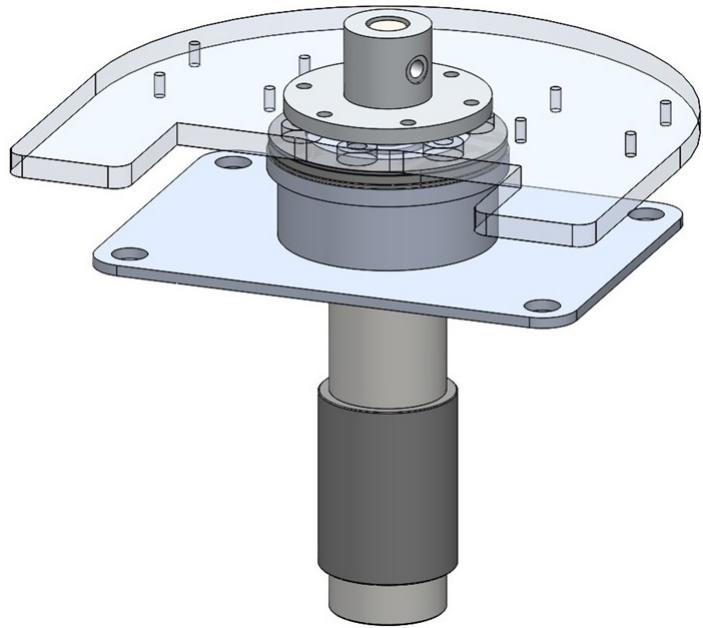


Figura 3.51: Modelo CAD de la base del manipulador

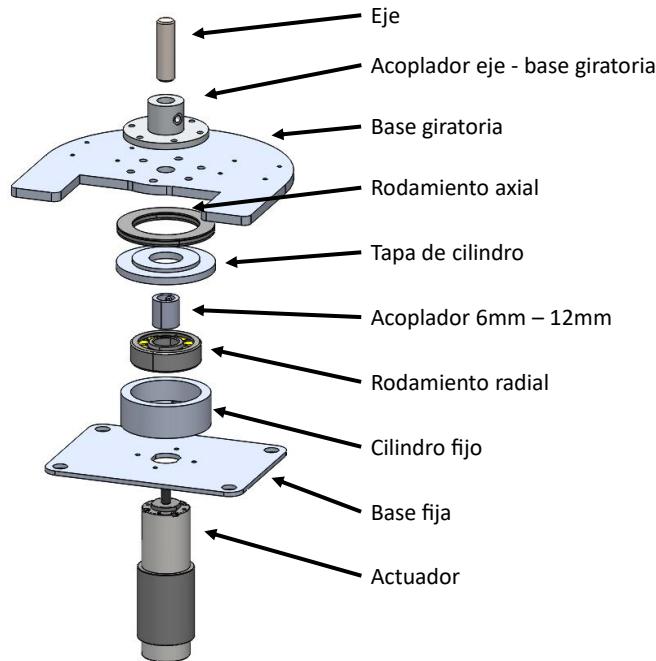


Figura 3.52: Vista explosionada del modelo CAD de la base del manipulador

### 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 al segundo eslabón, y para soportar los esfuerzos radiales, se utiliza una estructura de carga comercial que, como puede apreciarse en la vista explosionada de la Figura 3.53, 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 3.54.

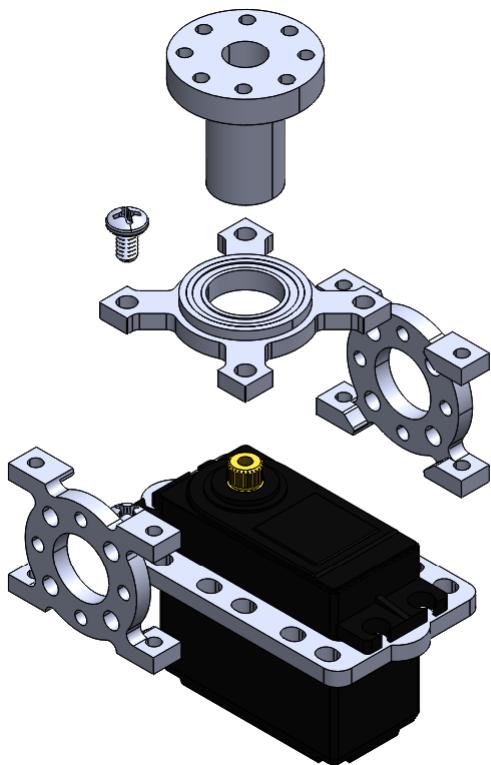


Figura 3.53: Vista explosionada de la estructura de carga del primer grado de libertad de la muñeca

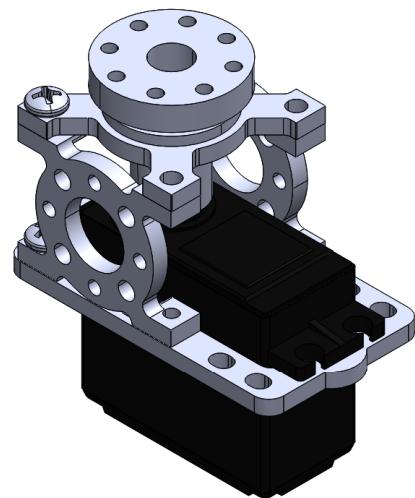


Figura 3.54: Estructura de carga ensamblada

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.
- 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 3.55, mientras que el ensamblaje se muestra en la Figura 3.56. Las piezas adquiridas se encuentran en el Anexo A. 6, mientras que los rodamientos aparecen en el Anexo A. 10.

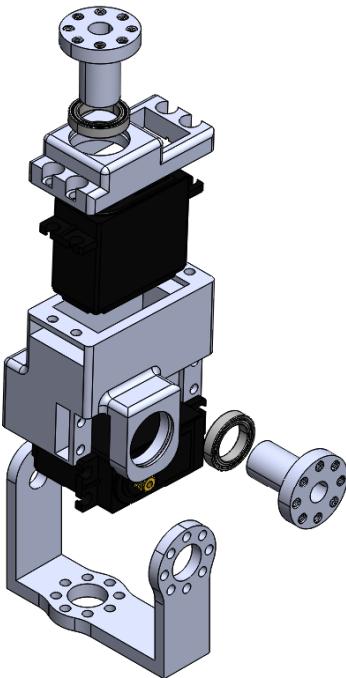


Figura 3.55: Vista explosionada de la estructura del segundo y tercer GDL

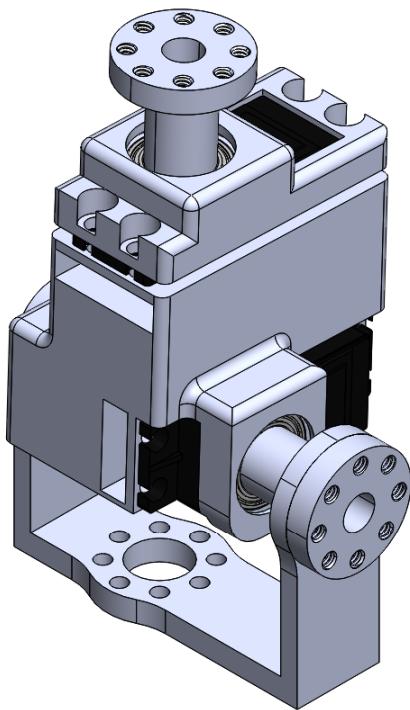


Figura 3.56: Estructura del segundo y tercer GDL ensamblada

La muñeca esférica completa con los servomotores se puede apreciar en la Figura 3.57.

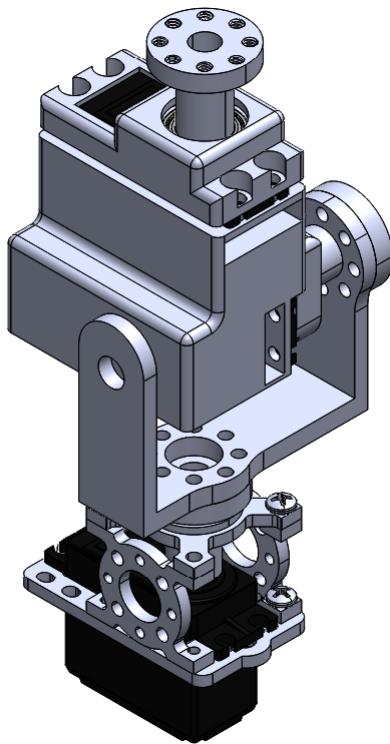


Figura 3.57: Modelo CAD de la muñeca esférica

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 máximo que deben de soportar, utilizando los diagramas mostrados en las Figuras 3.58 y 3.58, 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.

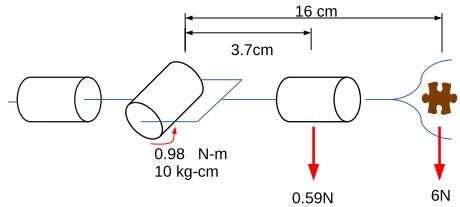


Figura 3.58: Reacción máxima para el primer grado de libertad de la muñeca

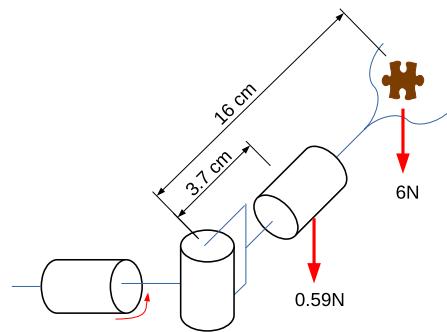


Figura 3.59: Reacción máxima para el segundo grado de libertad de la muñeca

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:

- Par máximo a  $7.4[\text{V}] = 19\ [\text{Kg cm}]$
- Corriente a motor bloqueado =  $3[\text{A}]$
- Voltaje de operación =  $4.8[\text{V}]$  a  $8.4[\text{V}]$

### 3.1.2. 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” [29], 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 3.60 se muestra un diagrama esquemático de los elementos del mecanismo.

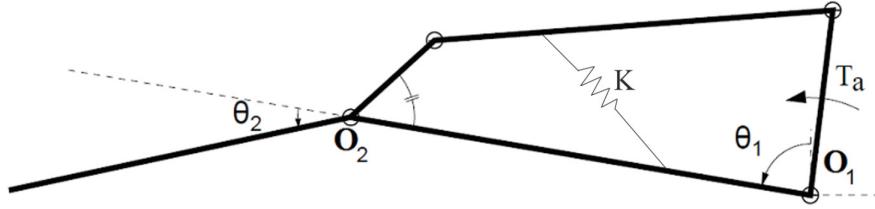


Figura 3.60: Elementos del mecanismo del gripper, IEEE

El torque de un actuador se aplica en  $O_1$ , donde el torque  $T_a$  genera un desplazamiento angular  $\theta_1$ . El resorte con módulo elástico  $K$ , ejerce una fuerza que mantiene el ángulo  $\theta_2$  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  $\theta_2$ . Dicha secuencia es mostrada en la Figura 3.61.

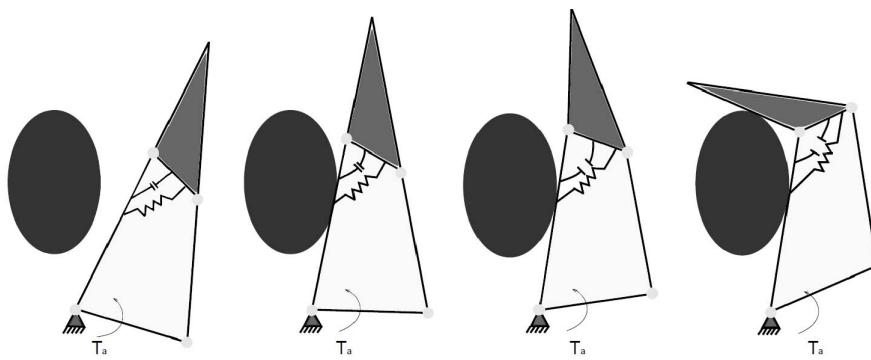


Figura 3.61: Secuencia de movimientos del mecanismo del gripper, IEEE

En la Figura 3.62 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.



Figura 3.62: Ensamblaje de una falange del gripper, IEEE

Según los resultados de las pruebas mostradas en la fuente[29], el efecto es capaz de sujetar objetos con diversas geometrías. En la Figura 3.63, 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 3.64, por lo que se propone un cambio de dimensiones en los “dedos” y la plataforma que funciona como “palma”.



Figura 3.63: Agarre del gripper con una pelota esférica, IEEE

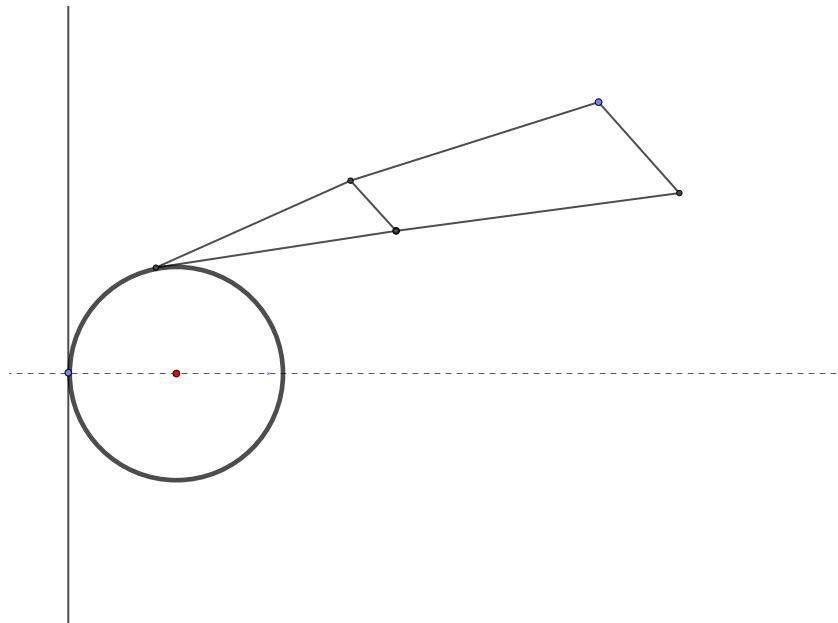


Figura 3.64: Diagrama simplificado de un dedo y la muestra objetivo

Después de realizar un análisis geométrico con el software Geogebra®, y comprobar varias opciones, se determinan las siguientes dimensiones:

- Distancia del eje central de la palma al inicio de la falange: 2.5[cm]
- Longitud de la primer falange: 6[cm]
- 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 3.65.

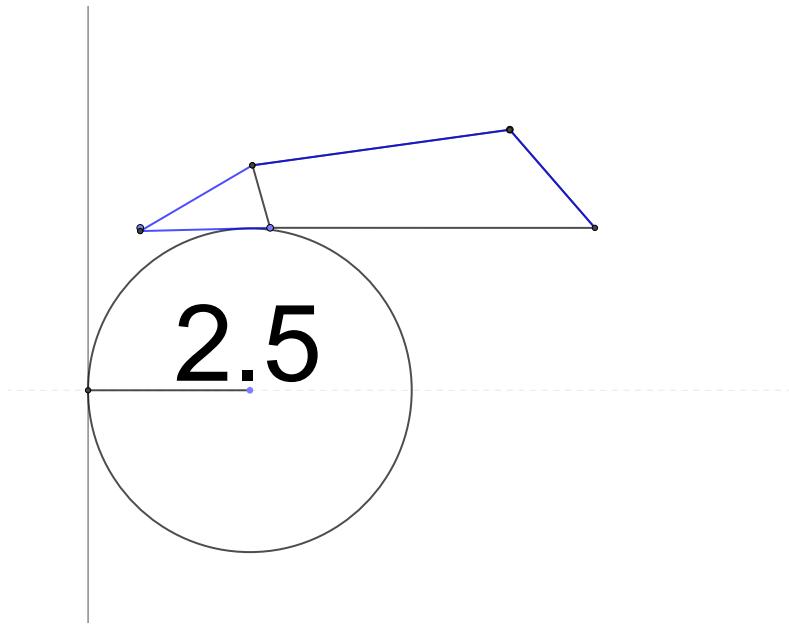


Figura 3.65: Diagrama simplificado de un dedo y la muestra objetivo

La distribución de los dedos del efecto se pueden apreciar claramente en la vista superior del efecto, mostrada en la Figura 3.66, mientras que el mecanismo subactuado se aprecia en la Figura 3.67.

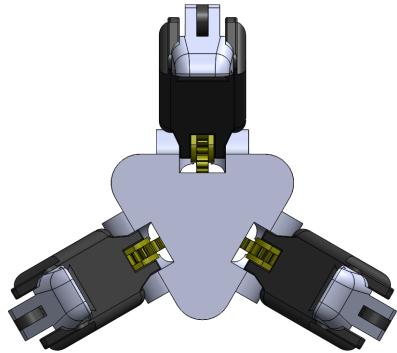


Figura 3.66: Distribución de los dedos del efecto

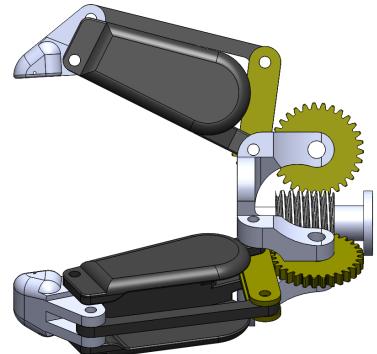


Figura 3.67: Mecanismo subactuado del efecto

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 3.68.

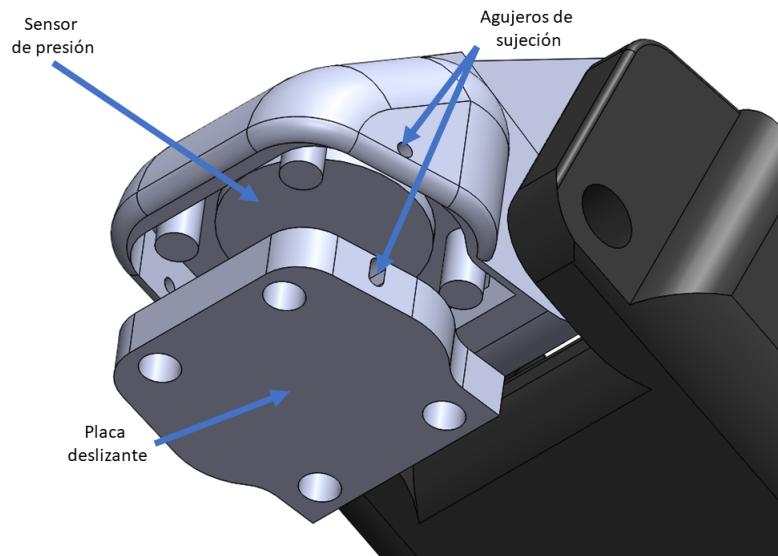


Figura 3.68: Ensamble de sensor de presión en la falange del efecto

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 A. 11) 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 3.69, y las piezas que lo componen en la vista explosionada de la Figura 3.70.

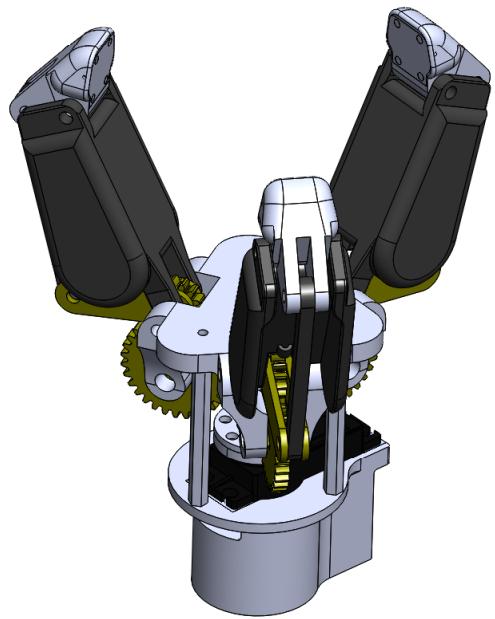


Figura 3.69: Ensamble final del efecto-  
tor

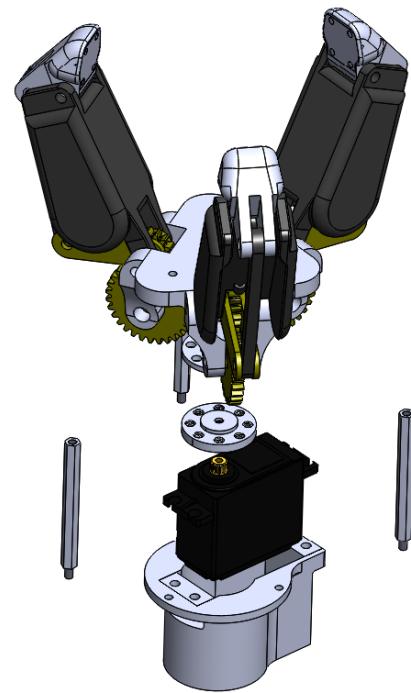


Figura 3.70: Vista explosionada del  
efector

### 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 3.71 y 3.72.

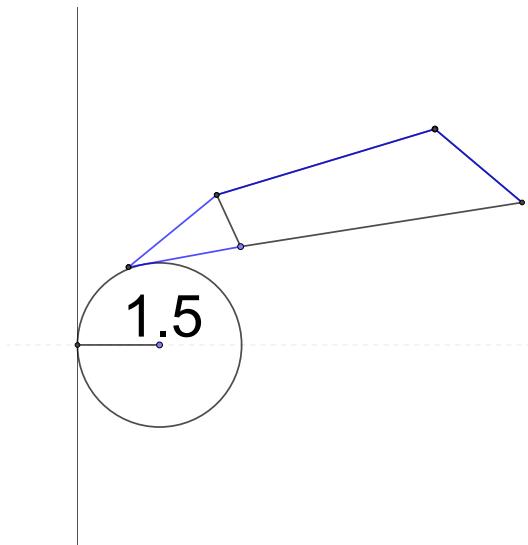


Figura 3.71: Análisis geométrico del agarre del efecto con muestra de 3[mm] de diámetro

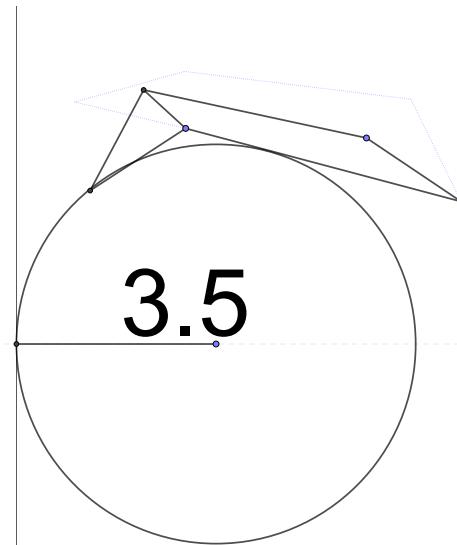


Figura 3.72: Análisis geométrico del agarre del efecto con muestra de 7[mm] de diámetro

### 3.1.3. Modelo matemático del sistema robótico

#### Modelo cinemático

##### Cinemática directa

Para abordar el problema de cinemática directa, primeramente se establecen marcos coordenados, que sirven como referencia para la posición y orientación de cada eslabón, de acuerdo a la convención de Denavit-Hartenberg [19], como se ve en la Figura 3.73.

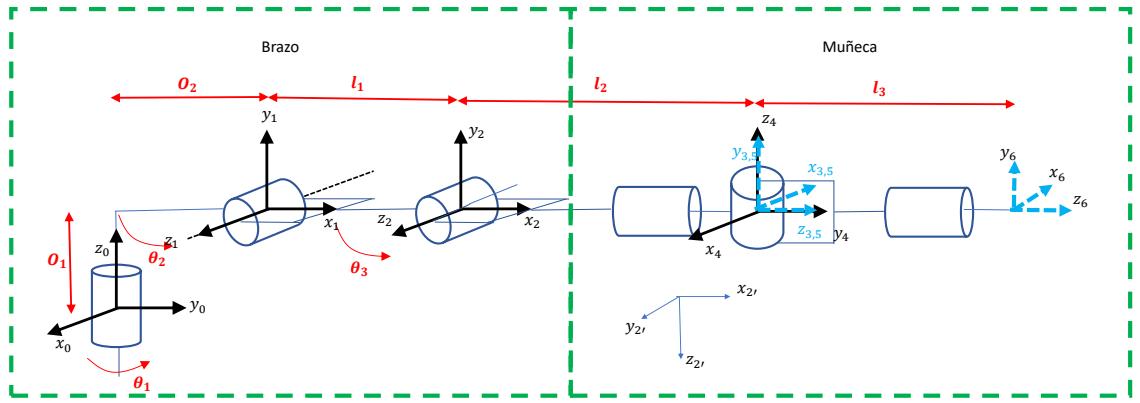


Figura 3.73: Asignación de los marcos de referencia a las articulaciones del robot

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.

Tabla 3.3: Parámetros de Denavit-Hartenberg

$i$	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$	Offset
1	$\theta_1$	$o_{ff1}$	$o_{ff2}$	$\frac{\pi}{2}$	0
2	$\theta_2$	0	$l_1$	0	0
2'	$\theta_3$	0	$l_2$	$\frac{\pi}{2}$	0
3	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	0
4	$\theta_4$	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$
5	$\theta_5$	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$
6	$\theta_6$	$l_3$	0	0	0

Al sustituir los valores de los parámetros de Denavit-Hartenberg, indicados en la Tabla 3.3, las matrices de transformación homogénea resultan de la siguiente manera:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & O_2 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & O_2 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & O_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A'_2 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & l_2 c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & l_2 s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ -s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} -c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ -s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente, para obtener la matriz  $T_0^6$ , se posmultiplican las matrices como sigue<sup>1</sup>:

$$T_{0(:,1)}^6 = \begin{bmatrix} s_6(s_1s_4 - s_{23}c_1c_4) - c_6(s_1c_4c_5 + c_1(s_{23}s_4c_5 + s_5c_{23})) \\ c_1(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_1(c_6(s_{23}s_4c_5 + s_5c_{23}) + s_{23}s_6c_4) \\ c_{23}(s_4c_5c_6 + s_6c_4) - s_{23}s_5c_6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{0(:,2)}^6 = \begin{bmatrix} s_1(s_4c_6 + s_6c_4c_5) + c_1(s_6(s_{23}s_4c_5 + s_5c_{23}) - s_{23}c_4c_6) \\ s_4(-c_1)c_6 + s_1s_6(s_{23}s_4c_5 + s_5c_{23}) - c_4(s_1s_{23}c_6 + s_6c_1c_5) \\ s_{23}s_5s_6 + c_{23}(c_4c_6 - s_4s_6c_5) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{0(:,3)}^6 = \begin{bmatrix} c_1c_{23}c_5 - s_5(s_1c_4 + s_{23}s_4c_1) \\ s_1c_{23}c_5 + s_5(c_1c_4 - s_1s_{23}s_4) \\ s_{23}c_5 + s_4s_5c_{23} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{0(:,4)}^6 = \begin{bmatrix} l_1c_1c_2 + l_2c_1c_{23} + l_3(c_1c_{23}c_5 - s_5(s_1c_4 + s_{23}s_4c_1)) + O_2c_1 \\ l_1s_1c_2 + l_2s_1c_{23} + l_3(s_1c_{23}c_5 + s_5(c_1c_4 - s_1s_{23}s_4)) + O_2s_1 \\ l_1s_2 + l_3s_4s_5c_{23} + s_{23}(l_3c_5 + l_2) + O_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

---

<sup>1</sup>Este producto es muy largo, por lo que se escribe el resultado columna por columna con la notación (: todas las filas, # de columna)

## Validación del modelo cinemático

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 3.74, en donde se puede observar que la configuración formada por los parámetros de la Tabla 3.3 son congruentes con la configuración de la asignación de marcos de la Figura 3.73.

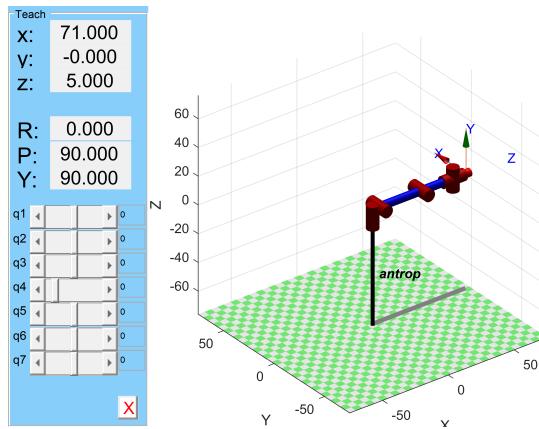


Figura 3.74: Modelo tridimensional del sistema robótico desarrollado en el toolbox *Robotics* de Peter Corke para MATLAB®

## 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

3.75 muestra la proyección del centro de la muñeca en el plano  $x_0 - y_0$ , permitiendo ver fácilmente el valor de  $\theta_1$  como una relación entre las coordenadas  $x_c$  y  $y_c$  del centro de la muñeca, como se muestra en la ecuación 3.7.

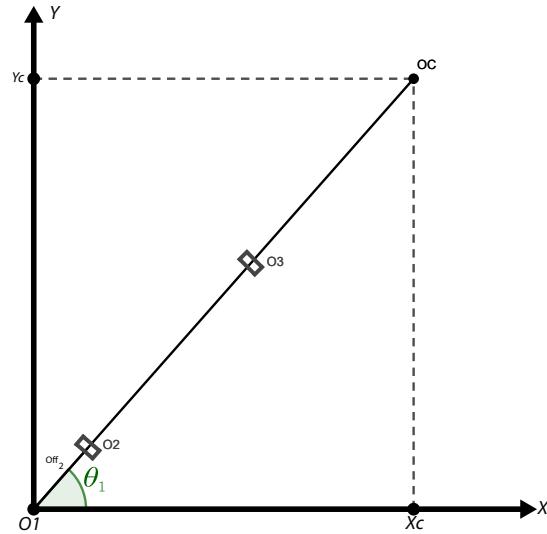


Figura 3.75: Proyección del centro de la muñeca en el plano  $x_0 - y_0$

$$\theta_1 = \text{atan2}(x_c, y_c) \quad (3.7)$$

En donde:  $\theta_1$  = Valor de la variable del primer grado de libertad.

Para encontrar el valor de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ , resulta de gran utilidad la Figura 3.76.

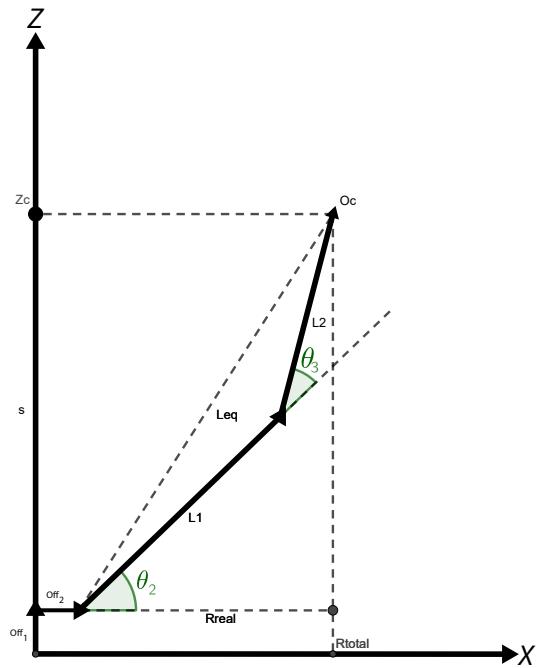


Figura 3.76: Proyección del centro de la muñeca en el plano formado por los eslabones

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  $\theta_3$  mediante la ley de cosenos.

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

Dado que  $l_{eq}^2 = (x_c^2 + y_c^2 - off_2)^2$  y  $s^2 = z_c - off_1$ . Entonces,  $\theta_3$  está dada por la ecuación 3.8.

$$\theta_3 = \text{atan2}\left(D, \pm \sqrt{1 - D^2}\right) \quad (3.8)$$

En donde:

$$\theta_3 = \text{Valor de la variable del tercer grado de libertad.}$$

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  $\theta_2$ , definido por la ecuación 3.9.

$$\theta_2 = \text{atan2}(r_{real}, s) - \text{atan2}(l_1 + l_2 c_3, l_2 s_3)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - off_2}, z_c - off_1\right) - \text{atan2}(l_1 + l_2 c_3, l_2 s_3) \quad (3.9)$$

En donde:

$$\theta_2 = \text{Valor de la variable del segundo grado de libertad.}$$

### 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:

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -s_4c_6 - s_6c_4c_5 & s_5c_4 \\ s_4c_5c_6 + s_6c_4 & c_4c_6 - s_4s_6c_5 & s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix}$$

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} -s_1 & -s_{23}c_1 & c_1c_{23} \\ c_1 & -s_1s_{23} & s_1c_{23} \\ 0 & c_{23} & s_{23} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Para construir  $(R_3^0)^T R$  se utiliza la ecuación 1.18 y 3.10, 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  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  y  $\theta_6$  como sigue.

$$\theta_5 = \text{atan2}\left(r_{13}c_1c_{23} + r_{23}s_1c_{23} + r_{33}s_{23}, \pm\sqrt{1 - (r_{13}c_1c_{23} + r_{23}s_1c_{23} + r_{33}s_{23})^2}\right) \quad (3.11)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}\left(\pm\sqrt{s_5^2 - (r_{33}c_{23} - r_{13}c_1s_{23} - r_{23}s_1s_{23})^2}, r_{33}c_{23} - r_{13}c_1s_{23} - r_{23}s_1s_{23}\right) \quad (3.12)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}\left(\pm\sqrt{s_5^2 - (r_{12}c_1c_{23} + r_{22}s_1c_{23} + r_{32}s_{23})^2}, r_{12}c_1c_{23} + r_{22}s_1c_{23} + r_{32}s_{23}\right) \quad (3.13)$$

## 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.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 c_2 - l_2 s_1 c_{23} - l_3 (s_1 c_{23} c_5 + s_5 (c_1 c_4 - s_1 s_{23} s_4)) - O_2 s_1 \\ l_1 c_1 c_2 + l_2 c_1 c_{23} + l_3 (c_1 c_{23} c_5 - s_5 (s_1 c_4 + c_1 s_{23} s_4)) + O_2 c_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -c_1 (l_1 s_2 + l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ -s_1 (l_1 s_2 + l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ l_1 c_2 - l_3 s_{23} s_4 s_5 + c_{23} (l_3 c_5 + l_2) \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -c_1 (l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ -s_1 (l_3 s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_3 c_5 + l_2)) \\ -l_3 s_4 s_5 s_{23} + c_{23} (l_3 c_5 + l_2) \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} l_3 s_5 (s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) \\ -l_3 s_5 (c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) \\ l_3 s_5 c_{23} c_4 \\ c_1 c_{23} \\ s_1 c_{23} \\ s_{23} \end{bmatrix}$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} -l_3 (s_1 c_4 c_5 + c_1 (s_{23} s_4 c_5 + s_5 c_{23})) \\ l_3 (c_1 c_4 c_5 - s_1 (s_{23} s_4 c_5 + s_5 c_{23})) \\ l_3 (s_4 c_{23} c_5 - s_{23} s_5) \\ s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4 \\ -c_1 s_4 - s_1 s_{23} c_4 \\ c_{23} c_4 \end{bmatrix}$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_1 c_{23} c_5 - s_5 (s_1 c_4 + c_1 s_{23} s_4) \\ s_1 c_{23} c_5 + s_5 (c_1 c_4 - s_1 s_{23} s_4) \\ s_{23} c_5 + s_4 s_5 c_{23} \end{bmatrix}$$

$$J = \left[ \begin{array}{c|c|c|c|c|c} J_1 & J_2 & J_3 & J_4 & J_5 & J_6 \end{array} \right] \quad (3.14)$$

### Jacobiano para singularidades

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

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (o_3 - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$J_{11} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -c_1l_2s_{23} \\ c_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -s_1l_2s_{23} \\ 0 & l_1c_2 + l_2c_{23} & l_2c_{23} \end{bmatrix}$$

$$J_{22} = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & s_1s_4 - s_{23}c_1c_4 & c_1c_{23}c_5 - s_5(s_1c_4 + s_{23}s_4c_1) \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23}c_4 - s_4c_1 & s_1c_{23}c_5 + s_5(c_1c_4 - s_1s_{23}s_4) \\ s_{23} & c_{23}c_4 & s_{23}c_5 + s_4s_5c_{23} \end{bmatrix}$$

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

$$\det J_{11} = -l_1l_2s_3(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) \quad (3.16)$$

$$\det J_{22} = -s_5 \quad (3.17)$$

De 3.16, se puede observar que las singularidades del brazo se presentan cuando

$$\theta_3 = 0$$

$$l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2 = 0$$

Mientras que de 3.17 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

$$J_{v\omega 1} = \begin{bmatrix} -O_2 s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ O_2 c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v\omega 2} = \begin{bmatrix} -s_1 (l_{c1}c_2 + O_2) & -l_{c1}s_2c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 (l_{c1}c_2 + O_2) & -l_{c1}s_1s_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{c1}c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v\omega 3} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_{c2}c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_{c2}s_{23}) & -l_{c2}s_{23}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_1c_2 + l_{c2}c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_{c2}s_{23}) & -l_{c2}s_1s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1c_2 + l_{c2}c_{23} & l_{c2}c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v\omega 4} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_{23}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_1s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1c_2 + l_2c_{23} & l_2c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & c_1c_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & s_1c_{23} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & s_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v\omega 5} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -c_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_{23}c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_1(l_1c_2 + l_2c_{23} + O_2) & -s_1(l_1s_2 + l_2s_{23}) & -l_2s_1s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1c_2 + l_2c_{23} & l_2c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & c_1c_{23} & s_1s_4 - s_{23}c_1c_4 & 0 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & s_1c_{23} & -s_1s_{23}c_4 - s_4c_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & s_{23} & c_{23}c_4 & 0 \end{bmatrix}$$

$J_{v\omega 6}$  es igual al Jacobiano calculado en la ecuación eq:Jacobiano, pues toma en cuenta el movimiento de todas las juntas, por lo que solo se requiere sustituir  $l_3$  por  $l_{c3}$  como sigue

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 c_2 - l_2 s_1 c_{23} - l_{c3} (s_1 c_{23} c_5 + s_5 (c_1 c_4 - s_1 s_{23} s_4)) - O_2 s_1 \\ l_1 c_1 c_2 + l_2 c_1 c_{23} + l_{c3} (c_1 c_{23} c_5 - s_5 (s_1 c_4 + c_1 s_{23} s_4)) + O_2 c_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -c_1 (l_1 s_2 + l_{c3} s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_{c3} c_5 + l_2)) \\ -s_1 (l_1 s_2 + l_{c3} s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_{c3} c_5 + l_2)) \\ l_1 c_2 - l_{c3} s_{23} s_4 s_5 + c_{23} (l_{c3} c_5 + l_2) \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -c_1 (l_{c3} s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_{c3} c_5 + l_2)) \\ -s_1 (l_{c3} s_4 s_5 c_{23} + s_{23} (l_{c3} c_5 + l_2)) \\ -l_{c3} s_4 s_5 s_{23} + c_{23} (l_{c3} c_5 + l_2) \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} l_{c3} s_5 (s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) \\ -l_{c3} s_5 (c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) \\ l_{c3} s_5 c_{23} c_4 \\ c_1 c_{23} \\ s_1 c_{23} \\ s_{23} \end{bmatrix}$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} -l_{c3}(s_1c_4c_5 + c_1(s_{23}s_4c_5 + s_5c_{23})) \\ l_{c3}(c_1c_4c_5 - s_1(s_{23}s_4c_5 + s_5c_{23})) \\ l_{c3}(s_4c_{23}c_5 - s_{23}s_5) \\ s_1s_4 - c_1s_{23}c_4 \\ -c_1s_4 - s_1s_{23}c_4 \\ c_{23}c_4 \end{bmatrix}$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_1c_{23}c_5 - s_5(s_1c_4 + c_1s_{23}s_4) \\ s_1c_{23}c_5 + s_5(c_1c_4 - s_1s_{23}s_4) \\ s_{23}c_5 + s_4s_5c_{23} \end{bmatrix}$$

En donde:

$l_{ci}$  = Distancia al centro de masa de la i-ésima junta definida por  $l_i/2$

### 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

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5$$

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 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.

### 3.2. Sistema de Información (S2)

#### 3.2.1. 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. 12) 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. Para ello se recurre a dos herramientas muy útiles en el campo de la visión por computadora, las cuales son la *homografía* y la *estereopsis*.

Se requieren dos imágenes, una vez obtenidas, se realiza la corrección de perspectiva a través de la homografía, obteniendo una vista superior del suelo, con lo que es posible conocer las coordenadas  $x, y$  de la muestra, mientras que, para calcular la profundidad en el eje  $z$ , se utiliza la estereopsis con ayuda de un diagrama como el de la Figura 1.8.

La selección de cámaras se realiza de acuerdo al árbol de decisiones mostrado en el Anexo A. 13.

De los 2 modelos restantes, se selecciona la cámara más económica, pues ambas cumplen con los requerimientos mínimos, con especificaciones en el Apéndice A. 4.

Para la implementación de este algoritmo, se propone utilizar software libre, siendo seleccionado el lenguaje de programación Python, con la biblioteca OpenCV, la cual está orientada a la visión por computadora.

### 3.2.2. 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 3.77. Debido a que estos componentes forman parte de diferentes sistemas, la unión de ellos se realiza en el capítulo “Integración”.

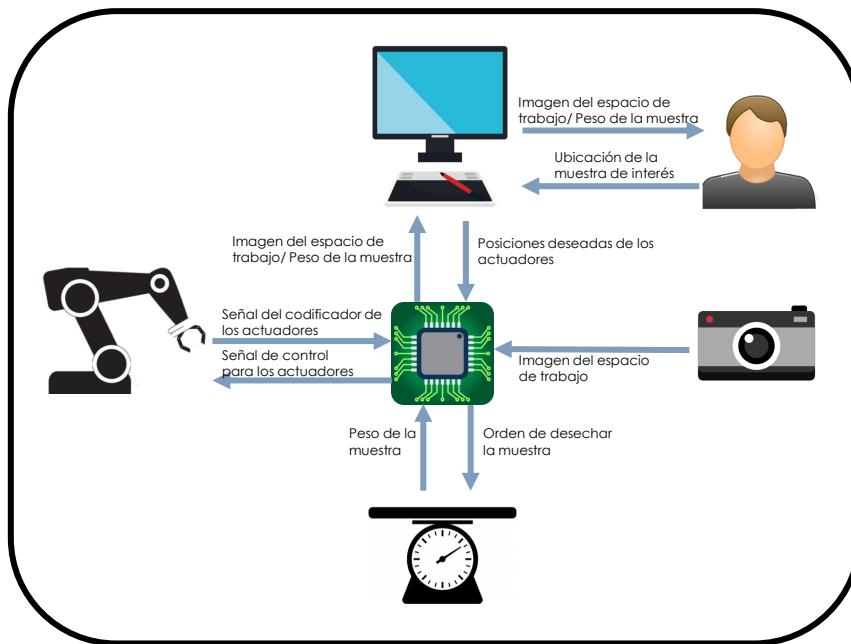


Figura 3.77: Diagrama de comunicación entre módulos

Con ayuda de este diagrama, se determinan los requerimientos de comunicación, mostrados en la Tabla 3.4, 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 3.4 se muestra la forma en que cada uno de

Tabla 3.4: Requerimientos de comunicación

Elemento	Numero 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

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 3.78.

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

- 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.



Figura 3.78: Elementos básicos de la interfaz de usuario

### 3.2.3. Módulo de procesamiento (M5)

Para seleccionar un sistema de procesamiento adecuado, es necesario tomar en cuenta lo siguiente[35]

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 entorno de desarrollo

Las interfaces de hardware se encuentran enlistadas en la Tabla 3.4.

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 3.79, proporcionada por el fabricante ARM[36], 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 3.5.

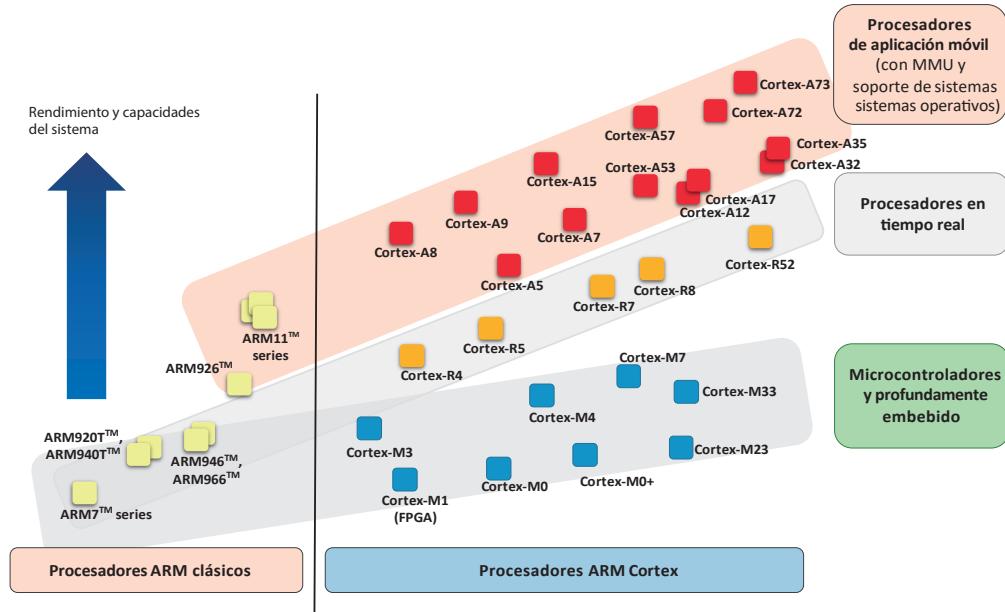


Figura 3.79: Familia de procesadores ARM, ARM

De acuerdo a esto, se selecciona la tarjeta de desarrollo STM32F446 (Anexo A. 14), pues cumple con las características necesarias y ya se cuenta con ella.

### 3.3. 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 3.6.

Tabla 3.5: 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 3.6: 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 $\mu$	-	0.005
Módulo ADC de celda de carga	5	1 $\mu$	0.0015	0.0015
Tarjeta de procesamiento	5	0.0512	0.081	0.120
Sensor de temperatura (x3)	5	150 $\mu$	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

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, 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:

$$\begin{aligned}
i_{reposto} &= 3i_{sf} + i_{lc} + i_{tarjeta} + 3i_{st} + 3i_{encoder} \\
&= 3 * 0.5[\mu A] + 1[\mu A] + 0.0512[A] + 3 * 150[\mu A] + 3 * 0.002[A] \\
&= 57.6545[mA] \\
i_{máxima} &= 3i_{sf} + i_{lc} + i_{tarjeta} + 3i_{st} + 3i_{encoder} + i_{cam} + i_{motor2} + 4i_{servos} \\
&= 3 * 0.005[A] + 0.0015[A] + 0.120[A] + 3 * 0.0025[A] + \dots \\
&\quad + 3 * 0.005[A] + 10[A] + 2 * 0.390[A] + 3.829[A] + 4 * 1.43[A] \\
&= 20.48[A]
\end{aligned}$$

En donde:

$i_{reposto}$  = Corriente consumida por el sistema en reposo

$i_{máxima}$  = Corriente máxima consumida por el sistema

$i_{sf}$  = Corriente del sensor de fuerza en reposo

$i_{lc}$  = Corriente de la celda de carga en reposo

$i_{tarjeta}$  = Corriente de la tarjeta de desarrollo en reposo

$i_{st}$  = Corriente del sensor de temperatura en reposo

$i_{encoder}$  = Corriente del encoder en reposo

$i_{motor}$  = Corriente consumida por el motor del primer eslabón

$i_{motores}$  = Corriente consumida por el motor del segundo eslabón

$i_{servos}$  = Corriente consumida por los servomotores

$i_{cam}$  = Corriente consumida por la cámara

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[37] y S-500-12[38] del fabricante Yueqing Mingwei Electric Co. Ltd.), sin embargo se selecciona el modelo S-500-12 (Anexo

A. 15), ya que aunque cuesta 10 USD más, tiene varias ventajas como 11[A] extras, protección contra altas temperaturas y garantía de 2 años.

### 3.3.1. Acondicionamiento

Según la Tabla 3.6, 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 conmutados 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 se muestra a continuación:

- 12[V]: No requiere convertidor.
- 7.6[V]: 7.15[A]
- 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]: 2xGS2678 de DFRobot en paralelo para sumar corrientes (cada uno suministra 5[A]) (Anexo A. 16)
- 5[V] a 0.939[A]: S9V11F3S5 de Pololu (Anexo A. 17)

### 3.3.2. Distribución

Con ayuda de la Figura 1.4 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. 15), y tiene una longitud de aproximadamente 9m, por lo que el calibre necesario es 12.

### **3.4. 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 desechador (M7).

El concepto mejorado (Figura 2.16) comprende un cono trunco que aumenta la superficie en donde el sistema robótico (S1) puede depositar la muestra, además de que la pendiente 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 3.18, presente en la guía de selección de celdas de carga [39], 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.

$$Capacidad = \frac{(Ic * L + L0) * Lec * Lic}{Nc} \quad (3.18)$$

En donde:

$Ic$  = Coeficiente de impacto

$L$  = Carga maxima a medir.

$L0$  = Carga inicial (Peso de la superficie de medición).

$Lec$  = 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 2.16 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 3.80.

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.

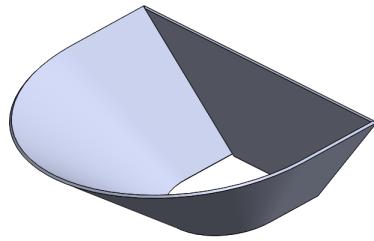


Figura 3.80: Contenedor de la muestra

Como se ve en la Figura 3.81, 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.

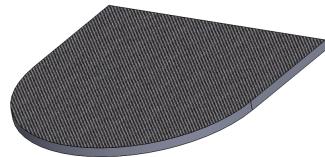


Figura 3.81: Superficie de medición

Finalmente, el mecanismo desechador consta de un actuador que remueve la superficie de medición para que la muestra caiga. El actuador se acopla al costado del embudo contenedor, como se muestra en la Figura 3.82.

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.

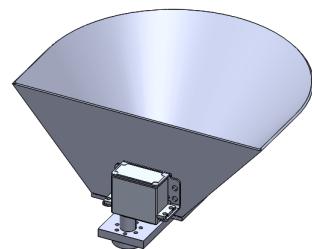


Figura 3.82: Mecanismo de desecho

La distribución de estos módulos se puede apreciar fácilmente con la ayuda de la vista lateral, mostrada en la Figura 3.83.

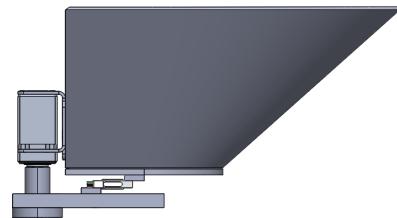


Figura 3.83: Vista lateral del laboratorio

Finalmente, los módulos que conforman el laboratorio pueden observarse en la Figura 3.84, mientras que el ensamblaje completo se muestra en la Figura 3.85.

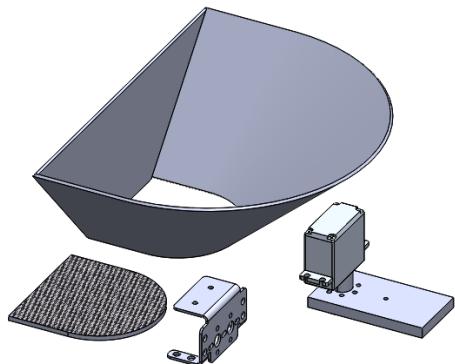


Figura 3.84: Vista explosionada del laboratorio

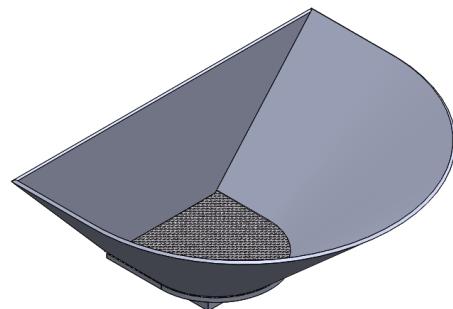


Figura 3.85: Laboratorio ensamblado

## 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 [30] 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]
- Características de malla: Mostradas en la Figura 3.86.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Non lineal 1 [Predeterminado]
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	5.36038 mm
Tolerancia	0.268019 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	15077
Número total de elementos	8798
Cociente de aspecto máximo	21.177
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	91.8
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0.205
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla [hh:mm:ss]	00:00:03
Nombre de computadora	LAPTOP-OSCAR

Figura 3.86: Características de mallado del análisis dinámico

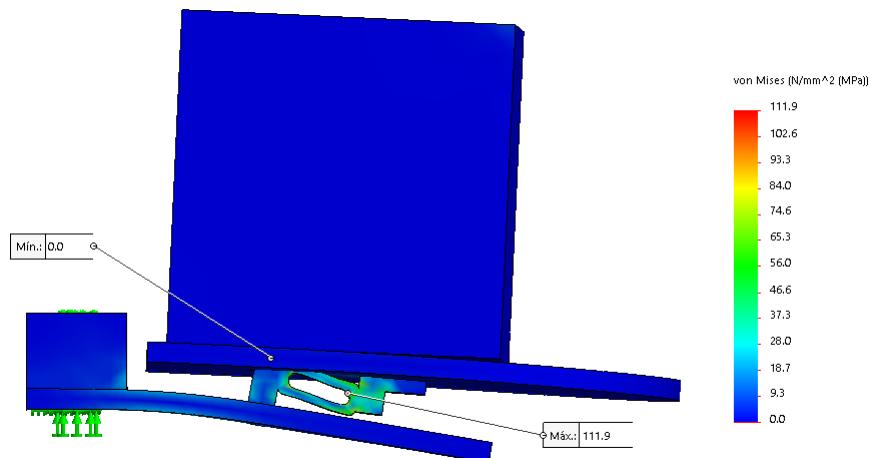


Figura 3.87: Análisis dinámico de impacto de la muestra sobre la superficie de medición del laboratorio

El estudio mostrado en la Figura 3.87 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.

### 3.5. 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 3.88.

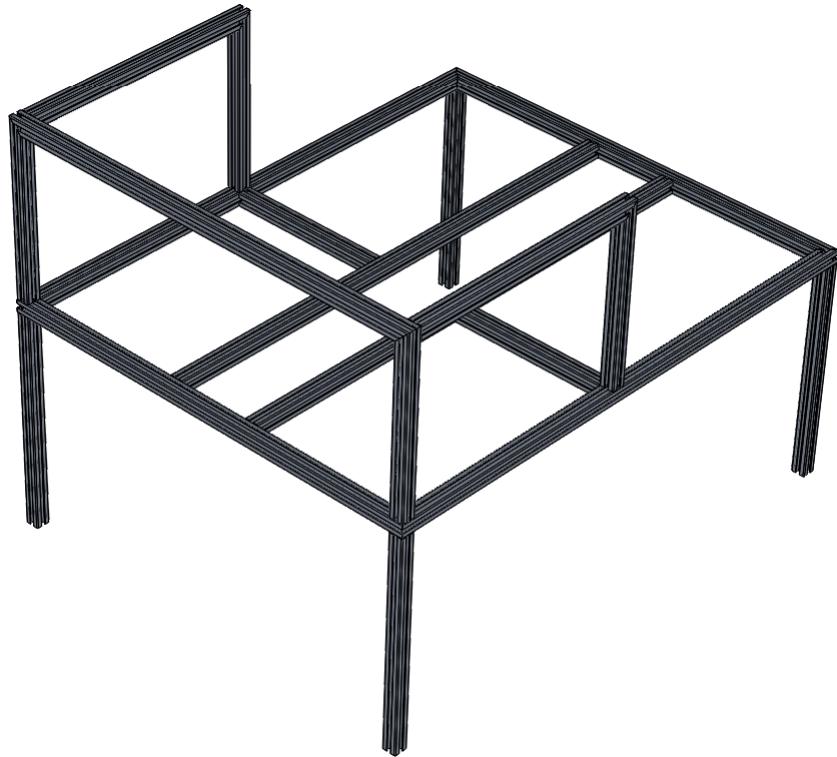


Figura 3.88: Estructura modificada del banco de pruebas



---

## 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<sup>1</sup>.

Recuérdese que:

---

<sup>1</sup>Para este punto ya se ha realizado la integración de los módulos a través del diseño de dominio específico

$S1 :=$  Sistema 1: Manipulador robótico

$M1 :=$  Módulo 1: Manipulador robótico

$M2 :=$  Módulo 2: Efector

$S2 :=$  Sistema 2: Información

$M3 :=$  Módulo 3: Percepción

$M4 :=$  Módulo 4: Comunicación

$M5 :=$  Módulo 5: Procesamiento

$S3 :=$  Sistema 3: Energético

$S4 :=$  Sistema 4: Laboratorio

$M6 :=$  Módulo 6: Obtención de datos

$M7 :=$  Módulo 7: Desechador

$S5 :=$  Sistema 5: Estructural

El estado de integración se define por  $SIx$  en donde  $x$  indica la secuencia de integración.

## 4.1. Integración de hardware

### Sistema robótico

En primer lugar, se integra el módulo del manipulador robótico con el efector final a través del último GDL de la muñeca, utilizando un cople en el eje del servomotor para unirlo con la base del efector, como se muestra en la Figura 4.1.

Estado de integración

$$M1 + M2 = S1$$

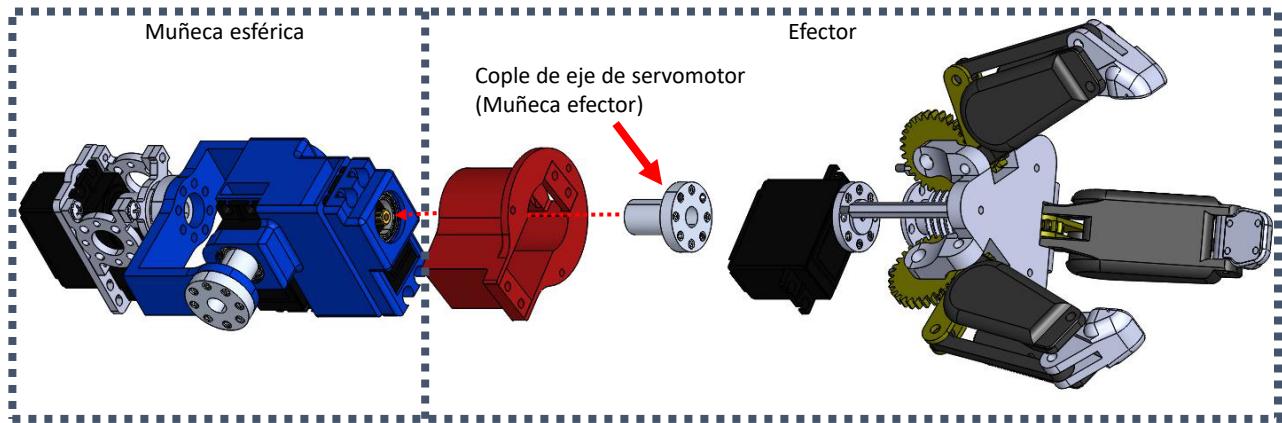


Figura 4.1: Integración del manipulador a través de la muñeca

## 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 4.2.

## Validación

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, realizado con una malla de características mostradas en la Figura 4.3, comprende un estudio de resistencia, el cual se muestra en la Figura 4.4, que indica que el esfuerzo torsional y axial máximo de  $7.04[\text{MPa}]$ , mientras que, de acuerdo al fabricante[40], el esfuerzo de cedencia es  $241[\text{MPa}]$ . Por otro lado, el estudio de rigidez, mostrado en la Figura 4.5, indica que la deflexión máxima es de  $1.9[\text{mm}]$ .

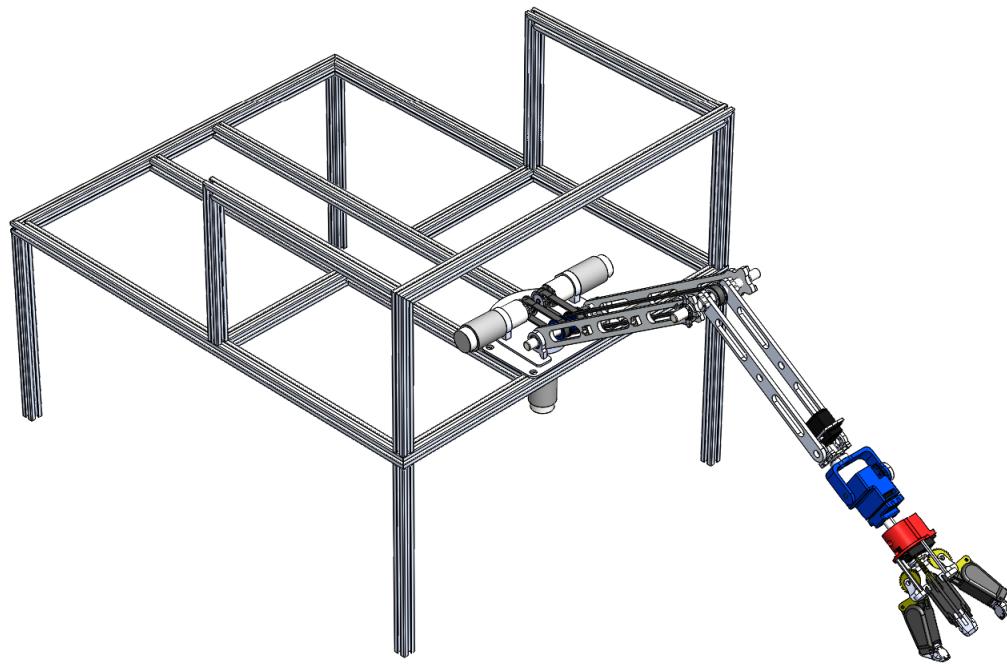


Figura 4.2: Integración del sistema robótico con el sistema estructural

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla mixta
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Verificación jacobiana para el vaciado	Activar
Tamaño de elementos	2.22173 mm
Tolerancia	0.111087 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	53316
Número total de elementos	31382
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:26
Nombre de computadora	

Figura 4.3: Características del mallado del análisis estático del sistema estructural

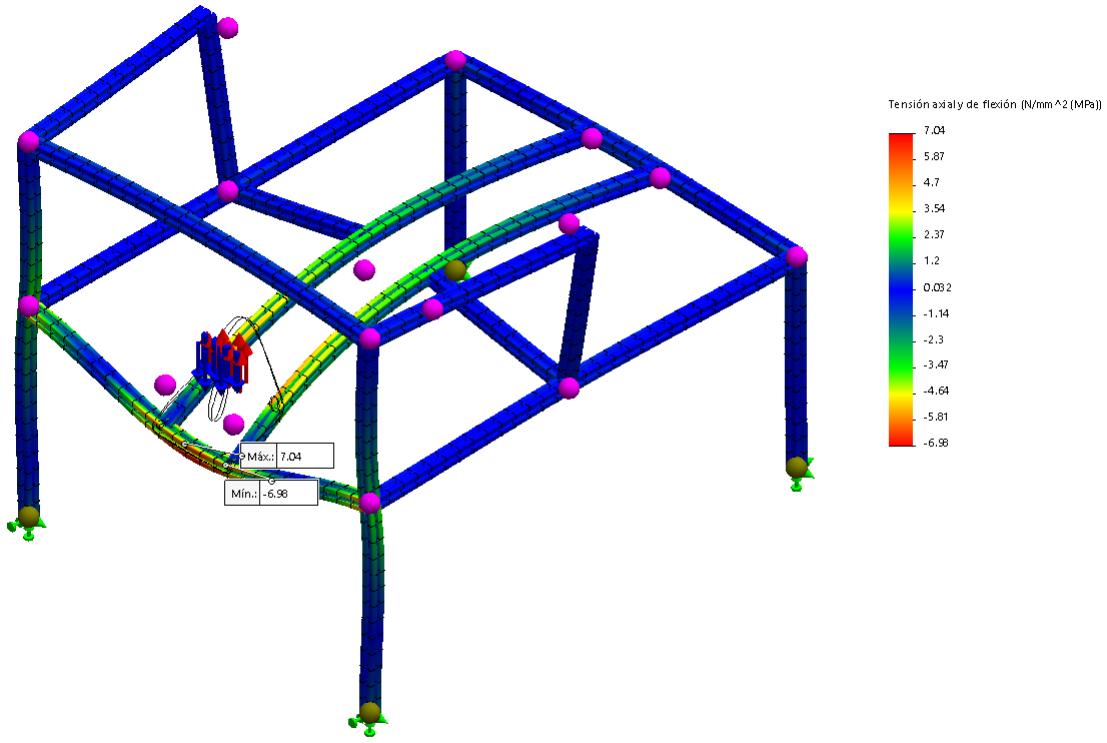


Figura 4.4: Análisis de resistencia de la estructura

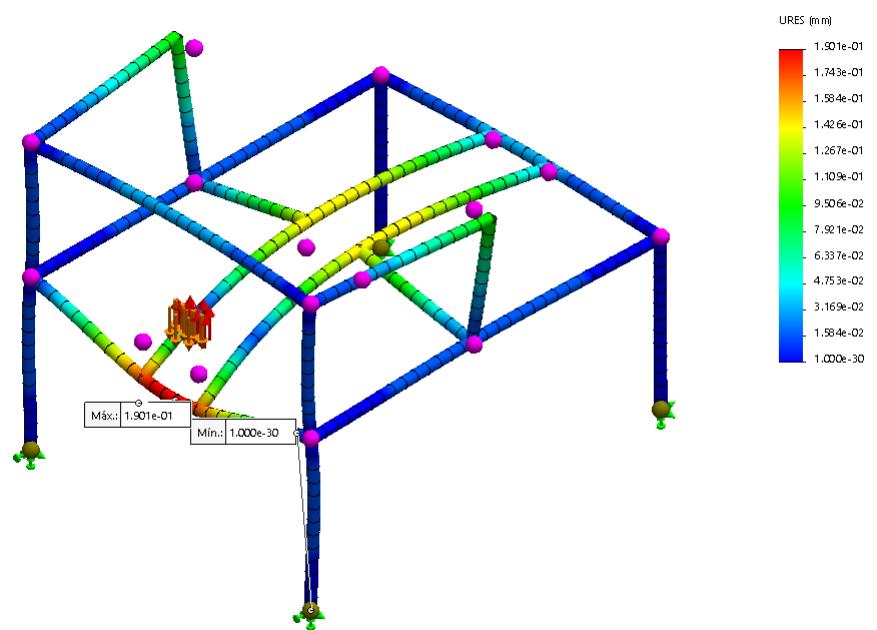


Figura 4.5: Análisis de rigidez de la estructura

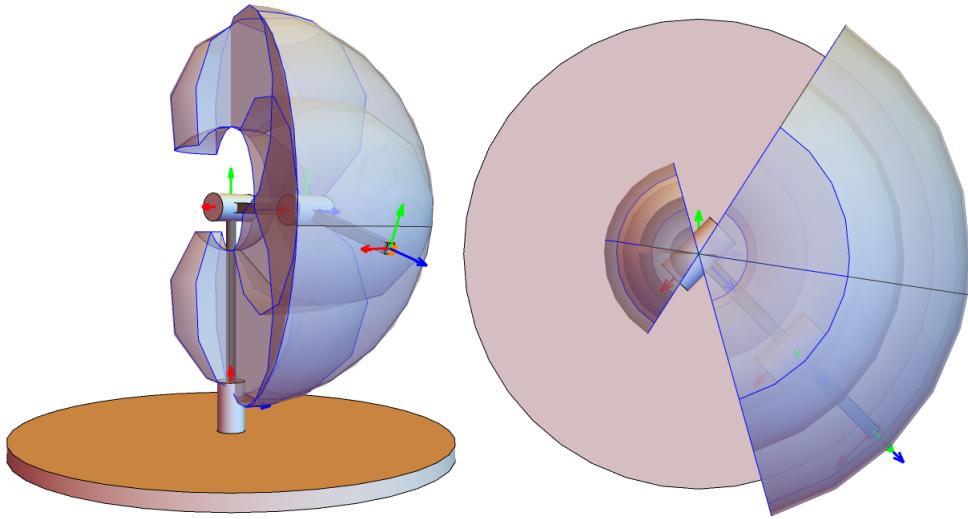


Figura 4.6: Espacio de trabajo del robot

### 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 4.6.<sup>2</sup>

### 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 4.7. 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 4.8, mientras que en la Figura 4.9 se utiliza una tela para que repose el efecto final. 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

---

<sup>2</sup>El volumen del espacio de trabajo no está a escala, debido a que la herramienta del software Mathematica <sup>®</sup>solo permite graficar el espacio de trabajo con longitudes de eslabones preestablecidas.

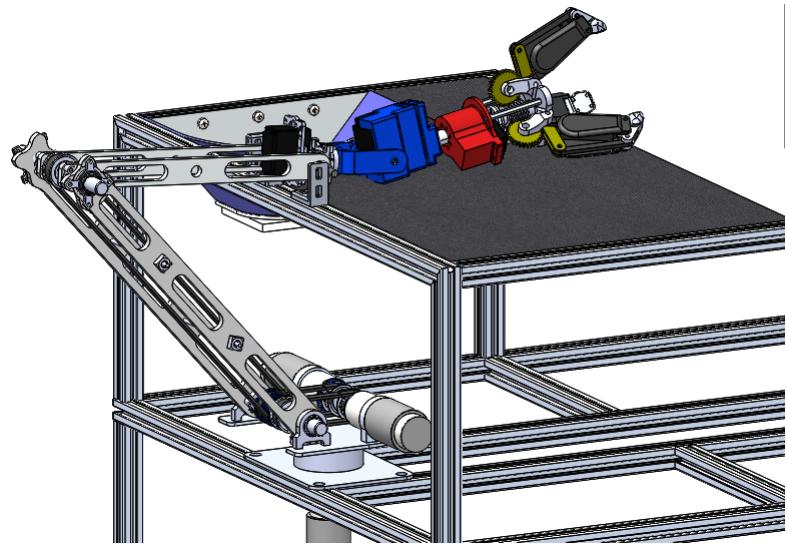


Figura 4.7: Robot en posición de reposo

configuración inicial del robot al momento de la activación, por lo que la posición de reposo sirve como punto de referencia.

$$S1 + S5 = SI15$$

## 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 4.10.

## Validación

La Figura 4.11 muestra que la posición del laboratorio está dentro del espacio de trabajo del robot.

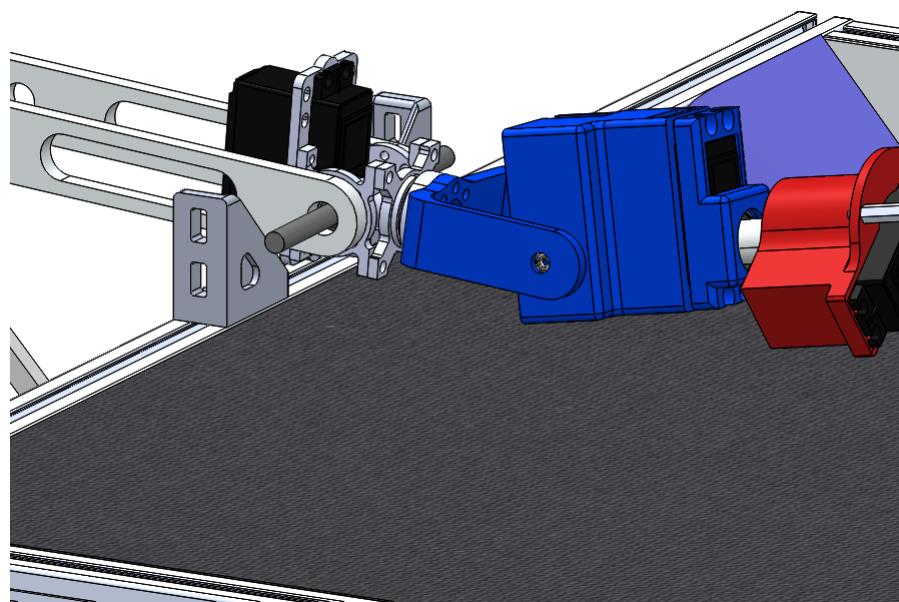


Figura 4.8: Soporte para el eslabón en posición de reposo

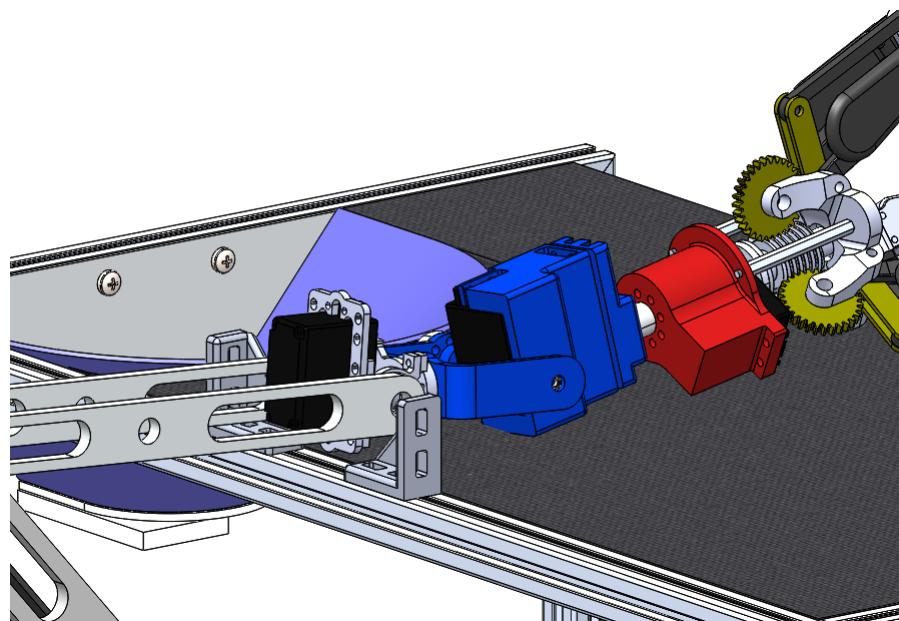


Figura 4.9: Soporte para el efecto final en posición de reposo

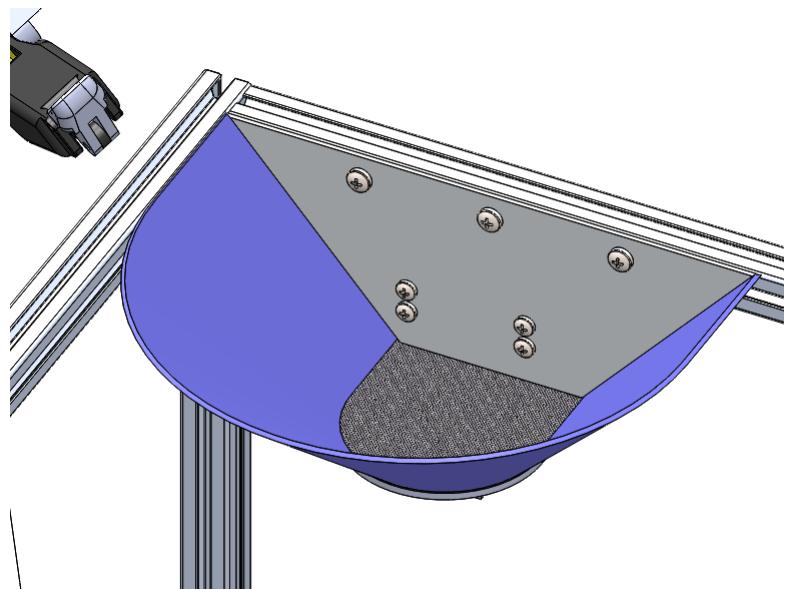


Figura 4.10: Integración del laboratorio con el sistema estructural

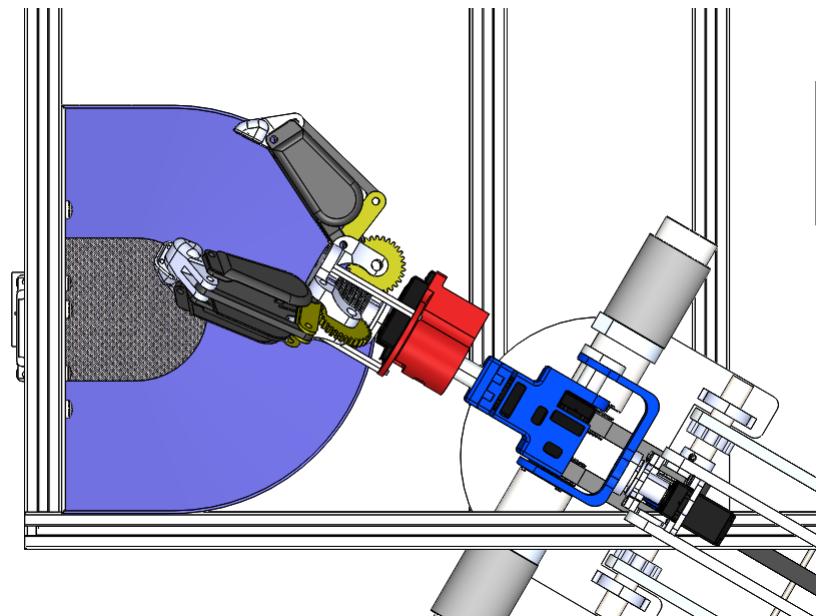


Figura 4.11: Integración del laboratorio con el sistema estructural

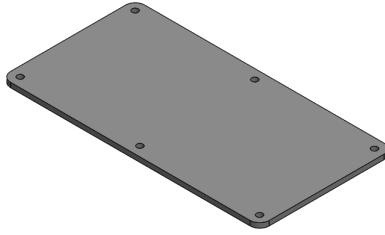


Figura 4.12: Soporte del sistema energético

$$SI15 + S4 = SI154$$

## Energético

En la Figura 4.13 se muestra la fuente de alimentación seleccionada en la posición determinada en la Figura 2.16, 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 4.12.

$$SI154 + S3 = SI543$$

## 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 4.14.

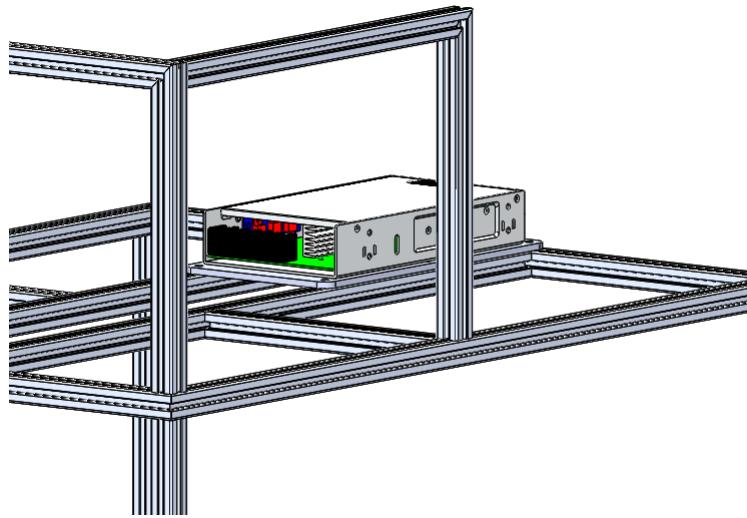


Figura 4.13: Integración del sistema energético con el sistema estructural

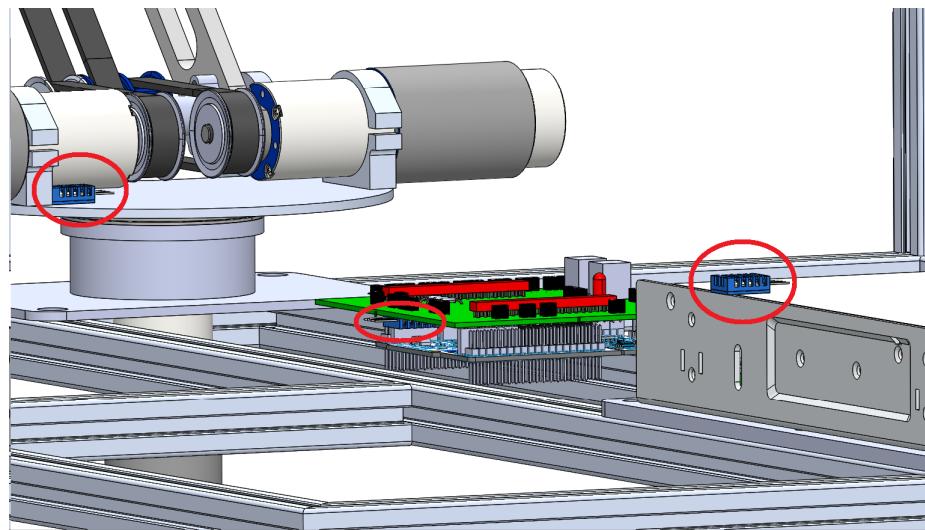


Figura 4.14: Sensores de temperatura y humedad montados en la estructura

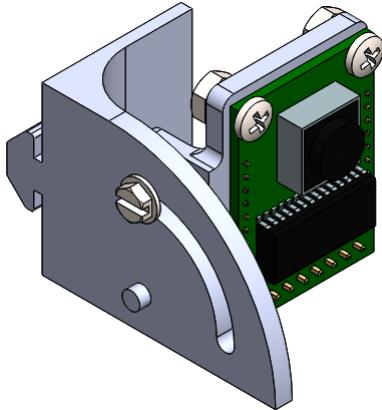


Figura 4.15: Pieza de acoplamiento para cámara

## Visión artificial

De acuerdo al concepto mejorado, mostrado en la Figura 2.16, 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, dicha pieza, junto con la cámara montada, se aprecia en la Figura 4.15, y las dos piezas necesarias se muestran en la Figura 4.16.

## Procesamiento

Los periféricos que utilizan los componentes se organizan de acuerdo a los requerimientos establecidos en la Tabla 4.1, en la cual se determina el tipo de periférico utilizado, para posteriormente realizar la distribución de pines como se muestra en la Figura 4.17<sup>3</sup>.

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 4.18, y cuyo diagrama esquemático se muestra en la Figura 4.19.

La placa se diseña para acoplarse directamente con la tarjeta del microcontrolador,

---

<sup>3</sup>Las cámaras están conectadas al mismo puerto SPI, y son activadas por software mediante CS1 y CS2

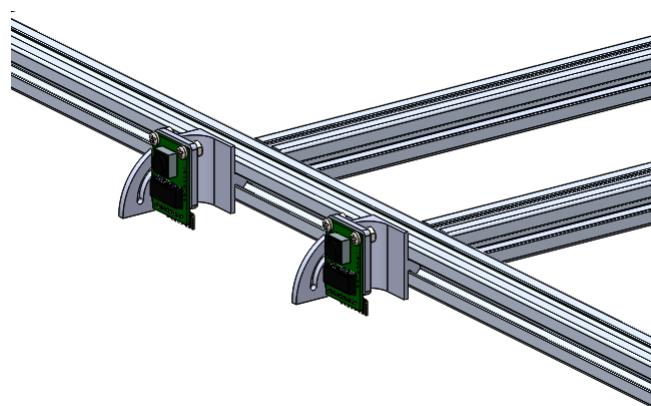


Figura 4.16: Cámaras montadas en la estructura

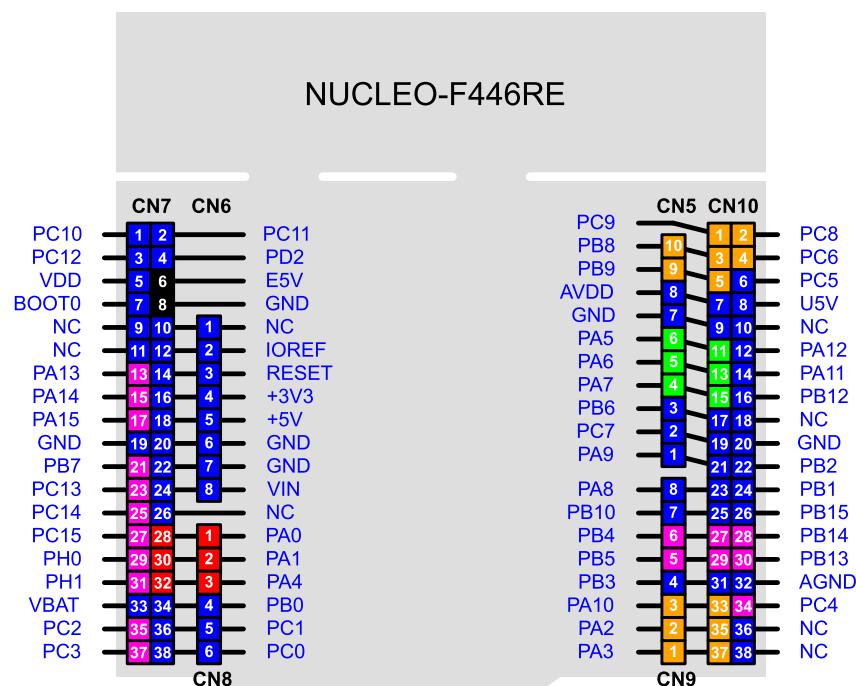


Figura 4.17: Conexión de los periféricos al controlador

Tabla 4.1: 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 Efecto	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

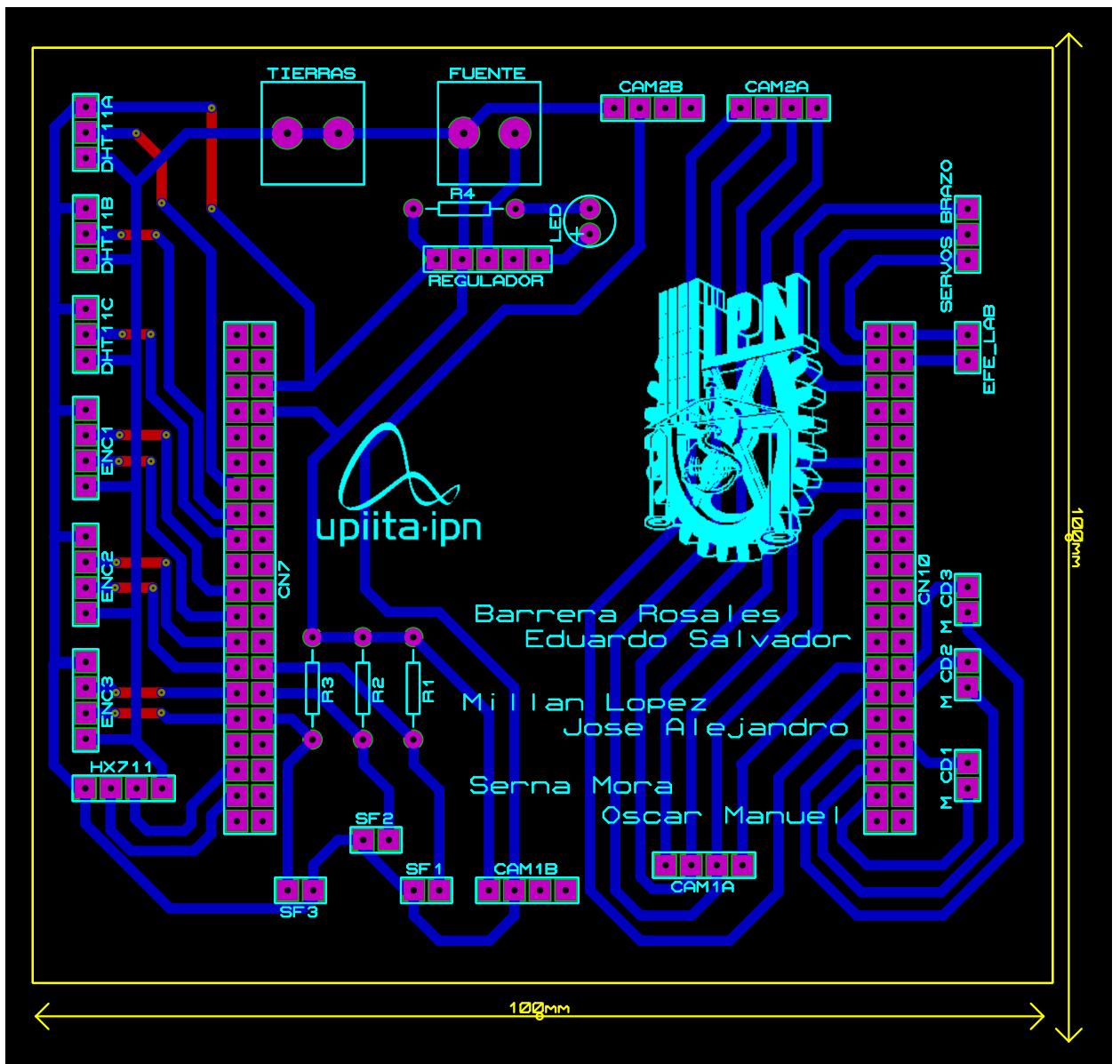


Figura 4.18: Placa de circuito impreso

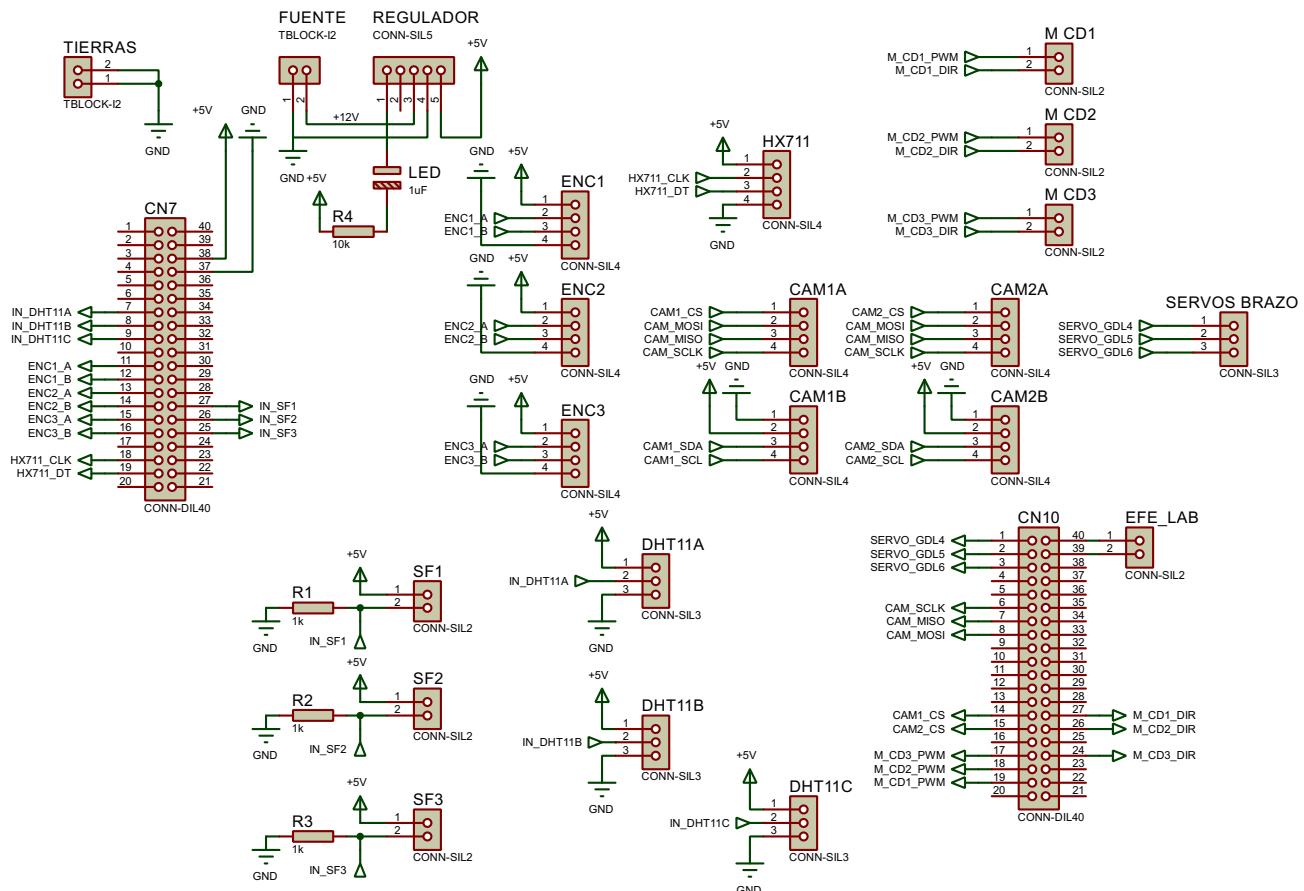


Figura 4.19: Diagrama esquemático de la placa de circuito impreso

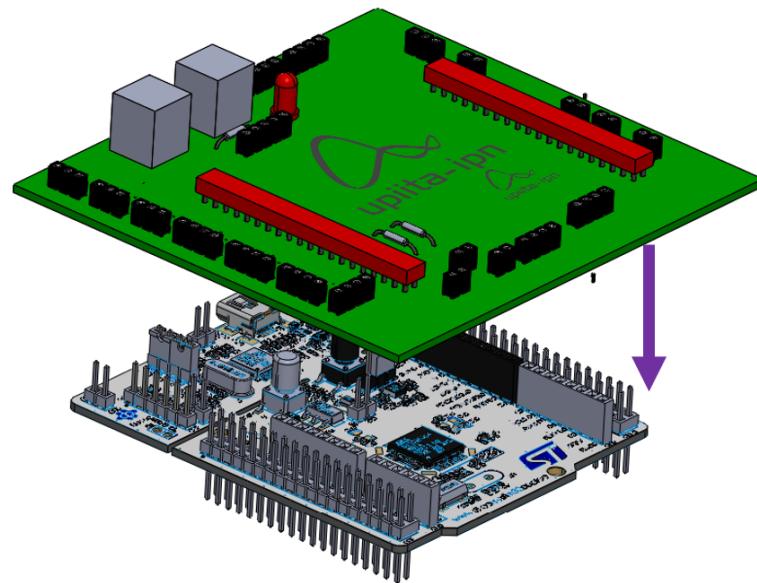


Figura 4.20: Ensamblaje de PCB con microcontrolador

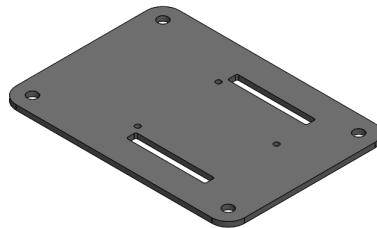


Figura 4.21: Soporte del sistema de información

como se muestra en la Figura 4.20.

Para colocar el sistema de procesamiento en la estructura, se diseña una plataforma de soporte, mostrada en la Figura 4.21. El ensamblaje resultante se acopla en la parte central de la estructura de acuerdo a la Figura 4.22.

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:

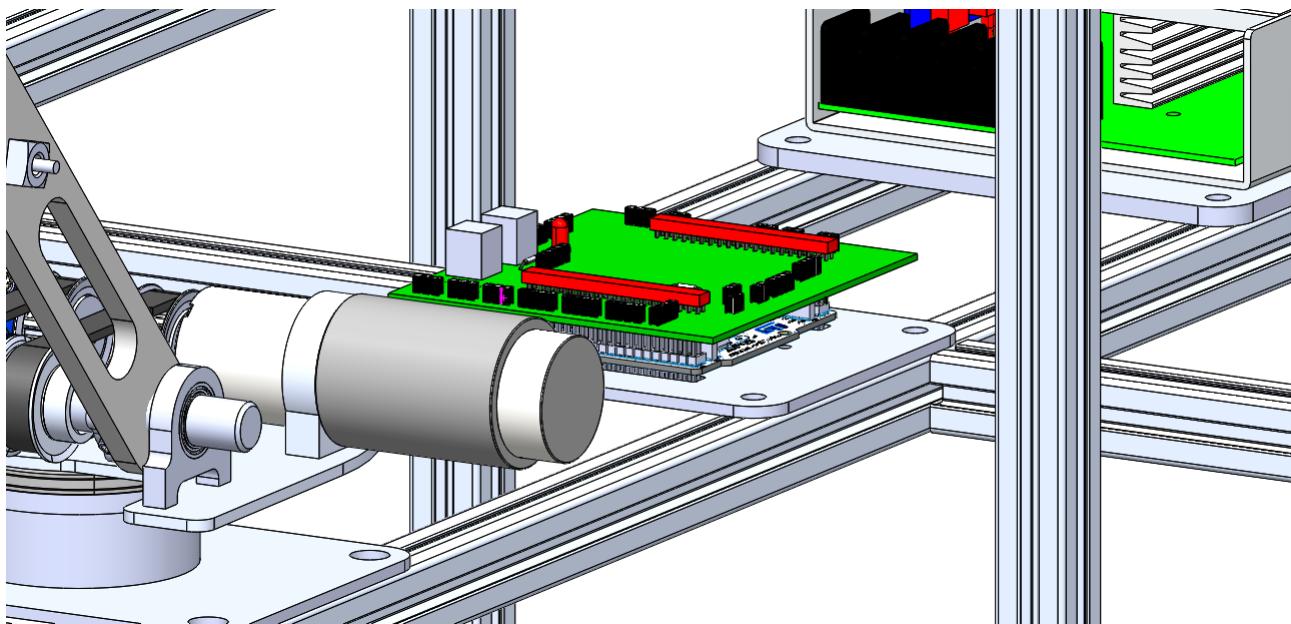
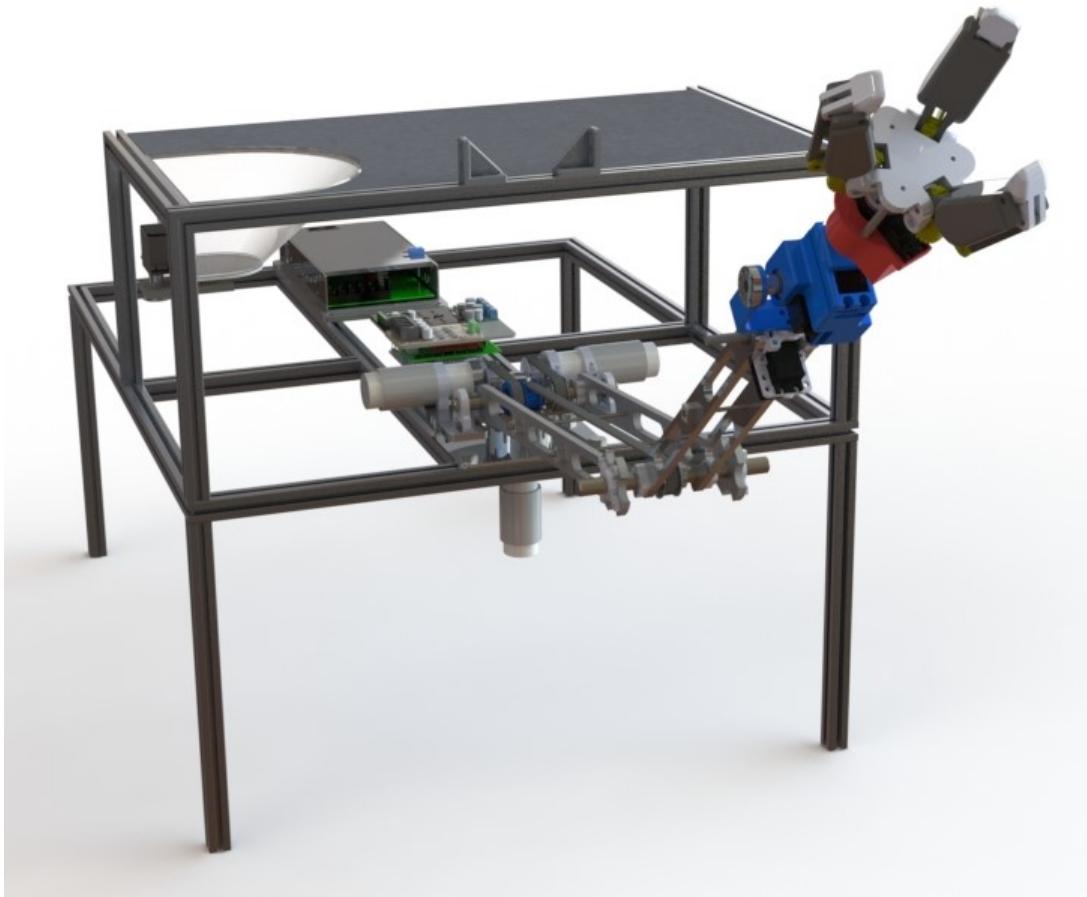


Figura 4.22: Placas colocadas en la estructura

- MDD10A (Anexo A. 18)
  - 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. 19)
  - Voltaje de alimentación: 6-30[V]
  - Corriente máxima continua: 20 [A]
  - Corriente pico: 60 [A] por menos de 10 segundos
  - Frecuencia máxima de PWM: 20 [KHz]



$$SI1543 + S2 = SI5432$$

## 4.2. 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.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso realizado por el computador, acompañado del pseudocódigo correspondiente.

```
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 0 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
```

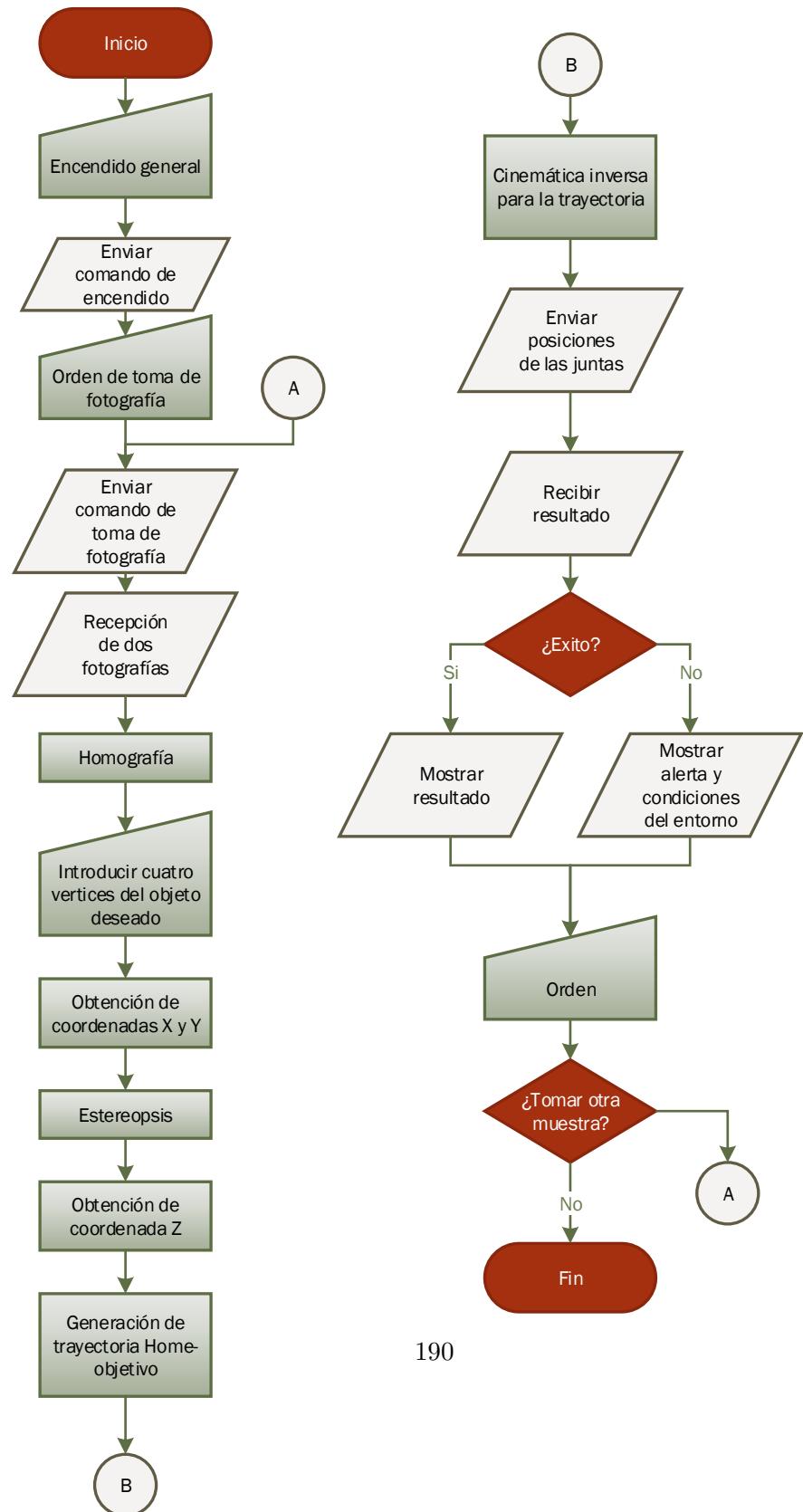


Figura 4.23: Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por la PC

```

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

```

Algoritmo 4.1: Pseudocódigo de la computadora

El diagrama de flujo del microcontrolador se muestra en la Figura 4.24.

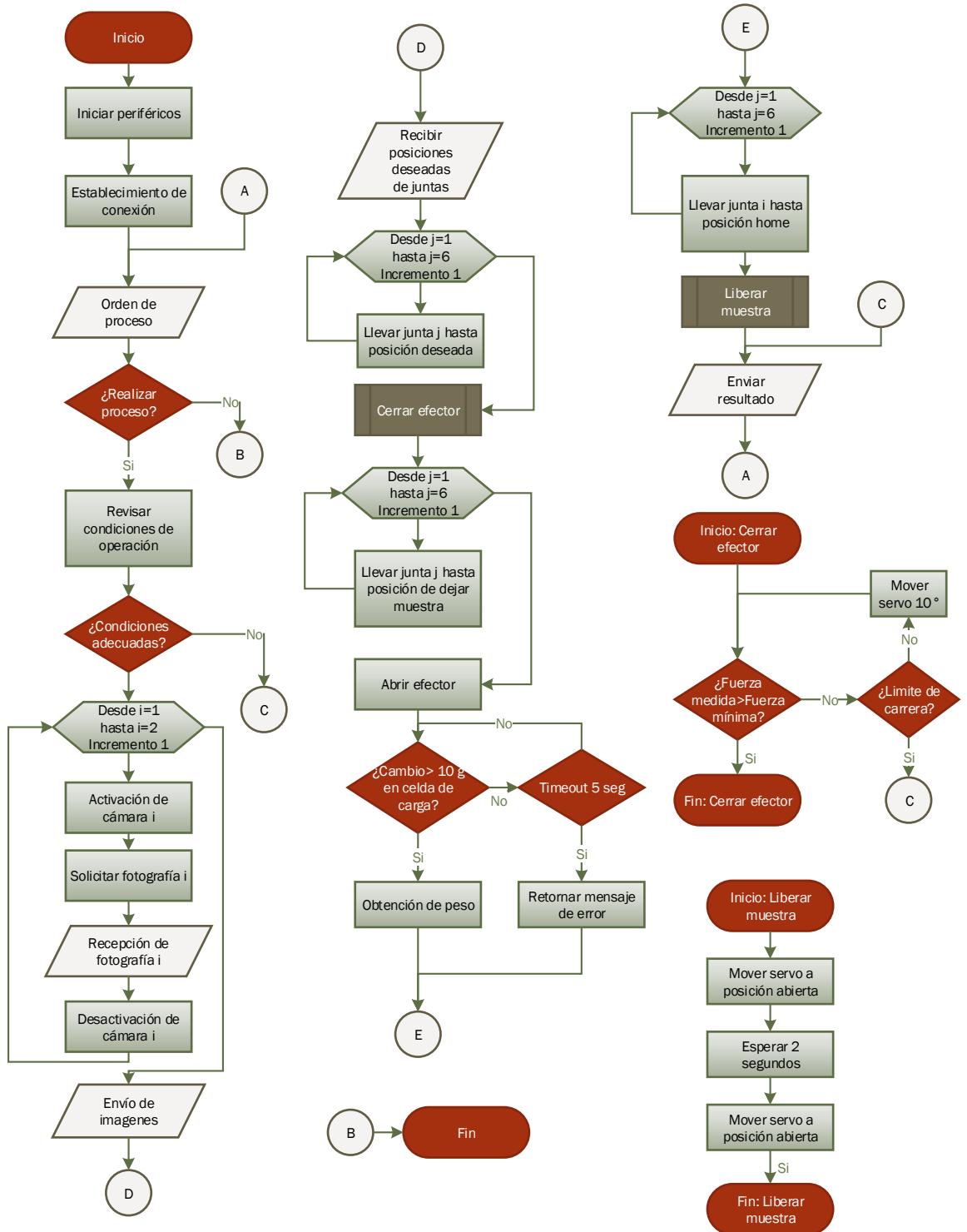


Figura 4.24: Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por el microcontrolador

El pseudocódigo del proceso realizado por el microcontrolador se presenta a continuación.

```
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 DTH11
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
40   hacer // Ciclo de cierre del efecto hasta determinar que la muestra ha
      sido asegurada
41   F[3]=lectura adc sensores fuerza
42   PwmServo=PwmServo+10° // Continuar cerrando el efecto
43   si PwmServo=limite de cierre entonces
44     errorEfecto=verdadero // El efecto no logró asegurar la muestra
45 mientras (F[0]<Fmin Y F[1]<Fmin Y F[2]<Fmin)
46   si errorEfecto == verdadero entonces
47     Resultado = errorEfecto
48   de otra forma
49   desde j=1 hasta j=6 incremento 1 // Llevar la muestra al laboratorio
50     pwm[j]=control(encoder[j],T_Lab[j])
51   fin del bucle
52 PwmServo=PwmServoTotalAbierto // Abrir efecto para dejar caer la muestra
53   Establecer Timer de timeout // Para esperar un máximo de 5 segundos a
      que la piedra llegue al área de medición
54 PiedraDetectada=Falso

```

```

55     mientras banderaTimeOut==falso y PiedraDetectada=False // Si sigue
      contando o si se detecta la piedra
56         PesoCelda=leer celda de carga
57         si PesoCelda>10g entonces
58             PiedraDetectada=Verdadero
59     fin del bucle
60     si PiedraDetectada=False entonces
61         Resultado=ErrorPiedra+condiciones entorno // La muestra no llegó al área
           de medición
62     de otra forma     Resultado = PesoCelda+condiciones entorno
63
64     desde j=1 hasta j=6 incremento 1 // Llevar el robot a su posición de Home
65         pwm[j]=control(encoder[j],T_Lab_Home[j])
66     fin del bucle
67     PwmDesechador=PwmAbierto // Deshacerse de la muestra
68     Espera 2 segundos
69     PwmDesechador=PwmCerrado // Regresar área de medición a su posición
           original
70     de otra forma     Resultado=ErrorCondiciones+condiciones entorno //
           Condiciones fuera de los límites aceptables
71     Enviar uart Resultado // Enviar información con resultado de la operación,
           sea exitoso o fallido
72     realizar_proceso = Esperar cadena de comando // Esperar nueva orden para
           tomar otra muestra o desactivar el sistema
73     Fin del bucle.
74     Fin del programa

```

Algoritmo 4.2: Pseudocódigo del microcontrolador

## Estimación de costos

La Tabla 4.2 refleja el costo aproximado del proyecto, considerando los componentes adquiridos y los manufacturados

Tabla 4.2: 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 commutada	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 B375-220XL	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

---

## Análisis de resultados

---

En este capítulo se interpretan los resultados obtenidos con ayuda de las validaciones realizadas, con el propósito de determinar teóricamente si el comportamiento del sistema cumple con los requerimientos establecidos en la Tabla 2.2.

### 5.1. Sistema 1: Robótico

Mediante varias iteraciones, fue posible diseñar eslabones capaces de resistir la carga provocada por su propio peso y el de la muestra sin comprometer el peso máximo del sistema. Aunado a esto, el diseño de la transmisión mecánica por medio de bandas elimina la necesidad de cargar el actuador en la junta que une a los eslabones, lo cual implicaría la existencia de esfuerzos mayores a los obtenidos con la transmisión, así como la demanda de un mayor par por parte de los actuadores y, por ende, mayor consumo energético.

La base del manipulador, que además constituye el primer grado de libertad, es un punto crítico ya que soporta al sistema robótico, por lo que es necesario asegurar que las piezas diseñadas no fallen frente a las cargas aplicadas; los análisis y simulaciones efectuados permiten estimar su buen desempeño con un factor de seguridad aceptable. Ya

que el sistema robótico se une al sistema estructural a través de la base del manipulador, se comprobó que la estructura es capaz de resistir las cargas generadas por el sistema robótico.

En cuanto a la muñeca esférica, la manufactura aditiva presenta ventajas significativas ante técnicas convencionales de manufactura, como la remoción de viruta, ya que tiene geometrías complejas con dimensiones reducidas. Además, el análisis del elemento crítico en forma de “C” que soporta a los últimos 2 GDL de la muñeca, así como al efecto y a la muestra indica que el material soporta satisfactoriamente los esfuerzos a los que es sometido, asimismo se tomaron medidas de prevención (rodamientos en los ejes de los servomotores) para disminuir en la medida de lo posible los esfuerzos a los que están sometidos las piezas.

El rediseño orientado a las dimensiones de las falanges del efecto final mejoró el agarre de las muestras con las características propuestas, ya que tiene una mayor cantidad de puntos de contacto entre las falanges y la muestra.

## 5.2. Sistema 2: Información

El sistema de visión por computador requiere de parámetros que deben ser obtenidos de forma experimental, como son la distancia entre cámaras y el ángulo de inclinación del plano de imagen. Los elementos que sujetan las cámaras están diseñados para permitir la variación de estas cantidades según se requiera.

Según el planteamiento del algoritmo y el establecimiento de requerimientos de comunicación y control, las capacidades del microcontrolador seleccionado son suficientes para realizar la tarea.

El diseño del PCB permite una distribución ordenada de las señales de información, así como la alimentación de los circuitos del módulo de procesamiento.

### **5.3. Sistema 3: Energético**

De acuerdo a los requerimientos específicos para el sistema energético (Tabla 3.6), el sistema está condicionado a operar una junta del manipulador a la vez, pues la suma de corriente máxima consumida por los actuadores es mayor a la corriente máxima que la fuente es capaz de proveer.

### **5.4. Sistema 4: Laboratorio**

El único parámetro que obtiene el módulo de obtención de datos es la masa de la muestra y, dado que la capacidad mínima requerida de la celda de carga, calculada para una muestra del doble del peso propuesto en los requerimientos (factor de seguridad igual a 2) y tomando en cuenta un coeficiente de corrección por el impacto generado al dejar caer la roca, es de 0.95 [Kg], la celda seleccionada con capacidad de 1 [Kg] es adecuada.

La verificación del funcionamiento del desechador requiere llevarse a cabo mediante pruebas experimentales.

### **5.5. Sistema 5: Estructural**

La estructura en la que se monta el sistema, asemeja a la estructura de un rover en desarrollo, sin embargo para este trabajo se planteó usar una estructura modificada con el objetivo de reducir costos. Ya que la estructura sigue siendo capaz de soportar el resto de los módulos del sistema, se concluye que la reducción de piezas no tiene un impacto significativo en su desempeño.



---

## Conclusiones

---

El seguimiento de la metodología permitió cumplir satisfactoriamente los objetivos establecidos para Trabajo Terminal 1, ya que funcionó como guía a lo largo del proceso de diseño desde el planteamiento de las necesidades hasta la secuencia de integración, en la cual se demuestra que los módulos trabajan de manera armónica. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que hay puntos pendientes por desarrollar, como lo son la dinámica del robot, planeación de trayectoria y el control de los actuadores.

Por otro lado, medir solamente el peso de la piedra no permite conocer las características del entorno en el que se encuentra como requerían los objetivos, sin embargo, el instrumental requerido para realizar estudios que así lo permitan son prohibitivamente costosos, e.g. espectrografía, por lo que su implementación queda fuera de la viabilidad del proyecto.

Sin embargo, se considera que el diseño alcanzó un grado de madurez aceptable para comenzar la implementación en Trabajo Terminal 2.



---

## 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] NASA, “Curiosity rover mission overview,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/msl/mission/overview/>
- [4] National Aeronautics and Space Administration, “MARS 2020 rover,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/mars2020/>
- [5] ——, “Rover — Power,” 2019, accessed: Oct. 2, 2019. [Online]. Available: <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/power/>

- [6] Y. H. Furrer F., Wermelinger M. and G. F., “Autonomous robotic stone stacking with online next best object target pose planning .” 2017.
- [7] C. Robotics, “Ur3e,” 2019. [Online]. Available: [https://store.clearpathrobotics.com/products/ur3e?\\_pos=2&\\_sid=da3af4811&\\_ss=r](https://store.clearpathrobotics.com/products/ur3e?_pos=2&_sid=da3af4811&_ss=r)
- [8] Robotiq, “3-finger adaptive robot gripper - robotiq,” 2019. [Online]. Available: [https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper?ref=nav\\_product\\_new\\_button](https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper?ref=nav_product_new_button)
- [9] A. A., “Master thesis: Design of a smart gripper for industrial applications,” 2016.
- [10] 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.
- [11] U. D. of Defense, *Systems Engineering Fundamentals*, 2001.
- [12] Federal Information Processing Standards Publication, *Integration Definition for Function Modeling (idef0)*, 1993.
- [13] O. H. R. C. Seidner, *On the Formal Verification of EFFBD Models Using a Structural Translation to Time Petri Nets*, 2007.
- [14] 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.
- [15] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed., Elsevier, Ed., 2011.
- [16] E. M. V. Robert L. Mott and J. Wang, *Design Elements in Mechanical Design*, 6th ed., Pearson, Ed., 2018.
- [17] S. D. P. . S. Instrument, *Handbook of Timing Belts, Pulleys, Chains and Sprockets*.
- [18] “Timing belt pulleys for small power transmission applications.” [Online]. Available: <https://www.sdp-si.com/products/Timing-Belt-Pulleys/>

- [19] S. H. Mark W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 1st ed. Wiley, 2005.
- [20] M. OpenCourseWare, “15. introduction to lagrange with examples.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=zhk9xLjrmI4&feature=youtu.be&t=879>
- [21] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, A. Press, Ed., 2001.
- [22] Enerdrive, “Cable sizing selection chart.” [Online]. Available: <https://enerdrive.com.au/2014/01/15/cable-size-chart/>
- [23] A. d. l. E. H. Enrique A. Gutierrez, Gonzalo P. Martisanz, *Conceptos y metodos en Vision por Computador*. Grupo de vision del CEA, 2016.
- [24] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*, S. Science and B. Media, Eds., 2017. [Online]. Available: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>
- [25] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 2206 Design methodology for mechatronic systems*, 1st ed., 2004.
- [26] K. J. E. Hull and J. Dick, *Requirements engineering*, 3rd ed. Springer Science and Business Media, 2011.
- [27] D. M. Buede and W. D. Miller, *The engineering design of systems: models and methods*. John Wiley and Sons, 2016.
- [28] T. L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process,” *International journal of services sciences*, 2008.
- [29] 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.

- [30] “Solidworks,” 2018.
- [31] J. Akin, *Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks*. Rice University, Texas, 2009.
- [32] SDP/SI, *Timing belts, pulleys, chains and sprockets*.
- [33] T. MX, “Guia para elegir materiales 3d.” [Online]. Available: <https://www.tridimx.com/materiales/>
- [34] SKF, “Rolling bearings.” [Online]. Available: <https://www.skf.com/us/products/rolling-bearings>
- [35] 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>
- [36] J. Yiu, *ARM Cortex-M for Beginners*, 2017.
- [37] 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](http://yqmiwi.com/a/Product/Single_output_series/S_series/2014/1115/44.html)
- [38] ——, “500w switching power supply.” [Online]. Available: [http://yqmiwi.com/a/Product/Single\\_output\\_series/S\\_series/2014/1127/107.html](http://yqmiwi.com/a/Product/Single_output_series/S_series/2014/1127/107.html)
- [39] AND, “How should we select a load cell?” [Online]. Available: [https://aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/loadcells\\_qa\\_08.html](https://aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/loadcells_qa_08.html)
- [40] . Inc., “Part no. 20-2020.” [Online]. Available: <https://8020.net/20-2020.html>
- [41] “Matlab r2020a,” 2020.
- [42] R. Electronics, “Linear vs switching regulators.” [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/products/power-management/linear-vs-switching-regulators.html>

# Apéndices

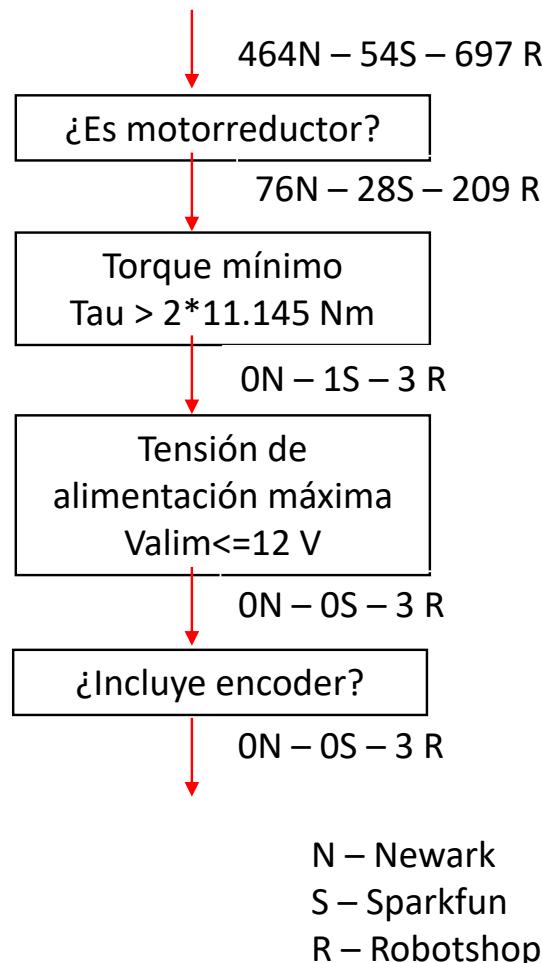


---

## Apéndice 1: Árboles de decisión

---

### A. 1. Motores de CD

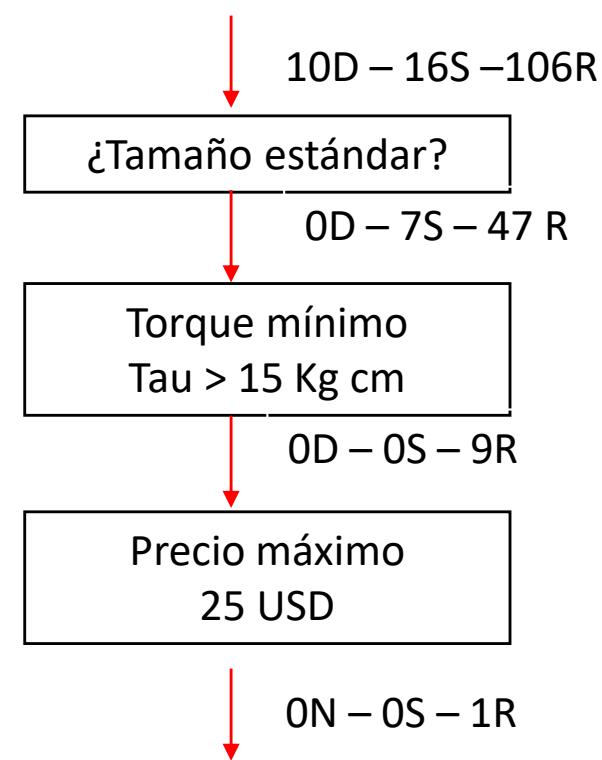


N – Newark

S – Sparkfun

R – Robotshop

## A. 2. Servomotores

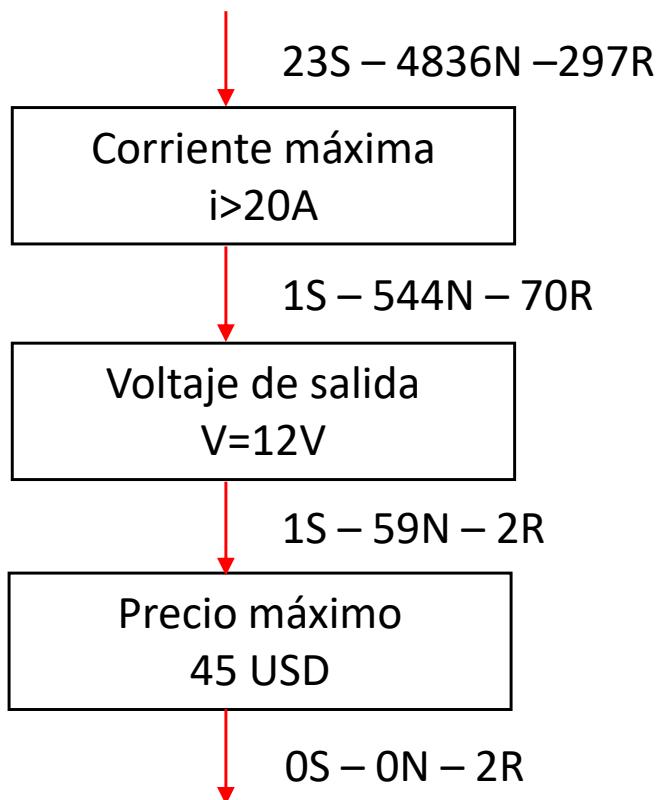


D – Dynamixel

S – Sparkfun

R – Robotshop

**A. 3. Fuentes de alimentación**

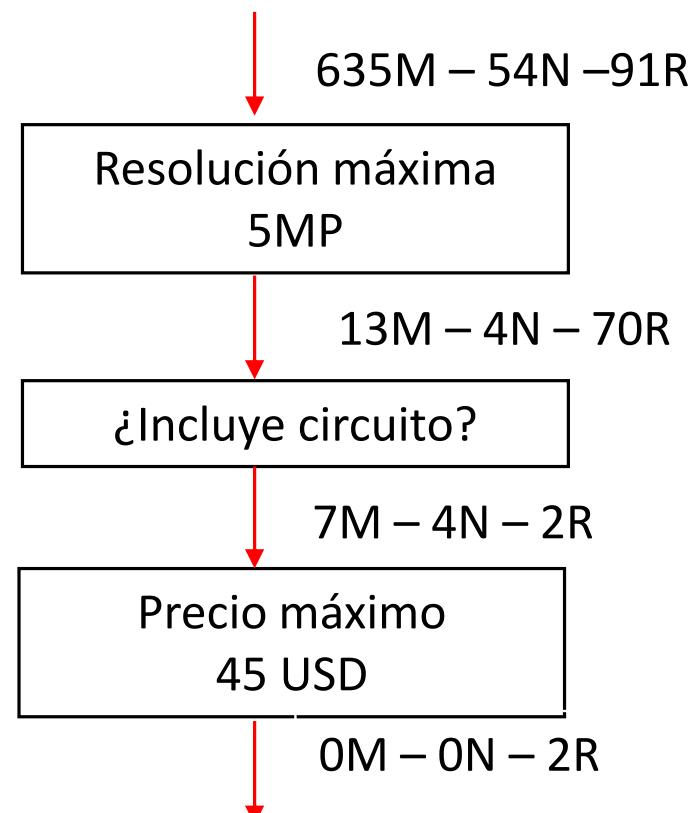


S – Sparkfun

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
```

```

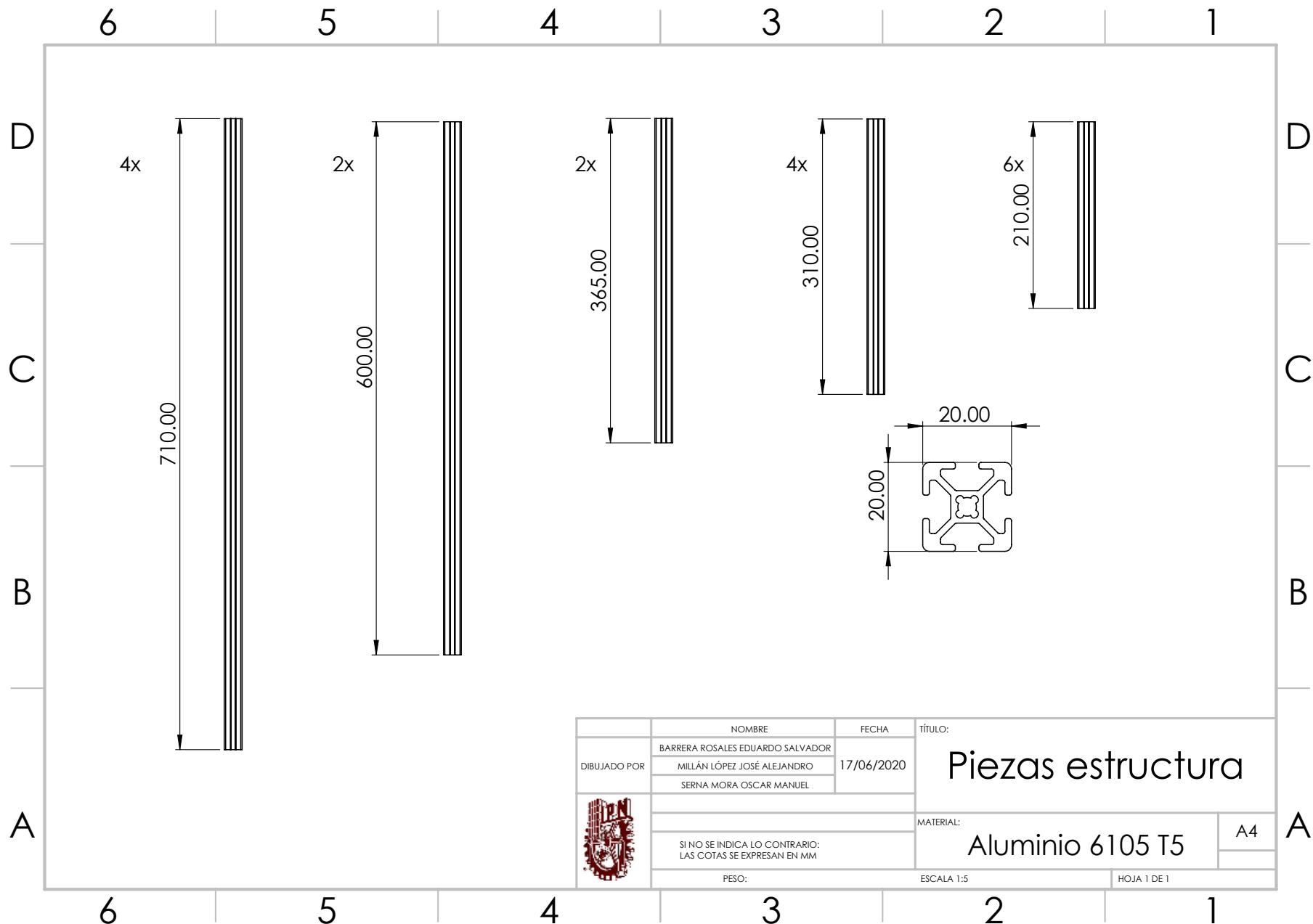
16 L(7)=Link('d',L3,'a',0,'alpha',0);%%%%%%Link
17
18
19 qli=[-pi pi;-pi pi;-pi pi;0 0;-pi pi;-pi pi;-pi pi];%definición de los
   límites de las juntas
20 qz=[0 0 0 0 ];%matriz con vectores articulares renglón
21 %%qfinal=[-pi/2 0 pi/2];
22 antropom=SerialLink(L,'name','antrop','qlim',qli); %construcción del objeto
   polar,
23 antropom.teach;
24 %= {'workspace', [-6 6 -6 6 -6 6]}; %opcion 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=iantrop(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

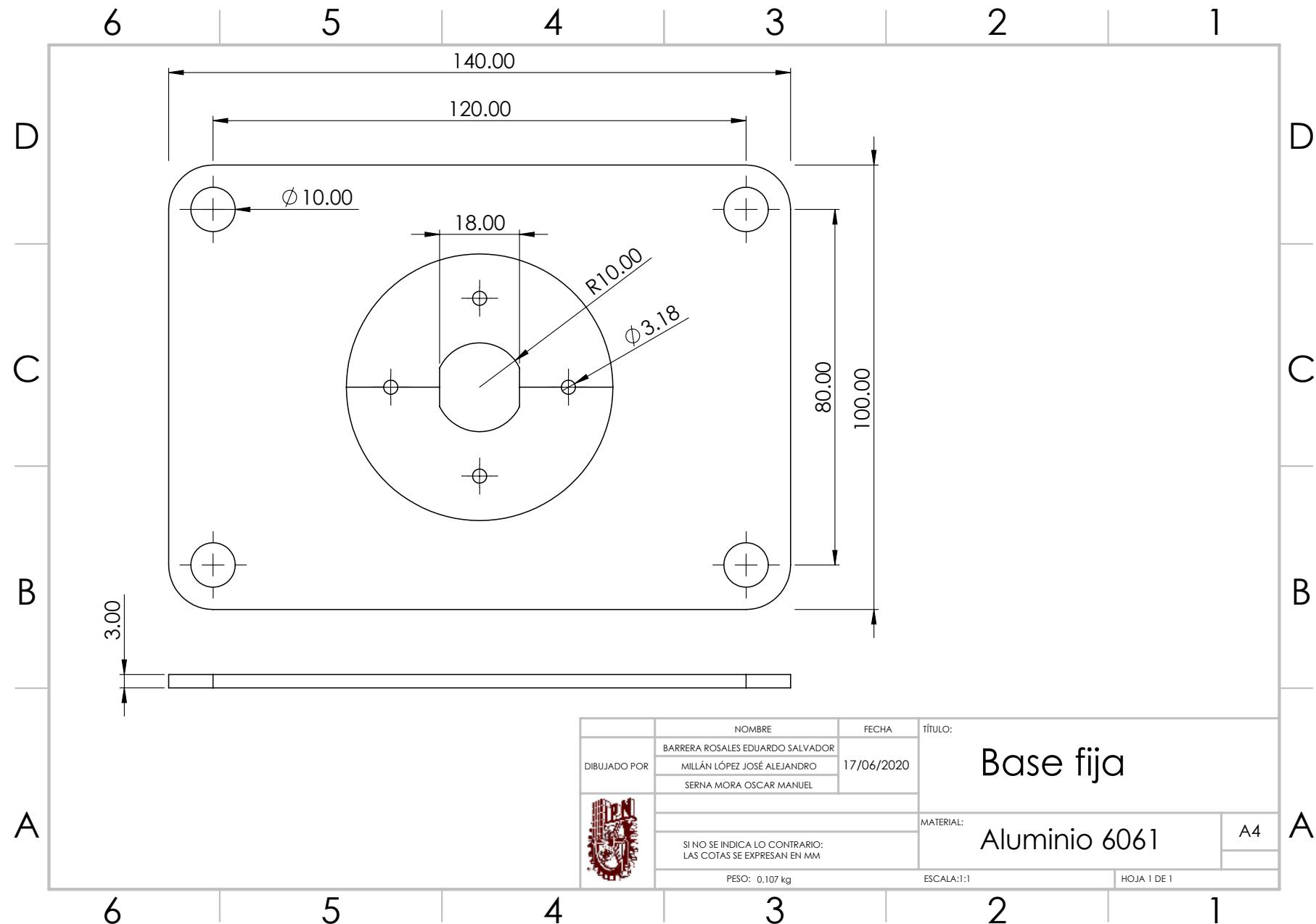
```

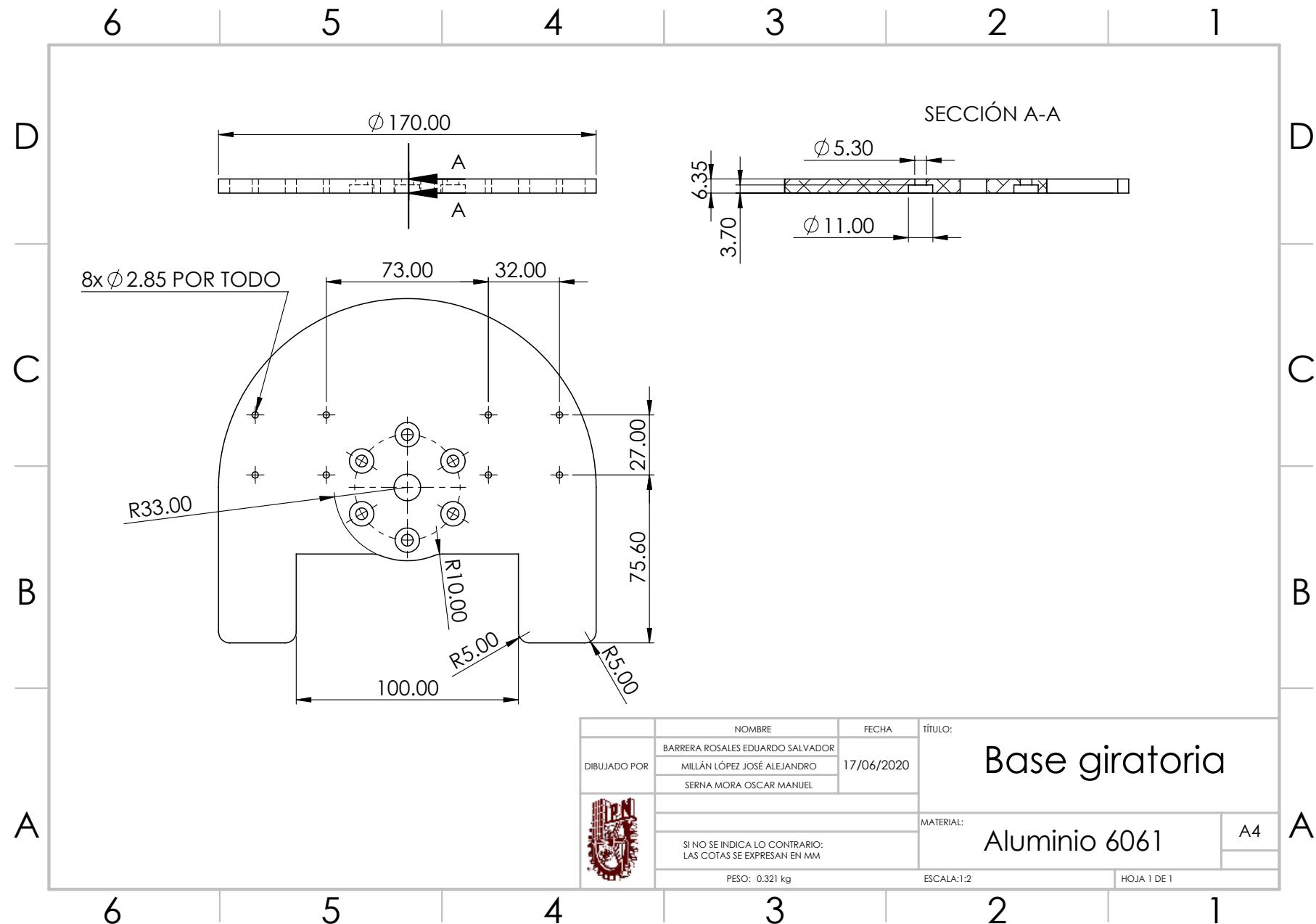
---

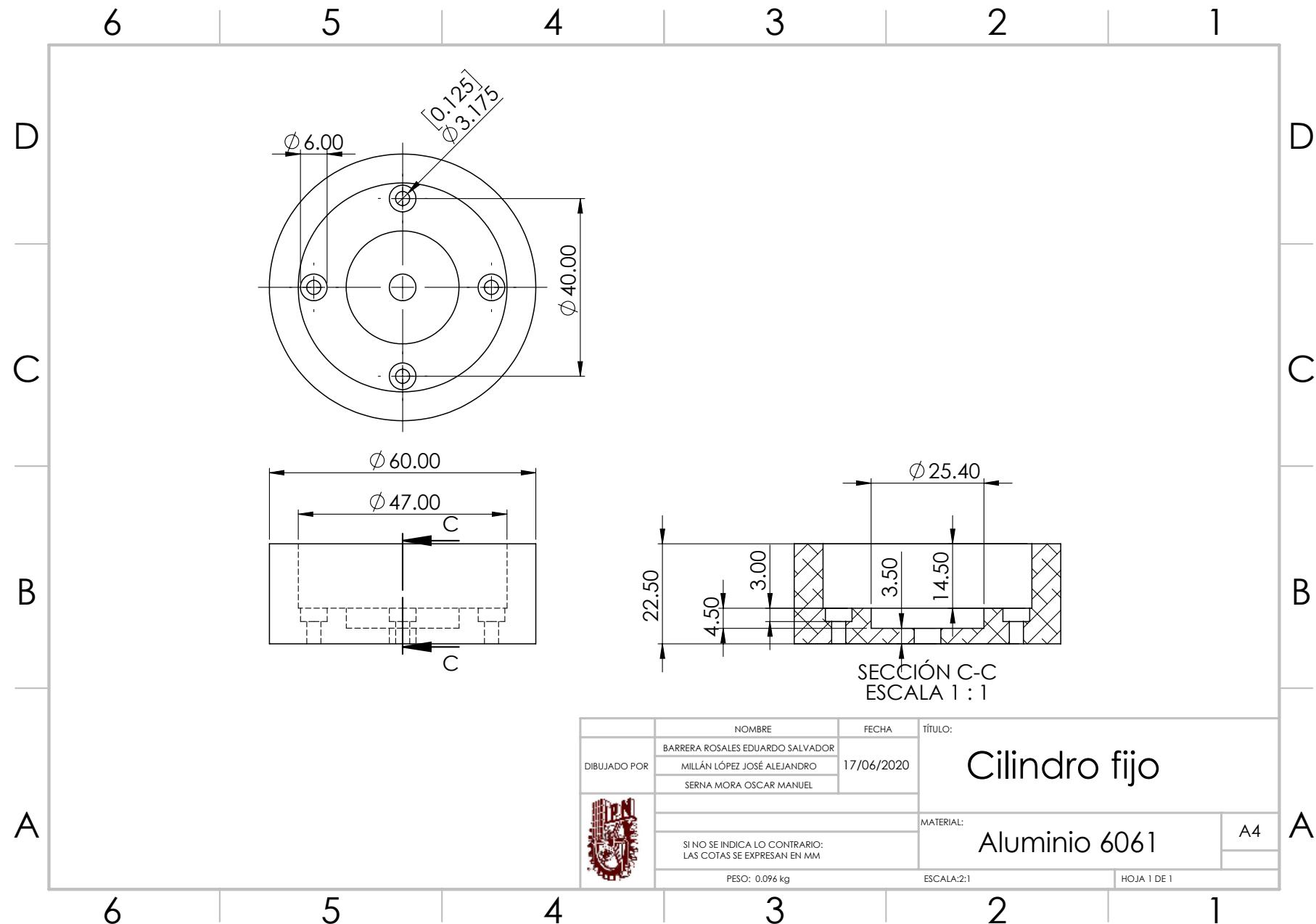
## Apéndice 3: Planos normalizados

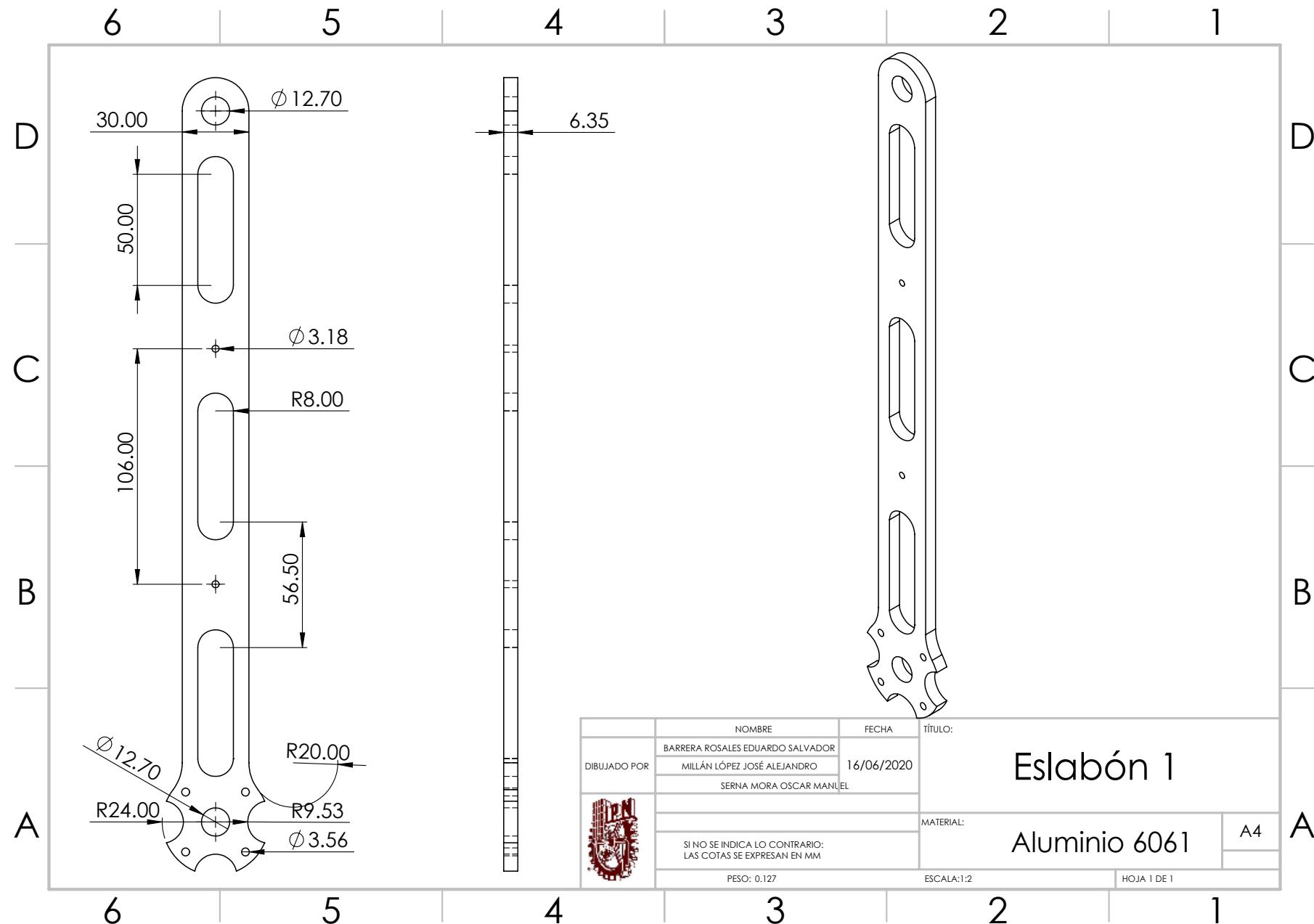
---

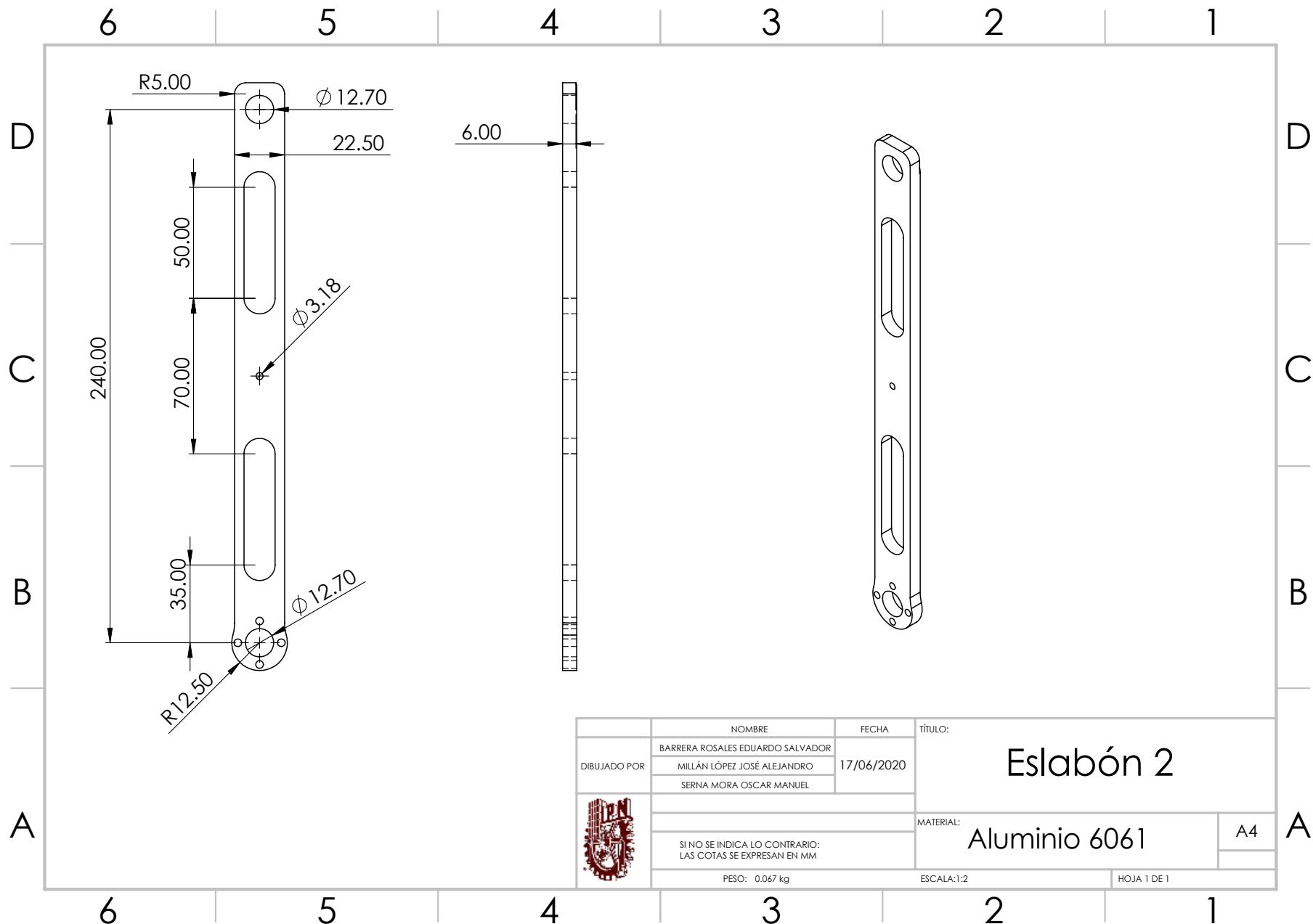


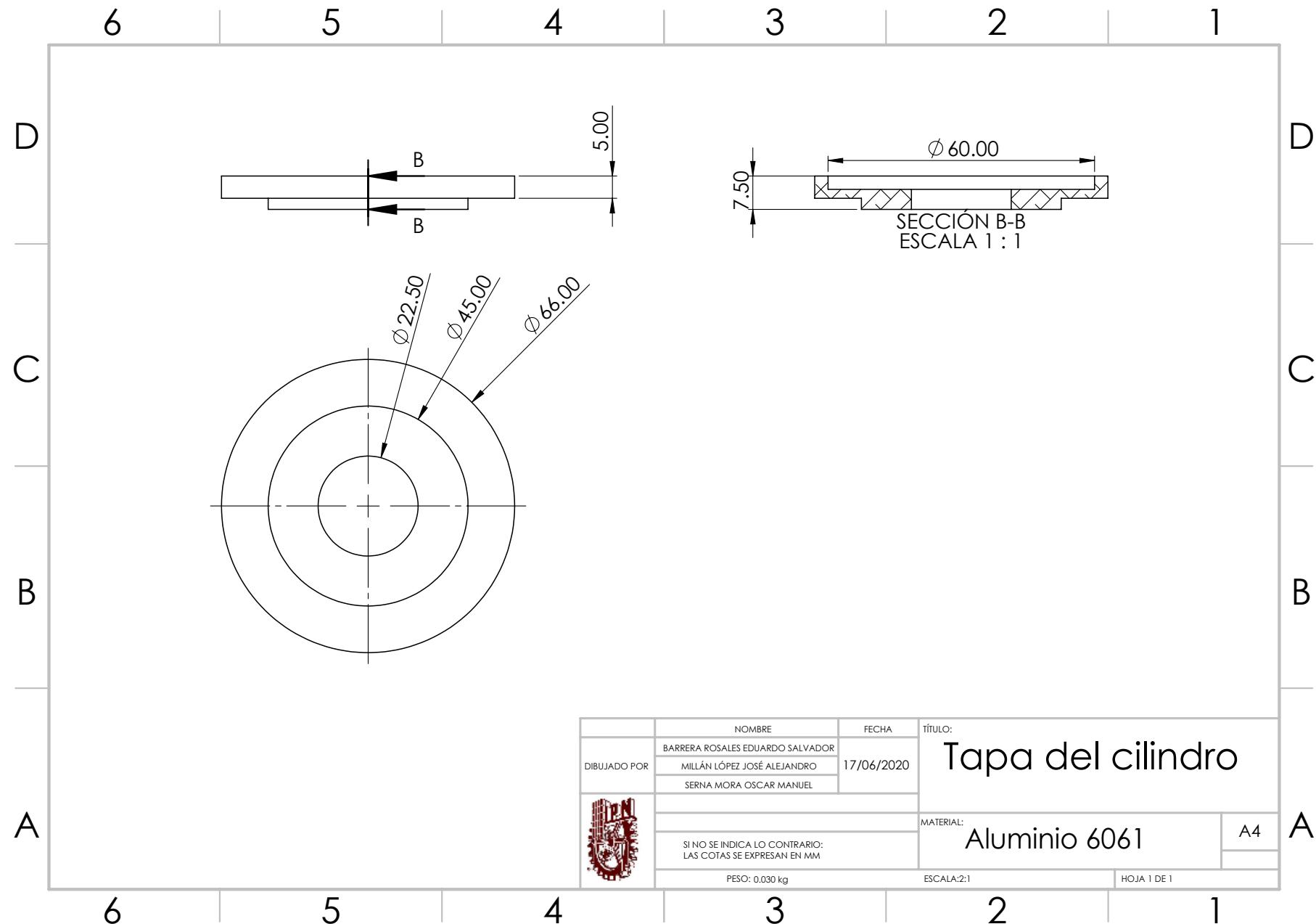


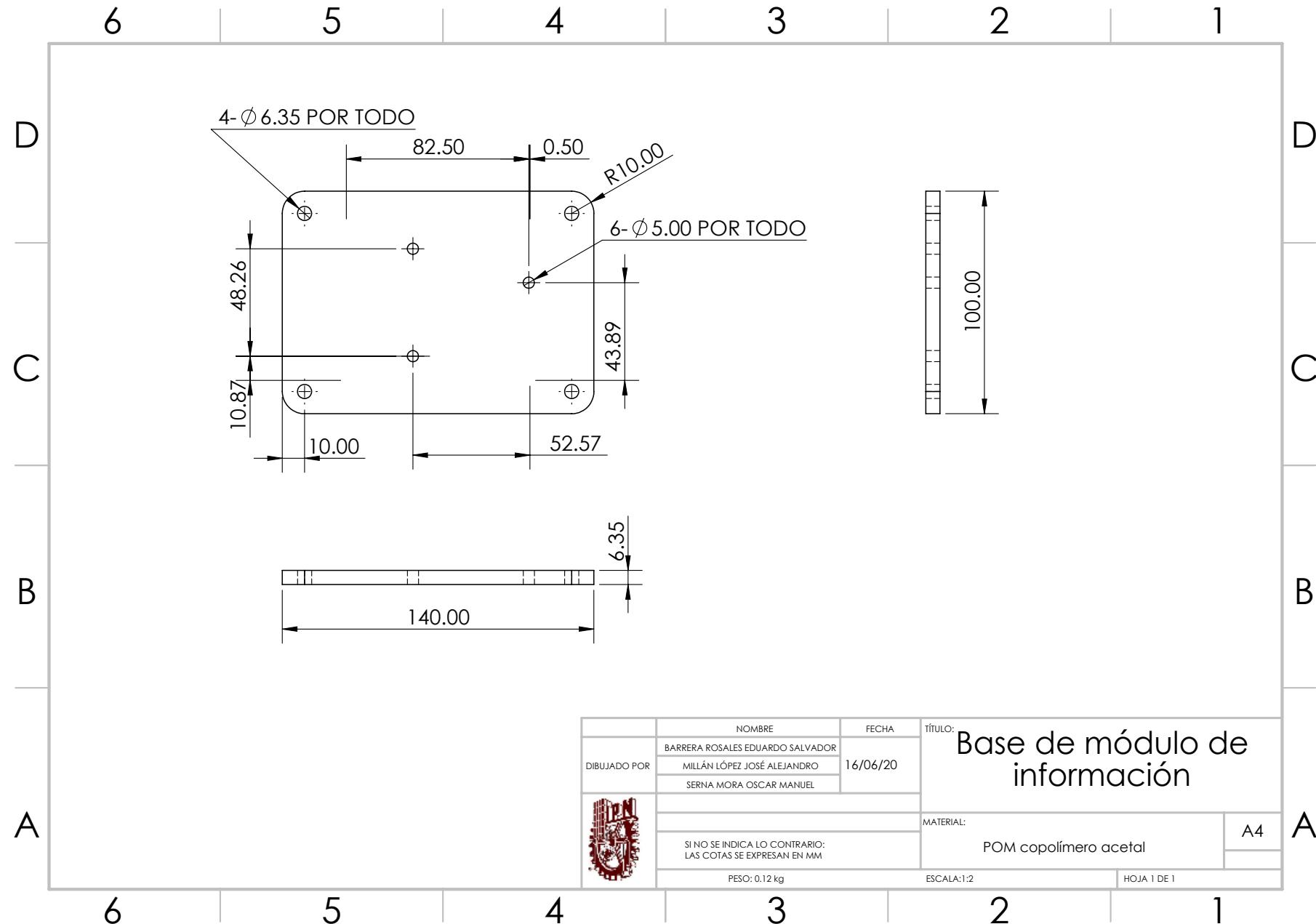


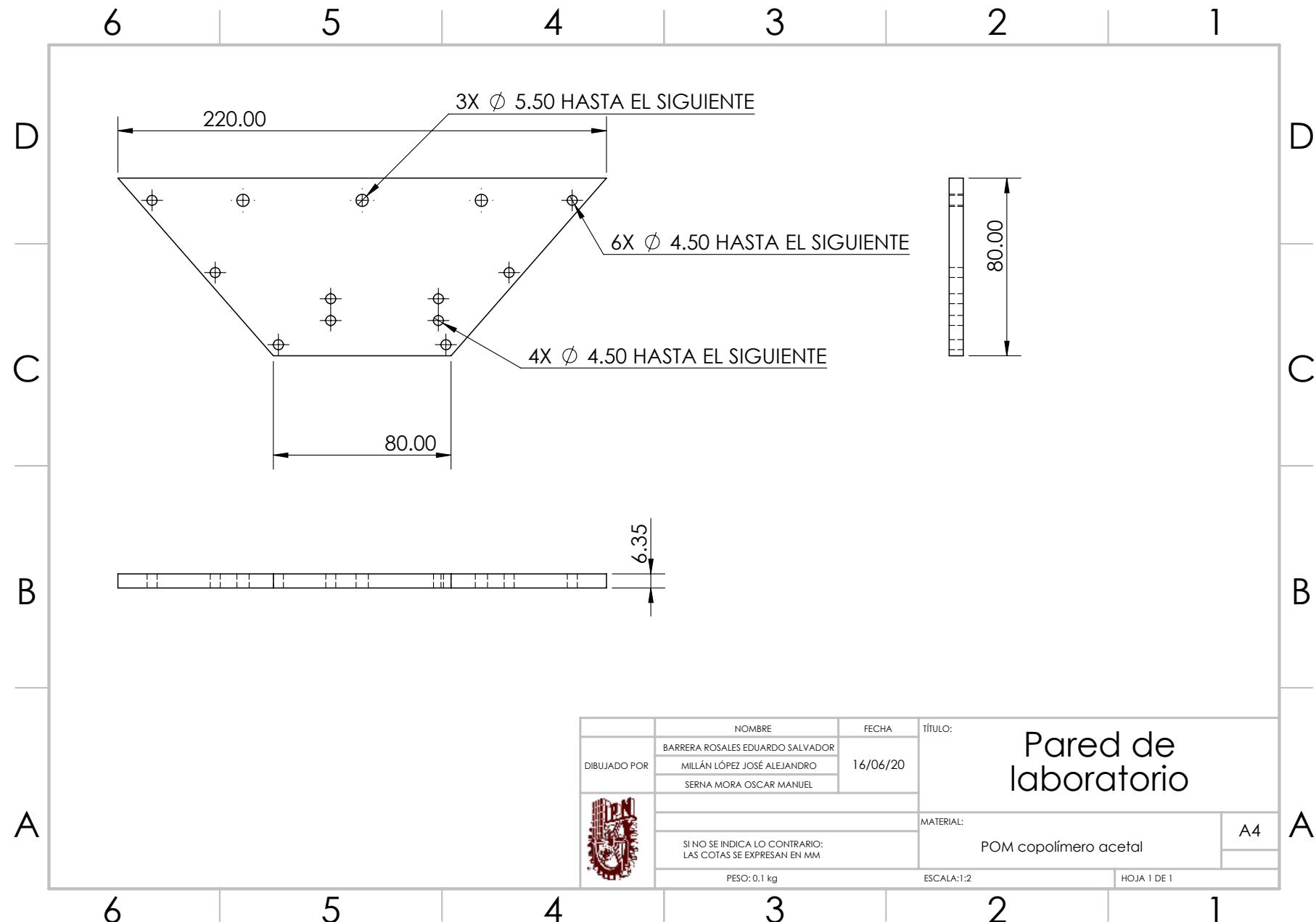


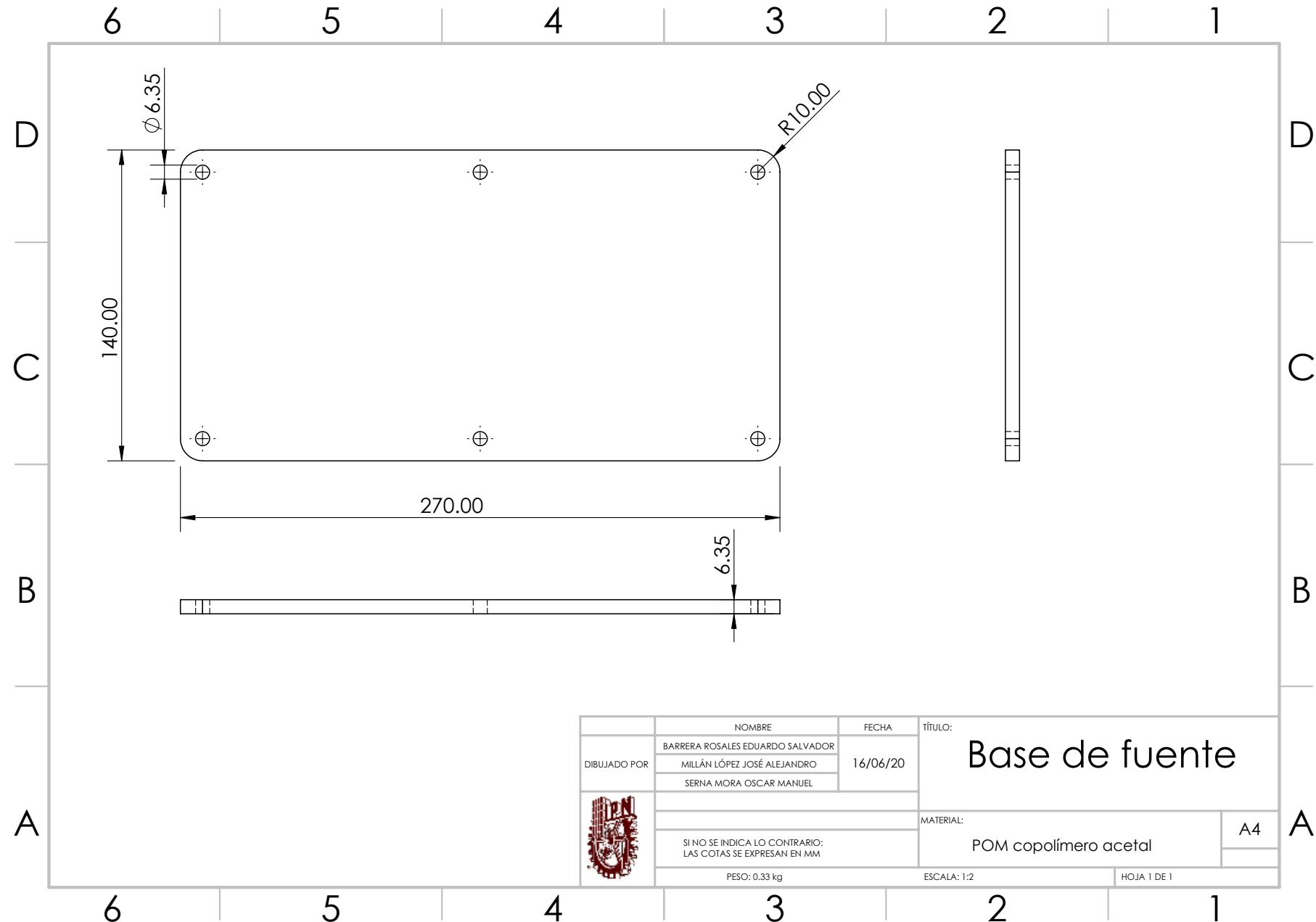














---

## Apéndice 4: Herramienta de selección multicriterio

---

### D. 1. Selección de concepto mediante AHP

#### Matriz de comparación de criterios

Matriz de comparación de criterios

Matriz de comparación de criterios

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9
Cr1	1.00000	7.00000	5.00000	0.33333	5.00000	0.20000	5.00000	3.00000	2.00000
Cr2	0.14286	1.00000	6.00000	0.20000	0.20000	0.20000	0.33333	0.14286	0.50000
Cr3	0.20000	0.16667	1.00000	0.11111	0.20000	0.20000	3.00000	0.33333	0.14286
Cr4	3.00000	5.00000	9.00000	1.00000	3.00000	3.00000	5.00000	3.00000	5.00000
Cr5	0.20000	5.00000	5.00000	0.33333	1.00000	0.14286	3.00000	0.20000	0.14286
Cr6	5.00000	5.00000	5.00000	0.33333	7.00000	1.00000	7.00000	5.00000	3.00000
Cr7	0.20000	3.00000	0.33333	0.20000	0.33333	0.14286	1.00000	0.20000	0.33333
Cr8	0.33333	7.00000	3.00000	0.33333	5.00000	0.20000	5.00000	1.00000	5.00000
Cr9	0.50000	2.00000	7.00000	0.20000	7.00000	0.33333	3.00000	0.20000	1.00000

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18
Cr1	0.14286	5.00000	3.00000	0.20000	0.50000	0.25000	7.00000	5.00000	0.33333
Cr2	0.33333	5.00000	1.00000	0.20000	0.33333	0.20000	3.00000	2.00000	0.33333
Cr3	0.14286	3.00000	2.00000	0.20000	7.00000	5.00000	0.20000	0.33333	0.14286
Cr4	3.00000	9.00000	5.00000	3.00000	5.00000	2.00000	3.00000	3.00000	2.00000
Cr5	0.14286	5.00000	3.00000	0.20000	5.00000	7.00000	5.00000	3.00000	1.00000
Cr6	3.00000	7.00000	5.00000	1.00000	7.00000	5.00000	5.00000	3.00000	0.33333
Cr7	0.20000	3.00000	5.00000	0.20000	1.00000	0.33333	5.00000	0.33333	0.20000
Cr8	0.20000	5.00000	5.00000	0.20000	3.00000	0.33333	7.00000	5.00000	0.33333
Cr9	0.14286	5.00000	5.00000	0.20000	0.33333	0.33333	5.00000	3.00000	0.20000

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Cr27
Cr1	0.33333	3.00000	5.00000	0.20000	7.00000	3.00000	5.00000	5.00000	0.20000
Cr2	0.20000	3.00000	5.00000	0.20000	5.00000	3.00000	5.00000	0.33333	0.33333
Cr3	0.20000	0.20000	5.00000	0.20000	5.00000	0.14286	5.00000	5.00000	0.14286
Cr4	5.00000	5.00000	5.00000	2.00000	5.00000	3.00000	7.00000	3.00000	1.00000
Cr5	1.00000	5.00000	7.00000	1.00000	7.00000	5.00000	5.00000	0.33333	0.20000
Cr6	0.33333	3.00000	5.00000	0.33333	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000
Cr7	0.20000	0.33333	5.00000	0.20000	3.00000	0.50000	4.00000	0.20000	0.20000
Cr8	0.33333	5.00000	5.00000	0.20000	5.00000	3.00000	5.00000	3.00000	0.33333
Cr9	0.33333	3.00000	5.00000	1.00000	5.00000	3.00000	5.00000	0.33333	0.20000

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9
Cr10	7.00000	3.00000	7.00000	0.33333	7.00000	0.33333	5.00000	5.00000	7.00000
Cr11	0.20000	0.20000	0.33333	0.11111	0.20000	0.14286	0.33333	0.20000	0.20000
Cr12	0.33333	1.00000	0.50000	0.20000	0.33333	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000
Cr13	5.00000	5.00000	5.00000	0.33333	5.00000	1.00000	5.00000	5.00000	5.00000
Cr14	2.00000	3.00000	0.14286	0.20000	0.20000	0.14286	1.00000	0.33333	3.00000
Cr15	4.00000	5.00000	0.20000	0.50000	0.14286	0.20000	3.00000	3.00000	3.00000
Cr16	0.14286	0.33333	5.00000	0.33333	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000
Cr17	0.20000	0.50000	3.00000	0.33333	0.33333	0.33333	3.00000	0.20000	0.33333
Cr18	3.00000	3.00000	7.00000	0.50000	1.00000	3.00000	5.00000	3.00000	5.00000

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18
Cr10	1.00000	7.00000	5.00000	0.33333	1.00000	2.00000	5.00000	3.00000	0.33333
Cr11	0.14286	1.00000	5.00000	0.20000	0.33333	0.20000	3.00000	3.00000	0.20000
Cr12	0.20000	0.20000	1.00000	0.14286	5.00000	3.00000	5.00000	0.33333	0.20000
Cr13	3.00000	5.00000	7.00000	1.00000	5.00000	3.00000	7.00000	3.00000	5.00000
Cr14	1.00000	3.00000	0.20000	0.20000	1.00000	0.20000	5.00000	3.00000	1.00000
Cr15	0.50000	5.00000	0.33333	0.33333	5.00000	1.00000	7.00000	7.00000	0.25000
Cr16	0.20000	0.33333	0.20000	0.14286	0.20000	0.14286	1.00000	0.20000	0.20000
Cr17	0.33333	0.33333	3.00000	0.33333	0.33333	0.14286	5.00000	1.00000	0.20000
Cr18	3.00000	5.00000	5.00000	0.20000	1.00000	4.00000	5.00000	5.00000	1.00000

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Cr27
Cr10	3.00000	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000	5.00000	5.00000	5.00000	0.33333
Cr11	0.20000	0.33333	5.00000	0.14286	5.00000	0.33333	3.00000	0.20000	0.20000
Cr12	0.20000	5.00000	5.00000	0.20000	5.00000	5.00000	3.00000	0.33333	0.20000
Cr13	3.00000	5.00000	7.00000	3.00000	7.00000	5.00000	7.00000	3.00000	3.00000
Cr14	1.00000	5.00000	3.00000	1.00000	3.00000	3.00000	7.00000	3.00000	0.33333
Cr15	3.00000	5.00000	7.00000	2.00000	7.00000	5.00000	7.00000	3.00000	3.00000
Cr16	0.14286	3.00000	3.00000	0.14286	5.00000	0.33333	3.00000	0.33333	0.20000
Cr17	0.20000	3.00000	5.00000	0.14286	5.00000	3.00000	3.00000	0.20000	0.20000
Cr18	5.00000	7.00000	7.00000	3.00000	5.00000	3.00000	5.00000	3.00000	0.33333

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9
Cr19	3.00000	5.00000	5.00000	0.20000	1.00000	3.00000	5.00000	3.00000	3.00000
Cr20	0.33333	0.33333	5.00000	0.20000	0.20000	0.33333	3.00000	0.20000	0.33333
Cr21	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000
Cr22	5.00000	5.00000	5.00000	0.50000	1.00000	3.00000	5.00000	5.00000	1.00000
Cr23	0.14286	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.33333	0.20000	0.20000
Cr24	0.33333	0.33333	7.00000	0.33333	0.20000	1.00000	2.00000	0.33333	0.33333
Cr25	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.20000	0.25000	0.20000	0.20000
Cr26	0.20000	3.00000	0.20000	0.33333	3.00000	1.00000	5.00000	0.33333	3.00000
Cr27	5.00000	3.00000	7.00000	1.00000	5.00000	1.00000	5.00000	3.00000	5.00000
Total	46.86190	73.46667	99.30952	8.99841	54.02857	20.90476	80.85000	42.61905	54.31905

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18
Cr19	3.00000	5.00000	5.00000	0.20000	1.00000	3.00000	5.00000	3.00000	3.00000
Cr20	0.33333	0.33333	5.00000	0.20000	0.20000	0.33333	3.00000	0.20000	0.33333
Cr21	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000
Cr22	5.00000	5.00000	5.00000	0.50000	1.00000	3.00000	5.00000	5.00000	1.00000
Cr23	0.14286	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.33333	0.20000	0.20000
Cr24	0.33333	0.33333	7.00000	0.33333	0.20000	1.00000	2.00000	0.33333	0.33333
Cr25	0.20000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.20000	0.25000	0.20000	0.20000
Cr26	0.20000	3.00000	0.20000	0.33333	3.00000	1.00000	5.00000	0.33333	3.00000
Cr27	5.00000	3.00000	7.00000	1.00000	5.00000	1.00000	5.00000	3.00000	5.00000
Total	46.86190	73.46667	99.30952	8.99841	54.02857	20.90476	80.85000	42.61905	54.31905

Matriz de comparación de criterios (Continuación)

	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Cr27
Cr19	1.00000	5.00000	7.00000	0.50000	5.00000	3.00000	5.00000	2.00000	0.33333
Cr20	0.20000	1.00000	0.33333	0.14286	0.33333	0.33333	2.00000	0.20000	0.33333
Cr21	0.14286	3.00000	1.00000	0.14286	1.00000	0.33333	1.00000	0.33333	0.33333
Cr22	2.00000	7.00000	7.00000	1.00000	9.00000	5.00000	5.00000	3.00000	0.33333
Cr23	0.20000	3.00000	1.00000	0.11111	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000	0.20000
Cr24	0.33333	3.00000	3.00000	0.20000	5.00000	1.00000	5.00000	2.00000	0.20000
Cr25	0.20000	0.50000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000	0.14286
Cr26	0.50000	5.00000	3.00000	0.33333	5.00000	0.50000	5.00000	1.00000	0.33333
Cr27	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	5.00000	5.00000	7.00000	3.00000	1.00000
Total	31.25238	96.36667	120.33333	21.59206	126.33333	66.87619	121.00000	48.20000	14.61905

## Matriz normalizada de comparación de criterios

Matriz normalizada de comparación de criterios

Matriz normalizada de comparación de criterios

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9
Cr1	0.02134	0.09528	0.05035	0.03704	0.09254	0.00957	0.06184	0.07039	0.03682
Cr2	0.00305	0.01361	0.06042	0.02223	0.00370	0.00957	0.00412	0.00335	0.00920
Cr3	0.00427	0.00227	0.01007	0.01235	0.00370	0.00957	0.03711	0.00782	0.00263
Cr4	0.06402	0.06806	0.09063	0.11113	0.05553	0.14351	0.06184	0.07039	0.09205
Cr5	0.00427	0.06806	0.05035	0.03704	0.01851	0.00683	0.03711	0.00469	0.00263
Cr6	0.10670	0.06806	0.05035	0.03704	0.12956	0.04784	0.08658	0.11732	0.05523
Cr7	0.00427	0.04083	0.00336	0.02223	0.00617	0.00683	0.01237	0.00469	0.00614
Cr8	0.00711	0.09528	0.03021	0.03704	0.09254	0.00957	0.06184	0.02346	0.09205
Cr9	0.01067	0.02722	0.07049	0.02223	0.12956	0.01595	0.03711	0.00469	0.01841

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18
Cr1	0.00643	0.04873	0.03756	0.01914	0.00914	0.00686	0.06399	0.06793	0.01837
Cr2	0.01501	0.04873	0.01252	0.01914	0.00609	0.00548	0.02742	0.02717	0.01837
Cr3	0.00643	0.02924	0.02504	0.01914	0.12795	0.13712	0.00183	0.00453	0.00787
Cr4	0.13505	0.08772	0.06260	0.28715	0.09139	0.05485	0.02742	0.04076	0.11022
Cr5	0.00643	0.04873	0.03756	0.01914	0.09139	0.19197	0.04570	0.04076	0.05511
Cr6	0.13505	0.06823	0.06260	0.09572	0.12795	0.13712	0.04570	0.04076	0.01837
Cr7	0.00900	0.02924	0.06260	0.01914	0.01828	0.00914	0.04570	0.00453	0.01102
Cr8	0.00900	0.04873	0.06260	0.01914	0.05484	0.00914	0.06399	0.06793	0.01837
Cr9	0.00643	0.04873	0.06260	0.01914	0.00609	0.00914	0.04570	0.04076	0.01102

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Cr27
Cr1	0.01067	0.03113	0.04155	0.00926	0.05541	0.04486	0.04132	0.10373	0.01368
Cr2	0.00640	0.03113	0.04155	0.00926	0.03958	0.04486	0.04132	0.00692	0.02280
Cr3	0.00640	0.00208	0.04155	0.00926	0.03958	0.00214	0.04132	0.10373	0.00977
Cr4	0.15999	0.05189	0.04155	0.09263	0.03958	0.04486	0.05785	0.06224	0.06840
Cr5	0.03200	0.05189	0.05817	0.04631	0.05541	0.07477	0.04132	0.00692	0.01368
Cr6	0.01067	0.03113	0.04155	0.01544	0.03958	0.01495	0.04132	0.02075	0.06840
Cr7	0.00640	0.00346	0.04155	0.00926	0.02375	0.00748	0.03306	0.00415	0.01368
Cr8	0.01067	0.05189	0.04155	0.00926	0.03958	0.04486	0.04132	0.06224	0.02280
Cr9	0.01067	0.03113	0.04155	0.04631	0.03958	0.04486	0.04132	0.00692	0.01368

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9
Cr10	0.14938	0.04083	0.07049	0.03704	0.12956	0.01595	0.06184	0.11732	0.12887
Cr11	0.00427	0.00272	0.00336	0.01235	0.00370	0.00683	0.00412	0.00469	0.00368
Cr12	0.00711	0.01361	0.00503	0.02223	0.00617	0.00957	0.00247	0.00469	0.00368
Cr13	0.10670	0.06806	0.05035	0.03704	0.09254	0.04784	0.06184	0.11732	0.09205
Cr14	0.04268	0.04083	0.00144	0.02223	0.00370	0.00683	0.01237	0.00782	0.05523
Cr15	0.08536	0.06806	0.00201	0.05557	0.00264	0.00957	0.03711	0.07039	0.05523
Cr16	0.00305	0.00454	0.05035	0.03704	0.00370	0.00957	0.00247	0.00335	0.00368
Cr17	0.00427	0.00681	0.03021	0.03704	0.00617	0.01595	0.03711	0.00469	0.00614
Cr18	0.06402	0.04083	0.07049	0.05557	0.01851	0.14351	0.06184	0.07039	0.09205

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18
Cr10	0.04502	0.06823	0.06260	0.03191	0.01828	0.05485	0.04570	0.04076	0.01837
Cr11	0.00643	0.00975	0.06260	0.01914	0.00609	0.00548	0.02742	0.04076	0.01102
Cr12	0.00900	0.00195	0.01252	0.01367	0.09139	0.08227	0.04570	0.00453	0.01102
Cr13	0.13505	0.04873	0.08765	0.09572	0.09139	0.08227	0.06399	0.04076	0.27555
Cr14	0.04502	0.02924	0.00250	0.01914	0.01828	0.00548	0.04570	0.04076	0.05511
Cr15	0.02251	0.04873	0.00417	0.03191	0.09139	0.02742	0.06399	0.09511	0.01378
Cr16	0.00900	0.00325	0.00250	0.01367	0.00366	0.00392	0.00914	0.00272	0.01102
Cr17	0.01501	0.00325	0.03756	0.03191	0.00609	0.00392	0.04570	0.01359	0.01102
Cr18	0.13505	0.04873	0.06260	0.01914	0.01828	0.10970	0.04570	0.06793	0.05511

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Cr27
Cr10	0.09599	0.05189	0.04155	0.04631	0.03958	0.07477	0.04132	0.10373	0.02280
Cr11	0.00640	0.00346	0.04155	0.00662	0.03958	0.00498	0.02479	0.00415	0.01368
Cr12	0.00640	0.05189	0.04155	0.00926	0.03958	0.07477	0.02479	0.00692	0.01368
Cr13	0.09599	0.05189	0.05817	0.13894	0.05541	0.07477	0.05785	0.06224	0.20521
Cr14	0.03200	0.05189	0.02493	0.04631	0.02375	0.04486	0.05785	0.06224	0.02280
Cr15	0.09599	0.05189	0.05817	0.09263	0.05541	0.07477	0.05785	0.06224	0.20521
Cr16	0.00457	0.03113	0.02493	0.00662	0.03958	0.00498	0.02479	0.00692	0.01368
Cr17	0.00640	0.03113	0.04155	0.00662	0.03958	0.04486	0.02479	0.00415	0.01368
Cr18	0.15999	0.07264	0.05817	0.13894	0.03958	0.04486	0.04132	0.06224	0.02280

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9
Cr19	0.06402	0.06806	0.05035	0.02223	0.01851	0.14351	0.06184	0.07039	0.05523
Cr20	0.00711	0.00454	0.05035	0.02223	0.00370	0.01595	0.03711	0.00469	0.00614
Cr21	0.00427	0.00272	0.00201	0.02223	0.00264	0.00957	0.00247	0.00469	0.00368
Cr22	0.10670	0.06806	0.05035	0.05557	0.01851	0.14351	0.06184	0.11732	0.01841
Cr23	0.00305	0.00272	0.00201	0.02223	0.00264	0.00957	0.00412	0.00469	0.00368
Cr24	0.00711	0.00454	0.07049	0.03704	0.00370	0.04784	0.02474	0.00782	0.00614
Cr25	0.00427	0.00272	0.00201	0.01588	0.00370	0.00957	0.00309	0.00469	0.00368
Cr26	0.00427	0.04083	0.00201	0.03704	0.05553	0.04784	0.06184	0.00782	0.05523
Cr27	0.10670	0.04083	0.07049	0.11113	0.09254	0.04784	0.06184	0.07039	0.09205
Total	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18
Cr19	0.01501	0.04873	0.06260	0.03191	0.01828	0.00914	0.06399	0.06793	0.01102
Cr20	0.00900	0.02924	0.00250	0.01914	0.00366	0.00548	0.00305	0.00453	0.00787
Cr21	0.00900	0.00195	0.00250	0.01367	0.00609	0.00392	0.00305	0.00272	0.00787
Cr22	0.04502	0.06823	0.06260	0.03191	0.01828	0.01371	0.06399	0.09511	0.01837
Cr23	0.00900	0.00195	0.00250	0.01367	0.00609	0.00392	0.00183	0.00272	0.01102
Cr24	0.00900	0.02924	0.00250	0.01914	0.00609	0.00548	0.02742	0.00453	0.01837
Cr25	0.00900	0.00325	0.00417	0.01367	0.00261	0.00392	0.00305	0.00453	0.01102
Cr26	0.00900	0.04873	0.03756	0.03191	0.00609	0.00914	0.02742	0.06793	0.01837
Cr27	0.13505	0.04873	0.06260	0.03191	0.05484	0.00914	0.04570	0.06793	0.16533
Total	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Matriz normalizada de comparación de criterios (Continuación)

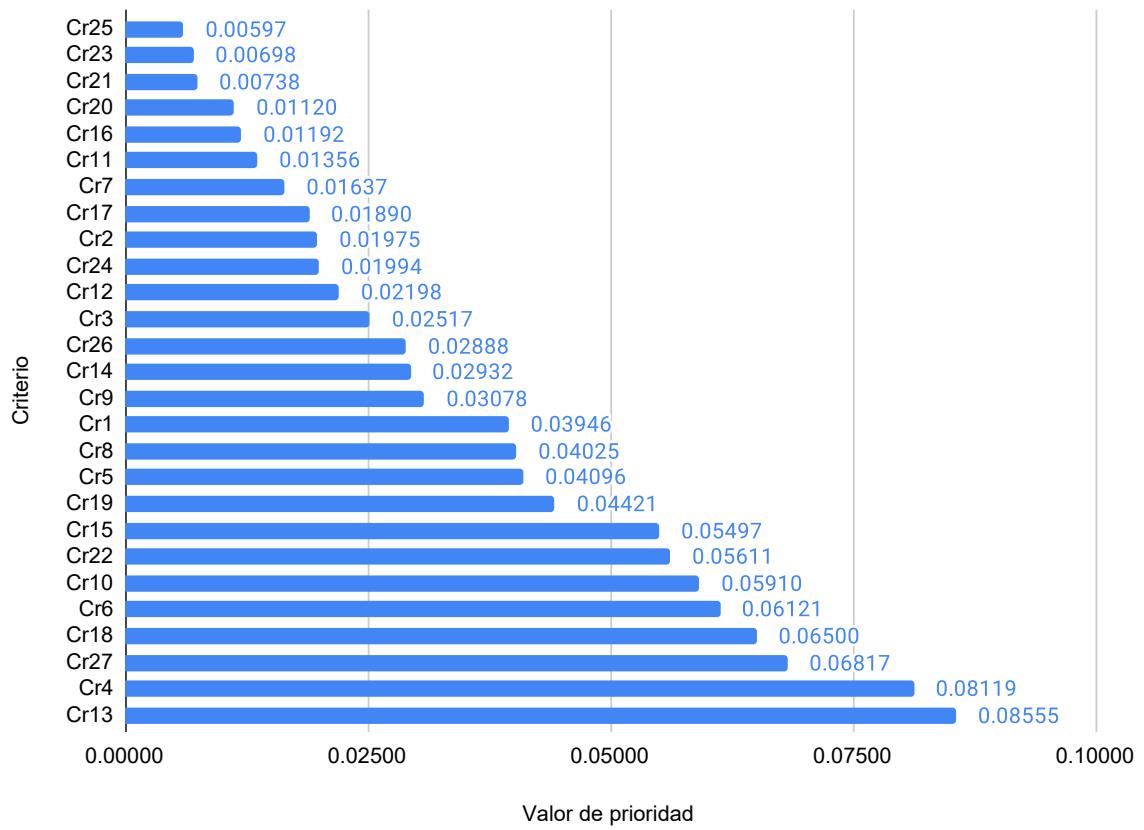
	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Cr27
Cr19	0.03200	0.05189	0.05817	0.02316	0.03958	0.04486	0.04132	0.04149	0.02280
Cr20	0.00640	0.01038	0.00277	0.00662	0.00264	0.00498	0.01653	0.00415	0.02280
Cr21	0.00457	0.03113	0.00831	0.00662	0.00792	0.00498	0.00826	0.00692	0.02280
Cr22	0.06400	0.07264	0.05817	0.04631	0.07124	0.07477	0.04132	0.06224	0.02280
Cr23	0.00640	0.03113	0.00831	0.00515	0.00792	0.00299	0.00826	0.00415	0.01368
Cr24	0.01067	0.03113	0.02493	0.00926	0.03958	0.01495	0.04132	0.04149	0.01368
Cr25	0.00640	0.00519	0.00831	0.00926	0.00792	0.00299	0.00826	0.00415	0.00977
Cr26	0.01600	0.05189	0.02493	0.01544	0.03958	0.00748	0.04132	0.02075	0.02280
Cr27	0.09599	0.03113	0.02493	0.13894	0.03958	0.07477	0.05785	0.06224	0.06840
Total	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

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
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



Jerarquia de criterios

## Criterio

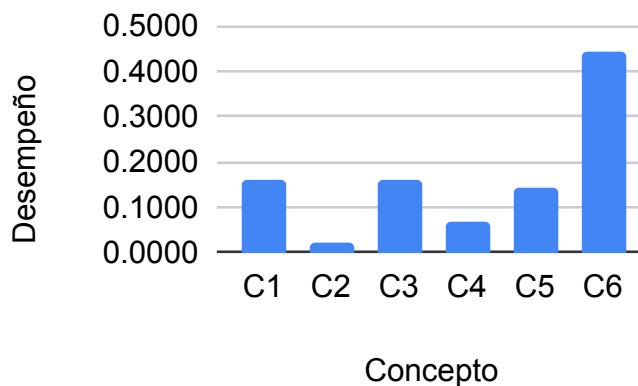
## Cr1

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr1

Cr1	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	9.00000	1.00000	5.00000	1.00000	0.20000
C2	0.11111	1.00000	0.11111	0.20000	0.11111	0.11111
C3	1.00000	9.00000	1.00000	5.00000	1.00000	0.20000
C4	0.20000	5.00000	0.20000	1.00000	0.33333	0.33333
C5	1.00000	9.00000	1.00000	3.00000	1.00000	0.20000
C6	5.00000	9.00000	5.00000	3.00000	5.00000	1.00000
Total	8.31111	42.00000	8.31111	17.20000	8.44444	2.04444

MnCr1	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.12032	0.21429	0.12032	0.29070	0.11842	0.09783
C2	0.01337	0.02381	0.01337	0.01163	0.01316	0.05435
C3	0.12032	0.21429	0.12032	0.29070	0.11842	0.09783
C4	0.02406	0.11905	0.02406	0.05814	0.03947	0.16304
C5	0.12032	0.21429	0.12032	0.17442	0.11842	0.09783
C6	0.60160	0.21429	0.60160	0.17442	0.59211	0.48913
Total	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.16031
C2	0.02161
C3	0.16031
C4	0.07131
C5	0.14093
C6	0.44552
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 1

## Criterio

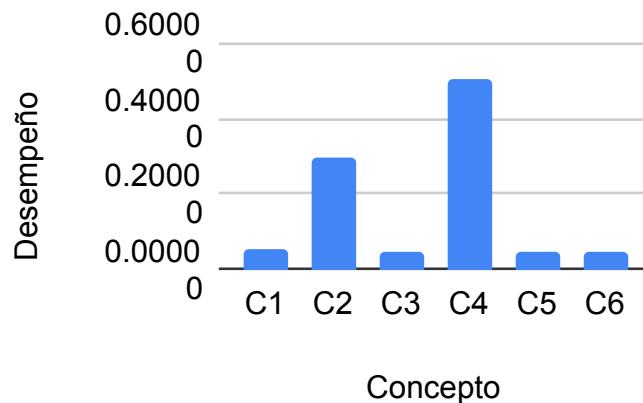
## Cr2

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr2

Cr2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	0.14286	1.00000	0.14286	1.00000	1.00000
C2	7.00000	1.00000	7.00000	0.25000	7.00000	7.00000
C3	1.00000	0.14286	1.00000	0.11111	1.00000	1.00000
C4	7.00000	4.00000	9.00000	1.00000	9.00000	9.00000
C5	1.00000	0.14286	1.00000	0.11111	1.00000	1.00000
C6	1.00000	0.14286	1.00000	0.11111	1.00000	1.00000
	18.00000	5.57143	20.00000	1.72619	20.00000	20.00000

MnCr2	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.05556	0.02564	0.05000	0.08276	0.05000	0.05000
C2	0.38889	0.17949	0.35000	0.14483	0.35000	0.35000
C3	0.05556	0.02564	0.05000	0.06437	0.05000	0.05000
C4	0.38889	0.71795	0.45000	0.57931	0.45000	0.45000
C5	0.05556	0.02564	0.05000	0.06437	0.05000	0.05000
C6	0.05556	0.02564	0.05000	0.06437	0.05000	0.05000
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.05233
C2	0.29387
C3	0.04926
C4	0.50602
C5	0.04926
C6	0.04926
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 2

## Criterio

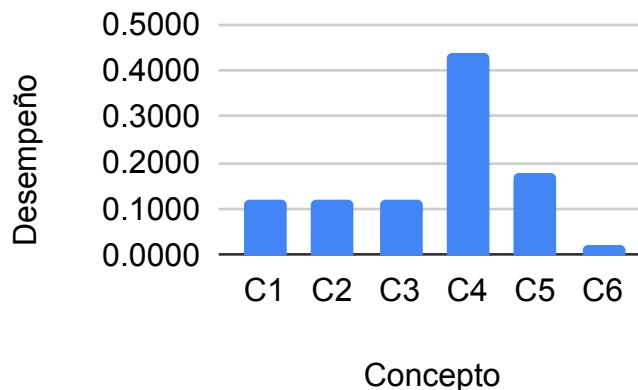
## Cr3

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr3

Cr3	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000	9.00000
C2	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000	9.00000
C3	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000	9.00000
C4	7.00000	7.00000	7.00000	1.00000	1.00000	7.00000
C5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	9.00000
C6	0.11111	0.11111	0.11111	0.14286	0.11111	1.00000
	11.11111	11.11111	11.11111	2.57143	5.11111	44.00000

MnCr3	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.09000	0.09000	0.09000	0.05556	0.19565	0.20455
C2	0.09000	0.09000	0.09000	0.05556	0.19565	0.20455
C3	0.09000	0.09000	0.09000	0.05556	0.19565	0.20455
C4	0.63000	0.63000	0.63000	0.38889	0.19565	0.15909
C5	0.09000	0.09000	0.09000	0.38889	0.19565	0.20455
C6	0.01000	0.01000	0.01000	0.05556	0.02174	0.02273
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.12096
C2	0.12096
C3	0.12096
C4	0.43894
C5	0.17651
C6	0.02167
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 3

## Criterio

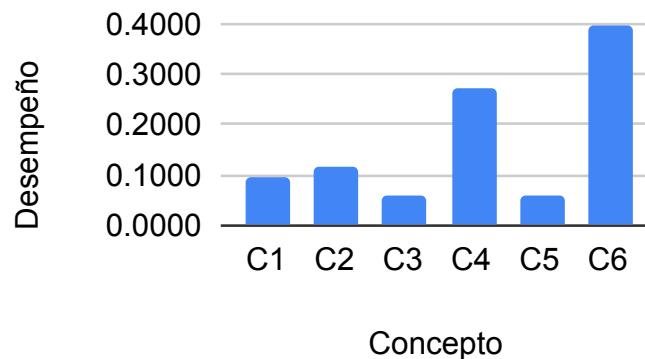
## Cr4

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr4

Cr4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	4.00000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000
C2	0.25000	1.00000	4.00000	0.33333	4.00000	0.14286
C3	1.00000	0.25000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000
C4	5.00000	3.00000	5.00000	1.00000	5.00000	0.50000
C5	1.00000	0.25000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000
C6	5.00000	7.00000	5.00000	2.00000	5.00000	1.00000
	13.25000	15.50000	17.00000	3.93333	17.00000	2.24286

MnCr4	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.07547	0.25806	0.05882	0.05085	0.05882	0.08917
C2	0.01887	0.06452	0.23529	0.08475	0.23529	0.06369
C3	0.07547	0.01613	0.05882	0.05085	0.05882	0.08917
C4	0.37736	0.19355	0.29412	0.25424	0.29412	0.22293
C5	0.07547	0.01613	0.05882	0.05085	0.05882	0.08917
C6	0.37736	0.45161	0.29412	0.50847	0.29412	0.44586
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.09853
C2	0.11707
C3	0.05821
C4	0.27272
C5	0.05821
C6	0.39526
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 4

## Criterio

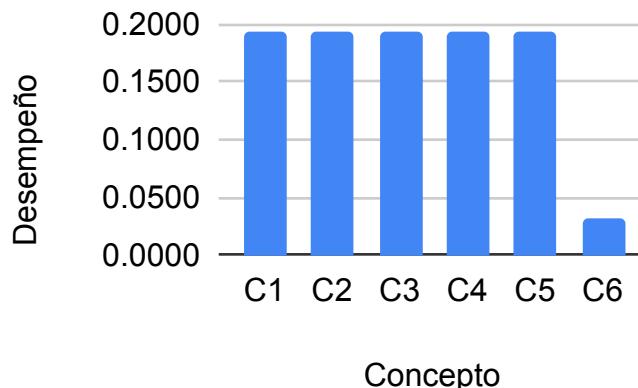
## Cr5

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr5

Cr5	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	6.00000
C2	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	6.00000
C3	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	6.00000
C4	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	6.00000
C5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	6.00000
C6	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	1.00000
	5.16667	5.16667	5.16667	5.16667	5.16667	31.00000

MnCr5	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355
C2	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355
C3	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355
C4	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355
C5	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355	0.19355
C6	0.03226	0.03226	0.03226	0.03226	0.03226	0.03226
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.19355
C2	0.19355
C3	0.19355
C4	0.19355
C5	0.19355
C6	0.03226
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 5

## Criterio

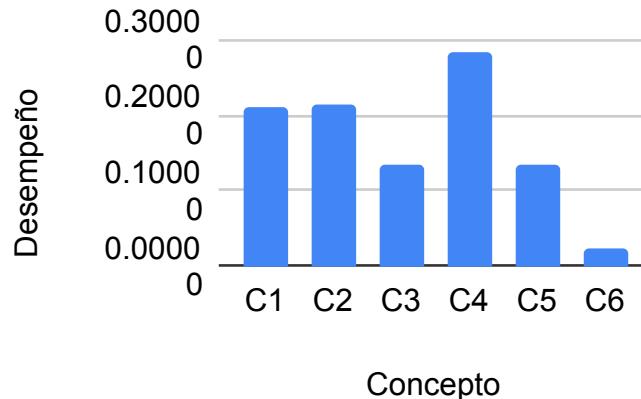
## Cr6

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr6

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr6

Cr6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	5.00000	1.00000	0.50000	1.00000	9.00000
C2	0.20000	1.00000	5.00000	0.25000	5.00000	3.00000
C3	1.00000	0.20000	1.00000	0.50000	1.00000	9.00000
C4	2.00000	4.00000	2.00000	1.00000	2.00000	8.00000
C5	1.00000	0.20000	1.00000	0.50000	1.00000	9.00000
C6	0.11111	0.33333	0.11111	0.12500	0.11111	1.00000
	5.31111	10.73333	10.11111	2.87500	10.11111	39.00000

MnCr6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.18828	0.46584	0.09890	0.17391	0.09890	0.23077
C2	0.03766	0.09317	0.49451	0.08696	0.49451	0.07692
C3	0.18828	0.01863	0.09890	0.17391	0.09890	0.23077
C4	0.37657	0.37267	0.19780	0.34783	0.19780	0.20513
C5	0.18828	0.01863	0.09890	0.17391	0.09890	0.23077
C6	0.02092	0.03106	0.01099	0.04348	0.01099	0.02564
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 6

## Criterio

## Cr7

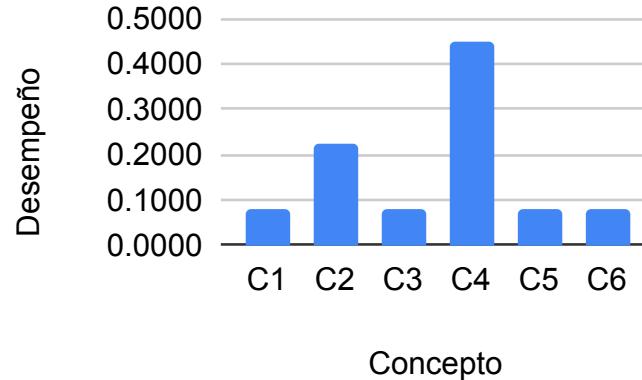
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr7

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr7

Cr7	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	0.33333	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000
C2	3.00000	1.00000	3.00000	0.33333	3.00000	3.00000
C3	1.00000	0.33333	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000
C4	5.00000	3.00000	5.00000	1.00000	5.00000	5.00000
C5	1.00000	0.33333	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000
C6	1.00000	0.33333	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000
	12.00000	5.33333	12.00000	2.13333	12.00000	12.00000

Concepto	Valor
C1	0.08160
C2	0.22396
C3	0.08160
C4	0.44965
C5	0.08160
C6	0.08160
Total	1.00000

MnCr7	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.08333	0.06250	0.08333	0.09375	0.08333	0.08333
C2	0.25000	0.18750	0.25000	0.15625	0.25000	0.25000
C3	0.08333	0.06250	0.08333	0.09375	0.08333	0.08333
C4	0.41667	0.56250	0.41667	0.46875	0.41667	0.41667
C5	0.08333	0.06250	0.08333	0.09375	0.08333	0.08333
C6	0.08333	0.06250	0.08333	0.09375	0.08333	0.08333
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 7

## Criterio

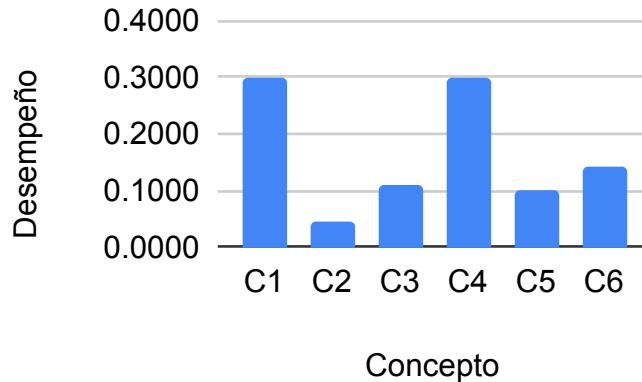
## Cr8

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr8

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr8

Cr8	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	5.00000	3.00000	1.00000	3.00000	3.00000
C2	0.20000	1.00000	0.33333	0.20000	0.33333	0.33333
C3	0.33333	3.00000	1.00000	0.33333	1.00000	1.00000
C4	1.00000	5.00000	3.00000	1.00000	3.00000	3.00000
C5	0.33333	3.00000	1.00000	0.33333	1.00000	0.33333
C6	0.33333	3.00000	1.00000	0.33333	3.00000	1.00000
	3.20000	20.00000	9.33333	3.20000	11.33333	8.66667

MnCr8	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.31250	0.25000	0.32143	0.31250	0.26471	0.34615
C2	0.06250	0.05000	0.03571	0.06250	0.02941	0.03846
C3	0.10417	0.15000	0.10714	0.10417	0.08824	0.11538
C4	0.31250	0.25000	0.32143	0.31250	0.26471	0.34615
C5	0.10417	0.15000	0.10714	0.10417	0.08824	0.03846
C6	0.10417	0.15000	0.10714	0.10417	0.26471	0.11538
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 8

## Criterio

## Cr9

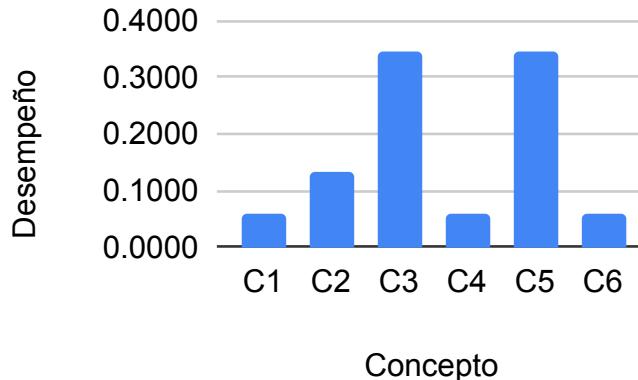
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr9

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr9

Cr9	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	0.33333	0.20000	1.00000	0.20000	1.00000
C2	3.00000	1.00000	0.20000	3.00000	0.20000	3.00000
C3	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000	5.00000
C4	1.00000	0.33333	0.20000	1.00000	0.20000	1.00000
C5	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000	5.00000
C6	1.00000	0.33333	0.20000	1.00000	0.20000	1.00000
	16.00000	12.00000	2.80000	16.00000	2.80000	16.00000

Concepto	Valor
C1	0.05969
C2	0.13145
C3	0.34474
C4	0.05969
C5	0.34474
C6	0.05969
Total	1.00000

MnCr9	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.06250	0.02778	0.07143	0.06250	0.07143	0.06250
C2	0.18750	0.08333	0.07143	0.18750	0.07143	0.18750
C3	0.31250	0.41667	0.35714	0.31250	0.35714	0.31250
C4	0.06250	0.02778	0.07143	0.06250	0.07143	0.06250
C5	0.31250	0.41667	0.35714	0.31250	0.35714	0.31250
C6	0.06250	0.02778	0.07143	0.06250	0.07143	0.06250
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 9

## Criterio

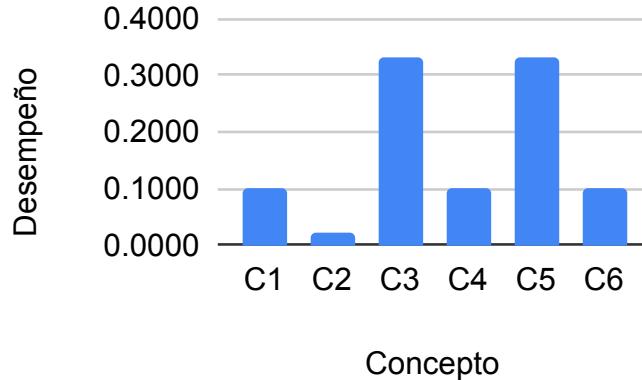
## Cr10

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr10

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr10

Cr10	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	7.00000	0.25000	1.00000	0.25000	1.00000
C2	0.14286	1.00000	0.11111	0.14286	0.11111	0.14286
C3	4.00000	9.00000	1.00000	4.00000	1.00000	4.00000
C4	1.00000	7.00000	0.25000	1.00000	0.25000	1.00000
C5	4.00000	9.00000	1.00000	4.00000	1.00000	4.00000
C6	1.00000	7.00000	0.25000	1.00000	0.25000	1.00000
	11.14286	40.00000	2.86111	11.14286	2.86111	11.14286

MnCr10	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.08974	0.17500	0.08738	0.08974	0.08738	0.08974
C2	0.01282	0.02500	0.03883	0.01282	0.03883	0.01282
C3	0.35897	0.22500	0.34951	0.35897	0.34951	0.35897
C4	0.08974	0.17500	0.08738	0.08974	0.08738	0.08974
C5	0.35897	0.22500	0.34951	0.35897	0.34951	0.35897
C6	0.08974	0.17500	0.08738	0.08974	0.08738	0.08974
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 10

## Criterio

## Cr11

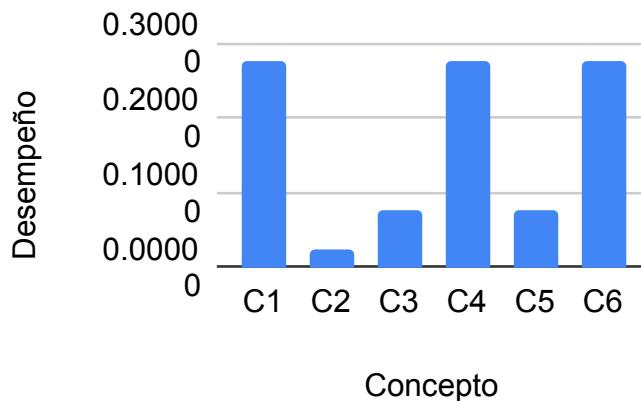
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr11

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr11

Cr11	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	9.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000
C2	0.11111	1.00000	0.14286	0.11111	0.14286	0.11111
C3	0.20000	7.00000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000
C4	1.00000	9.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000
C5	0.20000	7.00000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000
C6	1.00000	9.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000
	3.51111	42.00000	17.14286	3.51111	17.14286	3.51111

MnCr11	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.28481	0.21429	0.29167	0.28481	0.29167	0.28481
C2	0.03165	0.02381	0.00833	0.03165	0.00833	0.03165
C3	0.05696	0.16667	0.05833	0.05696	0.05833	0.05696
C4	0.28481	0.21429	0.29167	0.28481	0.29167	0.28481
C5	0.05696	0.16667	0.05833	0.05696	0.05833	0.05696
C6	0.28481	0.21429	0.29167	0.28481	0.29167	0.28481
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.27534
C2	0.02257
C3	0.07570
C4	0.27534
C5	0.07570
C6	0.27534
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 11

## Criterio

## Cr12

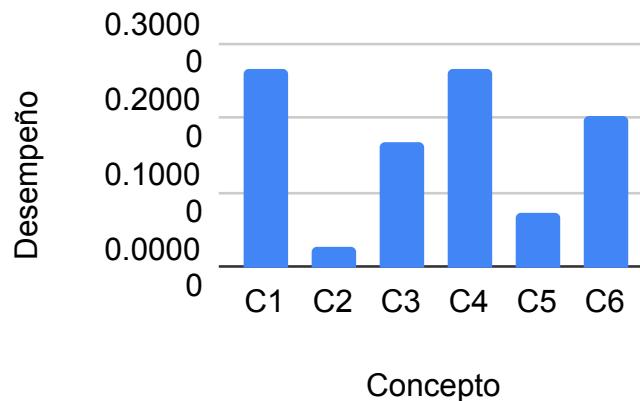
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr12

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr12

Cr12	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	7.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000
C2	1.00000	0.20000	0.14286	0.20000	0.14286	0.11111
C3	5.00000	1.00000	0.20000	1.00000	5.00000	0.20000
C4	7.00000	5.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000
C5	5.00000	1.00000	0.20000	1.00000	0.20000	0.20000
C6	7.00000	0.20000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000
	32.00000	12.40000	3.54286	17.20000	8.34286	3.51111

MnCr12	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.28226	0.21875	0.40323	0.28226	0.29070	0.11986
C2	0.04032	0.03125	0.01613	0.04032	0.01163	0.01712
C3	0.05645	0.15625	0.08065	0.05645	0.05814	0.59932
C4	0.28226	0.21875	0.40323	0.28226	0.29070	0.11986
C5	0.05645	0.15625	0.08065	0.05645	0.05814	0.02397
C6	0.28226	0.21875	0.01613	0.28226	0.29070	0.11986
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.26618
C2	0.02613
C3	0.16788
C4	0.26618
C5	0.07199
C6	0.20166
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 12

## Criterio

## Cr13

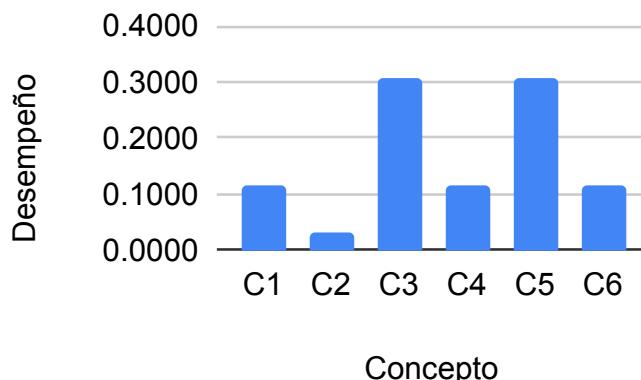
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr13

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr13

Cr13	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	5.00000	0.33333	1.00000	0.33333	1.00000
C2	0.20000	1.00000	0.14286	0.20000	0.14286	0.20000
C3	3.00000	7.00000	1.00000	3.00000	1.00000	3.00000
C4	1.00000	5.00000	0.33333	1.00000	0.33333	1.00000
C5	3.00000	7.00000	1.00000	3.00000	1.00000	3.00000
C6	1.00000	5.00000	0.33333	1.00000	0.33333	1.00000
	9.20000	30.00000	3.14286	9.20000	3.14286	9.20000

MnCr13	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.10870	0.16667	0.10606	0.10870	0.10606	0.10870
C2	0.02174	0.03333	0.04545	0.02174	0.04545	0.02174
C3	0.32609	0.23333	0.31818	0.32609	0.31818	0.32609
C4	0.10870	0.16667	0.10606	0.10870	0.10606	0.10870
C5	0.32609	0.23333	0.31818	0.32609	0.31818	0.32609
C6	0.10870	0.16667	0.10606	0.10870	0.10606	0.10870
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.11748
C2	0.03158
C3	0.30799
C4	0.11748
C5	0.30799
C6	0.11748
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 13

## Criterio

## Cr14

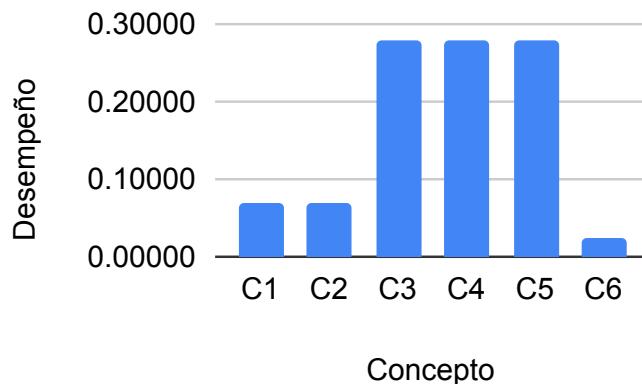
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr14

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr14

Cr14	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	0.20000	0.20000	0.20000	5.00000
C2	1.00000	1.00000	0.20000	0.20000	0.20000	5.00000
C3	5.00000	5.00000	1.00000	1.00000	1.00000	9.00000
C4	5.00000	5.00000	1.00000	1.00000	1.00000	9.00000
C5	5.00000	5.00000	1.00000	1.00000	1.00000	9.00000
C6	0.20000	0.20000	0.11111	0.11111	0.11111	1.00000
	17.20000	17.20000	3.51111	3.51111	3.51111	38.00000

MnCr14	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.05814	0.05814	0.05696	0.05696	0.05696	0.13158
C2	0.05814	0.05814	0.05696	0.05696	0.05696	0.13158
C3	0.29070	0.29070	0.28481	0.28481	0.28481	0.23684
C4	0.29070	0.29070	0.28481	0.28481	0.28481	0.23684
C5	0.29070	0.29070	0.28481	0.28481	0.28481	0.23684
C6	0.01163	0.01163	0.03165	0.03165	0.03165	0.02632
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.06979
C2	0.06979
C3	0.27878
C4	0.27878
C5	0.27878
C6	0.02408
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 14

## Criterio

## Cr15

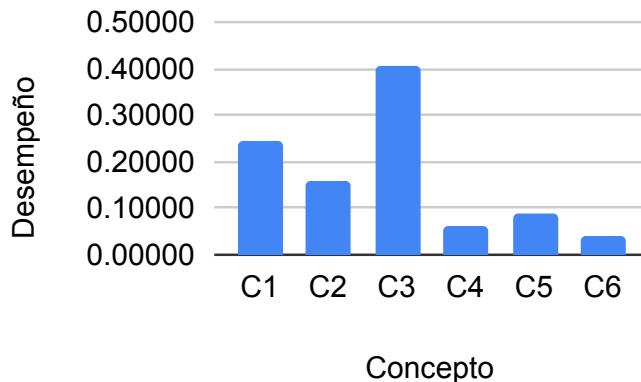
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr15

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr15

Cr15	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	3.00000	0.20000	5.00000	5.00000	5.00000
C2	0.33333	1.00000	0.33333	3.00000	3.00000	5.00000
C3	5.00000	3.00000	1.00000	5.00000	5.00000	5.00000
C4	0.20000	0.33333	0.20000	1.00000	0.33333	3.00000
C5	0.20000	0.33333	0.20000	3.00000	1.00000	3.00000
C6	0.20000	0.20000	0.20000	0.33333	0.33333	1.00000
	6.93333	7.86667	2.13333	17.33333	14.66667	22.00000

Concepto	Valor
C1	0.24600
C2	0.15606
C3	0.40465
C4	0.06363
C5	0.09043
C6	0.03924
Total	1.00000

MnCr15	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.14423	0.38136	0.09375	0.28846	0.34091	0.22727
C2	0.04808	0.12712	0.15625	0.17308	0.20455	0.22727
C3	0.72115	0.38136	0.46875	0.28846	0.34091	0.22727
C4	0.02885	0.04237	0.09375	0.05769	0.02273	0.13636
C5	0.02885	0.04237	0.09375	0.17308	0.06818	0.13636
C6	0.02885	0.02542	0.09375	0.01923	0.02273	0.04545
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 15

## Criterio

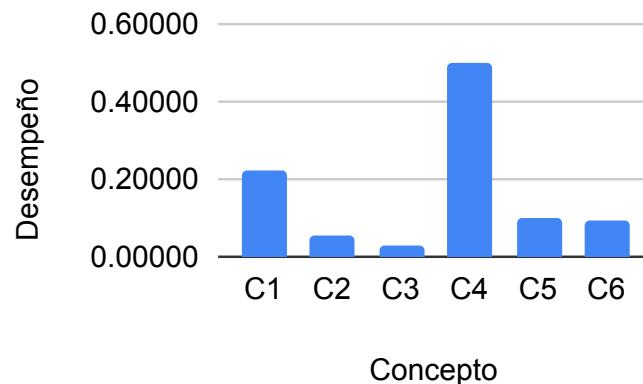
## Cr16

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr16

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr16

Cr16	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	5.00000	7.00000	0.20000	3.00000	5.00000
C2	0.20000	1.00000	3.00000	0.14286	0.33333	0.33333
C3	0.14286	0.33333	1.00000	0.11111	0.20000	0.20000
C4	5.00000	7.00000	9.00000	1.00000	7.00000	7.00000
C5	0.33333	3.00000	5.00000	0.14286	1.00000	1.00000
C6	0.20000	3.00000	5.00000	0.14286	1.00000	1.00000
	6.87619	19.33333	30.00000	1.73968	12.53333	14.53333

MnCr16	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.14543	0.25862	0.23333	0.11496	0.23936	0.34404
C2	0.02909	0.05172	0.10000	0.08212	0.02660	0.02294
C3	0.02078	0.01724	0.03333	0.06387	0.01596	0.01376
C4	0.72715	0.36207	0.30000	0.57482	0.55851	0.48165
C5	0.04848	0.15517	0.16667	0.08212	0.07979	0.06881
C6	0.02909	0.15517	0.16667	0.08212	0.07979	0.06881
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 16

## Criterio

## Cr17

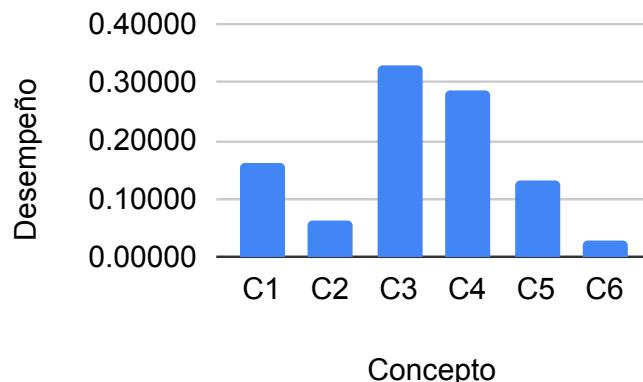
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr17

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr17

Cr17	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	7.00000	0.33333	0.33333	1.00000	5.00000
C2	0.14286	1.00000	0.33333	0.20000	0.33333	3.00000
C3	3.00000	3.00000	1.00000	3.00000	2.00000	7.00000
C4	3.00000	5.00000	0.33333	1.00000	5.00000	7.00000
C5	1.00000	3.00000	0.50000	0.20000	1.00000	5.00000
C6	0.20000	0.33333	0.14286	0.14286	0.20000	1.00000
	8.34286	19.33333	2.64286	4.87619	9.53333	28.00000

MnCr17	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.11986	0.36207	0.12613	0.06836	0.10490	0.17857
C2	0.01712	0.05172	0.12613	0.04102	0.03497	0.10714
C3	0.35959	0.15517	0.37838	0.61523	0.20979	0.25000
C4	0.35959	0.25862	0.12613	0.20508	0.52448	0.25000
C5	0.11986	0.15517	0.18919	0.04102	0.10490	0.17857
C6	0.02397	0.01724	0.05405	0.02930	0.02098	0.03571
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.15998
C2	0.06302
C3	0.32803
C4	0.28731
C5	0.13145
C6	0.03021
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 17

## Criterio

## Cr18

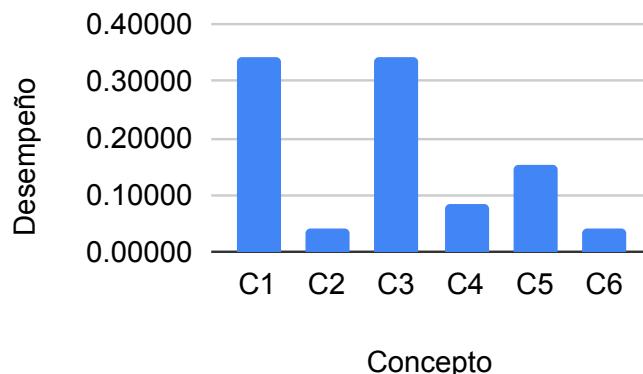
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr18

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr18

Cr18	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	7.00000	1.00000	5.00000	3.00000	7.00000
C2	0.14286	1.00000	0.14286	0.33333	0.33333	1.00000
C3	1.00000	7.00000	1.00000	5.00000	3.00000	7.00000
C4	0.20000	3.00000	0.20000	1.00000	0.33333	3.00000
C5	0.33333	3.00000	0.33333	3.00000	1.00000	5.00000
C6	0.14286	1.00000	0.14286	0.33333	0.20000	1.00000
	2.81905	22.00000	2.81905	14.66667	7.86667	24.00000

MnCr18	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.35473	0.31818	0.35473	0.34091	0.38136	0.29167
C2	0.05068	0.04545	0.05068	0.02273	0.04237	0.04167
C3	0.35473	0.31818	0.35473	0.34091	0.38136	0.29167
C4	0.07095	0.13636	0.07095	0.06818	0.04237	0.12500
C5	0.11824	0.13636	0.11824	0.20455	0.12712	0.20833
C6	0.05068	0.04545	0.05068	0.02273	0.02542	0.04167
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Concepto	Valor
C1	0.34026
C2	0.04226
C3	0.34026
C4	0.08564
C5	0.15214
C6	0.03944
Total	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 18

## Criterio

## Cr19

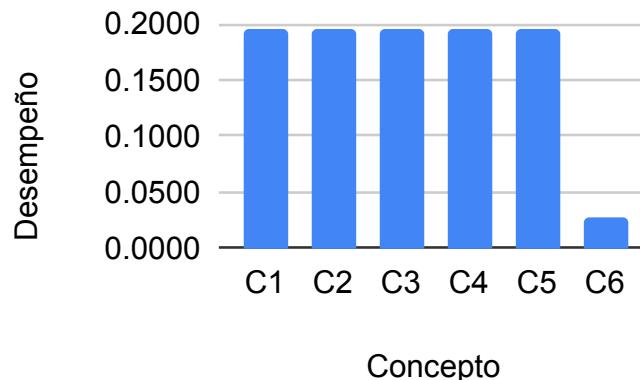
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr19

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr19

Cr19	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	7.00000
C2	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	7.00000
C3	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	7.00000
C4	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	7.00000
C5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	7.00000
C6	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	1.00000
	5.14286	5.14286	5.14286	5.14286	5.14286	36.00000

VCr19	Valor
C1	0.19444
C2	0.19444
C3	0.19444
C4	0.19444
C5	0.19444
C6	0.02778
	1.00000

MnCr19	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444
C2	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444
C3	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444
C4	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444
C5	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444	0.19444
C6	0.02778	0.02778	0.02778	0.02778	0.02778	0.02778
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 19

## Criterio

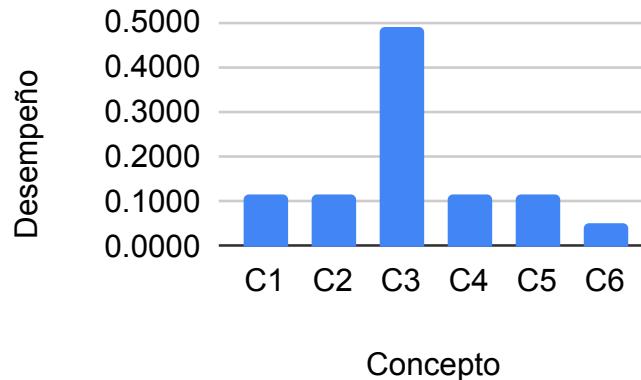
## Cr20

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr20

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr20

Cr20	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	3.00000
C2	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	3.00000
C3	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000	5.00000	5.00000
C4	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	3.00000
C5	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	3.00000
C6	0.33333	0.33333	0.20000	0.33333	0.33333	1.00000
	9.33333	9.33333	2.00000	9.33333	9.33333	18.00000

MnCr20	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.10714	0.10714	0.10000	0.10714	0.10714	0.16667
C2	0.10714	0.10714	0.10000	0.10714	0.10714	0.16667
C3	0.53571	0.53571	0.50000	0.53571	0.53571	0.27778
C4	0.10714	0.10714	0.10000	0.10714	0.10714	0.16667
C5	0.10714	0.10714	0.10000	0.10714	0.10714	0.16667
C6	0.03571	0.03571	0.10000	0.03571	0.03571	0.05556
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 20

## Criterio

## Cr21

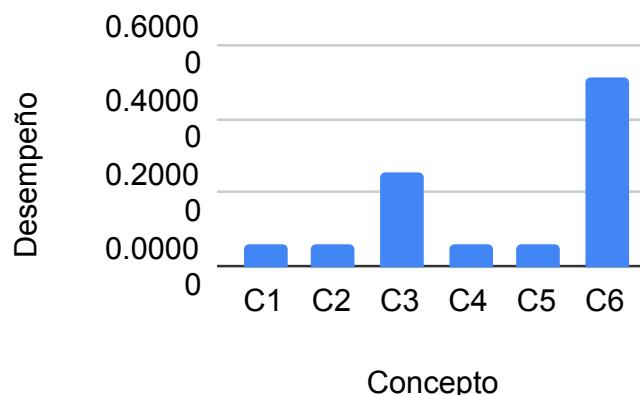
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr21

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr21

Cr21	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	0.14286
C2	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	0.14286
C3	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000	5.00000	0.20000
C4	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	0.14286
C5	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000	1.00000	0.14286
C6	7.00000	7.00000	5.00000	7.00000	7.00000	1.00000
	16.00000	16.00000	6.80000	16.00000	16.00000	1.77143

VCr21	Valor
C1	0.06001
C2	0.06001
C3	0.25166
C4	0.06001
C5	0.06001
C6	0.50830
	1.00000

MnCr21	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.06250	0.06250	0.02941	0.06250	0.06250	0.08065
C2	0.06250	0.06250	0.02941	0.06250	0.06250	0.08065
C3	0.31250	0.31250	0.14706	0.31250	0.31250	0.11290
C4	0.06250	0.06250	0.02941	0.06250	0.06250	0.08065
C5	0.06250	0.06250	0.02941	0.06250	0.06250	0.08065
C6	0.43750	0.43750	0.73529	0.43750	0.43750	0.56452
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 21

## Criterio

## Cr22

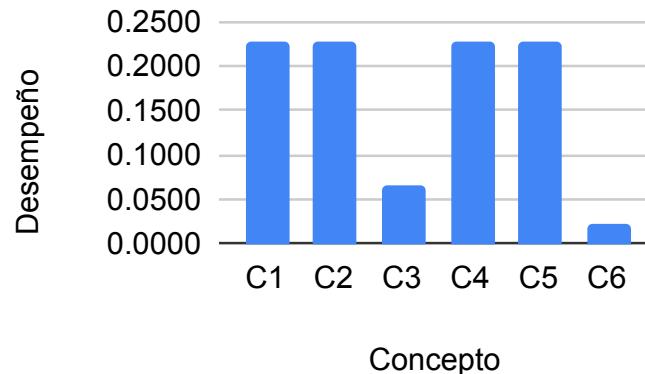
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr22

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr22

Cr22	C1	C2	C3	C4	C5	C6	VCr22	Valor
C1	1.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	9.00000	C1	0.22814
C2	1.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	9.00000	C2	0.22814
C3	0.20000	0.20000	1.00000	0.20000	0.20000	7.00000	C3	0.06533
C4	1.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	9.00000	C4	0.22814
C5	1.00000	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	9.00000	C5	0.22814
C6	0.11111	0.11111	0.14286	0.11111	0.11111	1.00000	C6	0.02210
	4.31111	4.31111	21.14286	4.31111	4.31111	44.00000		1.00000

MnCr22	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.23196	0.23196	0.23649	0.23196	0.23196	0.20455
C2	0.23196	0.23196	0.23649	0.23196	0.23196	0.20455
C3	0.04639	0.04639	0.04730	0.04639	0.04639	0.15909
C4	0.23196	0.23196	0.23649	0.23196	0.23196	0.20455
C5	0.23196	0.23196	0.23649	0.23196	0.23196	0.20455
C6	0.02577	0.02577	0.00676	0.02577	0.02577	0.02273
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 22

## Criterio

## Cr23

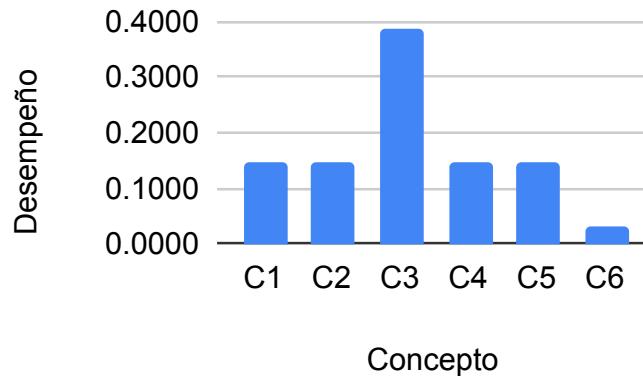
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr23

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr23

Cr23	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	0.33333	1.00000	1.00000	5.00000
C2	1.00000	1.00000	0.33333	1.00000	1.00000	5.00000
C3	3.00000	3.00000	1.00000	3.00000	3.00000	7.00000
C4	1.00000	1.00000	0.33333	1.00000	1.00000	5.00000
C5	1.00000	1.00000	0.33333	1.00000	1.00000	5.00000
C6	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000	0.20000	1.00000
	7.20000	7.20000	2.47619	7.20000	7.20000	28.00000

VCr23	Valor
C1	0.14479
C2	0.14479
C3	0.38675
C4	0.14479
C5	0.14479
C6	0.03409
	1.00000

MnCr23	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.13889	0.13889	0.13462	0.13889	0.13889	0.17857
C2	0.13889	0.13889	0.13462	0.13889	0.13889	0.17857
C3	0.41667	0.41667	0.40385	0.41667	0.41667	0.25000
C4	0.13889	0.13889	0.13462	0.13889	0.13889	0.17857
C5	0.13889	0.13889	0.13462	0.13889	0.13889	0.17857
C6	0.02778	0.02778	0.05769	0.02778	0.02778	0.03571
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 23

## Criterio

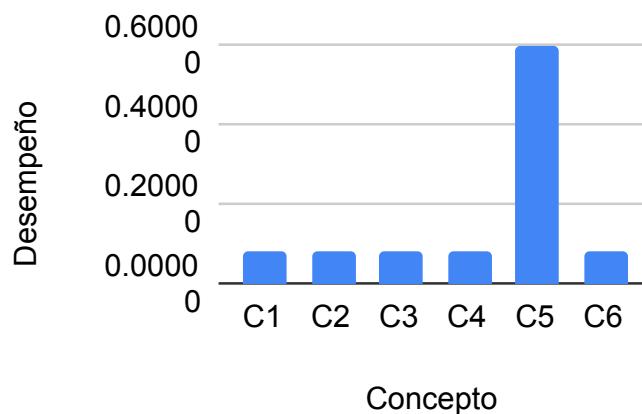
## Cr24

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr24

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr24

Cr24	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000
C2	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.11111	1.00000
C3	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000
C4	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000
C5	7.00000	9.00000	7.00000	7.00000	1.00000	7.00000
C6	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.14286	1.00000
	12.00000	14.00000	12.00000	12.00000	1.68254	12.00000

MnCr24	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.08333	0.07143	0.08333	0.08333	0.08491	0.08333
C2	0.08333	0.07143	0.08333	0.08333	0.06604	0.08333
C3	0.08333	0.07143	0.08333	0.08333	0.08491	0.08333
C4	0.08333	0.07143	0.08333	0.08333	0.08491	0.08333
C5	0.58333	0.64286	0.58333	0.58333	0.59434	0.58333
C6	0.08333	0.07143	0.08333	0.08333	0.08491	0.08333
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 24

## Criterio

## Cr25

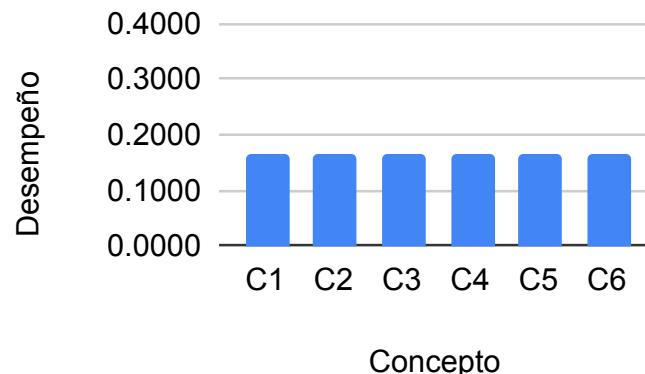
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr25

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr25

Cr25	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
C2	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
C3	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
C4	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
C5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
C6	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
	6.00000	6.00000	6.00000	6.00000	6.00000	6.00000

VCr25	Valor
C1	0.16667
C2	0.16667
C3	0.16667
C4	0.16667
C5	0.16667
C6	0.16667
	1.00000

MnCr25	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667
C2	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667
C3	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667
C4	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667
C5	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667
C6	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 25

## Criterio

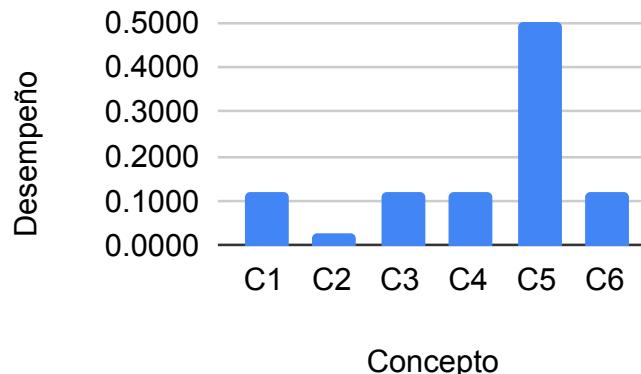
## Cr26

Evaluación de conceptos contra el criterio Cr26

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr26

Cr26	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
C2	0.20000	1.00000	0.20000	0.20000	0.11111	0.20000
C3	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
C4	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
C5	5.00000	9.00000	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000
C6	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
	9.20000	30.00000	9.20000	9.20000	1.91111	9.20000

MnCr26	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.10870	0.16667	0.10870	0.10870	0.10465	0.10870
C2	0.02174	0.03333	0.02174	0.02174	0.05814	0.02174
C3	0.10870	0.16667	0.10870	0.10870	0.10465	0.10870
C4	0.10870	0.16667	0.10870	0.10870	0.10465	0.10870
C5	0.54348	0.30000	0.54348	0.54348	0.52326	0.54348
C6	0.10870	0.16667	0.10870	0.10870	0.10465	0.10870
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 26

## Criterio

## Cr27

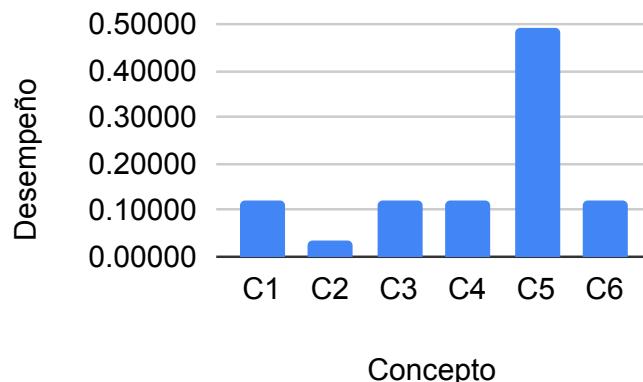
Evaluación de conceptos contra el criterio Cr27

Comparación del desempeño de los conceptos en el criterio Cr27

Cr27	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
C2	0.20000	1.00000	0.20000	0.20000	0.14286	0.20000
C3	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
C4	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
C5	5.00000	7.00000	5.00000	5.00000	1.00000	5.00000
C6	1.00000	5.00000	1.00000	1.00000	0.20000	1.00000
	9.20000	28.00000	9.20000	9.20000	1.94286	9.20000

VCr27	Valor
C1	0.11938
C2	0.03270
C3	0.11938
C4	0.11938
C5	0.48977
C6	0.11938
	1.00000

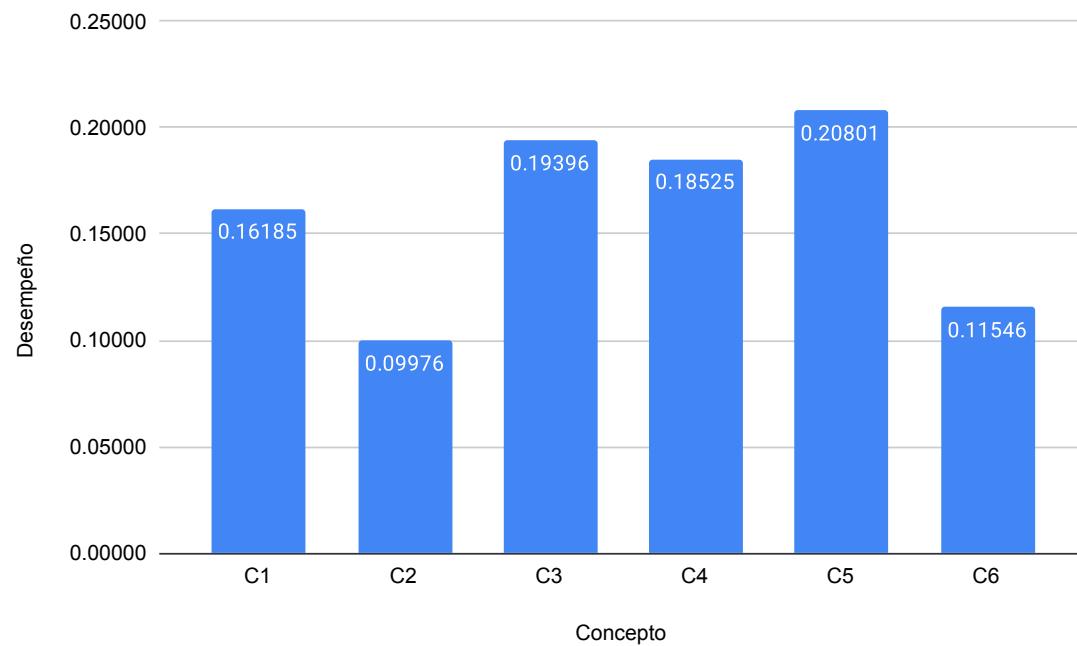
MnCr27	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.10870	0.17857	0.10870	0.10870	0.10294	0.10870
C2	0.02174	0.03571	0.02174	0.02174	0.07353	0.02174
C3	0.10870	0.17857	0.10870	0.10870	0.10294	0.10870
C4	0.10870	0.17857	0.10870	0.10870	0.10294	0.10870
C5	0.54348	0.25000	0.54348	0.54348	0.51471	0.54348
C6	0.10870	0.17857	0.10870	0.10870	0.10294	0.10870
	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000



Desempeño de los conceptos en el criterio 27

# Selección de concepto

Selección de concepto



Desempeño general de los conceptos solución

## Criterio

## Cr1

Comparación de desempeño Cr1: Ce vs Cm

Cr1	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.20000
Mejorado	5.00000	1.00000
	6.00000	1.20000
Concepto	Valor	
Elegido	0.16667	
Mejorado	0.83333	
Total	1.00000	

MnCr1	Elegido	Mejorado
Elegido	0.16667	0.16667
Mejorado	0.83333	0.83333
	1.00000	1.00000

## Criterio

## Cr2

Comparación de desempeño Cr2: Ce vs Cm

Cr2	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000
Concepto	Valor	
Elegido	0.50000	
Mejorado	0.50000	
Total	1.00000	

MnCr2	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

**Cr3**

Comparación de desempeño Cr3: Ce vs Cm

Cr3	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.14286
Mejorado	7.00000	1.00000
	8.00000	1.14286

Concepto	Valor
Elegido	0.12500
Mejorado	0.87500
Total	1.00000

MnCr3	Elegido	Mejorado
Elegido	0.12500	0.12500
Mejorado	0.87500	0.87500
	1.00000	1.00000

## Criterio

**Cr4**

Comparación de desempeño Cr4: Ce vs Cm

Cr4	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.33333
Mejorado	3.00000	1.00000
	4.00000	1.33333

Concepto	Valor
Elegido	0.25000
Mejorado	0.75000
Total	1.00000

MnCr4	Elegido	Mejorado
Elegido	0.25000	0.25000
Mejorado	0.75000	0.75000
	1.00000	1.00000

**Criterio****Cr5**

Comparación de desempeño Cr5: Ce vs Cm

Cr5	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.33333
Mejorado	3.00000	1.00000
	4.00000	1.33333
Concepto	Valor	
Elegido	0.25000	
Mejorado	0.75000	
Total	1.00000	

MnCr5	Elegido	Mejorado
Elegido	0.25000	0.25000
Mejorado	0.75000	0.75000
	1.00000	1.00000

**Criterio****Cr6**

Comparación de desempeño Cr6: Ce vs Cm

Cr6	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000
Concepto	Valor	
Elegido	0.50000	
Mejorado	0.50000	
Total	1.00000	

MnCr6	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr7

Comparación de desempeño Cr7: Ce vs Cm

Cr7	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr7	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr8

Comparación de desempeño Cr8: Ce vs Cm

Cr8	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr8	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

## Cr9

Comparación de desempeño Cr9: Ce vs Cm

Cr9	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr9	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

## Cr10

Comparación de desempeño Cr10: Ce vs Cm

Cr10	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr11	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr11

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr10	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr11	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr12

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr12	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr12	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Criterio****Cr13**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr13	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr13	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Criterio****Cr14**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr14	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
Total	1.00000

MnCr14	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr15

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr15	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.33333
Mejorado	3.00000	1.00000
	4.00000	1.33333

Concepto	Valor
Elegido	0.25000
Mejorado	0.75000
Total	1.00000

MnCr15	Elegido	Mejorado
Elegido	0.25000	0.25000
Mejorado	0.75000	0.75000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr16

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr16	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.14286
Mejorado	7.00000	1.00000
	8.00000	1.14286

Concepto	Valor
Elegido	0.12500
Mejorado	0.87500
Total	1.00000

MnCr16	Elegido	Mejorado
Elegido	0.12500	0.12500
Mejorado	0.87500	0.87500
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr17**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr17	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.20000
Mejorado	5.00000	1.00000
	6.00000	1.20000

Concepto	Valor
Elegido	0.16667
Mejorado	0.83333
Total	1.00000

MnCr17	Elegido	Mejorado
Elegido	0.16667	0.16667
Mejorado	0.83333	0.83333
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr18**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr18	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.20000
Mejorado	5.00000	1.00000
	6.00000	1.20000

Concepto	Valor
Elegido	0.16667
Mejorado	0.83333
Total	1.00000

MnCr18	Elegido	Mejorado
Elegido	0.16667	0.16667
Mejorado	0.83333	0.83333
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr19**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr19	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
	1.00000

MnCr19	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr20**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr20	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.20000
Mejorado	5.00000	1.00000
	6.00000	1.20000

Concepto	Valor
Elegido	0.16667
Mejorado	0.83333
	1.00000

MnCr20	Elegido	Mejorado
Elegido	0.16667	0.16667
Mejorado	0.83333	0.83333
	1.00000	1.00000

## Criterio

## Cr21

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr21	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.33333
Mejorado	3.00000	1.00000
	4.00000	1.33333

Concepto	Valor
Elegido	0.25000
Mejorado	0.75000
	1.00000

MnCr21	Elegido	Mejorado
Elegido	0.25000	0.25000
Mejorado	0.75000	0.75000
	1.00000	1.00000

## Criterio

## Cr22

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr22	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
	1.00000

MnCr22	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr23

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr23	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	0.33333
Mejorado	3.00000	1.00000
	4.00000	1.33333

Concepto	Valor
Elegido	0.25000
Mejorado	0.75000
	1.00000

MnCr23	Elegido	Mejorado
Elegido	0.25000	0.25000
Mejorado	0.75000	0.75000
	1.00000	1.00000

## Criterio

Cr24

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr24	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
	1.00000

MnCr24	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr25**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr25	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
	1.00000

MnCr25	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr26**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

Cr26	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
	1.00000

MnCr26	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Criterio**

**Cr27**

Comparación de desempeño Cr: Ce vs Cm

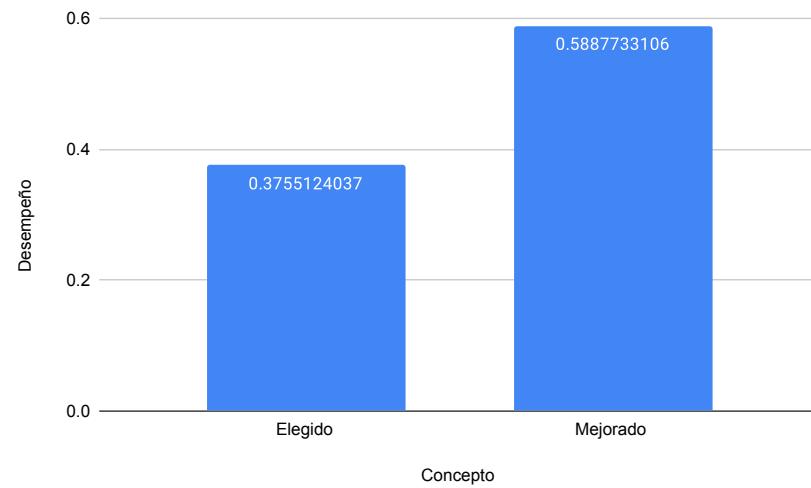
Cr27	Elegido	Mejorado
Elegido	1.00000	1.00000
Mejorado	1.00000	1.00000
	2.00000	2.00000

Concepto	Valor
Elegido	0.50000
Mejorado	0.50000
	1.00000

MnCr27	Elegido	Mejorado
Elegido	0.50000	0.50000
Mejorado	0.50000	0.50000
	1.00000	1.00000

**Desempeño general:** **Ce** **vs** **Cm**

Evaluación final del concepto elegido contra el concepto mejorado



## **Anexos**



---

## Anexo 1: Hojas de datos

---

**A. 1. Motor Planetario Premium HD 12V, 23RPM 4166.2oz-in**

**ROBOTZONE**

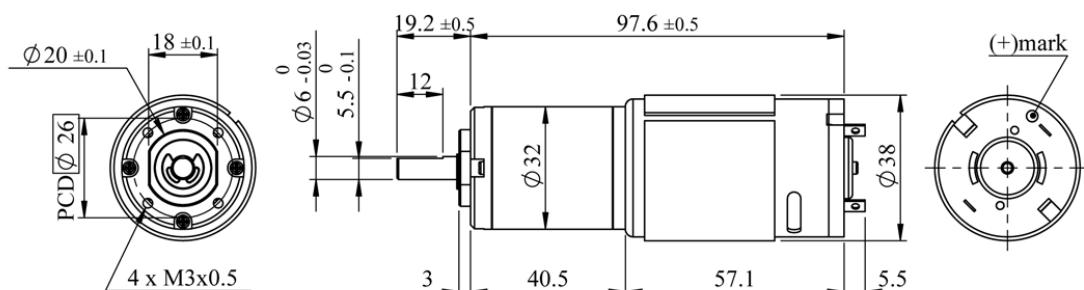
**MODEL NUMBER**  
**#638266**

DIRECTION OF ROTATION



## SPECIFICATIONS

### DC Planetary Gear Brush Motor



(unit:mm)

#### A. Operating Conditions:

1	Operating Voltage Range	6~12	VDC	4	Operating Temperature	-10~+60	°C
2	Rated Voltage	12	VDC	5	Storage Temperature	-30~+85	°C
3	Rated Load	21	kgf-cm	6	Test Position	Horizontal	~

#### B. Electrical Characteristics:

1	Max. No-load Current	0.54	A	6	Max. Stall Current	20	A
2	No-load Speed	23±3	rpm	7	Insulation Resist.(500V)	20	MΩ
3	Rated-load Current	1.2	A	8	Dielectric Strength	250	VAC
4	Rated-load Speed	22±2	rpm	9	Motor Brush Type	Graphite	~
5	Min. Stall Torque	300	kgf-cm	10	Output Power at Max.Eff.	9	W

#### C. Mechanical Characteristics:

1	Gear Type	Planetary	~	7	Max. Shaft Radial Load	3.5	kgf
2	Gear Ratio	1/369	~	8	Max. Shaft Runout	0.05	mm
3	Gear Material	Metal	~	9	Max. Shaft End Play	0.30	mm
4	Rated Tolerance Torque	22	kgf-cm	10	Bearing Type	Dual Ball	~
5	Moment. Tolerance Torque	44	kgf-cm	11	Net Weight	380±20	grams
6	Max. Shaft Axial Load	2.5	kgf				

## NE12 Magnetic Encoder Use Parameter

	1	BLACK	Motor -
	2	RED	Motor +
	3	green	Ground
	4	brown	Channel B
	5	yellow	Channel A
	6	orange	Sensor Voltage+

Note:

1. Leadwire: UL1007#24 6P long  $195 \pm 10$ mm
2. Terminal: JST SPH-002T-P0.5L Equivalent
3. Housing: JST PHR-6 Equivalent

(unit:mm)

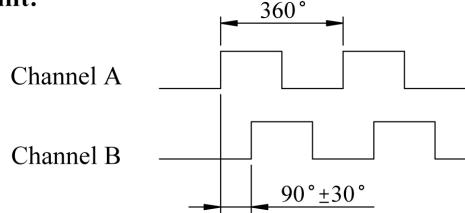
### A. Operating Range:

	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Operating Temperature Range	T <sub>a</sub>	-40	~	125	°C
Storage Temperature Range	T <sub>s</sub>	-65	~	150	°C
Operating Voltage Range	V <sub>cc</sub>	2.4	~	26	V

### B. Electrical Characteristics: (at 12V, at +25°C)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Typ	Max	Units
Output Saturation Voltage	V <sub>out</sub>	I <sub>c</sub> =10mA B>B <sub>op</sub>	0.2	0.6	V
Output Leakage Current	I <sub>leakage</sub>	B<B <sub>rp</sub>	<0.1	10	uA
Supply Current	I <sub>supply</sub>	Output Open	2.0	5	mA
Output Rise Time	T <sub>r</sub>	R <sub>L</sub> =2K Ohm C <sub>L</sub> =20Pf	1.0	10	us
Output Falling Time	T <sub>f</sub>	R <sub>L</sub> =2K Ohm C <sub>L</sub> =20 Pf	0.3	1.5	us

### C. Phase Shift:



### D. Note:

1. The output signal is open collector structure.
2. The NE12 Encoder is build in 24 poles magnet.

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

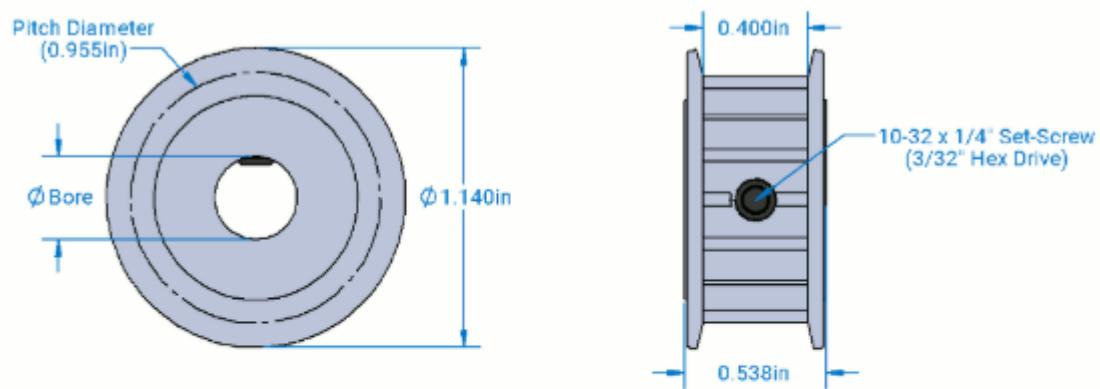
**Height** 10.0 cm

**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

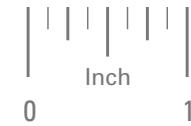
3-15DF03716

# 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

5

6

7

8

9

10

11

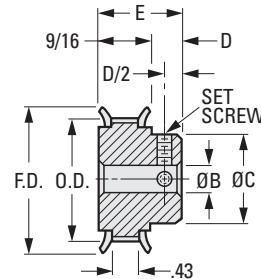
12

13

14

15

16

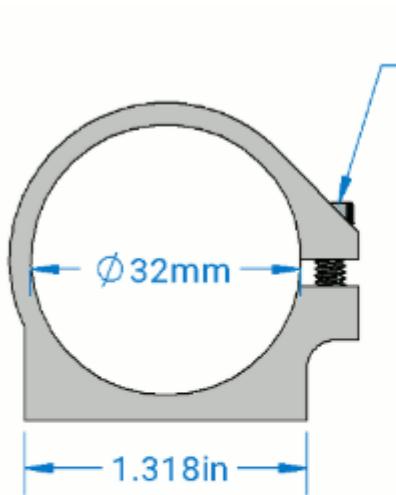


## INCH COMPONENT

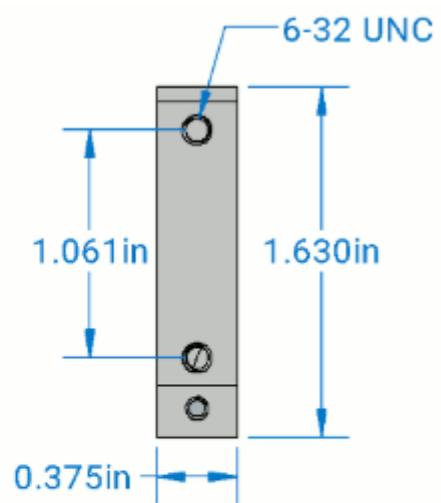
Catalog Number	No. of Grooves	P.D.	O.D.	F.D. ± 1/64	B Bore +.001 -.000	E Length ± 1/64	C Hub Dia. ± 1/64	D Hub Proj.	Set Screw
A 6A 3-10DF03706	10	.637	.617	7/8	.1875	13/16	7/16	1/4	#6-40
A 6A 3-10DF03708	10	.637	.617	7/8	.250	13/16	7/16	1/4	#8-32
A 6A 3-11DF03706	11	.700	.680	15/16	.1875	13/16	1/2	1/4	#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

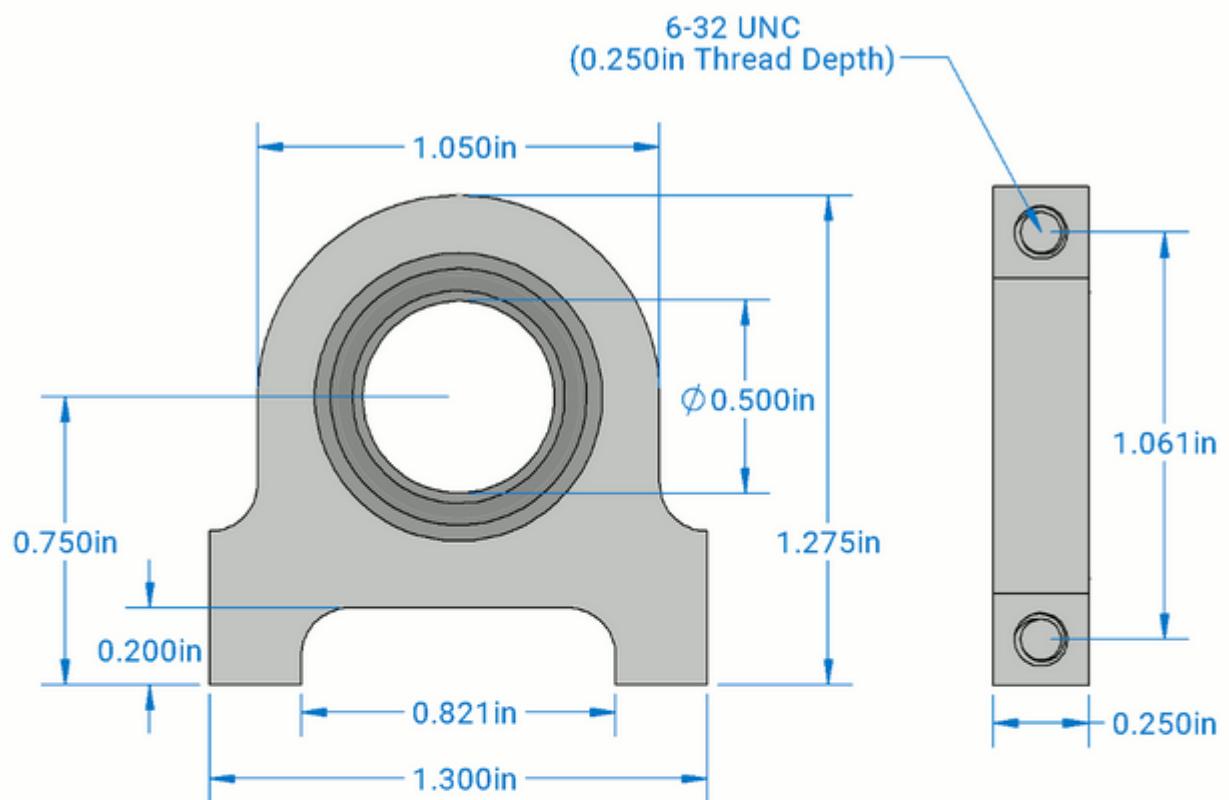
A. 5. Piezas adquiridas para ensamblar el manipulador



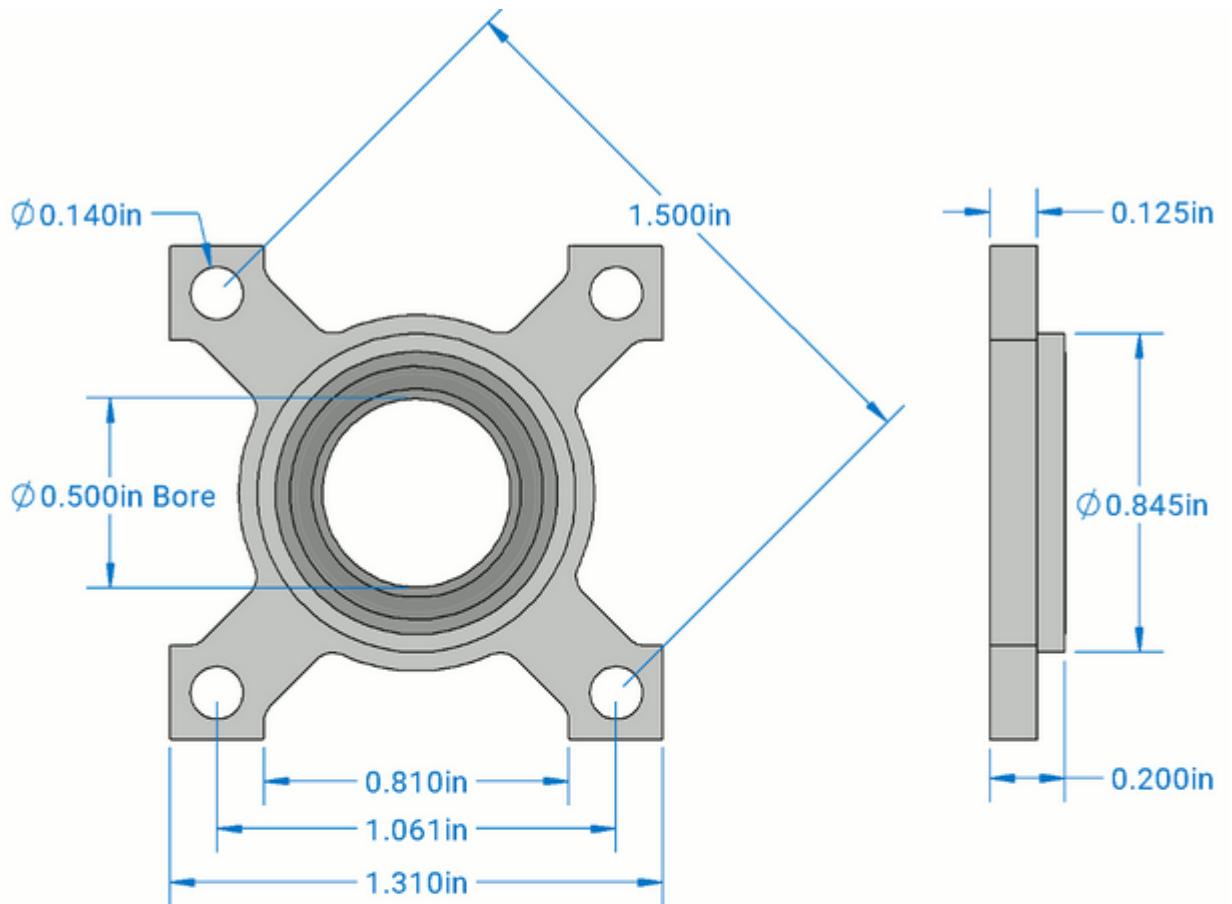
6-32 x 1/2" Socket  
Head Screw  
(7/64" Hex Drive)



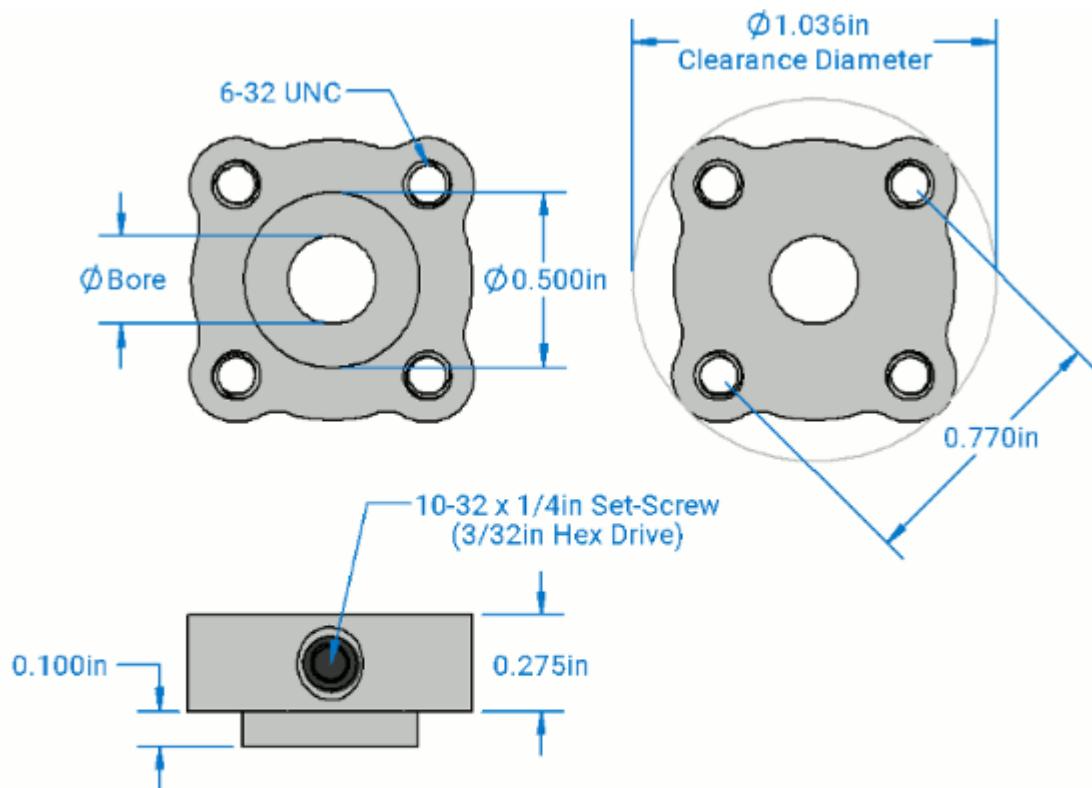
Material	Aluminum
Bore	32mm
Hole Pattern Compatibility	<u>1.50"</u>



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

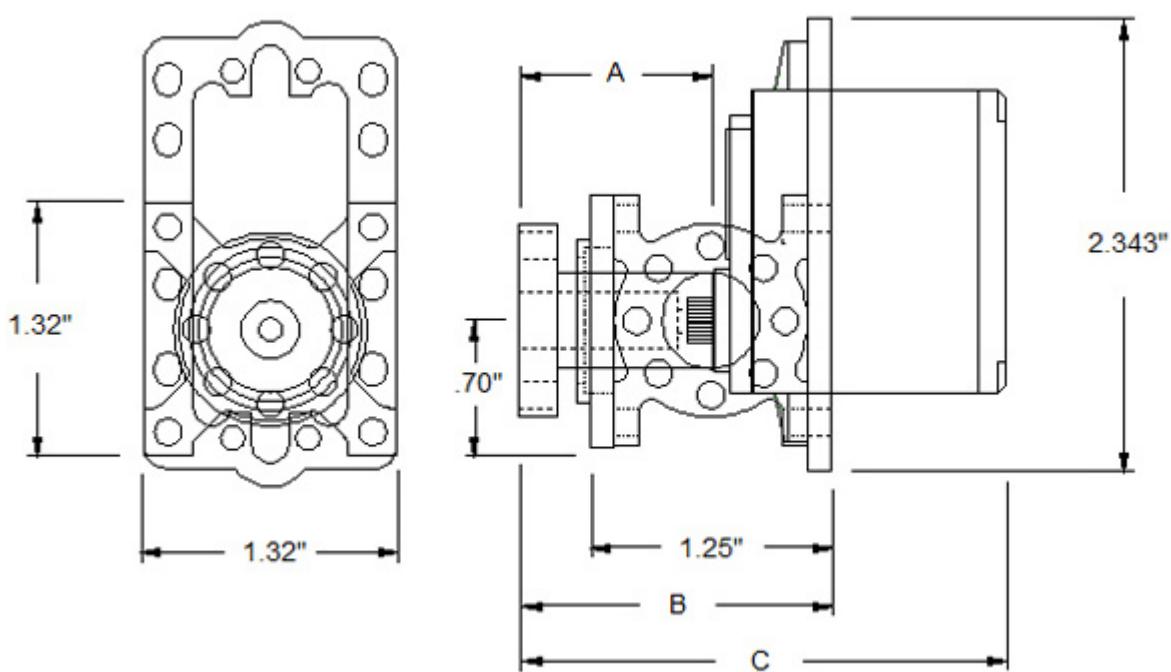


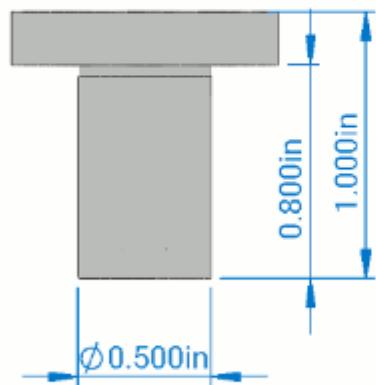
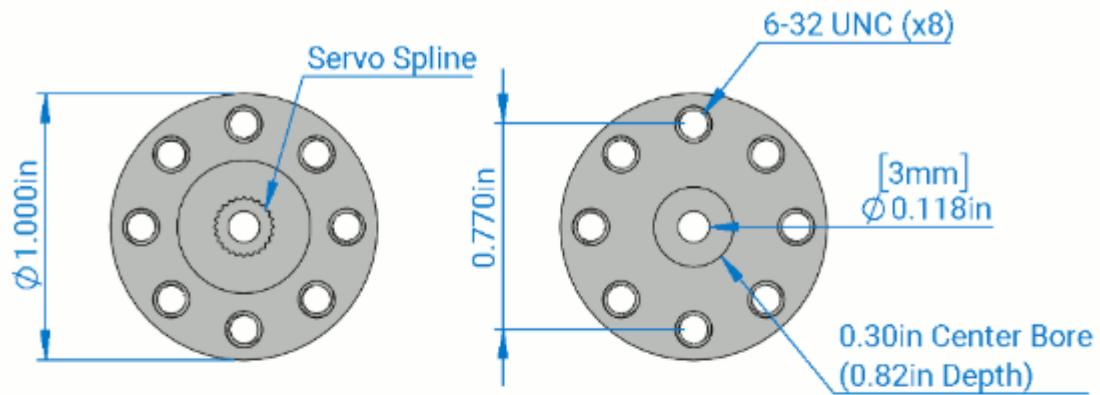
<b>Product Weight</b>	0.20 oz
<b>Material</b>	Aluminum
<b>Bearing ID</b>	0.500"
<b>Bearing Material</b>	52100 Chrome Steel
<b>Static Load</b>	114 lbs
<b>Dynamic Load</b>	200 lbs
<b>Max RPM</b>	24,000



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





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



#### Ball Bearing with Flange - 3mm ID (pair)

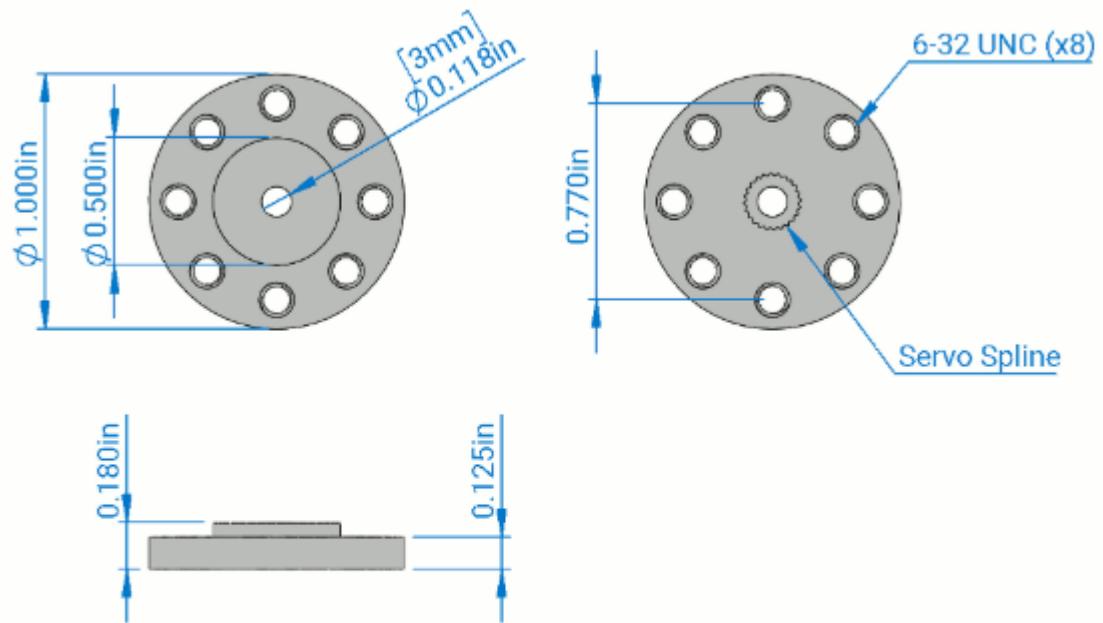
Inside Diameter = 3mm  
Outside Diameter = 8mm  
Thickness = 4mm

Shop on [Robotshop](#)

#### Information

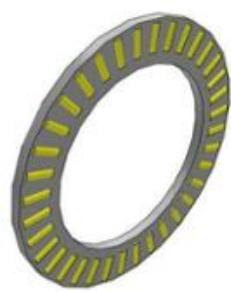
These bearings are perfect for adding to our older servo hinges, or your cool design. By [enlarging](#) the small hole on the older "C" brackets, the ball bearing assembly can be added with ease. Adding this ball bearing assembly improves the performance of the older servo brackets, making them virtually 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 ( <a href="#">C1</a> ) Spline or 25 Tooth ( <a href="#">3F/H25T</a> ) Spline

A. 8. Rodamiento axial de agujas AXK 4565



## AXK 4565

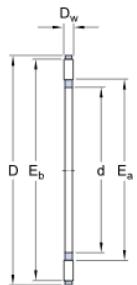
Popular item

### 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 <sub>w</sub>	3 mm
E <sub>a</sub>	min. 50 mm
E <sub>b</sub>	max. 63 mm

### CALCULATION DATA

Basic dynamic load rating	C	27 kN
Basic static load rating	C <sub>0</sub>	127 kN
Fatigue load limit	P <sub>u</sub>	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

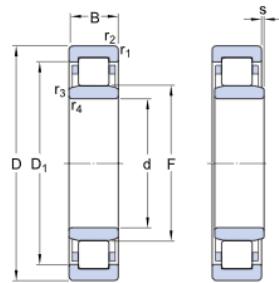
[Tolerances](#),  
Normal (metric), P6, Normal (inch),  
[Radial internal clearance](#),  
cylindrical bore, tapered bore,  
[Axial internal clearance](#),  
NUP, NJ + HJ

#### Bearing interfaces

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

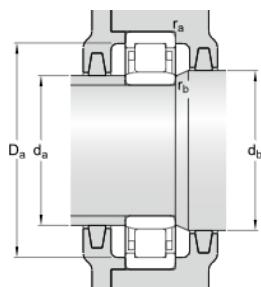
### Technical specification

#### DIMENSIONS



d	17 mm
D	47 mm
B	14 mm
D <sub>1</sub>	≈ 36.75 mm
F	24.2 mm
r <sub>1,2</sub>	min. 1 mm
r <sub>3,4</sub>	min. 0.6 mm
s	max. 1 mm

#### ABUTMENT DIMENSIONS



d <sub>a</sub>	min. 21.1 mm
d <sub>a</sub>	max. 23.1 mm
d <sub>b</sub>	min. 26 mm
D <sub>a</sub>	max. 41.7 mm
r <sub>a</sub>	max. 1 mm
r <sub>b</sub>	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	$\gamma$	0.6

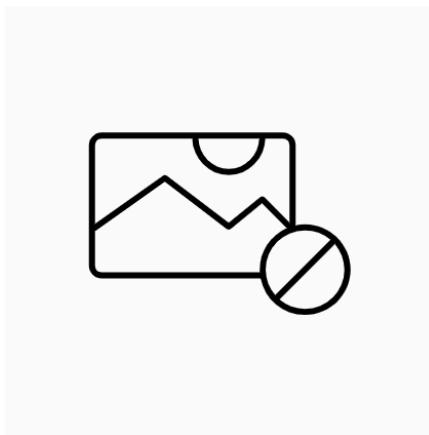
## MASS

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

## More information

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

**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

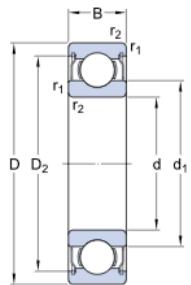
#### Bearing interfaces

Seat tolerances for standard conditions,

#### Tolerances and resultant fits

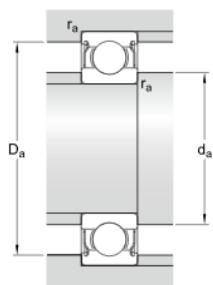
### Technical specification

#### DIMENSIONS



d	12.7 mm
D	19.05 mm
B	3.967 mm
$d_1$	$\approx 14.5$ mm
$D_2$	$\approx 17.3$ 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 fuerza FSR 402

### Features and Benefits

- Actuation Force as low as 0.1N and sensitivity range to 10N.
- Easily customizable to a wide range of sizes
- Highly Repeatable Force Reading; As low as 2% of initial reading with repeatable actuation system
- Cost effective
- Ultra thin; 0.45mm
- Robust; up to 10M actuations
- Simple and easy to integrate

### Description

Interlink Electronics FSR™ 400 series is part of the single zone Force Sensing Resistor™ family. Force Sensing Resistors, or FSRs, are robust polymer thick film (PTF) devices that exhibit a decrease in resistance with increase in force applied to the surface of the sensor. This force sensitivity is optimized for use in human touch control of electronic devices such as automotive electronics, medical systems, and in industrial and robotics applications.

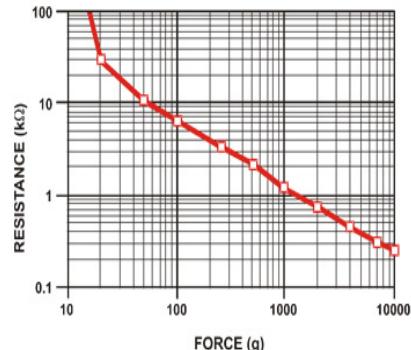


The standard 402 sensor is a round sensor 18.28 mm in diameter. Custom sensors can be manufactured in sizes ranging from 5mm to over 600mm. Female connector and short tail versions can also be ordered.

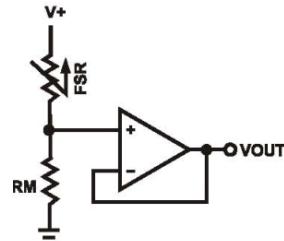
### Industry Segments

- Game controllers
- Musical instruments
- Medical device controls
- Remote controls
- Navigation Electronics
- Industrial HMI
- Automotive Panels
- Consumer Electronics

**Figure 1 - Force Curve**



**Figure 2 - Schematic**



**Interlink Electronics - Sensor Technologies**

## Applications

### Detect & qualify press

Sense whether a touch is accidental or intended by reading force

### Use force for UI feedback

Detect more or less user force to make a more intuitive interface

### Enhance tool safety

Differentiate a grip from a touch as a safety lock

### Find centroid of force

Use multiple sensors to determine centroid of force

### Detect presence, position, or motion

Of a person or patient in a bed, chair, or medical device

### Detect liquid blockage

Detect tube or pump occlusion or blockage by measuring back pressure

### Detect proper tube positioning

### Many other force measurement applications

## Device Characteristics

Feature	Condition	Value*	Notes
<b>Actuation Force</b>		0.1 Newtons	
<b>Force Sensitivity Range</b>		0.1 - 10.0 <sup>2</sup> Newtons	
<b>Force Repeatability<sup>3</sup></b>	(Single part)	± 2%	
<b>Force Resolution<sup>3</sup></b>		continuous	
<b>Force Repeatability<sup>3</sup></b>	(Part to Part)	±6%	
<b>Non-Actuated Resistance</b>		10M W	
<b>Size</b>		18.28mm diameter	
<b>Thickness Range</b>		0.2 - 1.25 mm	
<b>Stand-Off Resistance</b>		>10M ohms	Unloaded, unbent
<b>Switch Travel</b>	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
<b>Hysteresis<sup>3</sup></b>		+10%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
<b>Device Rise Time</b>		<3 microseconds	measured w/steel ball
<b>Long Term Drift</b>		<5% per log <sub>10</sub> (time)	35 days test, 1kg load
<b>Temp Operating Range</b>	(Recommended)	-30 - +70 °C	
<b>Number of Actuations</b>	(Life time)	10 Million tested	Without failure

\* Specifications are derived from measurements taken at 1000 grams, and are given as one standard deviation / mean, unless otherwise noted.

1. Max Actuation force can be modified in custom sensors.
2. Force Range can be increased in custom sensors. Interlink Electronics have designed and manufactured sensors with operating force larger than 50Kg.
3. Force sensitivity dependent on mechanics, and resolution depends on measurement electronics.

## A. 12. Sensor de temperatura y humedad DHT11

### Detailed Specifications:

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



### 3 Features

- 2MP image sensor OV2640
- M12 mount or CS mount lens holder with changeable lens options
- IR sensitive with proper lens combination
- I2C interface for the sensor configuration
- SPI interface for camera commands and data stream
- All IO ports are 5V/3.3V tolerant
- Support JPEG compression mode, single and multiple shoot mode, one time capture multiple read operation, burst read operation, low power mode and etc.
- Well mated with standard Arduino boards
- Provide open source code library for Arduino, STM32, Chipkit, Raspberry Pi, BeagleBone Black
- Small form of factor

### 4 Key Specifications

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| ■ Power supply<br>Normal :5V/70mA | ■ Active array size: 1600x1200                            |
| Low power mode: 5V/20mA           | ■ Shutter: rolling shutter                                |
| ■ SPI speed: 8MHz                 | ■ Lens: 1/4 inch  |
| ■ Frame buffer: 384KB             | ■ Resolution support:<br>UXGA, SVGA, VGA, QVGA, CIF, QCIF |
| ■ Size: 34 x 24 mm                | ■ Format support: RAW, YUV, RGB, JPEG                     |
| ■ Weight: 20g                     | ■ Pixel Size: 2.2μm x 2.2μm                               |
| ■ Temperature: -10°C ~ +55°C      |   |

### 5 Pin Definition

Table 1 ArduCAM-M-2MP Pin Definition

Pin No.	PIN NAME	TYPE	DESCRIPTION
1	CS	Input	SPI slave chip select input
2	MOSI	Input	SPI master output slave input
3	MISO	Output	SPI master input slave output
4	SCLK	Input	SPI serial clock
5	GND	Ground	Power ground
6	+5V	POWER	3.3V ~ 5V Power supply
7	SDA	Bi-directional	Two-Wire Serial Interface Data I/O
8	SCL	Input	Two-Wire Serial Interface Clock

## 6 Block Diagram

Figure 2 shows the block diagram of ArduCAM mini shield which is composed by lens, image sensor and an ArduChip. The lens is changeable and can be mounted by S-mount (M12x0.5) or CS-mount lens holder. The image sensor is 2MP CMOS OV2640 from Omnivision. The ArduChip uses ArduCAM proprietary third generation camera controller technology which handles the complex camera, memory and user interface hardware timing and provides a user friendly SPI interface.

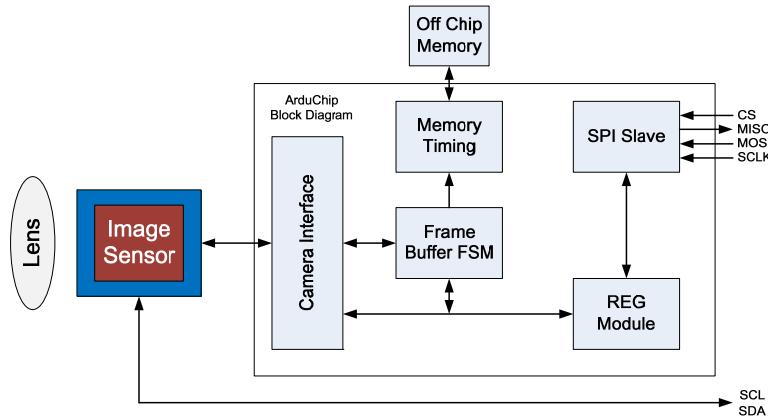


Figure 2 ArduCAM Mini Shield Block Diagram

## 7 Functions

### 7.1 Single Capture Mode

Single capture mode is the default capture mode of the camera. After issuing a capture command via SPI port, the ArduCAM will wait for a new frame and buffer the one entire image data to the frame buffer, and then assert the completion flag bit in the register. User only needs to poll the flag bit from the register to check out if the capture is done.

### 7.2 Multiple Capture Mode

Multiple capture mode is advanced capture mode. By setting the number of frames in the capture register, the ArduCAM will capture consequent frames after issuing capture command. Note that number of frames should be set properly and make sure do not exceed the maximum memory space.

### 7.3 JPEG Compression

The JPEG compression function is implemented in the image sensor. With proper register settings to the sensor, user can get different resolution with JPEG image stream output. It is recommended to use JPEG output to get higher resolution than RGB mode, due to the limitation of frame buffer.

### 7.4 Normal Read and Burst Read Operation

Normal read operation reads each image data by sending a read command in one SPI read operation cycle. While burst read operation only need to send a read command then read multiple image data in one SPI read operation cycle. It is recommended to use burst read operation to get better throughput performance.

### 7.5 Rewind Read Operation

Sometimes user wants to read the same frame of image data multiple times for processing, the rewind read operation is designed for this purpose. By resetting the read pointer to the beginning of the image data, user can read the same image data from the start point again.

### 7.6 Low Power Mode

Some battery power device need save power when in the idle status, the ArduCAM offers the low power mode to reduce power consumption, by shutdown the sensor and memory circuits.

### 7.7 Image Sensor Control

Image sensor control function is implemented in the image sensor. By setting proper set of register settings, user can control the exposure, white balance, brightness, contrast, color saturation and etc.

More technical information about ArduCAM mini shield, please read ArduCAM-M-2MP Hardware Application Note.pdf and ArduCAM-M-2MP Software Application Note.pdf for detail.

## 8 Lens Options

The ArduCAM-M-2MP camera shield is shipped with default LS-4011 (S mount) or LS-6018 (CS mount), lenses specification list as follows. S mount lenses normally have build IR cut filter, while the CS mount lenses doesn't have build in IR cut filter.

Please contact us [admin@arducam.com](mailto:admin@arducam.com) for more lens options.

### LS-4011 Lens Specification

#### SPECIFICATION:

1.Sensor Format:	1/3" x 0.5.3mm
2.EFL:	3.96 mm
3.F-number:	2.6
4.Construction:	4P+1IR
5.TV Distortion:	<1.2%
6.FOV:	56.8°
7.FBL:	1.29mm
8.IR:	645nm

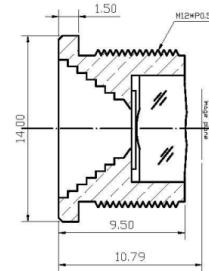
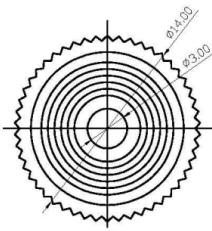


Figure 3 S Mount Lens Specification

### LS-6018 Lens Specification

#### 技术参数

Technical parameters

型号 Model No.	LS-6018CS	视场角 Field of View	68 °
焦距 Focal Length	6.0MM	外型尺寸 Dimensions	Φ28*24.2mm
通光口径 Aperture(F)	1.4	近摄距离 M.O.D(m)	0.1
接口 Mount	CS	净重 Weight(g)	29.0
靶面尺寸 Format	1/2.7"	备注 Remarks	Metal

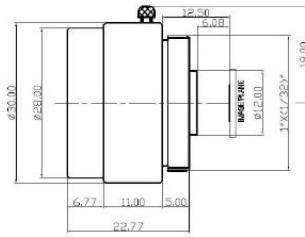
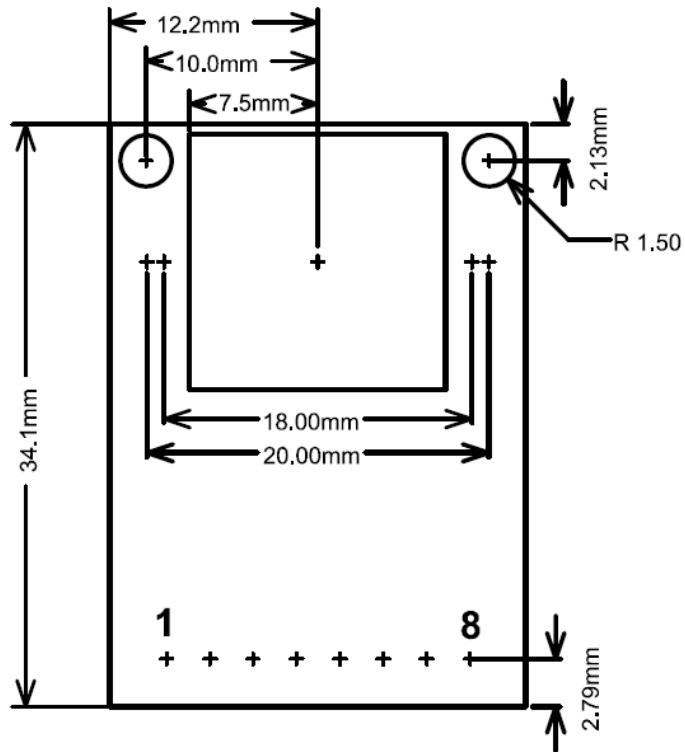


Figure 4 CS Mount Lens Specification

## 9 Mechanical Dimension



## 10 Order Information

Part Number	Description
ArduCAM-M-2MP-SM01	S Mount Preinstalled Pin Header
ArduCAM-M-2MP-SM02	S Mount Without Preinstalled Pin Header
ArduCAM-M-2MP-CSM01	CS Mount Preinstalled Pin Header
ArduCAM-M-2MP-CSM02	CS Mount Without Preinstalled Pin Header

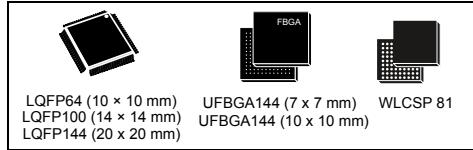


Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 225 DMIPS, up to 512 KB Flash/128+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, seventeen TIMs, three ADCs and twenty communication interfaces

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 × I<sup>2</sup>C 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 I<sup>2</sup>S 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

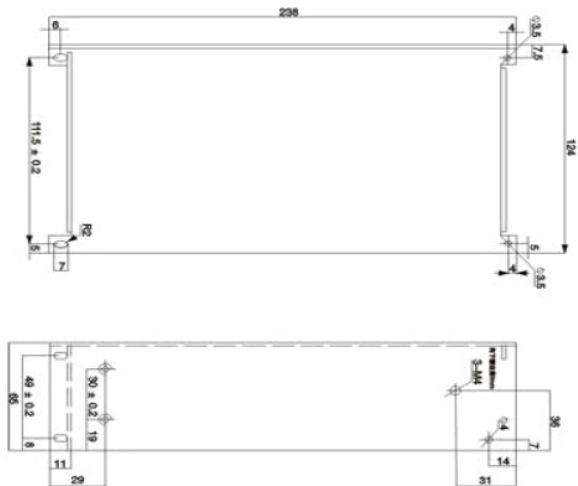
Reference	Part numbers
STM32F446xC/E	STM32F446MC, STM32F446ME, STM32F446RC, STM32F446RE, STM32F446VC, STM32F446VE, STM32F446ZC, STM32F446ZE.

A. 15. Fuente de alimentación S-500-12

Product Overview		Send Inquiry					
<b>1.Features</b>							
<ul style="list-style-type: none"> <li>·Protections: short circuit/over load/over voltage /over temp</li> <li>·AC input voltage range selected by switch</li> <li>·Small volume, low weight, high efficiency</li> <li>·100% full load burn-in test</li> <li>·2 Year warranty</li> <li>·Built-in cooling DC fan</li> <li>·Cooling fan ON-OFF auto control</li> <li>·LED indicator for power on</li> </ul>							
<b>2. Specification</b>							
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

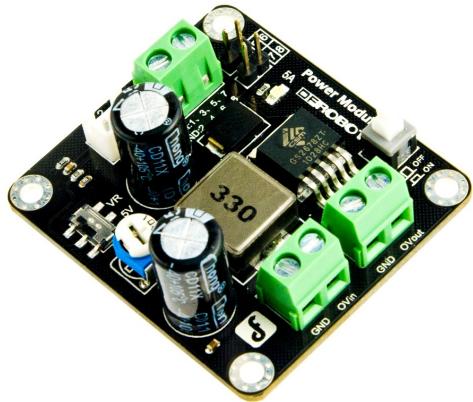
### 3. Mechanical Dimension



### 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

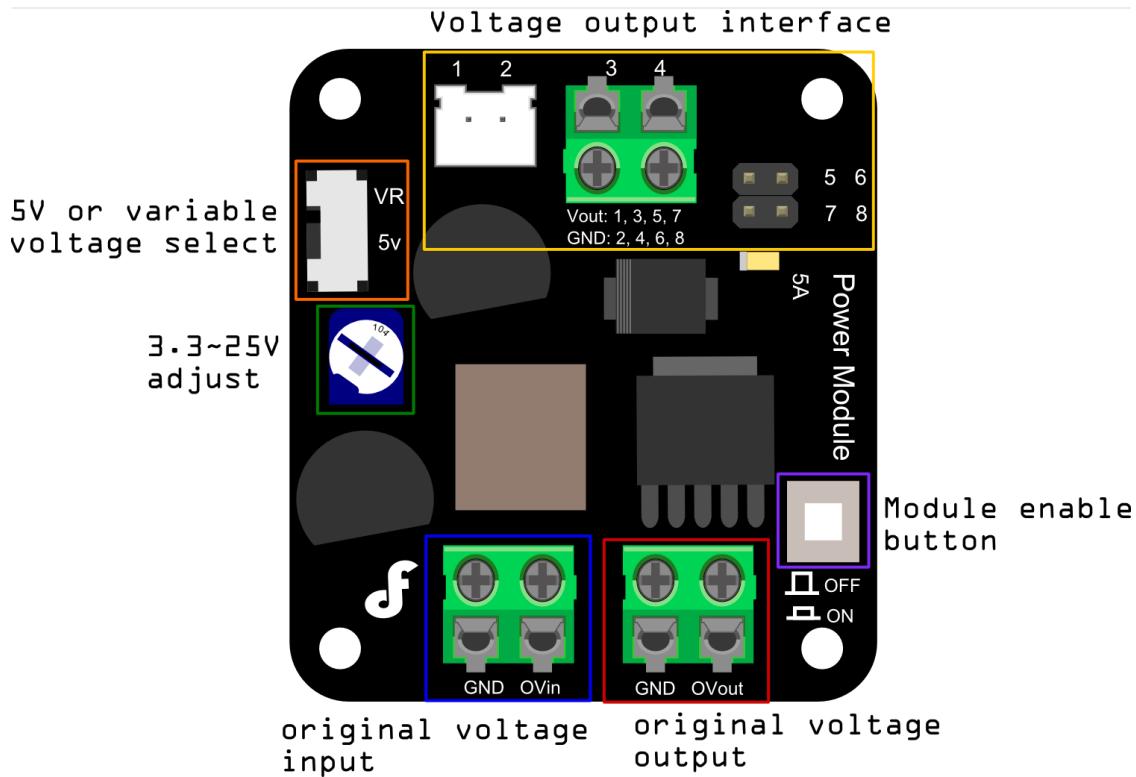
[https://wiki.dfrobot.com/Power\\_Module\\_SKU\\_DFR0205\\_](https://wiki.dfrobot.com/Power_Module_SKU_DFR0205_)

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. 17. S9V11F3S5**

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

## Dimensions

**Size:** 0.5" × 0.6" × 0.17"<sup>1</sup>

**Weight:** 0.7 g<sup>1</sup>

## General specifications

**Minimum operating voltage:** 2 V<sup>2</sup>

**Maximum operating voltage:** 16 V

**Maximum output current:** 1.5 A<sup>3</sup>

**Output voltage:** 3.3 V<sup>4</sup>

**Reverse voltage protection?:** N

**Maximum quiescent current:** 1 mA<sup>5</sup>

## 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  $\mu$ A when the input voltage is close to the output voltage.



### 3. PRODUCT SPECIFICATION AND LIMITATIONS

Absolute Maximum Rating

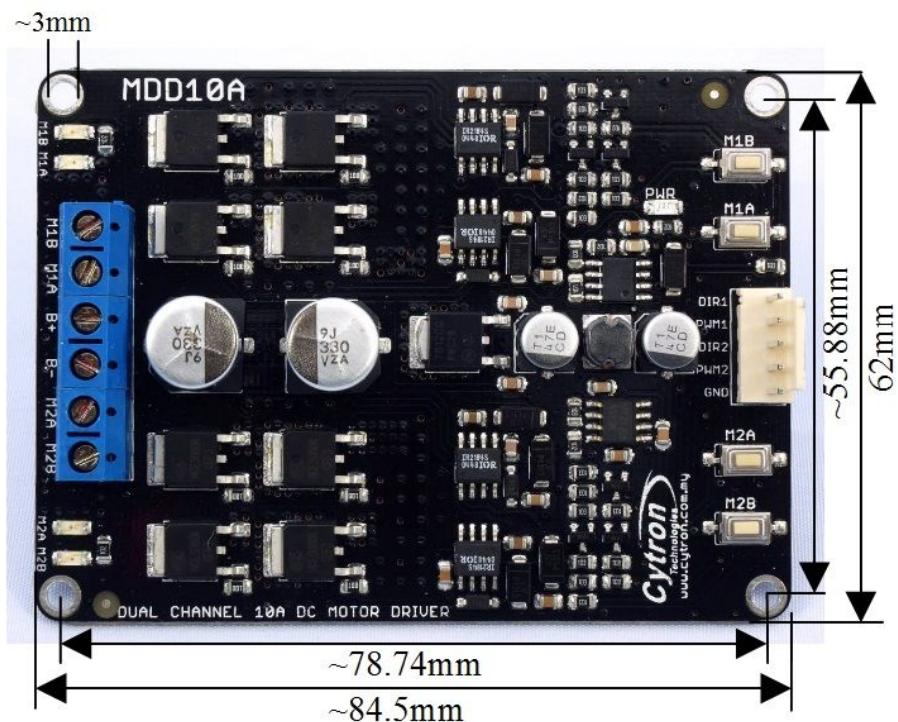
No.	Parameters	Min	Typical	Max	Unit
1	Power Input Voltage***	5	-	30	V
2	$I_{MAX}$ (Maximum Continuous Motor Current)*	-	-	10	A
3	$I_{PEAK}$ – (Peak Motor Current) **	-	-	30	A
4	$V_{IOH}$ (Logic Input – High Level)	3	-	5.5	V
5	$V_{IOL}$ (Logic Input – Low Level)	0	0	0.5	V
6	Maximum PWM Frequency	-	-	20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

\* Tested in room temperature at 25°C

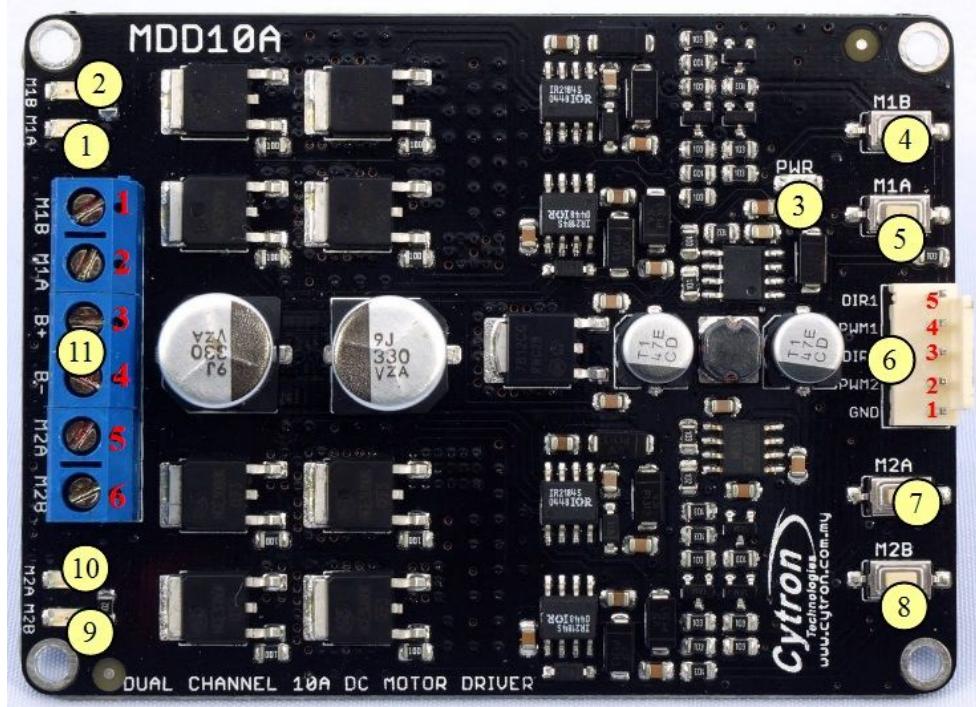
\*\* Must not exceed 10 seconds.

\*\*\* 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

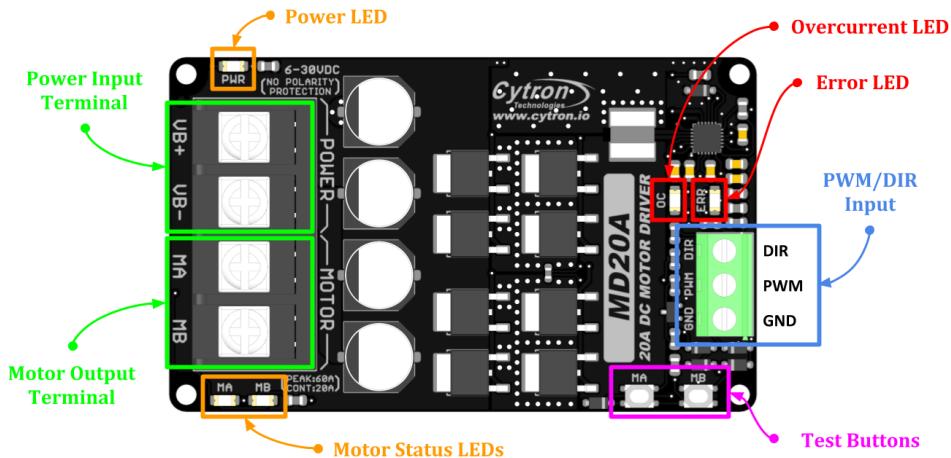


Figure 1: MD20A Board Functions

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

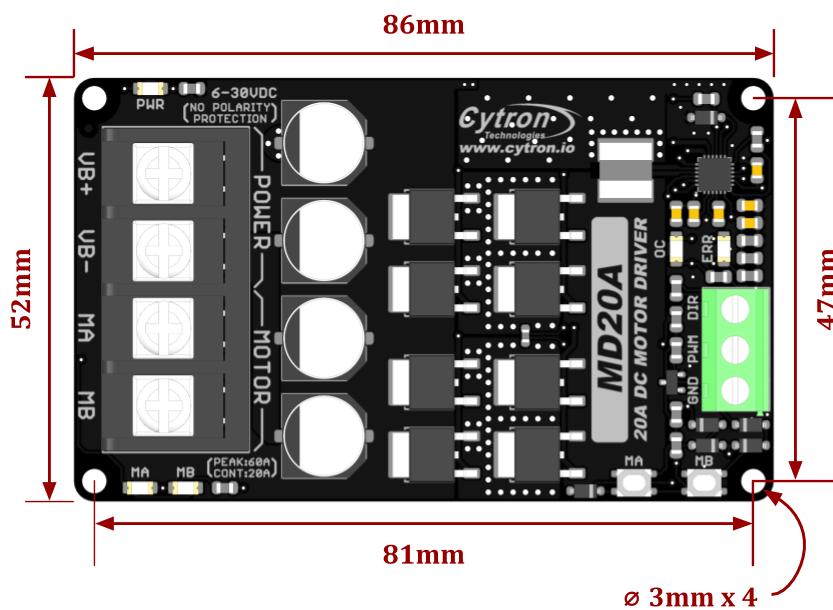


Figure 2: MD20A Dimension

## 4. INTERFACE

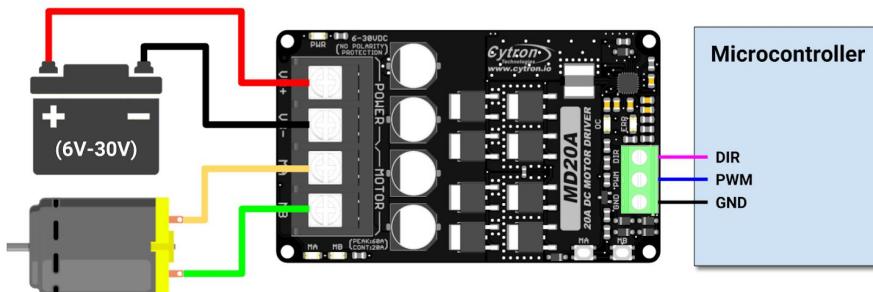


Figure 3: PWM & DIR Input Connection Diagram

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.