

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN ROBOT PLANO PARA DIAGNÓSTICO DE
MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS MEDIANTE INSPECCIÓN
VISUAL Y PRUEBA DE IMPACTO EN LAS CUÑAS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Gonzalo Javier Peralta Vizquerra

ASESOR:

Francisco Fabian Cuellar Cordova


Lima, abril, 2025

Informe de Similitud

Yo, **FRANCISCO CUELLAR CORDOVA**, docente de la Facultad de **CIENCIAS E INGENIERIA** de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado **DISEÑO DE UN ROBOT PLANO PARA DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS MEDIANTE INSPECCIÓN VISUAL Y PRUEBA DE IMPACTO EN LAS CUÑAS**, del autor **GONZALO JAVIER PERALTA VIZQUERRA**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **7 %**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **05/05/2025**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: **Lima, 06 de mayo del 2025**

Apellidos y nombres del asesor: Cuéllar Córdova, Francisco	
DNI: 10809099	Firma 
ORCID: 0000-0002-6661-5118	

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se desarrolla un robot plano para el diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias, tanto generadores como motores, mediante inspección visual y la prueba de impacto en las cuñas del estator. Se emplea la metodología VDI 2206 y 2221 para todo el proceso de diseño. Los objetivos entonces serán diseñar dicho robot con sus respectivos subsistemas trabajando bajo las normas de seguridad en el trabajo con motores y generadores en el Perú, realizar una investigación de tecnologías actuales, definir los requerimientos del sistema y realizar un proyecto final a partir de las diferentes evaluaciones provistas por la metodología. Este sistema es de tipo *crawler*, cuenta con un diseño modular, dos cámaras con alto rango de visión y dispone de un sensor de sonido para realizar la prueba de cuñas. Se controla desde una computadora personal mediante un programa que muestra la vista de las cámaras y almacena los resultados de la prueba de cuñas de acuerdo con la información posicional del robot. En conclusión, existe una oportunidad en el Perú para desarrollar un sistema como el propuesto pues actualmente las inspecciones son manuales y empíricas y el sistema presentado podría dar un diagnóstico cuantitativo y estandarizado del estado de las máquinas eléctricas a un precio competitivo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ÍNDICE DE CONTENIDO	ii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE ACRÓNIMOS	x
ANTECEDENTES AL DISEÑO	1
1.1. Marco contextual	1
1.2. Problemática	4
1.3. Propuesta de solución	5
1.4. Metodología.....	5
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo General.....	7
1.5.2. Objetivos Específicos	8
1.6. Alcance	8
ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Sistemas Integrados	10
2.1.1. Advanced Robotic Generator Inspection System (ARGIS)	10
2.1.2. Reconfigurable inspection robot for industrial applications (RIRIA).....	11
2.1.3. Modular Air-gap Crawler for Motor and Generator In-situ Inspection (ABB Crawler) 12	
2.1.4. Mitsubishi Electric GenSPIDER	14
2.1.5. Iris Power RIV 800	15
2.2. Subsistema de Desplazamiento.....	16
2.2.1. MD&A's Air Gap-Bot	16
2.2.2. Robotic Generator Inspection System (RoGIS)	17
2.2.3. Comparación de subsistemas de desplazamiento	18
2.3. Subsistema de inspección visual.....	18
2.3.1. Iris Power Riv Camera System.....	19
2.3.2. Comparación de subsistemas de inspección visual	20
2.4. Subsistema de prueba de cuñas.....	20
2.4.1. Enfoque cuantitativo del golpeo de cuñas del GenSPIDER.....	21

2.4.2.	Comparación de subsistemas de prueba de cuñas	22
PROYECTO CONCEPTUAL		23
3.1.	Lista de Exigencias	23
3.1.1.	Descripción de la Lista de Exigencias	23
3.3.	Lista de funciones	27
3.3.1.	Dominio Energía.....	27
3.3.2.	Dominio Mecánico	28
3.3.3.	Dominio Sensores	29
3.3.4.	Dominio Actuadores	30
3.3.5.	Dominio Control.....	30
3.3.6.	Dominio Comunicación.....	31
3.3.7.	Dominio Interfaz.....	32
3.4.	Matriz Morfológica.....	33
3.4.1.	Subsistema de energía.....	33
3.4.2.	Subsistema de desplazamiento	34
3.4.3.	Subsistema de inspección visual.....	34
3.4.4.	Subsistema de prueba de cuñas.....	35
3.4.5.	Subsistema de comunicación e interfaz.....	35
3.5.	Conceptos de solución	36
3.5.1.	Primer Concepto de Solución	36
3.5.2.	Segundo Concepto de Solución	38
3.5.3.	Tercer Concepto de Solución.....	41
3.6.	Evaluación Técnica Económica.....	43
3.6.1.	Criterios Técnicos	44
3.6.2.	Criterios Económicos.....	47
3.6.3.	Resultados de la evaluación.....	49
3.7.	Solución óptima	51
3.7.1.	Diagrama de operaciones.....	53
3.7.2.	Diagrama de bloques	55
PROYECTO FINAL.....		56
4.1.	Diseño Integrado.....	56
4.1.1.	Modelo 3D	56
4.1.2.	Diagrama de Flujo General.....	59
4.1.3.	Selección de materiales.....	61

4.2.	Subsistema de Control	63
4.2.1.	Dimensionamiento	63
4.2.2.	Selección de componentes	64
4.2.3.	Diagrama de conexiones	66
4.2.4.	Diseño de placa electrónica	67
4.2.5.	Algoritmo de Control.....	68
4.3.	Subsistema de Desplazamiento.....	69
4.3.1.	Dimensionamiento	69
4.3.2.	Cálculos de potencia	70
4.3.3.	Selección de componentes	71
4.3.4.	Algoritmo PID para el desplazamiento.....	74
4.3.5.	Simulación mecánica	77
4.4.	Subsistema de Inspección Visual.....	79
4.4.1.	Selección de cámara	79
4.4.2.	Selección de actuadores	80
4.5.	Subsistema de Prueba de cuñas	82
4.5.1.	Diseño del sistema	83
4.6.	Subsistema de Energía	88
4.6.1.	Cálculos de potencia	88
4.9.	Análisis de Costos.....	93
4.9.1.	Costos de componentes.....	93
4.9.2.	Costos de fabricación.....	94
4.9.3.	Costos de diseño	95
CONCLUSIONES		96
RECOMENDACIONES.....		98
BIBLIOGRAFÍA		100
Anexos		105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del RIRIA	11
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del ABB Crawler.....	13
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del GenSPIDER	14
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del RIV 800	15
Tabla 2.5. Comparación de subsistemas de desplazamiento	18
Tabla 2.6. Comparación de subsistemas de inspección visual.....	20
Tabla 2.7. Comparación de subsistemas de prueba de cuña	22
Tabla 3.1. Funciones del subsistema de energía	33
Tabla 3.2. Funciones del subsistema de desplazamiento	34
Tabla 3.3. Funciones del subsistema de inspección visual	34
Tabla 3.4. Funciones del subsistema de prueba de cuñas	35
Tabla 3.5. Funciones del subsistema de comunicación e interfaz	35
Tabla 3.6. Justificación de valores g y p	44
Tabla 3.7. Comparación del criterio de medición de cuñas	44
Tabla 3.8. Comparación del criterio de calidad de imagen.....	45
Tabla 3.9. Comparación del criterio de movilidad	45
Tabla 3.10. Comparación del criterio de diseño	46
Tabla 3.11. Comparación del criterio de comunicación	46
Tabla 3.12. Comparación del criterio de seguridad	47
Tabla 3.13. Justificación de pesos ponderados de criterios técnicos	47
Tabla 3.14. Comparación del costo de componentes.....	48
Tabla 3.15. Comparación del costo de fabricación.....	48
Tabla 3.16. Comparación de costos de mantenimiento	48
Tabla 3.17. Comparación de costos de operación.....	49
Tabla 3.18. Justificación de pesos ponderados de criterios económicos	49

Tabla 3.19. Resultados de la evaluación técnica.....	50
Tabla 3.20. Resultados de la evaluación económica.....	50
Tabla 4.1. Comparación de materiales.....	62
Tabla 4.2. Tabla de fuerzas de la banda magnética	62
Tabla 4.3. Comparación de microprocesadores	65
Tabla 4.4. Resultados de los cálculos de potencia	70
Tabla 4.5. Comparación de motores DC.....	71
Tabla 4.6. Especificaciones del driver	73
Tabla 4.7. Especificaciones del encoder	74
Tabla 4.8. Especificaciones de la cámara	80
Tabla 4.9. Comparación de servomotores de posicionamiento	81
Tabla 4.10. Especificaciones del LED SMD	82
Tabla 4.11. Especificaciones del actuador lineal	87
Tabla 4.12. Comparación de sensores de sonido	88
Tabla 4.13. Cálculos de potencia	89
Tabla 4.14. Comparación de protocolos seriales	91
Tabla 4.15. Costos de componentes electrónicos	94
Tabla 4.16. Costos de componentes mecánicos.....	94
Tabla 4.17. Costos de fabricación.....	95
Tabla 4.18. Costos totales del sistema	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo de energía en el Perú	2
Figura 1.2. Componentes de un generador eléctrico rotativo	3
Figura 1.3. Robot de inspección para máquinas eléctricas	5
Figura 1.4. Modelo V de la norma VDI 2206	6
Figura 1.5. Etapas de la metodología VDI 2221	7
Figura 2.1. a) Riel del sistema acoplado al rotor b) Vehículo de inspección del generador....	10
Figura 2.2. Fotografía del robot crawler	12
Figura 3.3. a) Fotografía del robot crawler b) Algunos accesorios	13
Figura 2.4. Exterior del GenSPIDER con dimensiones	14
Figura 2.5. RIV - Cámara instalada para inspección lateral	15
Figura 2.6. MD&A's Air Gap-Bot	17
Figura 2.7. Estación de acoplamiento o <i>Docking Station</i>	17
Figura 2.8. Sistema Iris Power Riv	19
Figura 2.9. Mecanismo de golpeteo de las cuñas.....	21
Figura 2.10. Clasificación del grado de apriete	22
Figura 3.1. Diagrama de Caja Negra	27
Figura 3.2. Estructura del Dominio de Energía	28
Figura 3.3. Estructura del Dominio Mecánico	29
Figura 3.4. Estructura del Dominio de Sensores.....	29
Figura 3.5. Estructura del Dominio de Actuadores.....	30
Figura 3.6. Estructura del Dominio de Control.....	31
Figura 3.7. Estructura del Dominio de Comunicación	32
Figura 3.8. Estructura del Dominio de Interfaz	33
Figura 3.9. Vista del Concepto 1 y sus componentes	37
Figura 3.10. Interfaz y dispositivos de entrada/salida.....	38

Figura 3.11. Vista externa del Concepto 2.....	39
Figura 3.12. Vista inferior del Concepto 2	40
Figura 3.13. Interfaz y dispositivos de entrada/salida.....	41
Figura 3.14. Vista frontal del Concepto 3.....	42
Figura 3.15. Laptop mostrando la interfaz del Concepto 3.....	43
Figura 3.16. Gráfico de evaluación técnica-económica.....	51
Figura 3.17. Vista externa de la solución óptima.....	52
Figura 3.18. Interfaz de la solución óptima	53
Figura 3.19. Diagrama de operaciones general del sistema propuesto	54
Figura 3.20. Diagrama de bloques del sistema propuesto	55
Figura 4.1. Modelo 3D general del robot.....	57
Figura 4.2. Módulo de control del subsistema.....	57
Figura 4.3. Detalle de la parte delantera del robot.....	58
Figura 4.4. Módulo de desplazamiento.....	58
Figura 4.5. Detalle del interior del módulo de desplazamiento	59
Figura 4.6. Diagrama de flujo general del controlador.....	60
Figura 4.7. Leyenda de fuerzas de la banda magnética	63
Figura 4.8. Dimensiones máximas del módulo de control.....	64
Figura 4.9. Dimensiones del Raspberry Pi Zero	66
Figura 4.10. Pinout del Raspberry Pi Zero	67
Figura 4.11. PCB del sistema.....	68
Figura 4.12. Dimensiones máximas del módulo de desplazamiento	70
Figura 4.13. Motor Pololu 75:1 de alta potencia	72
Figura 4.14. Driver DRV8833	73
Figura 4.15. a) Encoder 12CPR con sus conexiones b) Encoder montado al motor Pololu....	74
Figura 4.16. Diagrama de bloques PID.....	75
Figura 4.17. Respuesta de paso unitario con PID	76

Figura 4.18. Diagrama de Bode del sistema con PID	76
Figura 4.19. Diagrama de cuerpo libre de la rueda y eje	77
Figura 4.20. a) Esfuerzos en el elemento superior b) Deformaciones en el elemento superior	78
Figura 4.21. a) Esfuerzos en el elemento superior b) Deformaciones en el elemento superior	79
Figura 4.22. Cámara ArduCAM Sensor Spy con cable flexible.....	80
Figura 4.23. Servo Pololu 1040	81
Figura 4.24. LED PJ2N-FFVE	82
Figura 4.25. Sistema amplificador de brazo de palanca	83
Figura 4.26. Diagrama de cuerpo libre del elemento de golpe	84
Figura 4.27. Esfuerzos en el elemento de golpe	86
Figura 4.28. Deformaciones en el elemento de golpe.....	86
Figura 4.29. Actuador lineal de cuerpo cilíndrico	87
Figura 4.30. Simulación del step down de 12 V a 6 V	90
Figura 4.31. Simulación del step down de 12 V a 5.1 V	90
Figura 4.32. Ventana principal de la interfaz.....	92
Figura 4.33. Ventana de evaluación de cuñas.....	93

LISTA DE ACRÓNIMOS

AC: Alternating Current

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

ARGIS: Advanced Robotic Generator Inspection System

CAD: Computer Assisted Design

CAE: Computer-aided engineering

COB: Chip On Board

CPR: Counts Per Revolution

CPU: Central Processing Unit

CSI: Camera Serial Interface

DC: Direct Current

DCL: Diagrama de cuerpo libre

DIN: Deutsches Institut für Normung

DS: Docking Station

DSI: Display Serial Interface

EIA: Electronic Industries Alliance

ELCID: Electromagnetic Core Imperfection Detection

EN: European Norm

FEC: Forward error correction

FPS: Frames per Second

GIV: Generator Inspection Vehicle

GPIO: General Purpose Input Output

GPU: graphics processing unit

HD: High Definition

HDMI: High-Definition Multimedia Interface

IEA: International Energy Agency

IEC: International Electrotechnical Commission

IIT: Istituto Italiano di Tecnologia

IMU: Inertial Measurement Unit

INS: Inertial Navigation System

ISO: International Organization for Standardization

JPR: Japan Solderless Terminal

LED: Light Emitting Diode

MD&A: Mechanical Dynamics & Analysis

MDM: Metodología de Diseño Mecatrónico

NTP: Norma Técnica Peruana

PCB: Printed circuit board

PICO: Problem, Intervention, Comparison and Outcome

PID: Proporcional Integral Derivativo

PTZ: pan, tilt, zoom

PWM: Pulse width modulation

RAM: Random Access Memory

RIRIA: Reconfigurable inspection robot for industrial applications

RIV: Robotic Inspection Vehicle

SLS: Sinterizado selectivo por láser

SMD: Surface-Mount-Device

TME: Transfer Multisort Elektronik

USB: Universal Serial Bus

USD: United States Dollar

VDI: Verein Deutscher Ingenieure

VIG: Vehículo de Inspección del Generador

WTT: wedge tightness testing

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES AL DISEÑO

Este capítulo presenta la problemática que aborda la presente tesis. Además, detalla el marco contextual necesario para explicar cómo se pretende solucionar dicha problemática. Finalmente, se presenta la metodología que se ha implementado, el objetivo general, los objetivos específicos y finalmente, el alcance de la tesis.

1.1. Marco contextual

En la actualidad, el consumo eléctrico es cada vez mayor en todo el mundo. Según el análisis de data de la *International Energy Agency* (IEA) al 2018 se consumían casi 2700 teravatios por hora (TWh) más que en el 2014 y la tendencia indica que para el 2022 se consuma más de 27 500 TWh. El Perú no es la excepción, tal y como se muestra en la Figura 1.1, la tendencia es ascendente y al 2018 se consumía 49 TWh.

La energía eléctrica juega un papel crucial tanto para el público en general como para el sector industrial (Pistone, 2019, p. 598). Además, al desplazar a los combustibles fósiles en sectores como por ejemplo el de transporte, contribuye a utilizar cada vez más energías renovables como la hidroeléctrica o la eólica. Ambas tecnologías tienen como elemento clave al generador eléctrico el cual es activado cuando la fuerza del agua impulsa las turbinas en una planta hidroeléctrica o cuando las corrientes de aire mueven las aspas de una torre eólica.

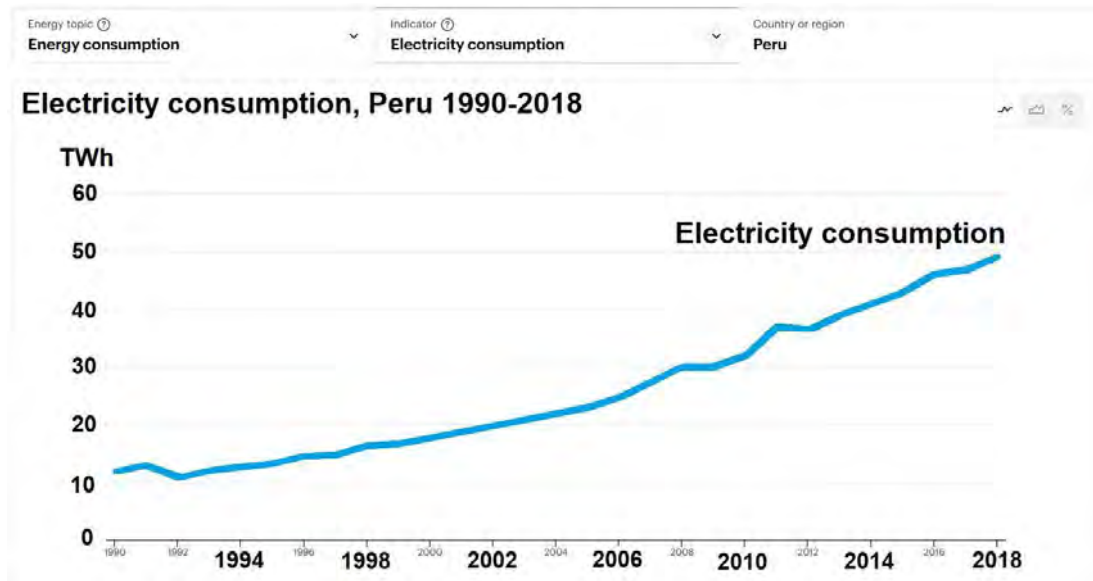


Figura 1.1. Consumo de energía en el Perú

Fuente: Adaptado de IEA (2019)

Los generadores eléctricos funcionan empleando la Ley de Faraday para convertir energía mecánica en energía eléctrica. La Fundación Endesa (2024) afirma que esta ley establece que el voltaje inducido en un circuito es directamente proporcional al cambio del flujo magnético en un conductor o espira; esto significa que, si tenemos un campo magnético generando un flujo magnético, necesitamos una espira por donde circule una corriente para conseguir que se genere la fuerza electromotriz (f.e.m.).

Cuando una espira con corriente eléctrica se encuentra en un campo magnético, se generan fuerzas que provocan que la espira gire sobre su eje. De manera similar, si se coloca una espira en un campo magnético y esta empieza a girar, se inducirá una corriente. Esta corriente inducida es la que genera la fuerza electromotriz, la cual varía según la posición de la espira y el campo magnético. Es así como los generadores necesitan 2 componentes que funcionen como la espira y el inductor de campo magnético. Estos son el rotor (parte giratoria) y el estator (parte estática) como se puede apreciar en la Figura 1.2.



Figura 1.2. Componentes de un generador eléctrico rotativo

Fuente: Adaptado de Fundación Endesa (2024)

El rotor se monta en un eje que descansa en dos rodamientos o cojinetes. El espacio que separa el rotor del estator se llama entrehierro (*air gap* en inglés) y es necesario para que la máquina pueda girar. Normalmente, tanto en el estator como en el rotor existen devanados hechos con conductores de cobre por los que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico (Fundación Endesa, 2024). Uno de los devanados crea un flujo en el entrehierro y se denomina inductor. El otro devanado recibe el flujo del primero y se denomina inducido.

Estos componentes se desgastan como cualquier otro, particularmente el aislamiento del devanado, desviaciones axiales del rotor o calidad del acoplamiento presentan amenazas a la integridad del generador. Es por ello por lo que se tienen que realizar inspecciones regularmente que puedan detectar estas fallas, en caso ocurrieran, lo más pronto posible. De lo contrario la eficiencia de la máquina reduciría considerablemente ya sea por rozamiento innecesario en las piezas móviles o pérdidas magnéticas producto de un devanado deficiente.

Campuzano-Martínez (2016) afirma que la tendencia mundial hacia el mantenimiento predictivo ha incrementado la posibilidad de obtener mejores diagnósticos del estado de los equipos, aplicando diversas técnicas de monitoreo en línea, principalmente de descargas

parciales como lo reporta Carvajal en su método no normalizado y no invasivo para el diagnóstico de motores de gran capacidad (p. 12).

Por lo general, las inspecciones se llevan a cabo removiendo el rotor del generador permitiendo que los operarios puedan realizar ensayos no destructivos de manera manual. Las pruebas más comunes son mediante ultrasonido, para detectar posibles fallas mecánicas; la prueba ELCID o *Electromagnetic Core Imperfection Detection* y la inspección simple visual. En el Perú, estas pruebas están reguladas por la norma NTP IEC 60034-2:2001 (Máquinas Eléctricas Rotativas. Métodos de Ensayo) según el Ministerio de Energía y Minas.

1.2. Problemática

El problema principal que se pretende solucionar con la presente tesis es el prolongado tiempo de parada que deben sufrir los grandes motores y generadores eléctricos para poder hacerles un diagnóstico adecuado. Esto presenta consecuencias perjudiciales no solo para la empresa sino también para los operarios. En primer lugar, el montaje y desmontaje requieren de maquinaria pesada y usualmente se llevan a cabo en un taller de mantenimiento. Esto eleva sustancialmente el costo de inspección de un motor o generador. Debido al gran tamaño y complejidad de estas máquinas eléctricas, dichas operaciones, no solo demoran varias semanas, sino que son a veces la causa de daños mecánicos y eléctricos (Pistone, 2019, p. 597). Además, los trabajadores podrían sufrir accidentes y perjuicios al realizar un trabajo continuo tanto dentro como alrededor de la máquina desmontada. Finalmente, pruebas como el ELCID representan una inversión significativa, ya que requieren personal calificado para asegurar su confiabilidad, no son fáciles de replicar y carecen de sistemas de información integrados. Todas estas posibles consecuencias se podrían evitar empleando un robot que inspeccione dichas máquinas eléctricas.

1.3. Propuesta de solución

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se propone desarrollar un sistema capaz de introducirse en el entrehierro de las máquinas eléctricas rotatorias y desplazarse por toda el área entre el rotor y el estator realizando una inspección visual y de impacto a las cuñas de las ranuras del bobinado utilizando microcámaras y un sistema actuador de impacto respectivamente. En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de este tipo de robots. Dichos robots solucionan la necesidad de maquinaria pesada para desmontar y volver a montar las piezas, reduciendo no solo costos sino también tiempo de mantenimiento y el riesgo de accidentes. El sistema contará con todos los sensores necesarios para realizar las mediciones por sí solo, siendo estos las cámaras y un sensor de sonido, y transmitirá datos en tiempo real a un operario capacitado el cual validará el estado del generador.



Figura 1.3. Robot de inspección para máquinas eléctricas

Fuente: Procedia Manufacturing (2019)

1.4. Metodología

En esta investigación se utilizará la metodología empleada en el curso de Metodología de Diseño Mecatrónico (MDM), la cual comprende a las normas alemanas VDI 2206 y VDI 2221. La primera propone un procedimiento genérico para el diseño de sistemas mecatrónicos que deben ser especificados de acuerdo con la tarea de diseño específica (Gausemeler,

Moehringer, 2002, p. 788). Dicho procedimiento se basa en el modelo V ilustrado en la Figura 1.4, popular en los años 70 para desarrollar software. Para soluciones mecatrónicas más complejas es posible que sea necesario implementar este método de manera iterativa hasta llegar a un producto final.

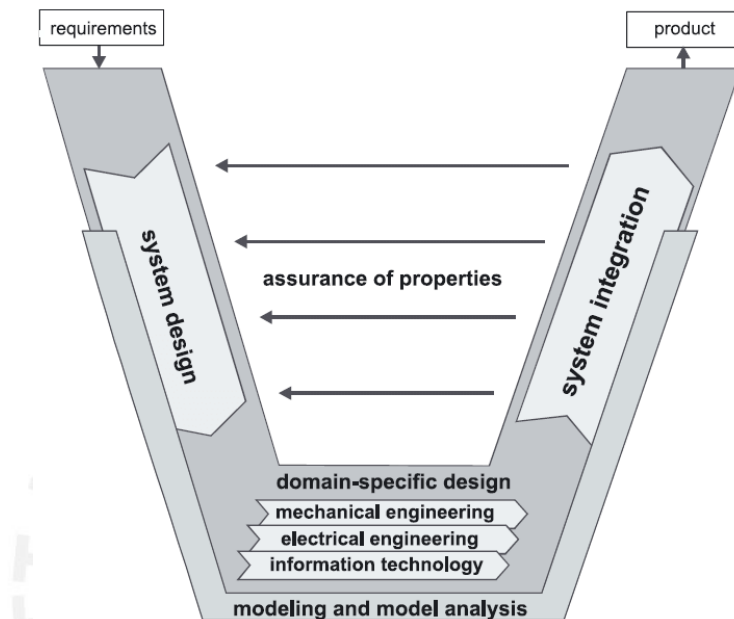


Figura 1.4. Modelo V de la norma VDI 2206

Fuente: Gausemeier, J., & Moehringer, S. (2002)

La segunda norma fue concebida como una guía (Figura 1.5) para desarrollar productos técnicos, así como contribuir a proyectos formativos como es el caso del presente documento. El objetivo de esta guía es proporcionar un procedimiento para diseño que sea válido tanto para la mecánica de precisión como para la ingeniería eléctrica (*The Design Society*, 2006, p. 47). Además, uno de los objetivos principales de la norma era asignar métodos de diseño a las diferentes fases del desarrollo. Con este fin es que abarca cuatro fases de diseño principales:

- Comprensión de la tarea
- Concepción de la solución
- Realización del diseño
- Elaboración de detalles

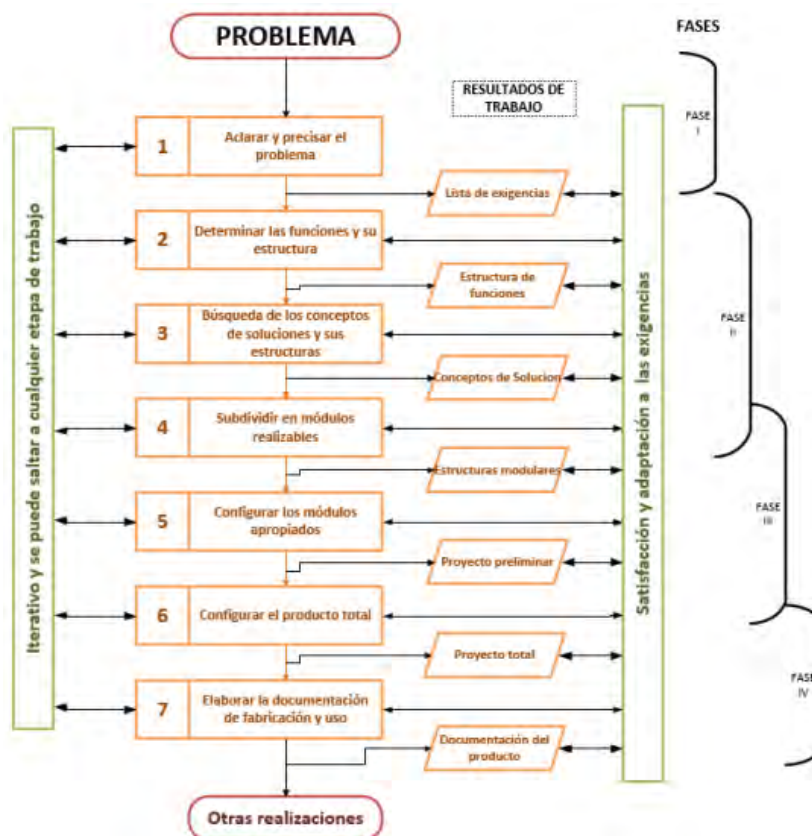


Figura 1.5. Etapas de la metodología VDI 2221

Fuente: Rudas, C. (2015)

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Empleando la pregunta de investigación PICO se puede delimitar el objetivo principal de la presente tesis. Esta pregunta tiene 4 partes; el problema o área de interés (P), la intervención (I), la comparación entre distintos escenarios (C) y por último el resultado o *outcome* (O). Para el presente proyecto se tiene:

P: los motores y generadores eléctricos necesitan de mantenimiento

I: diseñar un robot de inspección

C: inspección manual o teleoperada

O: inspección rápida y segura

Por lo que la pregunta completa sería, ¿Se puede alcanzar una inspección de mantenimiento a máquinas eléctricas más rápida y segura diseñando un robot teleoperado que una inspección manual?

Por lo que el objetivo general será:

Diseñar un robot plano teleoperado para la inspección rápida y segura de máquinas eléctricas rotatorias.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Investigar sobre robots de inspección de máquinas eléctricas rotatorias
- Investigar sobre las pruebas de inspección de motores y generadores eléctricos
- Realizar una comparación técnica-económica de diferentes propuestas de diseño
- Realizar la lista de requerimientos del sistema
- Dimensionar y modelar la estructura del robot plano
- Diseñar una placa electrónica para el robot
- Diseñar el sistema de inspección visual
- Diseñar el método de prueba de cuñas
- Diseñar algoritmos de control y teleoperación
- Crear la interfaz de usuario
- Realizar cálculos de potencia y resistencia para validar el diseño

1.6. Alcance

La presente tesis tiene como alcance diseñar un sistema analizando las tecnologías existentes en el área de los robots para diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias. Para esto se modelará mediante softwares CAD que permitan presentar un diseño completo del robot en base a la literatura consultada.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Los robots para diagnóstico de generadores se dividen en 3 principales categorías, dependiendo de cómo estos se movilizan a través del entrehierro: teleféricos, tractores (*crawlers* en inglés) y pluma o de riel (Pistone, 2019, p. 598). La primera categoría utiliza cables colocados y tensados en el entrehierro a cada lado del generador para movilizar a los robots. Para hacer cambios de ranura se necesita girar el anillo que sujeta los cables fuera de la máquina. La principal ventaja es la rapidez de inspección, mientras que la principal desventaja es la necesidad de abrir ambos extremos del generador. La segunda consiste en un robot equipado para moverse independientemente a través del entrehierro. La principal ventaja es la flexibilidad para conducir alrededor de obstáculos y mirar un punto de interés desde diferentes ángulos. Además, otra ventaja de esta categoría es que la operación requiere solo un acceso al generador. Por último, la tercera tiene como mecanismo de transporte una viga telescópica por la cual avanzará el robot a través del entrehierro sujetado al anillo de retención, mientras que la viga podría girar sobre este anillo para cambios de ranura. Esta categoría se usa en generadores pequeños pues su principal desventaja es el límite de peso de los robots, aunque al igual que los *crawlers*, solo necesita un acceso al generador.

2.1. Sistemas Integrados

2.1.1. Advanced Robotic Generator Inspection System (ARGIS)

Este robot comercial fue hecho por la empresa europea Dekra, es del tipo pluma o de riel y cuenta con la capacidad de realizar la prueba ELCID, la evaluación de apriete de las cuñas del estator, además de contar con 4 módulos visuales: una cámara orientada hacia adelante, otra para inspeccionar el rotor y 2 adicionales para inspeccionar las ranuras de enfriamiento del estator.



Figura 2.1. a) Riel del sistema acoplado al rotor b) Vehículo de inspección del generador

Fuente: Adaptado de Dekra (2016)

Un motor de cadena y una estación de acoplamiento (Figura 2.1. a) para el vehículo de inspección del generador (VIG) (Figura 3.1. b) están montados alrededor de uno de los anillos de retención del generador. Se coloca con precisión delante de cada ranura para que el VIG se pueda insertar en un espacio mínimo de 17 mm (Dekra, 2016).

Algunos de los beneficios del ARGIS son: se requiere menos mano de obra para preparar el generador para inspección de medio a 3 turnos en lugar de varias semanas, reducción de los costos de interrupción (hasta 300 000 euros), reducción de la productividad perdida debido al tiempo de inactividad (que puede ascender a millones de euros), menos riesgo de daño al

generador, el sistema tiene una alta reproducibilidad, todos los datos se almacenan para futuras comparaciones y tendencias de datos y por último ARGIS se puede combinar con pruebas de anillo de retención in situ (KIRR) (Dekra, 2016).

2.1.2. Reconfigurable inspection robot for industrial applications (RIRIA)

Este robot del tipo *crawler* ha sido desarrollado por el *Istituto Italiano di Tecnologia* (IIT) y cuenta con cámaras de alta definición para la inspección visual, puede hacer la evaluación de calidad de las cuñas del estator y la prueba ELCID. El vehículo que se muestra en la Figura 2.2. está compuesto por 2 submódulos, el central alberga todas las sondas y la electrónica, mientras que los módulos laterales actúan como módulos de desplazamiento (Pistone, 2019). En la Tabla 2.1 se presentan las especificaciones técnicas del crawler.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del RIRIA

Especificaciones técnicas	
Dimensiones máximas	150mm x 140mm x 25mm
Grado máximo de ajustabilidad de los módulos de desplazamiento	20°
Método de adhesión	Imanes de neodimio (15mm x 15mm x 8mm)
Velocidad máxima	10 cm/s
Carga máxima	1kg
Altura mínima del entrehierro	25mm
Precisión posicional	<5mm
Controlador	CompactRIO sbRIO-9637 by National Instruments
Software para la interfaz	LabVIEW

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.2. Fotografía del robot crawler

Fuente: Procedia Manufacturing (2019)

Este robot funciona de igual manera así el generador tenga el rotor en su lugar o haya sido removido. La reconfigurabilidad es algo que lo distingue de los demás, pues su diseño modular le permite cambiar de sensores ampliando su capacidad de inspección a otras máquinas e incluso acoplar 2 o más robots para cargar sensores adicionales. Además, si bien es teleoperado mediante una conexión analógica y digital, es posible modificarlo para que pueda tener funciones autónomas.

2.1.3. Modular Air-gap Crawler for Motor and Generator In-situ Inspection

(ABB Crawler)

Este robot fue desarrollado por ABB *Corporate Research Center* para reducir los costos del mantenimiento de generadores y motores eléctricos. Cuenta con un diseño modular (Figura 2.3. a) compuesto por un módulo principal, el cual alberga los sensores principales y dos módulos de desplazamiento. Estos últimos son extensibles y articulados por lo que el robot tiene la capacidad de alinearse con los dientes metálicos del estator y desplazarse con eficiencia. En la Tabla 2.2 se presentan las especificaciones técnicas de este robot.

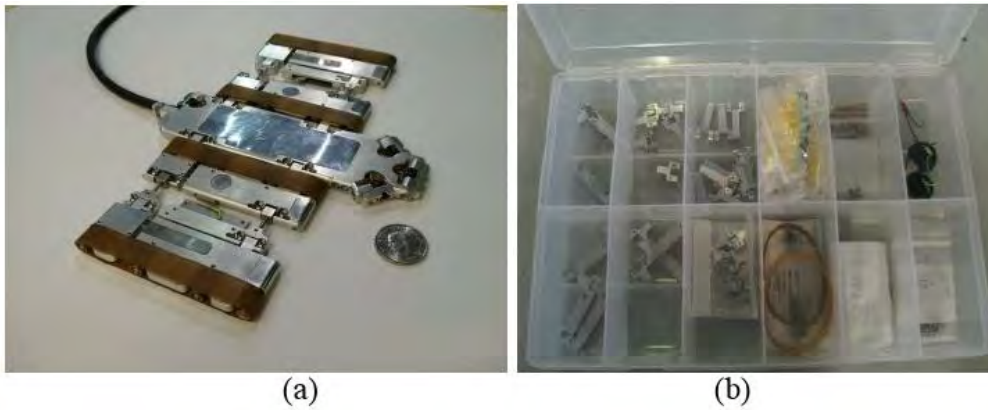


Figura 3.3. a) Fotografía del robot crawler b) Algunos accesorios

Fuente: ABB Corporate Research Center (2015)

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del ABB Crawler

Especificaciones técnicas	
Dimensiones mínimas	75mm x 90mm x 10mm
Método de adhesión	Orugas ferromagnéticas
Altura mínima del entrehierro	10mm
Ángulo de la cámara	75°
Sistema de inspección visual	ABB InSight

Fuente: Elaboración propia

El número de módulos conectados entre sí directamente o mediante las bisagras de articulación no está limitado. Estas bisagras son algunos de los accesorios (Figura 3.3. b) que fueron diseñados en conjunto. Zhang (2015) afirma que, de esta manera, con módulos de funcionalidad y conducción, el *crawler* podría llevar mayor carga para adherirse magnéticamente con suficiente fuerza para operaciones como el golpeteo de las cuñas o la reparación del estator y para realizar múltiples operaciones en un solo despliegue de robot (p. 3168).

2.1.4. Mitsubishi Electric GenSPIDER

Este modelo comercial fue desarrollado por la empresa japonesa Mitsubishi para ofrecer una alternativa a las frecuentes y costosas inspecciones a los generadores de turbinas. Con este diseño (Figura 2.4) no solo se pretende agilizar la inspección, sino que también mejorar la precisión de cada medición. Por esta razón fue optimizado para que dos operarios puedan utilizarlo sin complicaciones. El primero opera directamente al robot mientras que el segundo lo instala en el entrehierro. En la Tabla 2.3 se presentan las especificaciones técnicas del GenSPIDER.

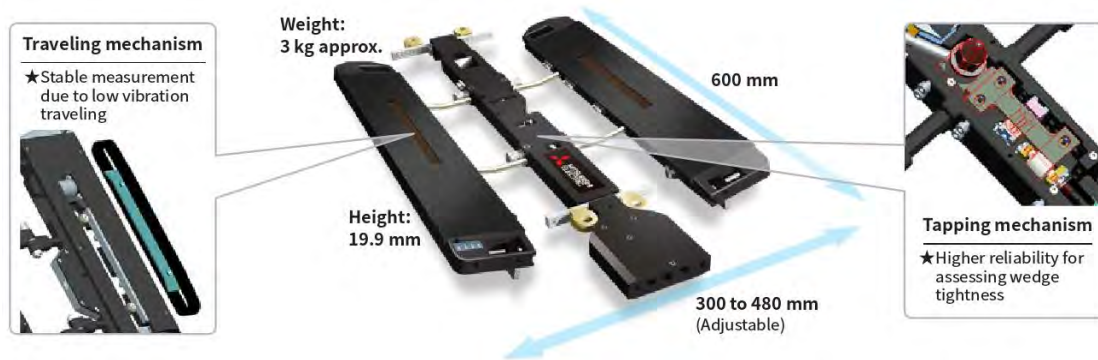


Figura 2.4. Exterior del GenSPIDER con dimensiones

Fuente: Mitsubishi Electric (2020)

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del GenSPIDER

Especificaciones técnicas	
Dimensiones	600mm x 300-480mm x 19.9mm
Peso	3kg
Temperatura de operación	Desde -10 hasta 50 °C
Fuente de alimentación	AC 100-240V (50/60 Hz)
Método de adhesión	Orugas antivibración
Software para la interfaz	GenSPIDER Monitoring Software

Fuente: Elaboración propia

Este robot posee la capacidad de realizar inspección visual, la prueba de apriete de las cuñas del estator y la prueba ELCID gracias a sus sensores y actuadores. Otra bondad que tiene

este sistema es que facilita el planeamiento de un sistema predictivo de mantenimiento. Esto debido a que acumula los resultados de sus mediciones y analiza patrones para prepararse para la siguiente inspección.

2.1.5. Iris Power RIV 800

Este producto permite la inspección visual del generador (estator y rotor) e incluso la inspección de las rejillas de ventilación en busca de residuos sin la necesidad de remover el rotor. Además, también provee de la prueba ELCID de manera automatizada y la prueba de apriete de las cuñas del estator. En la Tabla 2.4. se muestran las especificaciones técnicas del Vehículo de Inspección Robótico o RIV por sus siglas en inglés. En la Figura 2.5. se encuentra la cámara instalada de manera lateral, una de las posibles configuraciones de este equipo.



Figura 2.5. RIV - Cámara instalada para inspección lateral

Fuente: Iris Power (2021)

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del RIV 800

Especificaciones técnicas	
Dimensiones	180-300mm x 350mm x 30mm
Carga máxima	2kg
Altura mínima del entrehierro	35mm
Temperatura de operación	Desde 0 hasta 50 °C
Fuente de alimentación	80-264V (50/60 Hz)
Método de adhesión	Soporte magnético
Paso de ranura	Desde 65 hasta 210mm

Fuente: Elaboración propia

Según el mismo Iris Power (2021) algunos de los beneficios del RIV son: reducir el costo total de mantenimiento al proporcionar pruebas más rápidas con un solo operador, reducir la fatiga y el estrés humano, guía automática en el núcleo del estator pues el sistema detecta los bordes de los dientes del estator para seguir una línea recta, con el modo AUTO el RIV se detiene a una distancia preestablecida y además proporciona una velocidad variable.

2.2. Subsistema de Desplazamiento

Como se mencionó anteriormente, los robots de inspección están divididos por categorías de acuerdo con su sistema de desplazamiento. Los *crawlers* son los más utilizados ya que proporcionan ventajas clave, como la posibilidad de trabajar con un solo lado del generador abierto y minimizar el tiempo de instalación previo a la inspección en sí. Sin embargo, los subsistemas de desplazamiento abarcan mayores posibilidades las cuales se intentan comparar. Para la comparación de los subsistemas no solo se tomarán en cuenta los presentados en esta sección sino también los elementos de los sistemas integrados que corresponden.

2.2.1. MD&A's Air Gap-Bot

El sistema móvil de este robot no usa orugas magnéticas como la mayoría de aquellos para inspección del tipo *crawler*. En su lugar, utiliza un sistema neumático para generar fuerza entre el rotor y el estator (Figura 2.6). En otras palabras, reemplaza la fuerza magnética por la fuerza de fricción pues es esta la que lo mantiene correctamente sujetado en el entrehierro. Esto le da mayor libertad al momento de desplazarse, pero limita su uso exclusivamente a cuando el rotor se encuentre en su lugar.



Figura 2.6. MD&A's Air Gap-Bot

Fuente: MD&A (2019)

2.2.2. Robotic Generator Inspection System (RoGIS)

El RoGIS consta de una estación de acoplamiento o (DS en inglés) y un vehículo de inspección de generadores (GIV en inglés) operado a distancia. El DS se monta en la tapa del extremo (anillo de retención) del rotor y se puede girar a cualquier posición, de modo que el GIV se puede alinear con cada ranura del estator sin necesidad de mover el rotor (ModernPowerSystems, 2016). Tal y como se puede observar en la Figura 2.7 este subsistema corresponde a un robot tipo pluma o de riel.








Figura 2.7. Estación de acoplamiento o *Docking Station*

Fuente: Modern Power Systems (2016)

2.2.3. Comparación de subsistemas de desplazamiento

La Tabla 2.5 compara los subsistemas de desplazamiento anteriormente presentados junto con los de los sistemas integrados. Esta contiene las características principales correspondientes a dicho subsistema. Se incluyen distintos tipos de desplazamiento.

Tabla 2.5. Comparación de subsistemas de desplazamiento

	ARGIS	RIRIA	Gen SPIDER	MD&A's Air Gap-Bot	RoGIS
Características					
Tipo de robot según su desplazamiento	Riel o pluma	Crawler	Crawler	Crawler	Riel o pluma
Método de adhesión	Riel acoplado a un anillo del rotor	Imanes de neodimio	Orugas magnéticas	Presión / orugas con fricción	Riel acoplado a un anillo del rotor
Eje de giro sobre sí mismo	No	No	No	Sí	No

Fuente: Elaboración propia

2.3. Subsistema de inspección visual

La apariencia de las superficies internas del rotor y el estator puede proporcionar mucha información sobre el estado de un generador y, a menudo, es la inspección visual la que puede brindar una advertencia anticipada de problemas que podrían desarrollarse más adelante. Para esto se hace uso de cámaras de alta resolución lo suficientemente pequeñas para que se puedan introducir en entrehierros muy angostos. Los robots de inspección de generadores generalmente están equipados con más de una cámara para poder hacer la inspección visual de manera eficiente y confiable. Existen diversas soluciones para poder observar todos los puntos de interés con las cámaras, cómo colocar espejos móviles para minimizar volumen sin sacrificar visibilidad o designar una cámara por punto de interés para tener varias perspectivas en simultáneo.

La revista *Modern Power Systems* (2016) afirma que una posible configuración con 4 cámaras será: la primera está inclinada hacia adelante a lo largo del entrehierro, lo que proporciona visibilidad del cuerpo principal del rotor, incluidos los tapones de equilibrio, así como el núcleo del estator. La segunda mira hacia abajo, directamente sobre la superficie del rotor, lo que permite la inspección de las ranuras de ventilación. Por último, dos cámaras orientadas hacia el exterior proporcionan vistas directas de ambos lados de cada ranura de ventilación del estator (p. 1). A continuación, se realiza una comparación entre las cámaras presentes en robots de inspección.

2.3.1. Iris Power Riv Camera System

La cámara proporciona un sistema flexible para inspecciones de rotor en grandes generadores. Está instalado en el vehículo de inspección robótica Iris Power el cual se puede mover a lo largo de las ranuras del estator. El sistema de cámara incluye una luz integral. La cámara y la luz se dirigen a un espejo a 45°, que puede girar de forma remota 360° permitiendo la exploración del estator o rotor, así como observar hacia adelante a lo largo del espacio de aire (Iris Power, 2021). Este sistema cámara-luz-espejo se puede apreciar en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Sistema Iris Power Riv

Fuente: Iris Power (2021)

2.3.2. Comparación de subsistemas de inspección visual

La Tabla 2.6 compara el subsistema de inspección visual anteriormente presentado junto con los de los sistemas integrados. Esta contiene las características principales correspondientes a dicho subsistema. Se incluyen distintas formas de posicionar la cámara.

Tabla 2.6. Comparación de subsistemas de inspección visual

Características	RIRIA 	ABB Crawler 	GenSPIDER 	Iris Power Riv Camera System 
Número de cámaras	4	1	1	1
Diseño modular	No	No	Sí	Sí
Mecanismo de posicionamiento de cámara	Las cámaras tienen una posición fija	Directo de la cámara frontal	Giro de espejo	Giro de espejo
Ángulo de giro de imagen	0°	150°	360°	45°
Resolución		1280 x 720 píxeles	1280 x 720 píxeles	1280x1024 píxeles

Fuente: Elaboración propia

2.4. Subsistema de prueba de cuñas

La revista *Modern Power Systems* (2016) afirma que uno de los métodos más sencillos para comprobar la integridad del estator es medir la rigidez de la tapa de las ranuras del bobinado, también conocida como cuña. Una cuña suelta en el estator significa movimiento en las bobinas, lo que puede ocasionar abrasión mecánica del aislamiento, acelerando el deterioro del generador y potencialmente haciendo que este falle (p. 1).

Existen diversas formas de realizar la prueba de apriete de las cuñas del estator o *Stator wedge tightness testing* (WTT) en inglés. Tradicionalmente, el operario encargado de la inspección golpea estas cuñas con un martillo de metal y en base al sonido identifica si la pieza está correctamente ajustada o no. A continuación, se realiza una comparación entre los

sistemas integrados presentados anteriormente, los cuales siguen este mismo procedimiento, y otro que utiliza un acelerómetro para medir las vibraciones de la cuña tras realizar el golpeteo.

2.4.1. Enfoque cuantitativo del golpeteo de cuñas del GenSPIDER

El mecanismo de golpeteo consiste de 3 componentes: un martillo que hace vibrar a la cuña del estator, un motor que mueve el martillo y un acelerómetro que detecta las vibraciones (Mitsubishi Electric, 2020). Estos componentes se pueden apreciar en el esquema presentado en la Figura 2.9. La instalación del motor de accionamiento es axial con relación al cuerpo del robot lo que da como resultado un cuerpo más delgado y la garantía de una vibración suficientemente fuerte como para inspeccionar cualquier tipo de estator.

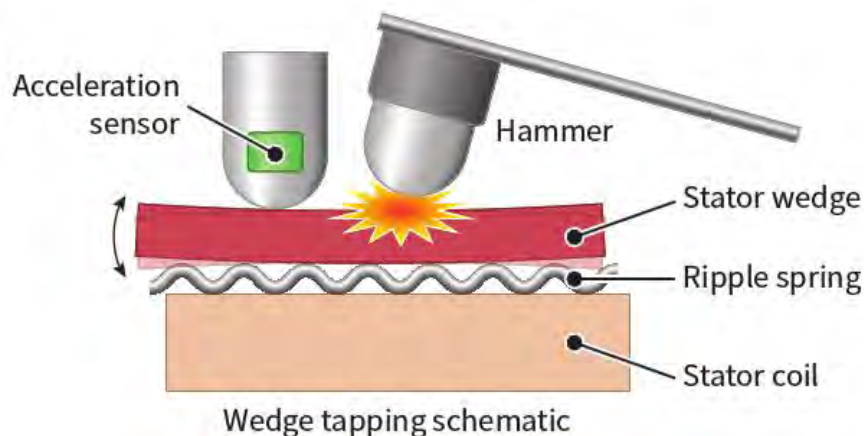


Figura 2.9. Mecanismo de golpeteo de las cuñas

Fuente: Mitsubishi Electric (2020)

Gracias a su sistema de sensado, este sistema es capaz de distinguir 5 grados de apriete como se muestra en la Figura 2.10. Esto lo diferencia de otros pues la mayoría de los robots de inspección con mecanismos similares fallan en evaluar los estados más “moderados” del estado de apriete de las cuñas. Como resultado, este sistema es altamente confiable y preciso al momento de generar un reporte de mantenimiento.

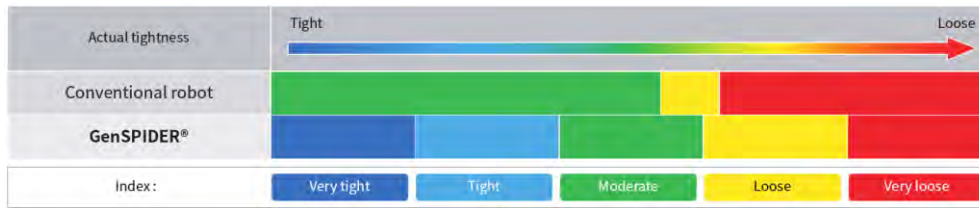





Figura 2.10. Clasificación del grado de apriete

Fuente: Mitsubishi Electric (2020)

2.4.2. Comparación de subsistemas de prueba de cuñas

La Tabla 2.7 compara el subsistema de prueba de cuñas anteriormente presentado junto con los de los sistemas integrados. Esta contiene las características principales correspondientes a dicho subsistema. Se incluye el tipo de sensor que se utiliza.

Tabla 2.7. Comparación de subsistemas de prueba de cuña

	RIRIA	ABB Crawler	GenSPIDER
Características			
Tipo de sensor	Sensor de sonido	Sensor de sonido	Acelerómetro
Diseño modular	No	Sí	No
Procesamiento de señales	No	No	Sí

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

PROYECTO CONCEPTUAL

Este capítulo presenta el procedimiento para elaborar el proyecto conceptual siguiendo la metodología explicada en el Capítulo 1. Primero, se presenta y se explica la lista de exigencias de la presente tesis. Luego, se definen las entradas y salidas del sistema; a continuación, se detallan las funciones que deberá tener el robot para cumplir los requerimientos establecidos. Tomando en cuenta estos pasos, se elabora la matriz morfológica con tres propuestas de solución. Finalmente, se realiza una evaluación técnico-económica y se selecciona la propuesta ganadora.

3.1. Lista de Exigencias

En el Anexo A se encuentra la Lista de Exigencias para el posterior desarrollo del robot.

3.1.1. Descripción de la Lista de Exigencias

Función Principal: El robot deberá ser capaz de introducirse en el entrehierro de un motor o generador eléctrico, desplazarse dentro de éste de manera teleoperada y proveer imágenes del interior de la máquina en tiempo real para que el encargado realice la inspección visual. Además, este sistema debe contar con los módulos necesarios para realizar la prueba de apriete de las cuñas del estator.

Geometría: Las dimensiones no deben exceder de 300 mm de largo por 200 mm de ancho y 25 mm de grosor. El grosor es un factor clave al momento de determinar la altura mínima del entrehierro a la cual permite ingresar. Del mismo modo, el ancho del sistema también es un limitante de operación. Es por ello que debe ser capaz de curvarse para poder acomodarse a diferentes diámetros de generadores o motores eléctricos.

Cinemática: Analizando los modelos comerciales revisados en el Estado del Arte, se determina que el robot deberá desplazarse por el entrehierro con una velocidad máxima de 20 cm/s tomando en cuenta que esta debe ser regulable por el operario. Además, debe tener una precisión posicional tal que el error no pase de 5 mm.

Fuerzas: El robot se deberá desplazar cargando su propio peso a lo largo del entrehierro. Este será como máximo 2 kilogramos, tomando en cuenta los demás modelos presentados en el Estado del Arte, así como el peso real de los componentes del sistema y los materiales empleados para la carcasa.

Energía: El sistema trabajará todo el tiempo conectado por lo que no se necesitarán baterías. La alimentación será mediante Ethernet (*Power over Ethernet* o PoE) a 12 voltios en corrientes continua.

Señales: El robot será teleoperado por lo que todas sus señales de entrada provendrán de una consola de control operada por el encargado. Estas serán: señales de movimiento del robot, señales de accionamiento del subsistema de inspección visual y la señal de accionamiento del subsistema de prueba de cuñas. Mientras que las señales de salida serán: las imágenes captadas por la o las cámaras, los resultados de la prueba de apriete de las cuñas del estator y alguna señal de emergencia en caso de un mal funcionamiento.

Comunicación: Debe ser capaz de transmitir video en tiempo real a tal 1280x1024 píxeles de resolución y a 15 cuadros por segundo (fps) como mínimo. Simultáneamente, enviará las

señales de control de movimiento al robot para lo cual se usará comunicación serial RS232 o similares.

Seguridad: Las máquinas eléctricas que este robot puede inspeccionar deben cumplir la norma europea EN 60529.

Material: La carcasa necesita la resistencia suficiente para proteger los componentes internos al impacto de una caída si el operador deja caer al robot durante su instalación dentro de la máquina eléctrica. Además, debe ser de un material de peso liviano como por ejemplo una carcasa de aluminio o de un polímero de alta densidad.

Fabricación: La fabricación de la carcasa y el subsistema de prueba de apriete de cuñas será en el país al ser piezas de baja complejidad. Estas deben cumplir las tolerancias máximas requeridas para un correcto funcionamiento. Por otro lado, los sensores y actuadores serán modelos comerciales disponibles internacionalmente.

Control: El robot será controlado por un sistema de retroalimentación tipo PID que permite regular toda su dinámica.

Electrónica: El robot contará con un controlador de capacidades similares a las del Jetson Nano, microcámara(s) de alta definición (1280x1024 píxeles), motores y drivers para el desplazamiento y el subsistema de prueba de apriete de cuñas del estator. Este subsistema puede utilizar ya sea un sensor de sonido o un acelerómetro.

Operación: Como máximo 2 operarios para la correcta instalación y monitoreo. La instalación incluye colocar el robot en el entrehierro, lograr su fijación y que esté listo para el desplazamiento, mientras que el control implica mover al robot a la posición deseada mientras se realizan las dos pruebas (visual y de apriete de cuñas). El sistema será capaz de resistir temperaturas entre 0 a 50 °C.

Interfaz: Deberá contar con una interfaz para visualizar las salidas de las cámaras dentro del robot y también para analizar los resultados de la prueba de apriete de cuñas del estator.

Montaje: Se usarán diferentes tipos de uniones (atornilladas, soldadas, geométricas, epoxy) para fabricar el robot de acuerdo a normas internacionales como DIN o ISO.

Mantenimiento: El mantenimiento completo deberá hacerse semestralmente. De preferencia, previo a cada sesión de muestreo se hará una calibración de los sensores para garantizar la veracidad de las pruebas.

Costos: El costo de fabricación no deberá exceder los USD\$5000.

3.2. Funciones del sistema

Como parte de la metodología empleada, se deben identificar las entradas y salidas del sistema integrado, dejando de lado los procesos intermedios. Es en base a estas entradas y salidas que se construirá la estructura conceptual del robot y para esto se emplea la Caja Negra, mostrada en la Figura 3.1.

ENTRADAS:

- Comandos de desplazamiento: Indica los movimientos que realizará el robot
- Señal de prueba de cuñas: Indica que, donde esté posicionado el robot en ese momento, hará el golpeteo de la cuña.
- Señal de parada de emergencia: Detiene el robot sin importar el proceso en el que se encuentre debido a algún fallo en el sistema.
- Entorno: Comprende todo el espacio del entrehierro y particularmente la cuña que será sensada por el sistema.
- Energía eléctrica PoE: El sistema funciona conectado a un cable Ethernet

SALIDAS:

- Señales de la interfaz: Muestra lo que el sistema está captando con sus cámaras y los resultados de la prueba de cuñas.
- Indicador de stand-by: Muestra que el sistema está en modo de espera.
- Alarma: En caso se produzca un mal funcionamiento el sistema avisará mediante una alarma.

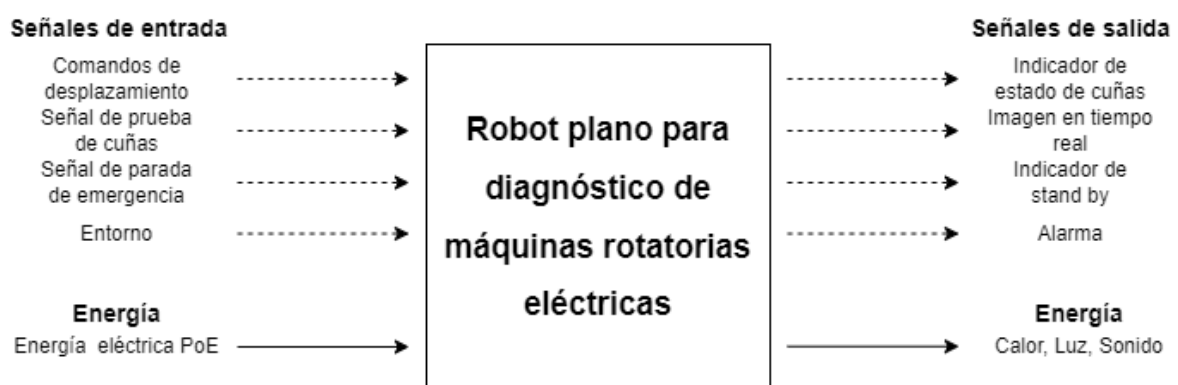


Figura 3.1. Diagrama de Caja Negra

Fuente: Elaboración propia

3.3. Lista de funciones

Una vez mostradas todas las entradas y salidas del robot inspector de máquinas eléctricas rotatorias se presentan las funciones que se identificaron dentro de la Caja Negra, agrupadas en dominios. El diagrama que engloba todas estas funciones se presenta en el Anexo B.

3.3.1. Dominio Energía

- Regular energía de alimentación: suministra la energía que le corresponde a cada subsistema.
- Energizar actuadores: proporciona la energía eléctrica para el funcionamiento de los actuadores.

- Energizar controlador: proporciona la energía eléctrica para el funcionamiento del controlador.
- Energizar sensores: proporciona la energía eléctrica para el funcionamiento de los sensores.

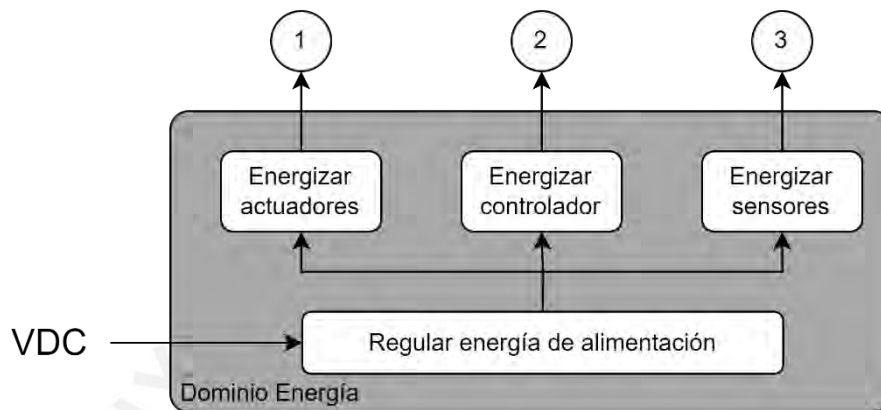


Figura 3.2. Estructura del Dominio de Energía

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Dominio Mecánico

- Sostener al robot en el entrehierro: permite adherir a todo el sistema al estator.
- Transmitir movimiento: mecanismo que permite movilizar al robot una vez sujetado dentro del entrehierro.
- Albergar y proteger componentes: estructura la cual contendrá a los componentes y evitará que los electrónicos se vean perjudicados por las condiciones externas.
- Golpear a la cuña: mecanismo que proporciona un golpeteo a las cuñas del estator, esencial para la prueba física.
- Posicionar la cámara: permite cambiar la dirección hacia donde apunta la cámara para ampliar al rango de visión.

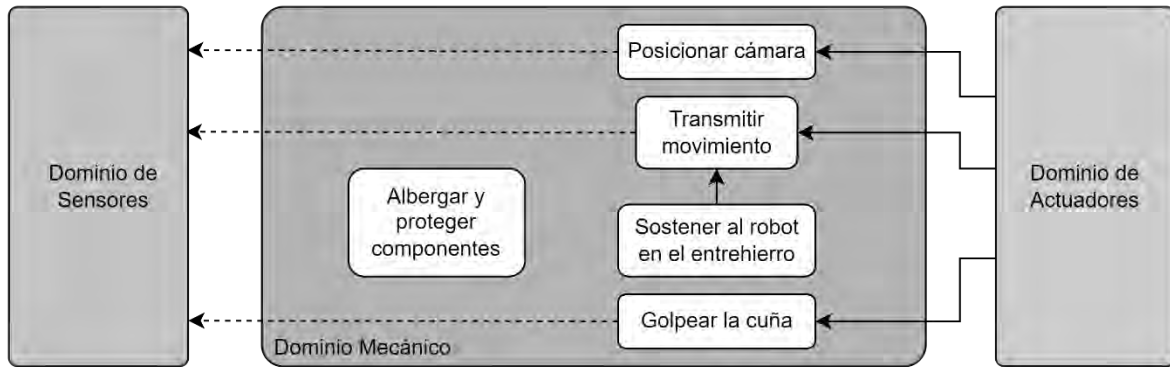


Figura 3.3. Estructura del Dominio Mecánico

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Dominio Sensores

- Captar imágenes: permite sentir el entorno mediante cámaras digitales
- Sensar posición: identifica la posición del robot mientras se mueve en relación a la máquina eléctrica con la ayuda de IMUs o encoders.
- Sensar impacto: permite medir el impacto del sistema de golpeo de cuñas ya sea mediante un sensor de sonido o un acelerómetro.

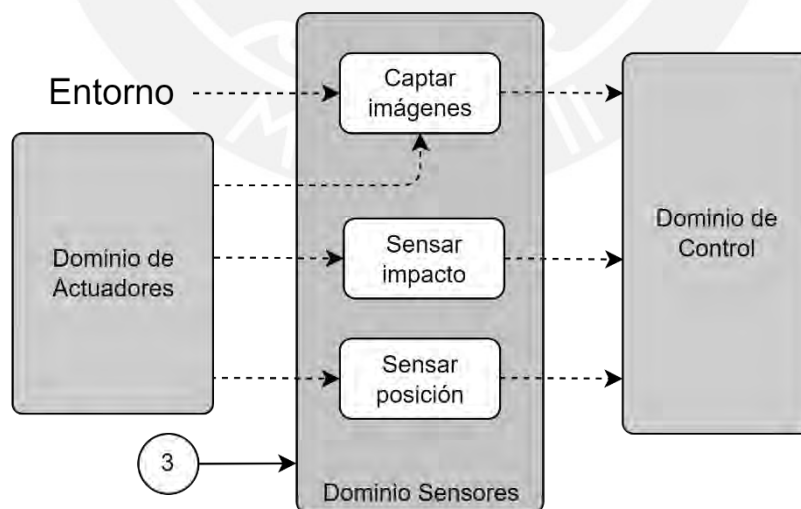


Figura 3.4. Estructura del Dominio de Sensores

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Dominio Actuadores

- Movilizar al robot: impulsa al robot mediante motores.
- Posicionamiento de cámaras: permite un giro de la imagen captada por las cámaras.
- Accionar posicionamiento de cámaras: permite el giro mecánico del subsistema de inspección visual.
- Iluminar entorno: ilumina el interior de la máquina eléctrica.
- Actuador de golpeo: mediante un servomotor con suficiente potencia acciona el golpeo de las cuñas.

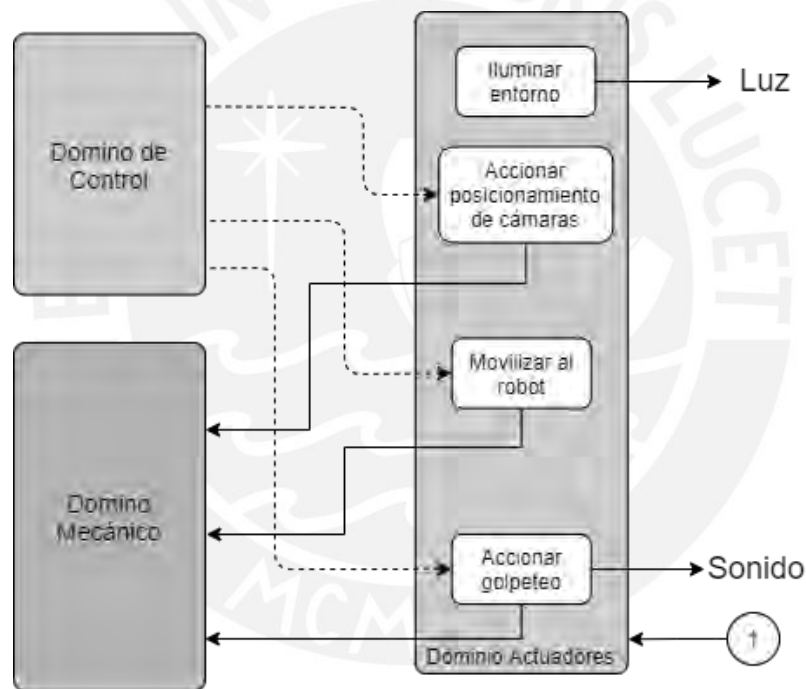


Figura 3.5. Estructura del Dominio de Actuadores

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Dominio Control

- Procesar imágenes: comprime las entradas de las cámaras para garantizar una resolución y cuadros por segundos constante.
- Identificar estado de la cuña: asigna un estado (cuña en buen estado o cuña suelta) a la señal procesada del sensor de impacto.

- Analizar errores: compara los resultados de los sensores con parámetros preestablecidos que puedan identificar posibles errores.
- Controlar el movimiento del robot: analiza la entrada del sensor de posición y contrasta con las posiciones que se han ido sensando desde que el robot se empezó a desplazar. Envía las señales necesarias para que los actuadores encargados del desplazamiento del sistema se movilicen según las instrucciones de la consola.
- Accionar prueba de cuñas: envía la señal precisa para el actuador de golpeo de un golpe constante y no altere los resultados del sensor.

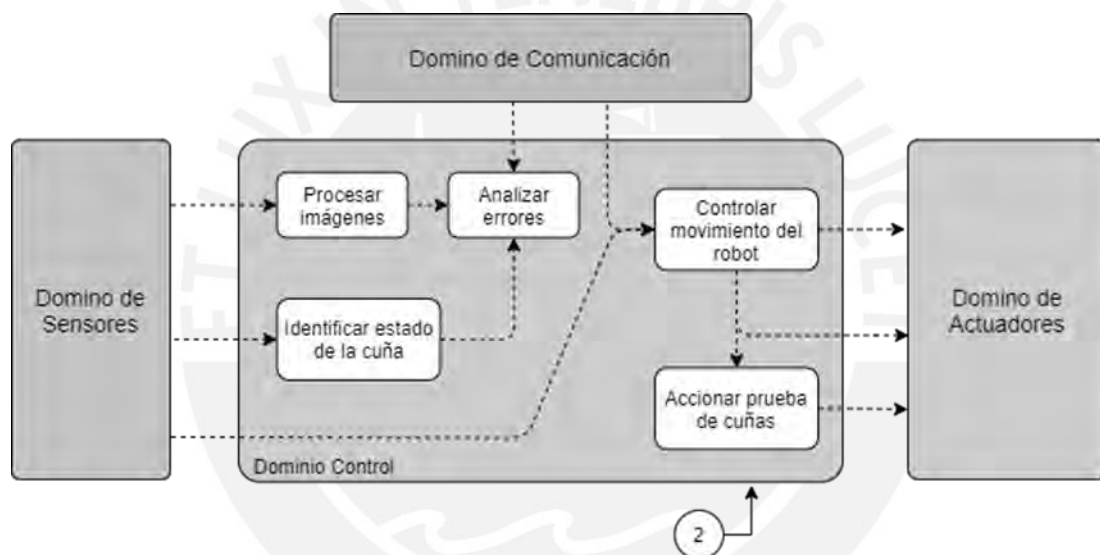


Figura 3.6. Estructura del Dominio de Control

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Dominio Comunicación

- Enviar información: envía las señales procesadas del Dominio de Control para mostrarlas todas en la interfaz.
- Recibir información: recibe las señales ingresadas por el usuario para ser procesadas por el Dominio de Control y ejecutadas por el Dominio Mecánico.

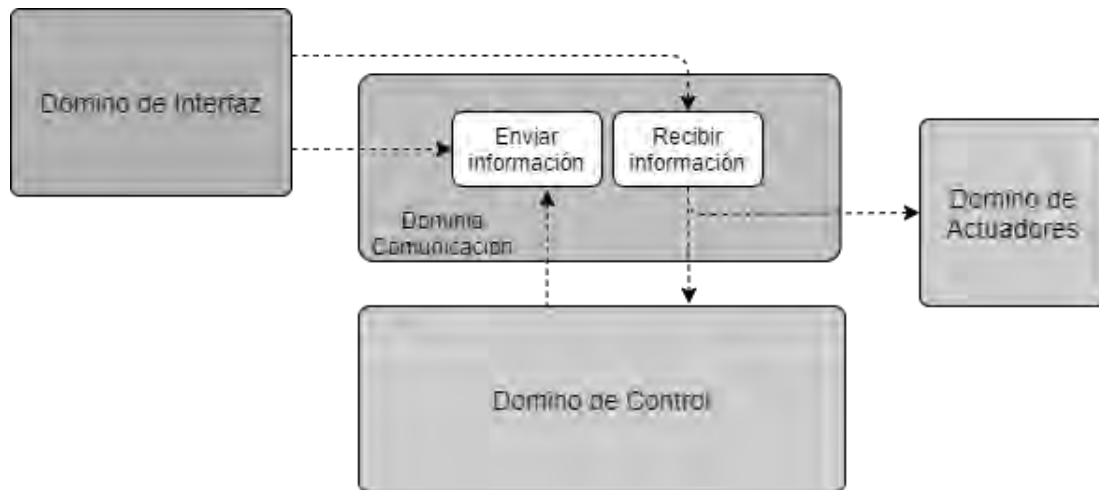


Figura 3.7. Estructura del Dominio de Comunicación

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Dominio Interfaz

- Recibir datos: recibe los datos procesados en tiempo real por el sistema.
- Transmitir datos: envía los comandos de desplazamiento y la señal de prueba de cuñas al módulo de comunicación del robot.
- Ingresar comandos: permite al usuario movilizar al robot, accionar la prueba de cuñas, girar las cámaras, iluminar el entorno y encender y apagar al robot.
- Mostrar imágenes en tiempo real: se visualiza las imágenes captadas por el robot en tiempo real con una resolución y cuadros por segundo constante.
- Mostrar estado de cuñas: se visualiza con un código de color (cuña en buen estado o cuña suelta) el estado que determina el sistema después de ejecutar la prueba de cuñas.
- Mostrar errores: la interfaz cuenta con una consola que da alertas visuales si detecta errores en el sistema.

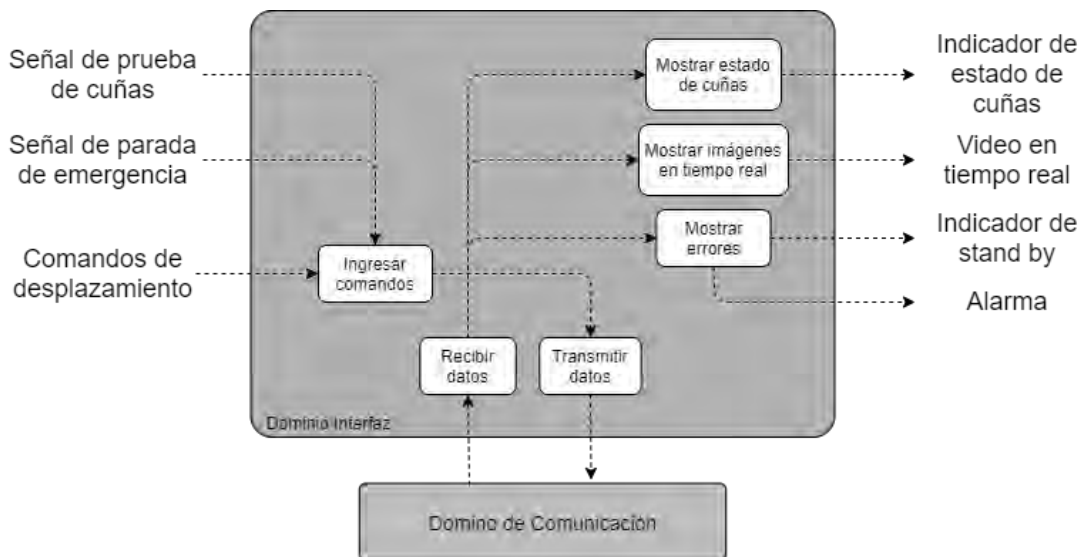


Figura 3.8. Estructura del Dominio de Interfaz

Fuente: Elaboración propia

3.4. Matriz Morfológica

La matriz morfológica se agrupa por dominios de acuerdo a las funciones que realizará el robot. Esta Matriz General se encuentra en el Anexo C mientras que a continuación se presenta el detalle de 3 conceptos de solución propuestos agrupados por subsistemas.

3.4.1. Subsistema de energía

Este subsistema agrupa las funciones que alimentan al robot y energizan todos los sistemas. Ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Funciones del subsistema de energía

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Regular energía de alimentación	Fuente Switching	Fuente Switching	Transformador
Energizar sensores	Buck converter	Regulador	Step down
Energizar actuadores			
Energizar controlador			

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Subsistema de desplazamiento

El subsistema de desplazamiento contiene las funciones que se aplican para la traslación o desplazamiento del sistema móvil. Ver Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Funciones del subsistema de desplazamiento

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Controlar el movimiento del robot	Control PID	Lazo Abierto	Control PID
Analizar errores	Lógica condicional	Forward error correction	Forward error correction
Sensar posición	IMU	Encoder	INS
Movilizar al robot	Motor DC	Motor AC	Motor AC
Sostener al robot en el entrehierro	Ruedas magnéticas	Adherencia por fricción	Ruedas magnéticas
Transmitir movimiento	Bandas de fricción	Bandas de fricción	Rodamientos
Albergar y proteger componentes	Contenedor IP55	Contenedor IP54	Contenedor IP65

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Subsistema de inspección visual

El tercer subsistema agrupa las funciones que permiten la inspección visual del entrehierro de las máquinas eléctricas. Ver Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Funciones del subsistema de inspección visual

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Procesar imágenes	Microprocesador	Microcontrolador	GPU
Analizar errores	Lógica condicional	Forward error correction	Forward error correction
Captar imágenes	Micro cámaras HD	Micro cámara HD	Cámara PTZ
Accionar posicionamiento de cámaras	Servomotor	Servomotor	Cámara PTZ
Iluminar entorno	Chip LED SMD	Chip LED SMD	Chip LED COB
Posicionar la cámara	Servomotor	Espejo rotativo	Cámara PTZ

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Subsistema de prueba de cuñas

El cuarto subsistema agrupa las funciones correspondientes a la prueba de cuñas del estator. Ver Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Funciones del subsistema de prueba de cuñas

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Identificar el estado de la cuña	Comparar con base de datos	Comparar con base de datos	Aprendizaje profundo
Accionar prueba de cuñas	Control PID	Lazo Abierto	Lazo Abierto
Analizar errores	Lógica condicional	Forward error correction	Forward error correction
Sensar impacto	Acelerómetro	Sensor de sonido	Sensor de sonido
Accionar golpeteo	Servomotor	Solenoide	Solenoide
Golpear a la cuña	Martillo para pruebas	Martillo de acero	Martillo de aluminio

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Subsistema de comunicación e interfaz

El último subsistema agrupa las funciones que transmiten información desde el usuario hasta el robot. Ver Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Funciones del subsistema de comunicación e interfaz

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Ingresar comandos	Teclado	Joystick	Teclado
Mostrar imágenes en tiempo real	Monitor	Monitor	Laptop
Mostrar estado de cuñas	Indicador por código de color	Indicador por código de color	Indicador numérico
Mostrar errores	Consola de texto	Indicador visual	Indicador visual
Transmitir datos	Cable Ethernet	Cable Ethernet	Cable de fibra óptica
Enviar/Recibir información	RS485	RS232	ADSL

Fuente: Elaboración propia

3.5. Conceptos de solución

Partiendo de la sección anterior se detalla a continuación los 3 conceptos de solución de manera gráfica y conceptual. Se presentarán todos los componentes utilizados, así como bocetos definiendo la ubicación y función de cada uno de ellos.

3.5.1. Primer Concepto de Solución

Este diseño plantea un robot tipo *crawler* de 3 módulos. La Figura 3.9. muestra el módulo central que contiene toda la circuitería de control y regulación de energía, así como los subsistemas de inspección visual y prueba de cuñas, además de los dos módulos laterales encargados de la adhesión al estator y el desplazamiento de todo el sistema. El módulo principal cumple la norma IP55 de protección de componentes frente al entorno y los módulos de desplazamiento se acoplan mediante bisagras. Estos elementos permiten un grado de doblez lo cual facilita a que el robot pueda introducirse en máquinas eléctricas de diferentes diámetros sin perder efectividad al momento de adherirse al estator mediante sus ruedas magnéticas. En la parte frontal del robot se encuentran los elementos necesarios para la inspección visual del entrehierro. Este sistema cuenta con 3 LEDs de tipo SMD y 2 microcámaras de alta definición acopladas a 2 servomotores que realizan un movimiento de cámara distinto cada uno. El izquierdo realiza el movimiento sobre su eje horizontal (*pan* en inglés) y el derecho, sobre el eje vertical (*tilt* en inglés). Estas imágenes son procesadas en tiempo real por un microprocesador y enviadas al dispositivo de salida el cual se explicará más adelante.

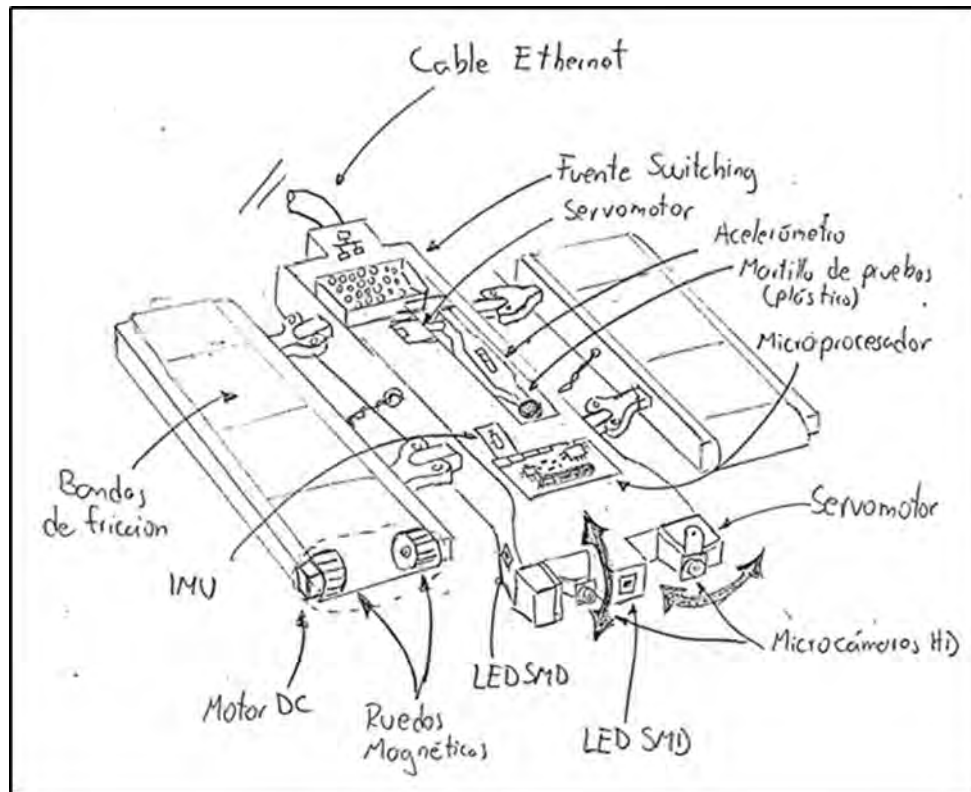


Figura 3.9. Vista del Concepto 1 y sus componentes

Fuente: Elaboración propia

El subsistema de prueba de cuñas emplea un servomotor el cual impulsa al martillo de pruebas para lograr el impacto deseado. Este elemento lleva montado un acelerómetro lo cual permite medir la intensidad del movimiento y la respuesta que tiene una vez impacta contra la cuña. Por otro lado, el sistema se desplaza mediante bandas de fricción y ruedas magnéticas accionadas por motores DC. Un IMU se encarga de detectar la posición relativa del robot mientras se va moviendo por la máquina eléctrica a inspeccionar y mediante un control PID, se hacen las correcciones necesarias para garantizar la precisión posicional especificada en la Lista de requerimientos. El sistema envía toda la información recopilada por los sensores a bordo al monitor mediante un cable ethernet, con comunicación serial RS-485. Todos los componentes están protegidos por un contenedor de norma IP55.

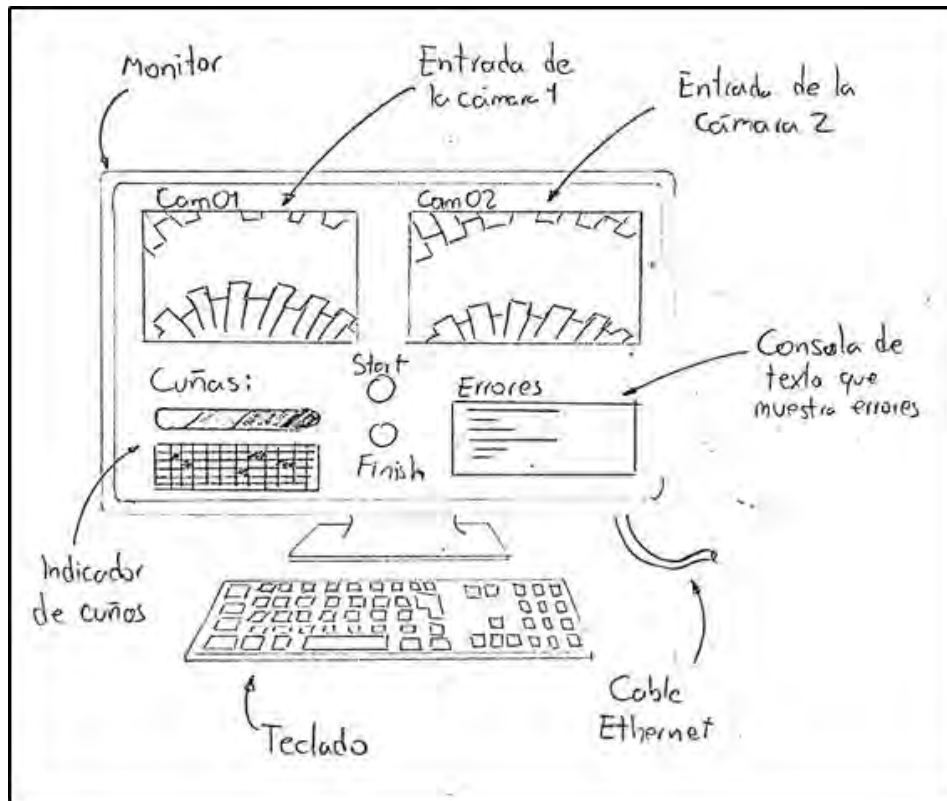


Figura 3.10. Interfaz y dispositivos de entrada/salida

Fuente: Elaboración propia

La interfaz se muestra en la Figura 3.10. Esta cuenta con 2 imágenes mostradas lado a lado correspondientes a las 2 cámaras del robot. Debajo se encuentran los botones de inicio y parada del sistema, así como la sección de prueba de cuñas y la consola de texto que indica los errores que puedan ocurrir. Cabe resaltar que estos son detectados por simple lógica condicional, es decir comparar los parámetros con los esperados y si se desvían demasiado, se envía una señal de error. Por último, el ingreso de comandos, ya sea para mover al robot, las cámaras, accionar la prueba de cuñas o apagar y encender al robot se realiza mediante un teclado convencional.

3.5.2. Segundo Concepto de Solución

Este concepto corresponde a un robot del tipo *crawler* que a diferencia del anterior funciona exclusivamente con el rotor en su lugar, pues su principal característica mecánica es la adhesión por presión accionada mediante actuadores lineales que impulsa una banda de

fricción ubicada en la parte superior, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.11. En esta figura también se muestra el subsistema de inspección visual el cual cuenta con una sola cámara la cual posiciona su imagen con la ayuda de un espejo rotativo en frente accionado por un servomotor. Este acoplamiento le permite girar 180° en el eje vertical. Adicionalmente, se cuenta con 2 LEDs de tipo SMD.

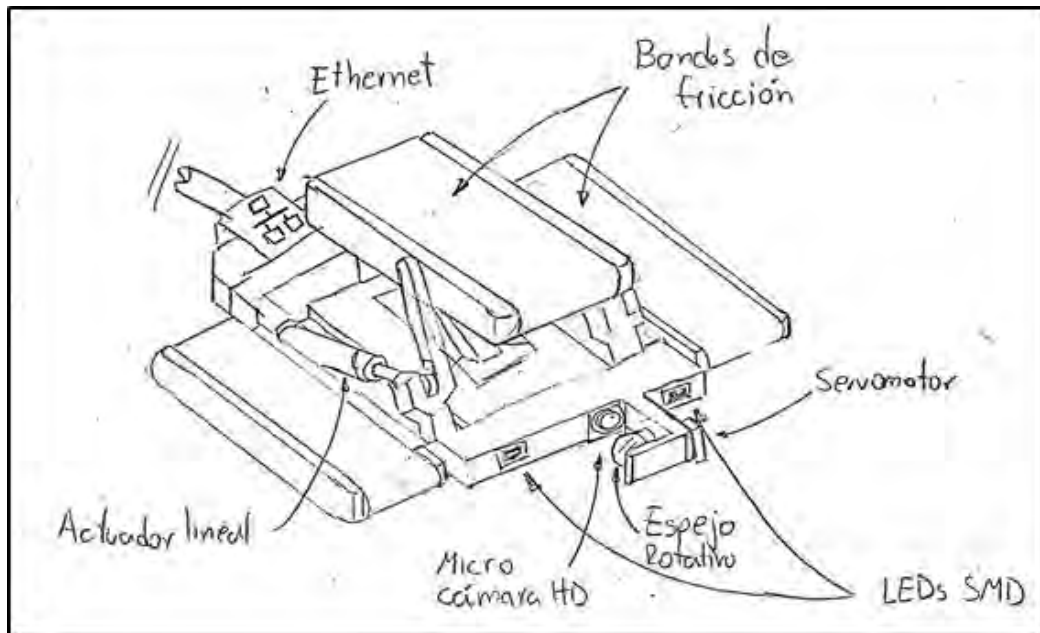


Figura 3.11. Vista externa del Concepto 2

Fuente: Elaboración propia

El desplazamiento de este concepto de solución se consigue mediante bandas de fricción las cuales transmiten el movimiento generado por rodillos accionados por motores DC. En la Figura 3.12. se muestra la vista inferior del robot, en la cual se puede apreciar en detalle el subsistema de inspección de cuñas. Este consiste de un martillo de acero activado por un solenoide el cual golpea la cuña generando una onda sonora que es detectada por un sensor de sonido. También, se puede observar los componentes de procesamiento, en primer lugar, el microcontrolador es el que recibe todas las señales, las procesa y las envía a un monitor mediante un cable ethernet, con comunicación serial RS-232. Adicionalmente, los *encoders* se encargan de medir las revoluciones de los motores. Para la energización del sistema se tiene

una fuente *switching* que lo alimenta tras usar reguladores de voltaje para cada componente.

Todos ellos están protegidos por un contenedor de norma IP54.

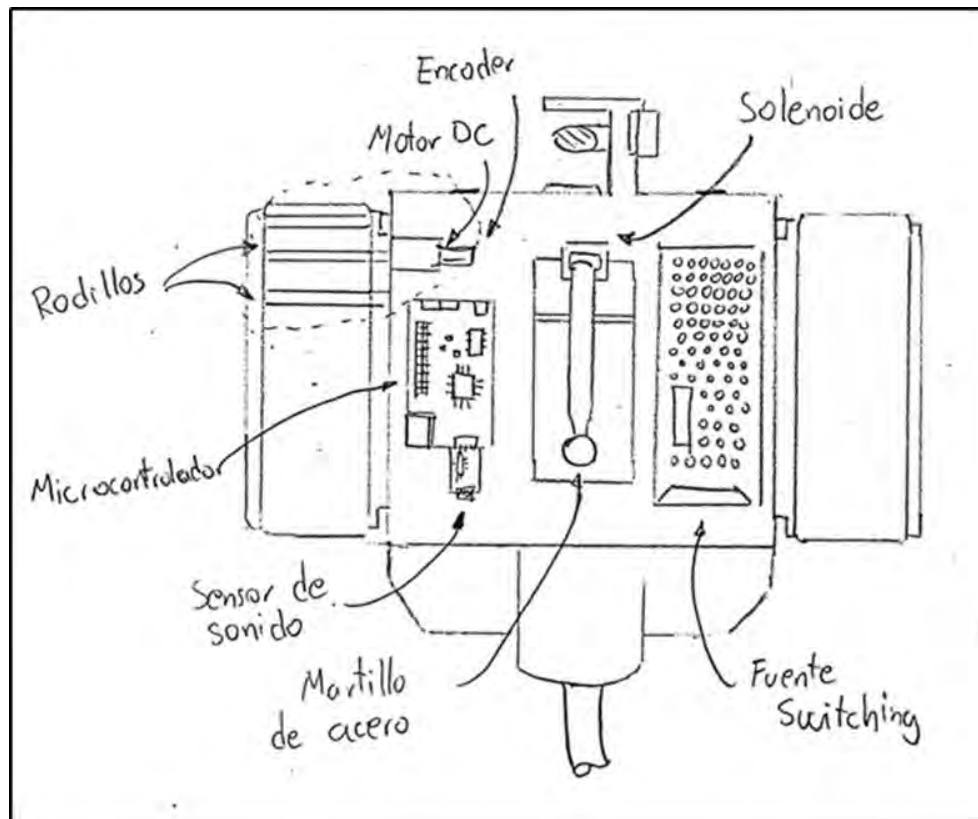


Figura 3.12. Vista inferior del Concepto 2

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.13. se muestra la configuración de entrada de comandos, así como la interfaz que muestra la información obtenida por los dos principales sensores. Un *joystick* analógico en la parte superior permite movilizar al robot y al sistema de la cámara al mismo tiempo. Esta muestra las imágenes en tiempo real mediante un monitor, así como también el indicador por color del estado de las cuñas, la lista de estados de las cuñas inspeccionadas y un modelo visual del robot con el cual se pueden visualizar posibles errores. Estos son detectados mediante el método *Forward error correction* (FEC) el cual consiste en enviar información adicional redundante para que los valores atípicos sean detectados como errores.

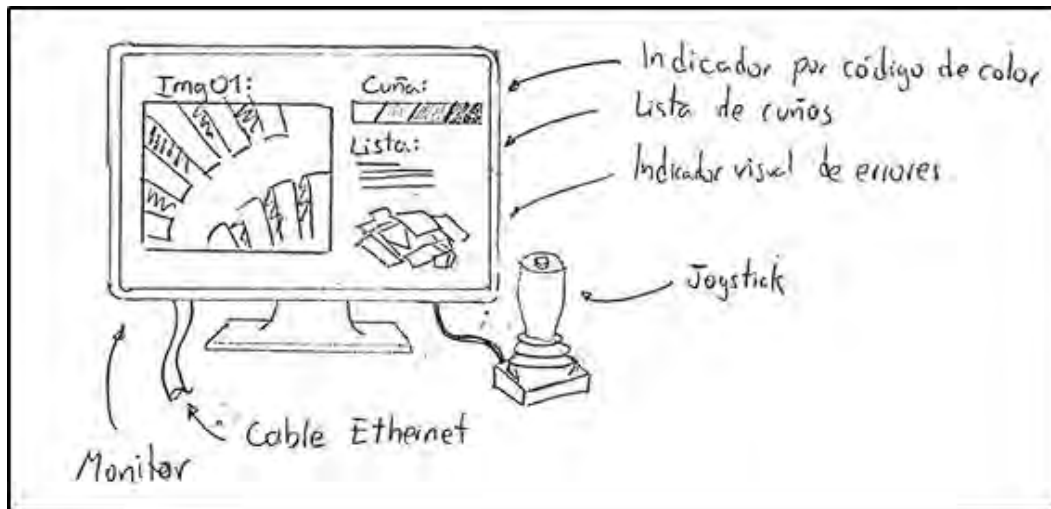


Figura 3.13. Interfaz y dispositivos de entrada/salida

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Tercer Concepto de Solución

Este robot también es del tipo *crawler* tal cual los dos anteriores, pero a diferencia de estos su principal método de desplazamiento son directamente las ruedas magnéticas como se puede apreciar en la Figura 3.14. Estas tienen mayor adhesión que las usadas anteriormente, aunque también tienen como componente principal al neodimio. Estas ruedas, junto con los motores AC, su sistema de transmisión, las bisagras duras y el INS conforman el subsistema de desplazamiento. Este es controlado por el GPU mediante un control PID, cabe destacar que el GPU también es responsable de procesar la información del subsistema de inspección visual y la prueba de cuñas, los cuales se explicarán a continuación.

La alimentación del sistema emplea un transformador el cual convierte la corriente alterna del tomacorriente en continua, la cual es regulada por *step downs* para cada componente electrónico a bordo. En la Figura 3.14 también se muestra la cámara PTZ que cumple las funciones tanto de captar imágenes como de posicionarse. Adicionalmente se tienen 2 LEDs tipo COB que iluminan el entorno. Por otro lado, se aprecia el martillo de aluminio empleado para la prueba de cuñas. Al golpearse con estas, accionado por un solenoide, el sensor de sonido

mide las señales respectivas. Todos los componentes están protegidos por un contenedor de norma IP65.

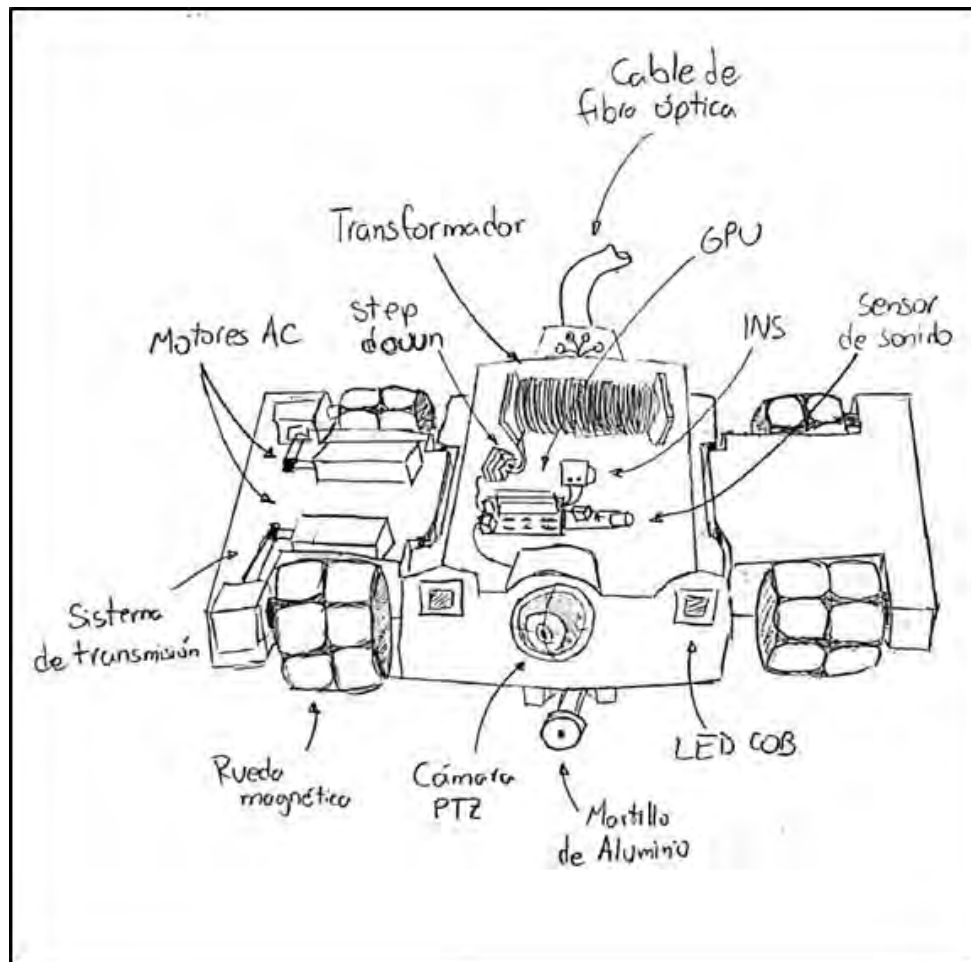


Figura 3.14. Vista frontal del Concepto 3

Fuente: Elaboración propia

La interfaz del sistema viene dada por software el cual puede ejecutarse en una laptop común, tal y como se muestra en la Figura 3.15. Esta, principalmente cuenta con la salida de cámara, el indicador numérico del apriete de la cuña analizada y un modelo visual del sistema para indicar errores, los cuales son detectados por Forward error correction (FEC). Pero también se cuenta con una lista de las cuñas ya medidas y una leyenda de lo que significa cada número, con relación al estado real de la cuña. Las entradas del robot se dan mediante un teclado y la conexión es de tipo ADSL mediante un cable de fibra óptica para mayor velocidad.

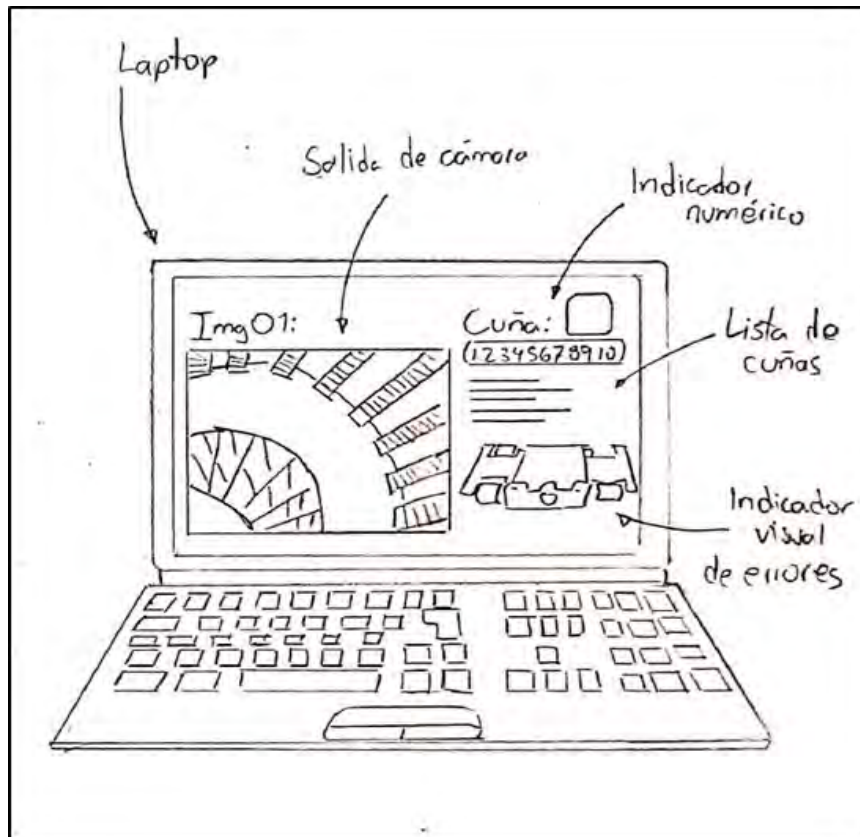


Figura 3.15. Laptop mostrando la interfaz del Concepto 3

Fuente: Elaboración propia

3.6. Evaluación Técnica Económica

A continuación, se evalúan los 3 conceptos anteriormente presentados en base a criterios técnicos y económicos. Los mismos se presentan y se explica su relevancia a continuación, con el fin de proponer un concepto óptimo de solución que emplee las funciones con mejores resultados. Estos criterios tienen un puntaje de satisfacción denotado por la letra p y un peso ponderado respecto al total de criterios que se identifica con la letra g . Los valores que pueden tomar estas dos variables están explicados en la Tabla 3.6. Con estos parámetros se procede a analizar cada uno de los criterios.

Tabla 3.6. Justificación de valores g y p

Valor	Peso Ponderado (g)	Puntaje de Satisfacción (p)
1	Es un criterio prescindible que casi no afecta las funciones del robot	Es suficiente para hacer funcionar al robot
2	Es un criterio no muy importante, afectando moderadamente las funciones del sistema	Cumple moderadamente bien sus funciones requeridas
3	Es un criterio importante que afecta considerablemente las funciones esenciales del robot	Cumple efectiva y eficientemente la función respectiva
4	Es un criterio esencial para el correcto funcionamiento del sistema	Cumple los requerimientos excepcionalmente

Fuente: Elaboración propia

3.6.1. Criterios Técnicos

Medición de cuñas: Evalúa que tan preciso es el sistema en su capacidad para determinar el estado de ajuste de las cuñas. Así como también compara la confiabilidad del tipo de sensor para esta tarea.

Tabla 3.7. Comparación del criterio de medición de cuñas

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Emplea un acelerómetro como sensor principal lo cual depende enteramente del rebote del martillo	2
2	Utiliza un sensor de sonido que detecta el golpe del martillo de acero contra la cuña lo cual es más configurable, teniendo mayor adaptabilidad	3
3	También utiliza un sensor de sonido, pero tiene un martillo más ligero de aluminio	3

Fuente: Elaboración propia

Calidad de imagen: Se evalúa si la imagen es lo suficientemente nítida como para que se pueda realizar la inspección visual de manera efectiva. Además, debe de proveer los ángulos adecuados para analizar todo el componente, en este caso las cuñas.

Tabla 3.8. Comparación del criterio de calidad de imagen

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Cuenta con 2 cámaras de alta definición con 180° de movimiento en dos ejes	3
2	Cuenta con un sistema de una sola cámara de alta definición acoplado a un espejo rotativo de 180° en un solo eje. Es el sistema con más restricciones de los 3 conceptos	2
3	La cámara PTZ simplifica bastante el subsistema, pero no cuenta con la misma definición de las microcámaras	2

Fuente: Elaboración propia

Movilidad: Evalúa que tan bien se desplaza por el entrehierro una vez desplegado. Se toma en cuenta su precisión posicional, su maniobrabilidad, la confiabilidad de su método de adhesión y la eficiencia de sus motores.

Tabla 3.9. Comparación del criterio de movilidad

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Las bandas combinadas con ruedas magnéticas son una alternativa segura para todo tipo de robot crawler, así como el uso de motores DC	3
2	La adherencia por fricción otorga mayor maniobrabilidad, pero requiere obligatoriamente que el rotor se encuentre ensamblado	2
3	El uso de ruedas magnéticas combina la maniobrabilidad del concepto 2 con la seguridad del 1, así como también cuenta con la potencia de los motores AC y disponer de un INS	3

Fuente: Elaboración propia

Diseño: Se evalúa la forma del robot, su modularidad y su capacidad para adecuarse a entrehierros angostos y de diferente curvatura. También toma en cuenta la facilidad de manipulación por el operario.

Tabla 3.10. Comparación del criterio de diseño

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Posee un diseño compacto y modular, unidos por bisagras sueltas. Esto le permite curvarse con facilidad y entrar a diversas máquinas eléctricas	3
2	Tiene un diseño compacto que se expande para ejercer la adhesión por tracción. No se curva	2
3	Este concepto puede curvarse gracias a sus bisagras que mantienen su posición mediante fricción, tiene un diseño compacto y se adecua de acuerdo al diámetro del estator	3

Fuente: Elaboración propia

Comunicación: Si es que el sistema es capaz de transmitir todas las señales, tanto de entrada como de salida, sin reducir su calidad, a una cadencia estable en tiempo real. También toma en cuenta que tan efectivamente esa información puede ser mostrada al usuario.

Tabla 3.11. Comparación del criterio de comunicación

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Al usar un cable de ethernet, tiene buen rango de comunicación alámbrica. Se emplea la comunicación tipo RS485. La interfaz muestra las imágenes e indicadores de manera ordenada y permite una navegación intuitiva	3
2	Al usar un cable de ethernet, tiene un buen rango de comunicación alámbrica. Se emplea la comunicación tipo RS232. Posee una interfaz simplificada	2
3	Posee el cable de mayor velocidad, siendo este la fibra óptica, así como la comunicación serial más veloz: ADSL. La interfaz muestra las imágenes e indicadores de manera efectiva	3

Fuente: Elaboración propia

Seguridad: Evalúa que tanto garantiza el sistema una protección de todos los componentes tanto de partículas externas tal y como polvo o agua, como de golpes y caídas.

Tabla 3.12. Comparación del criterio de seguridad

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Las bisagras sueltas absorben el impacto por lo que con un repuesto es capaz de volverse operativo rápidamente luego de una caída	3
2	Su diseño compacto y sin módulos lo hacen más resistente a las caídas que los otros dos conceptos. Posee un contenedor IP54 para proteger sus componentes de agentes externos	3
3	Posee el mejor contenedor para proteger los componentes internos. Sin embargo, sus ruedas magnéticas son propensas a romperse	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Justificación de pesos ponderados de criterios técnicos

Criterio	Justificación	Peso ponderado (g)
Medición de cuñas	Es una de las dos pruebas que el robot debe ser capaz de realizar a un nivel comparable al de una prueba manual realizada por un operario, por lo que su importancia es máxima	4
Calidad de imagen	Es la otra parte de las mediciones principales del robot. No solo debe ser de buena calidad, sino que la imagen debe ser posicionable dentro del entrehierro	4
Movilidad	El desplazamiento del sistema está estrechamente relacionado con su capacidad para realizar correcta y eficientemente las dos mediciones principales	3
Diseño	Si bien un mal diseño podría imposibilitar la operación en algunas máquinas eléctricas, no afectaría su rendimiento en otras	2
Comunicación	Sin una buena comunicación, no importa lo precisos que sean los sensores o el procesamiento interno del robot pues no llega esa información óptimamente hasta el dispositivo que muestre la interfaz	4
Seguridad	Es importante dar garantías para un uso prolongado. Sin embargo, no afectaría el rendimiento inicial del robot	2

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Criterios Económicos

Costo de componentes: Evalúa que tanto cuestan los principales componentes y materiales que se utilizaran en los sistemas. También se toma en cuenta, si es que estos tienen una mayor o menor disponibilidad en el mercado.

Tabla 3.14. Comparación del costo de componentes

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Contiene componentes con buena relación calidad-precio como las microcámaras y las ruedas magnéticas	3
2	Se usa el mismo criterio que el concepto 1, aunque use otros componentes	3
3	Este concepto contiene los componentes más caros como el GPU, la fibra óptica y la cámara PTZ	2

Fuente: Elaboración propia

Costo de fabricación: Toma en cuenta el costo de fabricación del sistema, el ensamblaje de todos los componentes y cuánto cuesta la maquinaria necesaria para este fin.

Tabla 3.15. Comparación del costo de fabricación

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Debido a que el diseño debe ser compacto y ligero, además de que tiene unas dimensiones muy pequeñas, la fabricación debe ser de calidad para garantizar tolerancias mínimas que permitan el funcionamiento óptimo. Se estima un precio elevado de fabricación para los 3 conceptos	2
2		2
3		2

Fuente: Elaboración propia

Costos de mantenimiento: Evalúa si los sistemas están diseñados para reducir costos y tiempos de mantenimiento. También se toma en cuenta como la calidad de los componentes afecta la periodicidad de los mantenimientos correctivos necesarios.

Tabla 3.16. Comparación de costos de mantenimiento

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	Su diseño simple y desacoplable hace que el mantenimiento sea rápido y eficiente	3
2	Al tener un diseño más complejo con más partes móviles y actuadores el costo de mantenimiento se eleva	2
3	A pesar de ser más sofisticado, su diseño modular también le permite tener un mantenimiento eficiente	3

Fuente: Elaboración propia

Costos de operación: Evalúa que tanto el diseño facilita la operación del robot al momento de inspeccionar una máquina eléctrica. Toman en cuenta cuántos operarios se necesita para un óptimo funcionamiento y que tan calificados deben estar.

Tabla 3.17. Comparación de costos de operación

Concepto	Justificación	Puntaje (p)
1	La operación es igual para los 3 robots, se recomienda dos operarios para su uso e inspección de máquinas eléctricas. Uno se encarga de posicionar y monitorearlo y el otro realizar las pruebas mediante la interfaz	3
2		3
3		3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18. Justificación de pesos ponderados de criterios económicos

Costos	Justificación	Peso ponderado (g)
De componentes	Es prioritario conseguir los componentes de mejor rendimiento y calidad para garantizar el funcionamiento deseado del sistema	4
De fabricación	Va de la mano con los costos de componentes pues la fabricación y ensamblaje juegan un papel tan importante como la calidad de los componentes	4
De mantenimiento	Estos costos son inevitables durante toda la vida útil del robot, por lo que el diseño debe tener en cuenta garantizar la calidad de los componentes para que no tengan que realizarse cambios muy seguidos	3
De operación	Si bien estos costos son importantes para que el sistema realice su función, en el caso del tipo crawler existe muy poca variación de costos operativos	2

Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Resultados de la evaluación

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación técnica y la evaluación económica de los conceptos de solución propuestos en la Tabla 3.19. y la Tabla 3.20. respectivamente.

Tabla 3.19. Resultados de la evaluación técnica

Evaluación técnica									
Criterio Técnico	g	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3		Concepto Óptimo	
		p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
Medición de cuñas	4	2	8	3	12	3	12	4	16
Calidad de imagen	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Movilidad	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Diseño	2	3	6	2	4	3	6	4	8
Comunicación	4	3	12	2	8	3	12	4	16
Seguridad	2	3	6	3	6	3	6	4	8
Sumatoria			53		44		53		76
Xi			0.697		0.579		0.697		1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Resultados de la evaluación económica

Evaluación económica									
Criterio Económico	g	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3		Concepto Óptimo	
		p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
Costo de componentes	4	3	12	3	12	2	8	4	16
Costo de fabricación	4	2	8	2	8	2	8	4	16
Costos de mantenimiento	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Costos de operación	2	3	6	3	6	3	6	4	8
Sumatoria			35		32		31		52
Yi			0.673		0.615		0.596		1

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados son mostrados mejor en una gráfica de dispersión como en la Figura 3.16. empleando los parámetros Xi e Yi correspondientes a la parte técnica y económica respectivamente.

Evaluación Técnica-económica

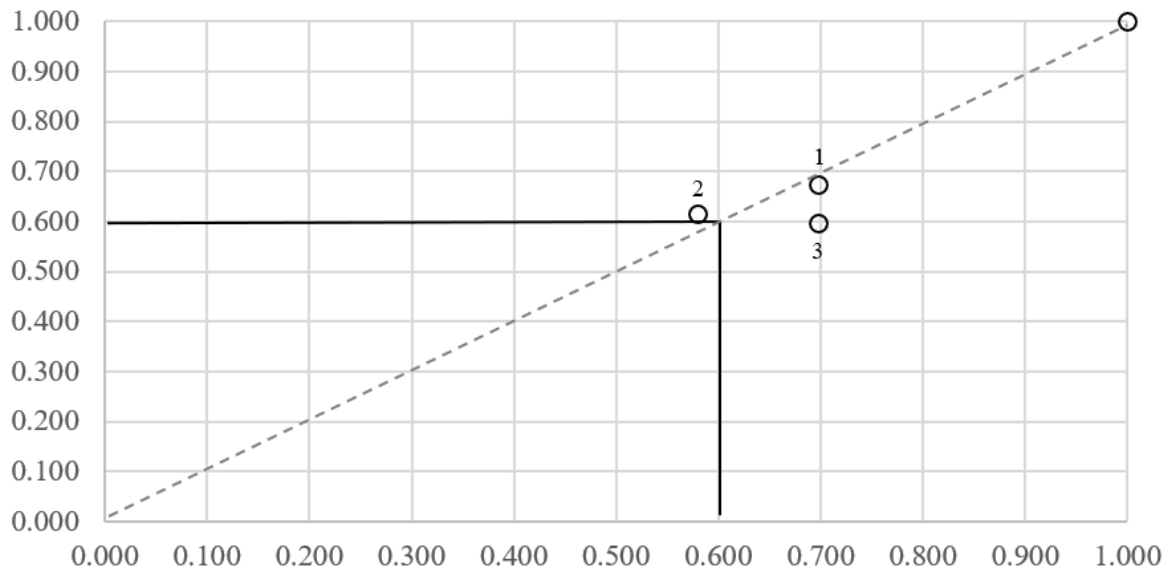


Figura 3.16. Gráfico de evaluación técnica-económica

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico observamos que los conceptos 1 y 3 son considerados buenas soluciones mientras que el concepto 2 consigue apenas superar el límite establecido de 0.6 puntos por lo que es descartado inmediatamente. La solución con mejor desempeño y por lo tanto la ganadora sería el concepto de solución 1 ya que es la opción más cercana a la línea diagonal que se asemeja al concepto de solución ideal indicado en la esquina superior derecha del gráfico.

3.7. Solución óptima

Se tomó como base el diseño del concepto 1, esto se evidencia en la Figura 3.17. por lo que se explicará principalmente los cambios que se realizaron para lograr la solución óptima. En primer lugar, el sistema de prueba de apriete de cuñas fue definido, empleando un martillo de aluminio accionado por un solenoide de carrera mínima pero gran potencia. La transmisión mecánica se dará mediante un mecanismo que permita pivotar al martillo de forma que pueda incorporarse dentro del delgado marco del sistema. Un sensor de sonido mide las ondas generadas por el impacto del martillo contra las cuñas. El GPU procesara las señales captadas

para dar un resultado de estado mediante la interfaz, la cual se explica a detalle en el siguiente párrafo. Para el subsistema de inspección visual, permanecen las dos microcámaras acopladas a servomotores pues brindan suficiente flexibilidad para posicionar ambas entradas de imagen según requiera el operador en todo momento. Sin embargo, el sistema ahora cuenta con una GPU para mayor rendimiento gráfico sin perder latencia durante la comunicación.

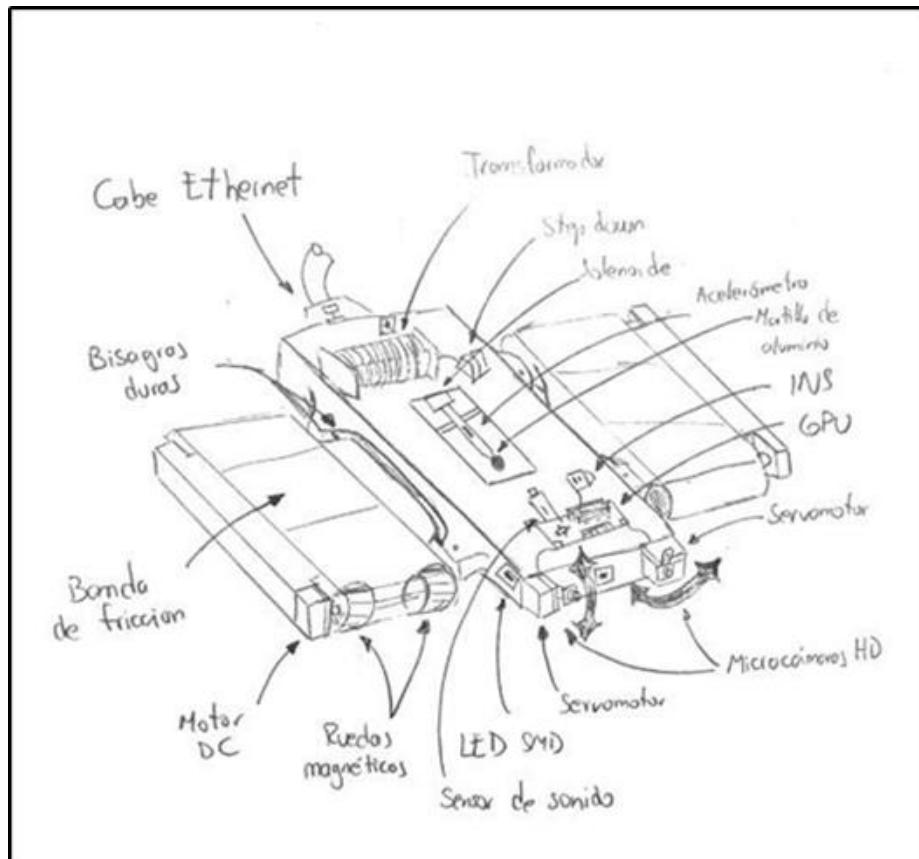


Figura 3.17. Vista externa de la solución óptima

Fuente: Elaboración propia

El diseño sigue siendo modular, la parte central se une a los módulos de desplazamiento mediante bisagras duras que ayudan al soporte del robot mientras se adhiere al entrehierro con sus ruedas magnéticas. En la Figura 3.18. se muestra el diseño de la interfaz gráfica en un monitor convencional. En esta se visualiza las salidas de las 2 cámaras del robot. Debajo se encuentran los botones de inicio y parada del sistema, así como la sección de prueba de cuñas y el modelo del sistema para mostrar errores visualmente. Por último, el ingreso de comandos,

ya sea para mover al robot, las cámaras, accionar la prueba de cuñas o apagar y encender al robot se realiza mediante un teclado alfanumérico.

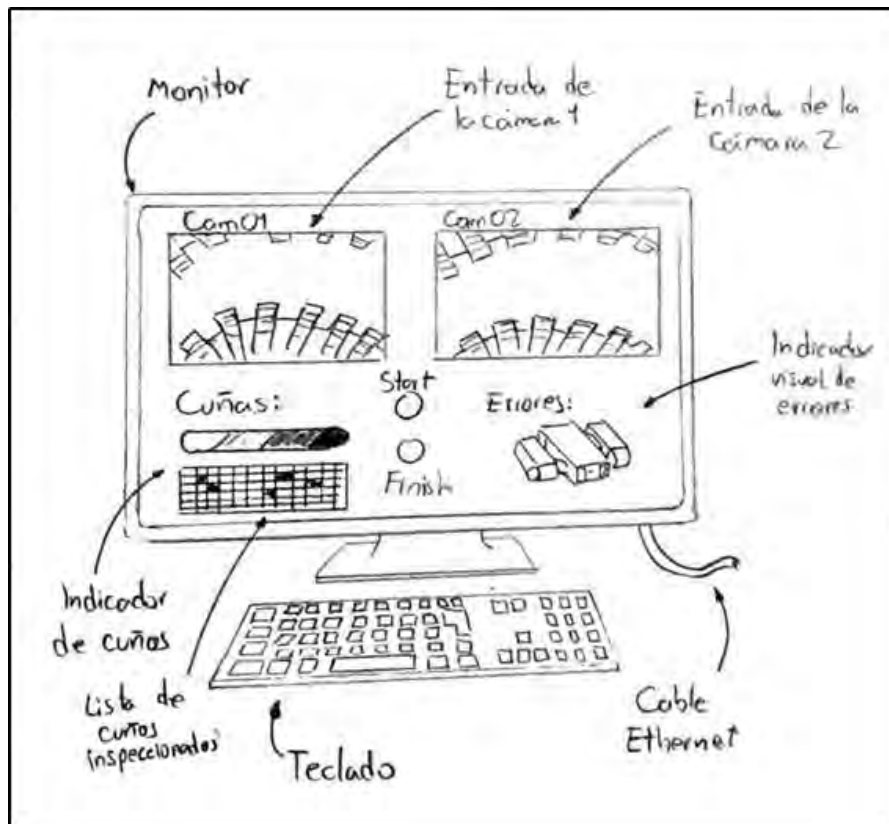


Figura 3.18. Interfaz de la solución óptima

Fuente: Elaboración propia

3.7.1. Diagrama de operaciones

En la Figura 3.19. se presenta el Diagrama de Operaciones General del Sistema. Este contiene las acciones que debe realizar el usuario para el correcto funcionamiento del mismo. El proceso comienza energizando al sistema al conectarlo a un dispositivo capaz de ejecutar el programa de la interfaz. Luego, se debe colocar manualmente al robot a la orilla del entrehierro y simultáneamente accionar su desplazamiento frontal para que quede adherido correctamente al rotor o al estator según lo requiera el operario. Una vez adherido, se ejecuta toda la inspección de manera teleoperada, a menos que se presenten problemas específicos como errores de desplazamiento o en el sensado tal y como se indica en los recuadros rojos. Si fuera el caso, habría que retirar el robot de manera manual para luego desconectarlo.

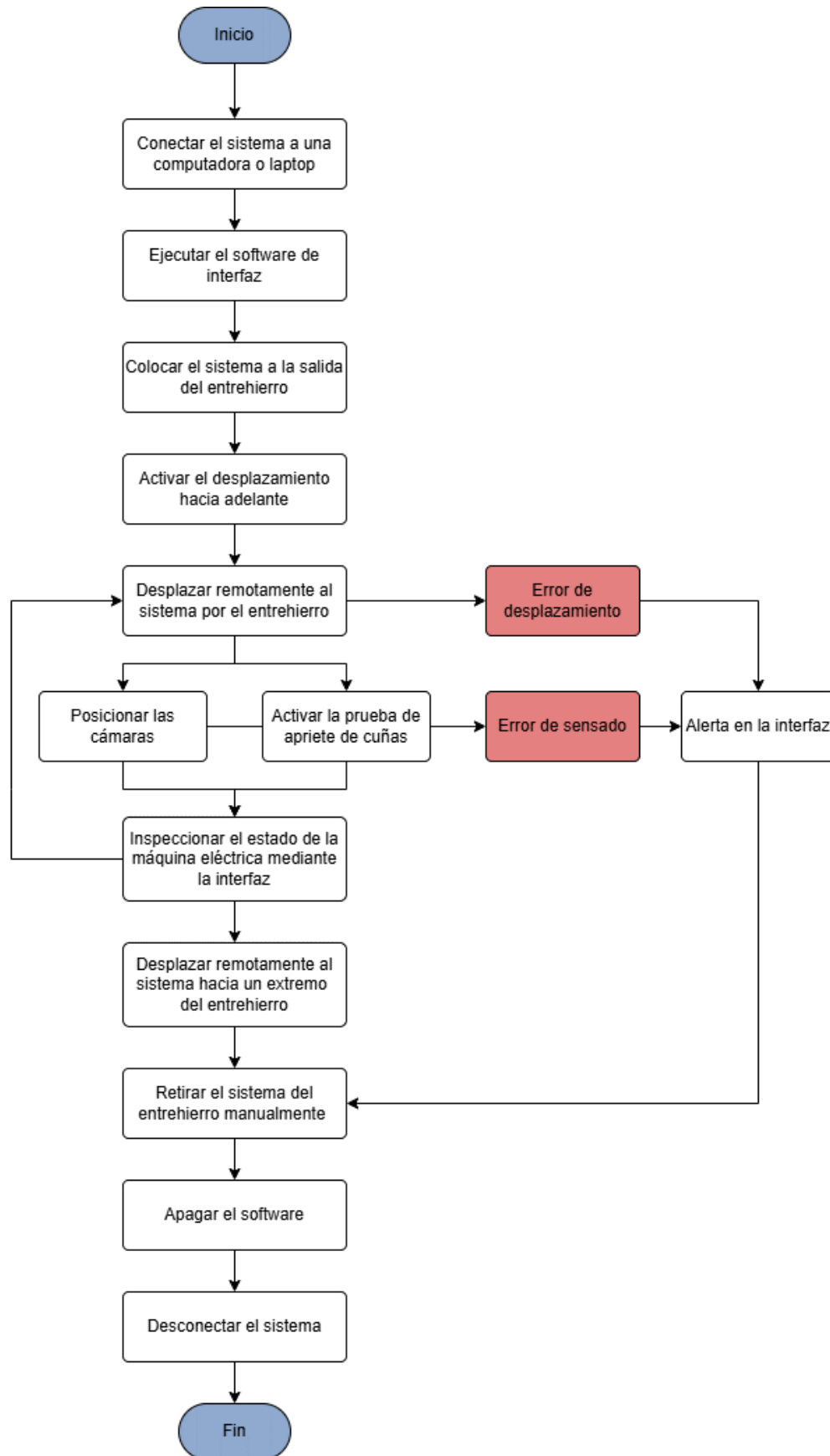


Figura 3.19. Diagrama de operaciones general del sistema propuesto

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques o estructura de hardware se presenta en la Figura 3.20. Este diagrama muestra las conexiones de los diferentes componentes o elementos del sistema. La alimentación vía Ethernet, provee al sistema de hasta 12 voltios de corriente continua para que pueda ser empleada por los distintos componentes. Los transformadores tipo *step down* se encargan de regular este voltaje a 5 y 6 voltios dependiendo de cual utiliza cada componente. Se requiere un driver para regular la corriente y velocidad de los motores DC. Adicionalmente, el GPU se encarga de energizar al sensor de sonido, las microcámaras de alta definición y las luces LED. De manera similar, las líneas punteadas simbolizan las señales de entrada y salida que tiene el GPU para cumplir todas las funciones del sistema.

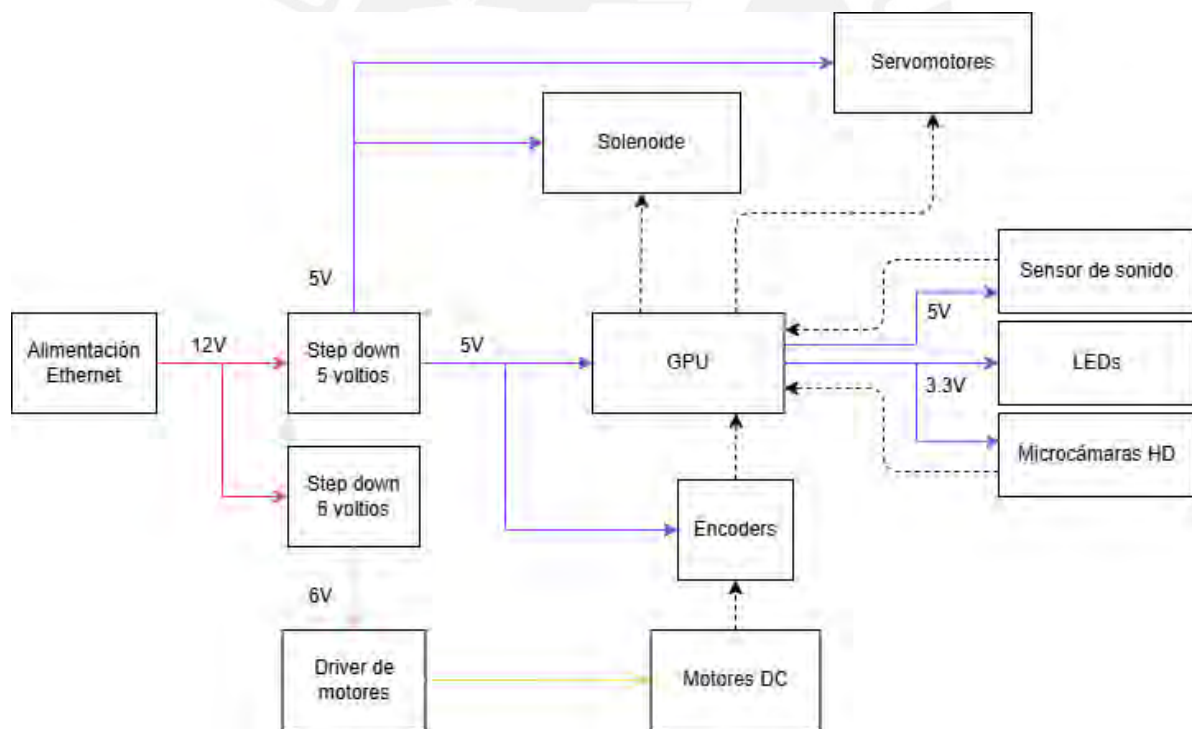


Figura 3.20. Diagrama de bloques del sistema propuesto

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

PROYECTO FINAL

La primera sección del presente capítulo detalla las características generales del sistema teleoperado tales como su geometría, los módulos que lo componen, materiales, forma de uso y las conexiones entre sus componentes. En las secciones siguientes se describen los subsistemas del robot con más detalle, incluyendo el software que se requiere tanto para la operación del mismo como para la visualización de la información en la estación de trabajo designada.

4.1. Diseño Integrado

4.1.1. Modelo 3D

En la Figura 4.1. se plantea un diseño en 3D con la ayuda del software CAD Inventor Professional 2025. La característica principal que restringe el diseño es la altura máxima que tendrá el robot plano, ya que este se diseña para entrehierros de 21 mm a más. En un principio se decidió por unas dimensiones del modelo de 200 x 250 x 18 mm las cuales fueron adecuándose y reduciéndose en la medida de lo posible hasta llegar a las dimensiones finales 183.5 x 232.5 x 20 mm. El sistema en sí se compone de 3 módulos, siendo los laterales módulos de desplazamiento y el central, de control. Los unen 2 bisagras las cuales permiten que el sistema se curve según sea necesario para adecuarse a los estatores.

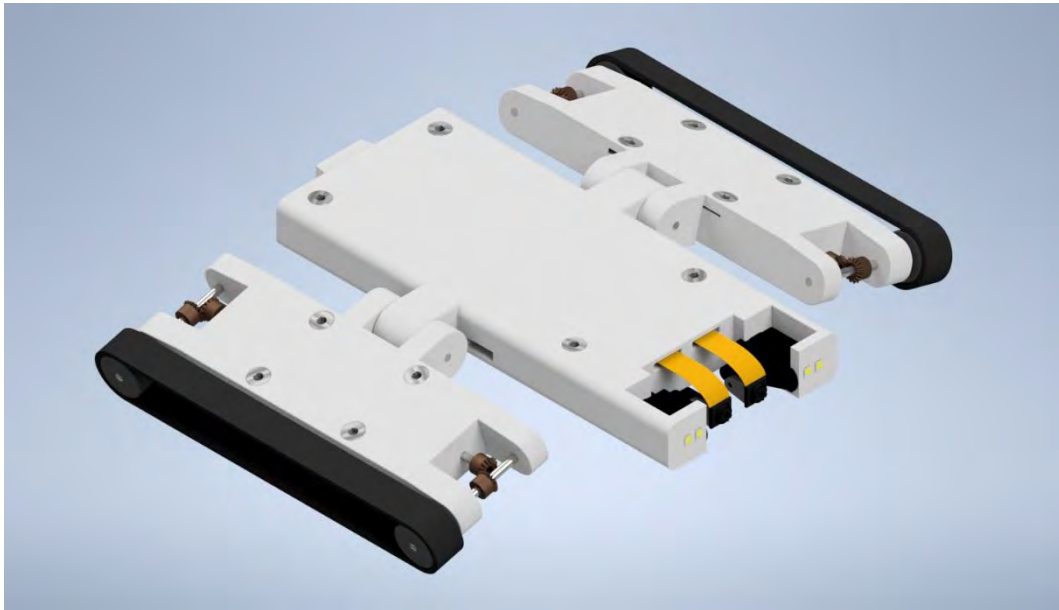


Figura 4.1. Modelo 3D general del robot

Fuente: Elaboración propia

Dentro del módulo de control se tienen los componentes electrónicos y mecánicos que pertenecen a los subsistemas de control, energía, inspección visual y prueba de cuñas. En la Figura 4.3. se puede observar el detalle de la parte delantera del robot, la cual contiene los componentes para la inspección visual.

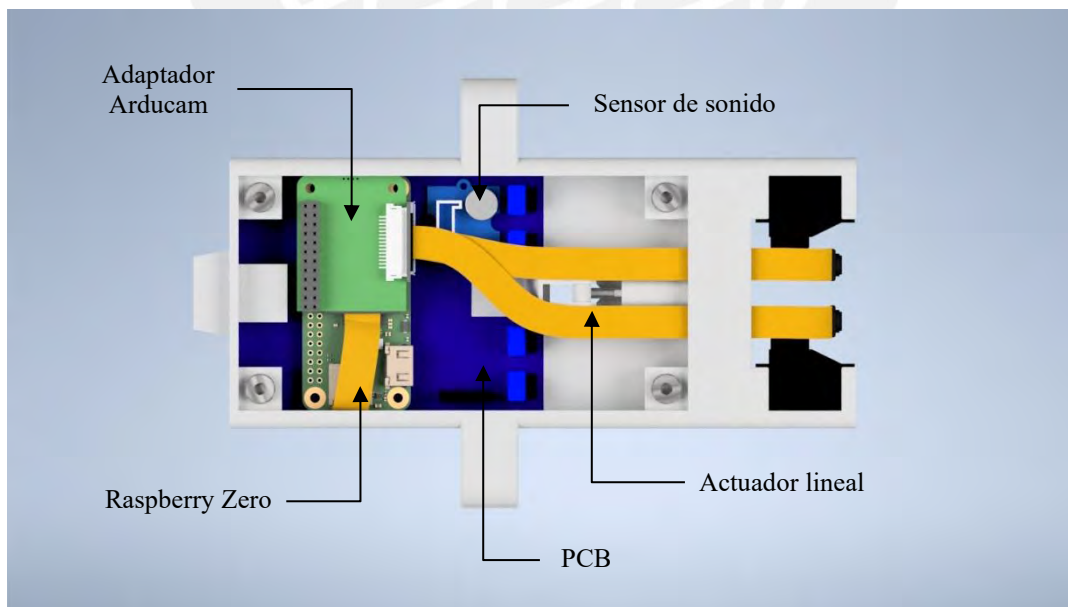


Figura 4.2. Módulo de control del subsistema

Fuente: Elaboración propia

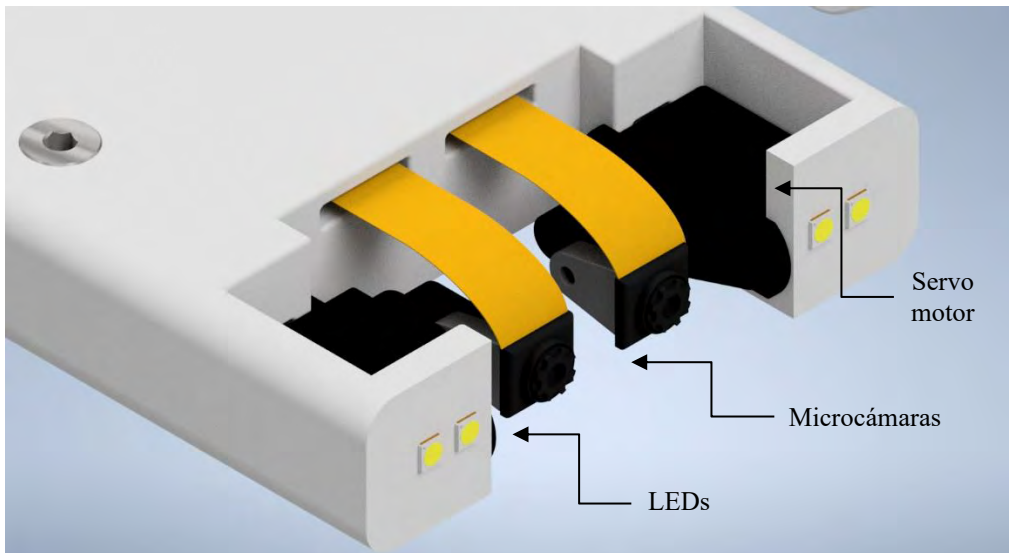


Figura 4.3. Detalle de la parte delantera del robot

Fuente: Elaboración propia

Los módulos de desplazamiento se componen de dos piezas que brindan el soporte principal. Dentro de estas piezas van montados dos motores DC, junto con el encoder, conectando estos componentes mediante aperturas en el diseño. Se emplea dos engranes cónicos para transmitir el movimiento de los motores hacia con las ruedas, las cuales, a su vez, transmiten el movimiento mediante una banda magnética. Finalmente, una bisagra conecta con el módulo de control. En la Figura 4.4. se puede observar la configuración de dicho módulo y en la Figura 4.5, se muestra los componentes internos del mismo.

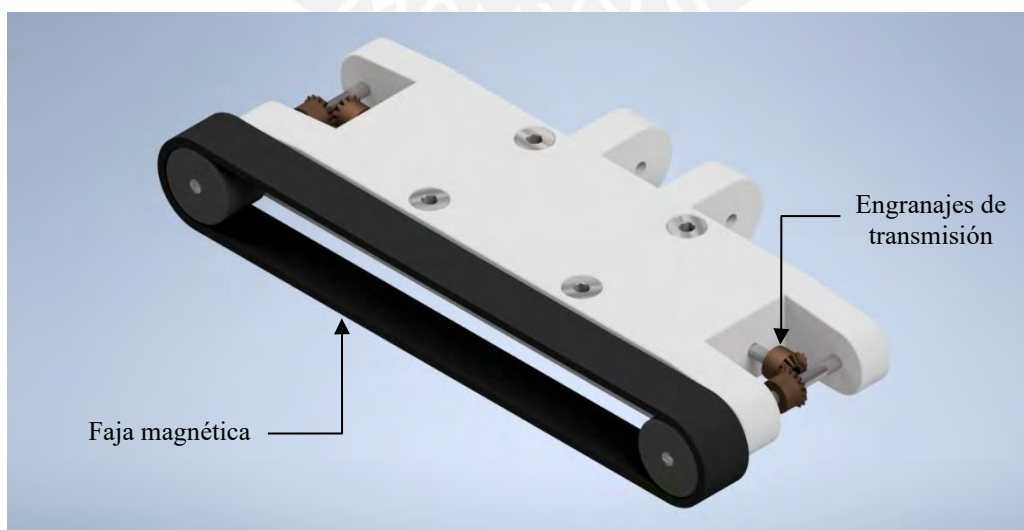


Figura 4.4. Módulo de desplazamiento

Fuente: Elaboración propia

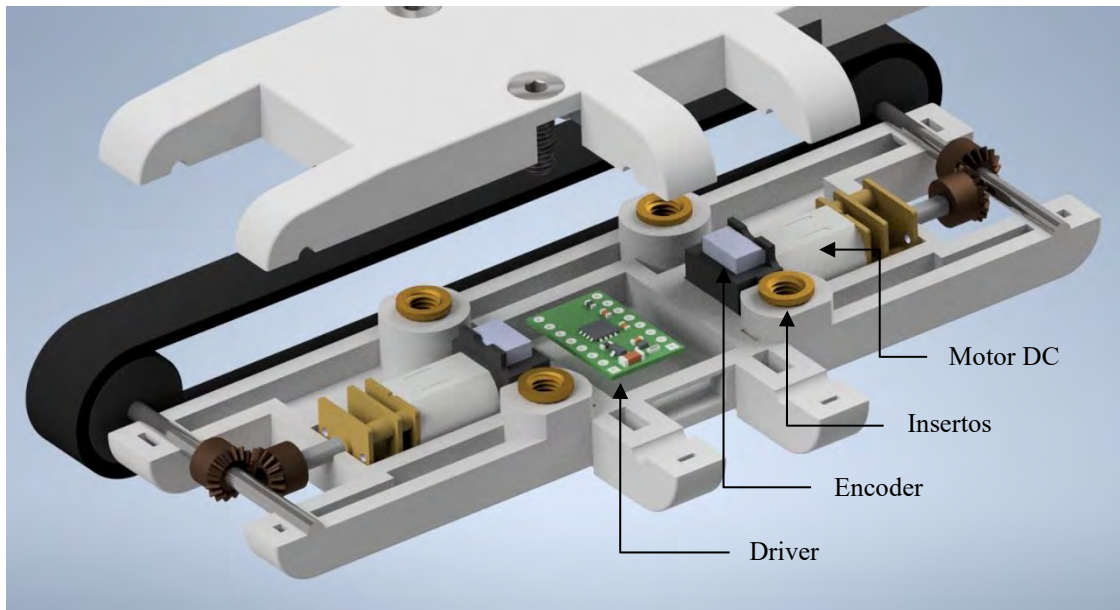


Figura 4.5. Detalle del interior del módulo de desplazamiento

Fuente: Elaboración propia

Los planos para fabricar los prototipos de las carcasas del Módulo de control y desplazamiento, así como los elementos de unión empleados, se encuentran en el Anexo D.

4.1.2. Diagrama de Flujo General

En la Figura 4.6. se muestra el diagrama de flujo que representa la lógica que debe seguir el controlador durante su funcionamiento. Primeramente, se energiza los LEDs, el sensor de sonido, las cámaras y se posiciona el robot de acuerdo a sus comandos. Luego, en el estado principal, el robot dirige su movimiento y posiciona a los servos según el input del usuario. Estos últimos modifican el ángulo de visión de las cámaras, independientemente una de la otra. Al pulsar el botón de la prueba de cuñas, se detiene el movimiento, se acciona el mecanismo de golpe y se sensa la cuña. Si es que todo salió correctamente se envía la información del resultado de la prueba y la posición de la cuña para luego volver al estado inicial. De lo contrario se envía una señal de error y vuelve al estado inicial sin enviar los resultados. Una vez el sistema vuelve al extremo expuesto de la maquina eléctrica, el operario des energiza al sistema mediante la interfaz para luego extraerlo manualmente.

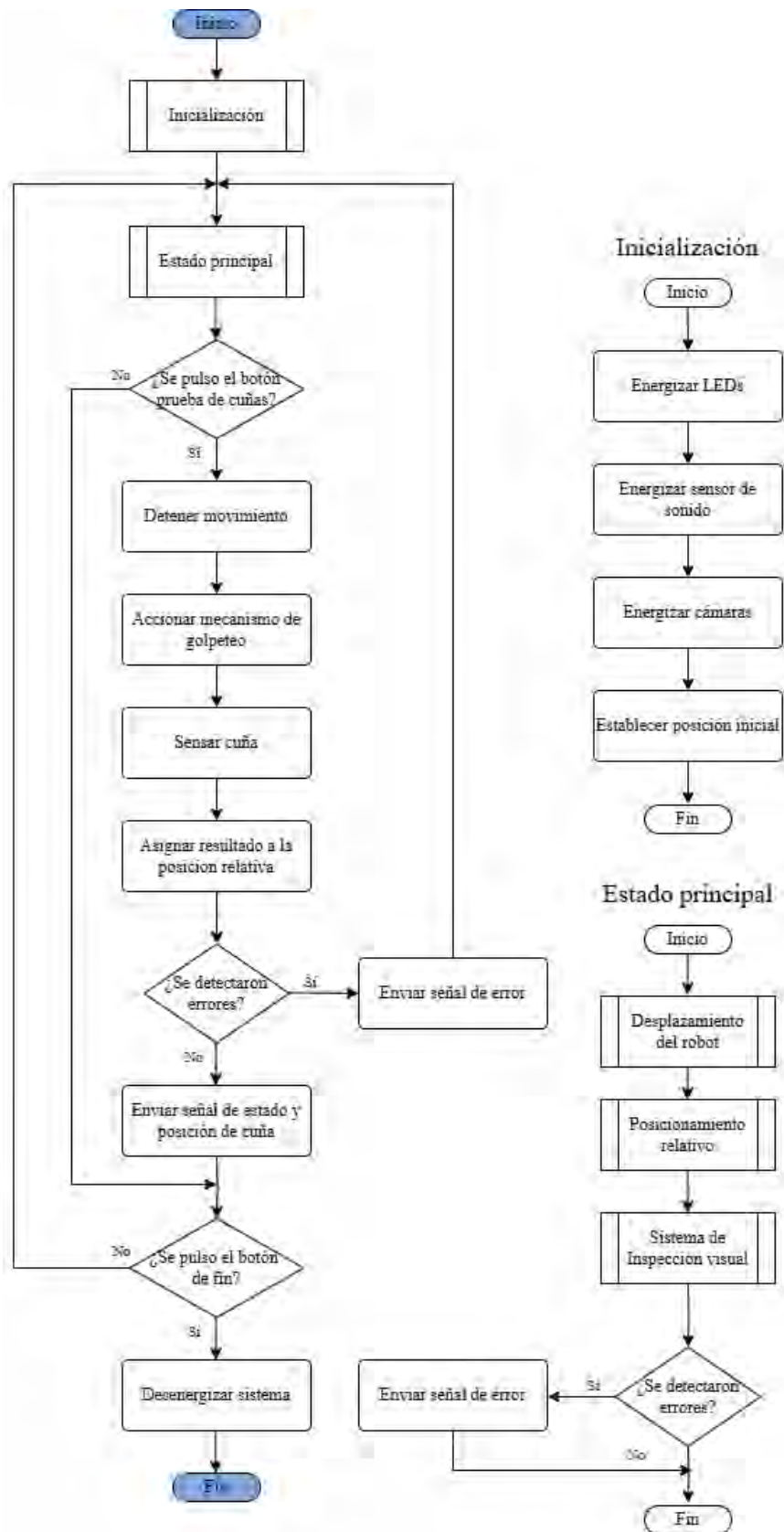


Figura 4.6. Diagrama de flujo general del controlador

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Selección de materiales

La impresión 3D es el método más adecuado para llevar la geometría compleja del diseño a la realidad a un bajo costo. Además, como se demuestra más adelante, los materiales disponibles mediante esta tecnología cumplen los requerimientos mecánicos del sistema. Debido a las dimensiones reducidas del robot y a sus tolerancias mínimas, se plantea el uso del Sinterizado selectivo por láser o SLS como técnica de impresión 3D.

El sinterizado selectivo por láser es una tecnología de fabricación aditiva que utiliza un láser de alta potencia para sinterizar pequeñas partículas de polímero en polvo y convertirlo en una estructura sólida basada en un modelo 3D (FormLabs, 2024). Esta técnica es fiable y precisa, con detalles mínimos de 0.5 mm, agujeros de 1.5 mm y tolerancia de $\pm 0.3\%$. Además, no requiere estructuras de soporte adicionales durante del proceso de impresión, reduciendo el total de material empleado y simplificando la fase de posacabado.

Debido al diseño del robot, se requiere de elementos de unión para las piezas impresas en polímero que permitan el ajuste y desajuste para fines de mantenimiento del robot. Es por esto que elementos como los tornillos autorroscantes quedan automáticamente descartados. Los insertos tipo Chevron de cobre se utilizan a menudo en plásticos frágiles, como en piezas impresas en 3D. Se insertan en el orificio diseñado y se aplica calor para derretir el plástico adyacente, el cual, al enfriarse se moldea según la forma de las ranuras externas. Las principales bondades de este tipo de unión es que no se desgastan con el uso repetido, manteniendo una larga vida útil. En la Tabla 4.1. se presenta las características más relevantes para el robot de los materiales seleccionados.

De acuerdo con la información del Estado del arte, las bandas magnéticas de neodimio ofrecen mayor estabilidad al robot al momento de desplazarse y mayor superficie de agarre que

otros métodos de adhesión. La Tabla 4.2. muestra los valores de la fuerza de sujeción que ejerce una banda de neodimio de 30 mm de ancho de acuerdo con la leyenda de la Figura 4.7.

Tabla 4.1. Comparación de materiales

Elemento	Propiedad	Material
Chasis	Nombre	Nylon 12 Powder
	Densidad	1.1 g/cm ³
	Resistencia por tracción (23 °C)	50 MPa
	Resistencia por flexión (23 °C)	66 MPa
	Alargamiento de rotura	11%
	Costo (10kg)	\$1165
Elementos de unión (Insertos y tornillos)	Material	Insertos térmicos de cobre
	Densidad	8.73 g/cm ³
	Resistencia Mecánica	315 MPa
	Temperatura de servicio	> 100 °C
	Material	Tornillos de cabeza ultraplana de acero inoxidable
	Densidad	8.0 g/cm ³
	Resistencia Mecánica	205 MPa
	Temperatura de servicio	> 100 °C
Faja	Material	Cinta magnética neodimio
	Densidad	230 g/cm
	Temperatura máxima de servicio	100 °C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2. Tabla de fuerzas de la banda magnética

Fuerzas	Banda magnética sobre hierro	Banda magnética sobre otra
Fuerza de sujeción magnética (a)	450 g/cm ²	675 g/cm ²
Fuerza de carga perpendicular (b)	112 g/cm ²	360 g/cm ²
Fuerza de carga paralela (c)	112 g/cm ²	180 g/cm ²

Fuente: Supermagnet

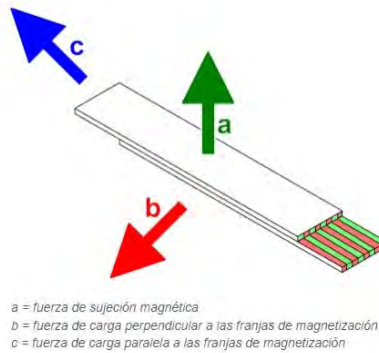


Figura 4.7. Leyenda de fuerzas de la banda magnética

Fuente: Supermagnet

4.2. Subsistema de Control

En esta sección se detallan las dimensiones del módulo de control y el funcionamiento del algoritmo de control principal, así como sus componentes y conexiones electrónicas.

4.2.1. Dimensionamiento

Para calcular el tamaño apropiado del robot se parte de las dimensiones críticas del entorno en el que operará. Es decir, se tiene en cuenta el ancho del entrehierro y el diámetro del rotor de la máquina eléctrica. Para los generadores comerciales se recomienda que el entrehierro H suele tener un tamaño de alrededor del 1% del diámetro D de la máquina.

$$H = \frac{D}{100} = \frac{r}{50} \quad (1)$$

Partiendo de la ecuación de una circunferencia de radio r se puede determinar la relación que debe de tener el largo l y el alto a máximo de la sección transversal del robot mientras se encuentra entre el rotor y el estator.

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (2)$$

$$\left(\frac{l}{2}\right)^2 + (r - H + a)^2 = r^2 \quad (3)$$

$$l = 2\sqrt{2r(H - a) - (H - a)^2} \quad (4)$$

En la Figura 4.8. se muestran las dimensiones máximas del módulo de control que permitan al sistema ingresar a entrehierros desde 21 mm, según las exigencias geométricas establecidas previamente, curvarse con las bisagras que conectan los módulos de desplazamiento y albergar todos los componentes electrónicos.

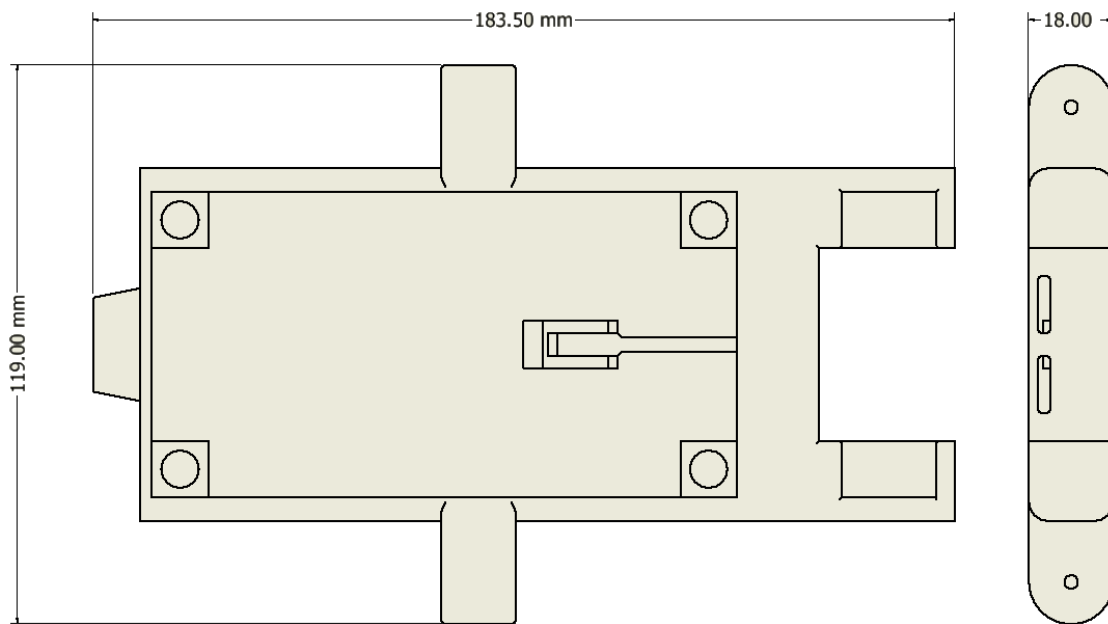





Figura 4.8. Dimensiones máximas del módulo de control

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Selección de componentes

En la Tabla 4.3. se muestran diversos microprocesadores disponibles en el mercado con sus principales características. En un primer lugar se optó por un microcontrolador; sin embargo, al utilizar el Arduino UNO, por ejemplo, se encontraron varias limitaciones. Tales como el número limitado de pines para conectar todos los sensores y actuadores sin requerir de circuitería adicional o la falta de capacidad de procesamiento al utilizar las microcámaras de alta definición y los demás actuadores simultáneamente. Además, por requerimiento, se necesita una comunicación de mayor velocidad y la capacidad de procesar imágenes de alta resolución (1080p15).

Tabla 4.3. Comparación de microprocesadores

Características	Requerimiento	Arduino UNO R3	Raspberry PI 3 Modelo B+	Raspberry Zero 2W
				
Dimensiones	<80 mm x 50 mm	69 mm x 53 mm	82 mm x 56 mm	65 mm x 30 mm
CPU		16 MHz ATmega328	1.4GHz quad-core 64-bit ARMv8 Cortex-A53	1GHz quad-core 64-bit Arm Cortex-A53
RAM		2 KB	1GB	512MB
Pines		14 pines digitales 6 pines analógicos 5 pines alimentación	40 pines GPIO	40 huellas de pines
Resolución máxima de cámara	1080 pixeles		1920x1080	1080 pixeles
FPS	15 fps		60 fps	30 fps
Velocidad		16 Mbps	300 Mbps	94 Mbps
Puertos disponibles		1 USB-B	1 Full-size HDMI 4 USB 2.0 1 Micro SD 1 Ethernet 1 CSI (cámara) 1 DSI (pantalla táctil)	1 Mini HDMI 1 Micro USB 1 CSI-2 (cámara)
Precio		\$20.99	\$35	\$15

Fuente: Elaboración propia

El controlador escogido para el sistema será el Raspberry Pi Zero 2W. Este posee características similares al Raspberry PI 3 Modelo B+ pero en tamaño reducido y con la mitad de memoria. Este sistema tiene como principal ventaja su arquitectura diseñada para manejar video en alta resolución sin necesidad de electrónica adicional, así como costar menos de la mitad. La cámara provista por la misma compañía otorga como máximo 1080 píxeles y 30 fps cumpliendo los requerimientos previamente establecidos. Además, se tiene la posibilidad de acoplar un cable ethernet para la teleoperación mediante una tarjeta adicional a la cual irá ensamblado este componente.

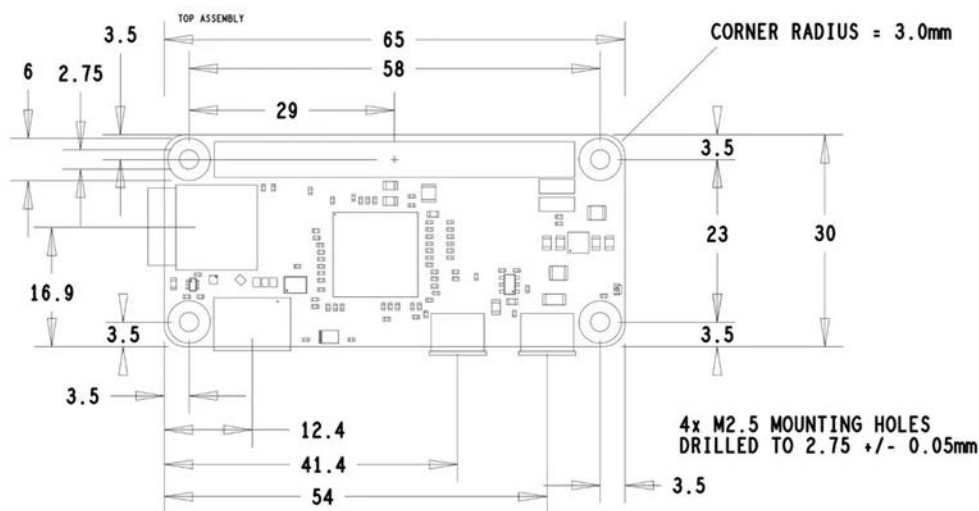


Figura 4.9. Dimensiones del Raspberry Pi Zero

Fuente: Raspberry

4.2.3. Diagrama de conexiones

Una vez seleccionada el componente electrónico principal, se procede a diseñar el diagrama de conexiones. Este contiene todos los componentes de control del robot y las conexiones pin a pin al Raspberry Zero 2W. En la Figura 4.10. se muestra como están distribuidos los pines de esta tarjeta (los cuales tienen la misma distribución para todas las tarjetas Zero) y su uso. Cabe resaltar que esta tarjeta tiene además de sus pines, un puerto micro USB, un mini HDMI y un puerto CSI del cual se conectará la cámara. En el Anexo E se muestra el diagrama completo de las conexiones entre el Raspberry, sensor de sonido, cámara, drivers, servos, actuador lineal y LEDs.

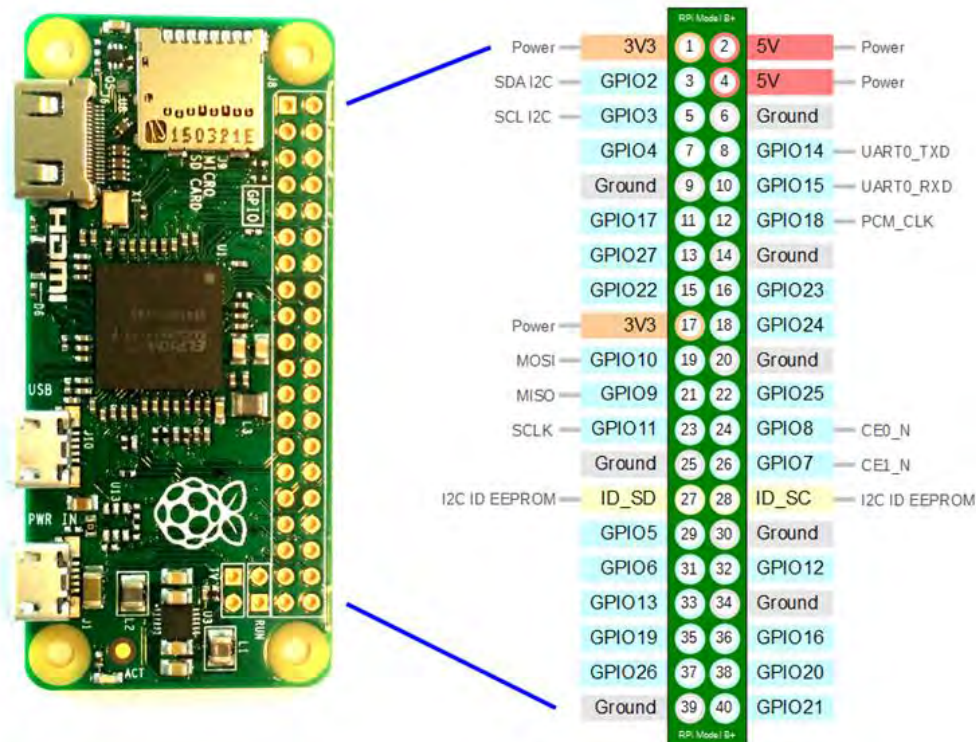


Figura 4.10. Pinout del Raspberry Pi Zero

Fuente: OAN Mantenimiento

4.2.4. Diseño de placa electrónica

Para el diseño de la placa electrónica se utilizó la herramienta EasyEDA. Esta tarjeta de 1.6 mm de espesor contiene pistas tanto en la capa superior como inferior. A ella van montadas el Raspberry Zero 2W y el sensor de sonido seleccionado. Cuenta con las conexiones necesarias para todos los sensores y actuadores, así como la entrada de alimentación y comunicación con la computadora vía ethernet. En la Figura 4.11. se muestra la vista en 3D de la tarjeta diseñada y los planos para esta se encuentran en el Anexo F.

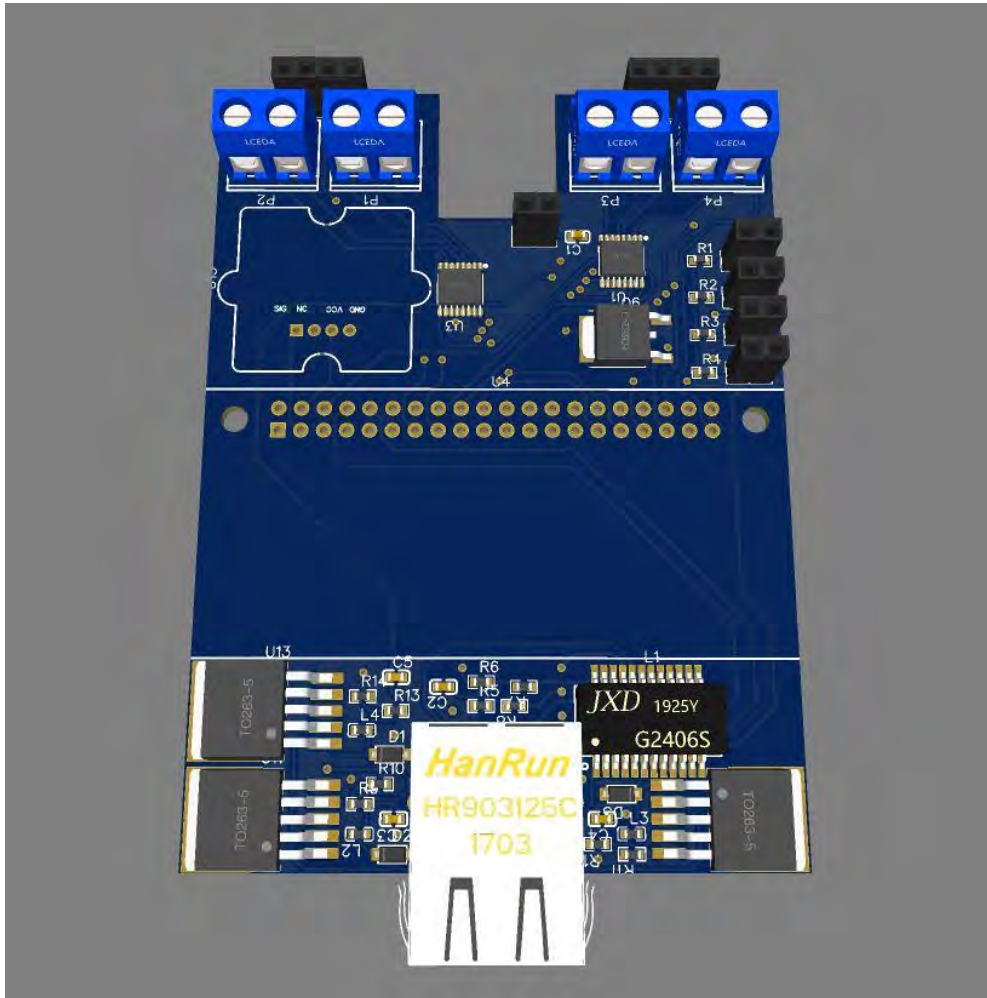


Figura 4.11. PCB del sistema

Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Algoritmo de Control

La lógica de control se desarrolla en Python al ser un lenguaje ampliamente usado en la actualidad y contar con muchas facilidades al momento de importar librerías para los microprocesadores Raspberry.

Para la función de desplazamiento se emplean *drivers* que modulan la velocidad y dirección de los motores mediante PWM. Se plantean 5 velocidades preestablecidas, las cuales están vinculadas a las teclas del 1 al 5. Para detener al robot se emplea la tecla de espacio. Por otro lado, los *encoders* convierten el movimiento de los motores en una señal eléctrica que el microprocesador luego utiliza para corregir el error posicional mediante un control PID.

Los servomotores son controlados por pulsos similares, aunque la diferencia está en que en esto se controla la posición en radianes. Las teclas W y S sirven para controlar los dos movimientos posibles de un servo y las teclas E y D sirven la misma función en el otro actuador.

La función de prueba de cuñas primero detiene al robot y activa la lectura de la entrada del sensor de sonido. Se tiene un *delay* y luego se activa el actuador lineal para finalizar con la captura de la señal sonora. Esta señal es comparada con una referencia predeterminada para identificar si el timbre de la cuña que ha sido golpeada es mayor o menor. Esto determinará si la condición de la cuña es aceptable o no. En el anexo H se encuentra la totalidad del código explicando previamente.

4.3. Subsistema de Desplazamiento

En esta sección se detallan las dimensiones del módulo de desplazamiento, así como también los cálculos de potencia necesarios para seleccionar los motores y la simulación mecánica de la pieza principal.

4.3.1. Dimensionamiento

Este subsistema supone una restricción importante de dimensiones debido al tamaño de los motores, sumado al grosor que deben tener la faja y las ruedas para generar tracción. Además, el ángulo de curvatura permitido por las bisagras determina el rango de máquinas eléctricas a las cuales el sistema puede introducirse. Las dimensiones finales son las que se pueden apreciar en la Figura 4.12.

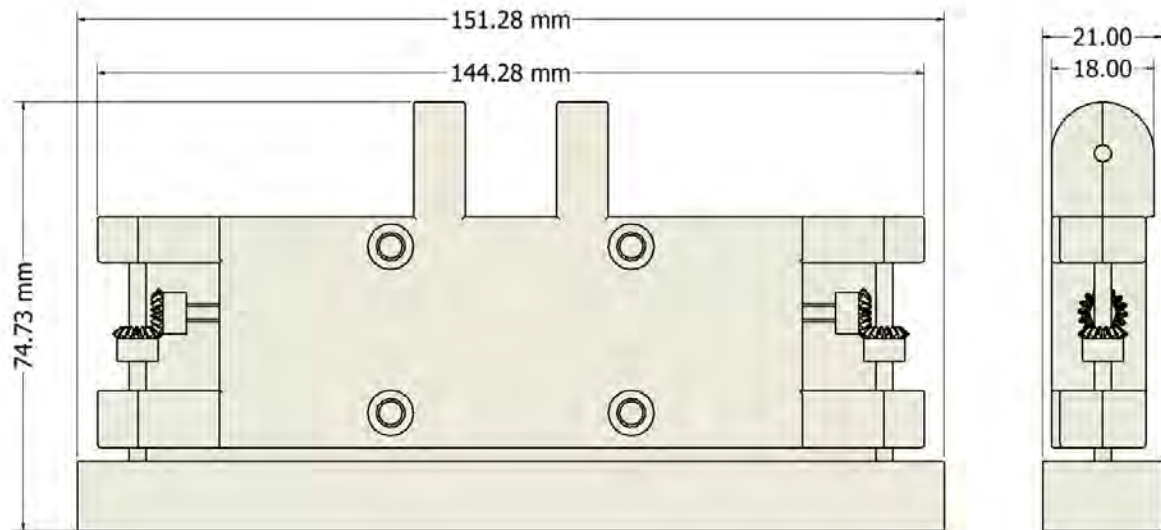


Figura 4.12. Dimensiones máximas del módulo de desplazamiento

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Cálculos de potencia

Para poder seleccionar el motor se tendrá en cuenta los parámetros de velocidad y peso establecidos en la Lista de exigencias. Estos serán 20 cm/s y 2kg respectivamente. El número de motores puede ser 2 o 4 de acuerdo a la geometría del robot y la restricción de 15 mm máximos. Los motores serán escogidos de acuerdo a los valores de potencia y torque que ofrezca.

$$P = T * \omega \quad (5)$$

$$T = F * \frac{d}{2} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{2v}{d} \quad (7)$$

Tabla 4.4. Resultados de los cálculos de potencia

Parámetros	Valor
Velocidad angular (ω)	26.67 rad/s o 254.65 rpm
Torque nominal (T)	36.75 mN.m
Potencia (P)	0.98 W

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Selección de componentes

De acuerdo a los cálculos previos se seleccionaron motores que puedan brindar la potencia, torque y velocidad necesarias para impulsar al robot habiendo escogido dos motores por módulo, es decir, 4 en total. En la Tabla 4.5. se muestran los modelos encontrados en el mercado con sus principales características.

Tabla 4.5. Comparación de motores DC

Características	Requerimiento	Maxon DCX 10 S, Brushed, ball bearings	Pololu 75:1 Micro Metal Gearmotor	CubeMars GL30
				
Dimensiones	<12 mm ancho <35 mm largo	ø10 x 31.1 mm	10 x 12 x 26 mm	ø34.5 x 15.7 mm
Peso		6 g	9.5 g	41 g
Voltaje		6 V	6 V	12 V
Corriente		0.223 A		2.3 A
Velocidad máxima	254.65 rpm	3320 rpm	410 rpm	3500 rpm
Velocidad a eficiencia máxima		11300 rpm	340 rpm	2200 rpm
Torque máximo	36.75 mN.m	1.46 mNm	1.3 kg.cm ó 127.4 mN.m	280 mN.m
Torque a eficiencia máxima		0.992 mNm	0.23 kg.cm ó 22.54 mN.m	80 mNm
Máxima potencia	0.98 W	1 W	1.4 W	22.5 W
Potencia a eficiencia máxima		0.58 W	0.8 W	19 W
Precio		€97.82	\$15.95	\$50.99

Fuente: Elaboración propia

Tanto los motores de Maxon como CubeMars tienen una increíble calidad, sin embargo, ya sea por dimensiones, exceso de potencia/torque y precio, incluso los mejores modelos fueron descartados. Además, todos ellos requieren de una caja reductora para regular la velocidad lo que aumentaría aún más el peso del robot y restringiría la forma de acoplar las ruedas al motor. Es por esto que se tomó en cuenta el extenso catálogo que tiene la marca Pololu. Dentro de esta se seleccionó el motor Pololu 75:1 Micro Metal Gearmotor de alta potencia y 6 voltios (código de producto 2361) el cual ya tiene una caja reductora incorporada la cual brinda la potencia y velocidad necesarias para el proyecto.



Figura 4.13. Motor Pololu 75:1 de alta potencia

Fuente: Pololu

Otra ventaja es que la misma marca ofrece componentes compatibles como los drivers y encoders. Para controlar la alimentación de los motores se seleccionó el driver DRV8833 Dual Motor Driver Carrier que fue diseñado para trabajar en conjunto. Este componente puede operar 2 de ellos en simultáneo por lo que el sistema requerirá un driver por módulo de desplazamiento.

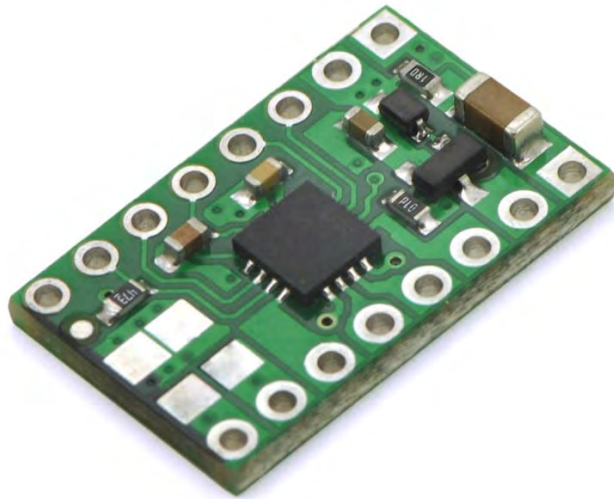


Figura 4.14. Driver DRV8833

Fuente: Pololu

Tabla 4.6. Especificaciones del driver

Especificaciones	Valor
Dimensiones	12.7 x 20.32 mm
Peso	1 g
Rango de voltaje	2.7 - 10.2 V
Corriente de salida	1.2 A
Precio	\$6.95

Fuente: Elaboración propia

Para medir la velocidad se seleccionó el *encoder* magnético de entrada frontal 12 CPR. Estos *encoders* se acoplan al motor como se muestra en la Figura 4.15.b. con los pines paralelos al eje del motor. Existe otra versión que tiene el acople con los pines perpendiculares al eje para otro tipo de conexión.

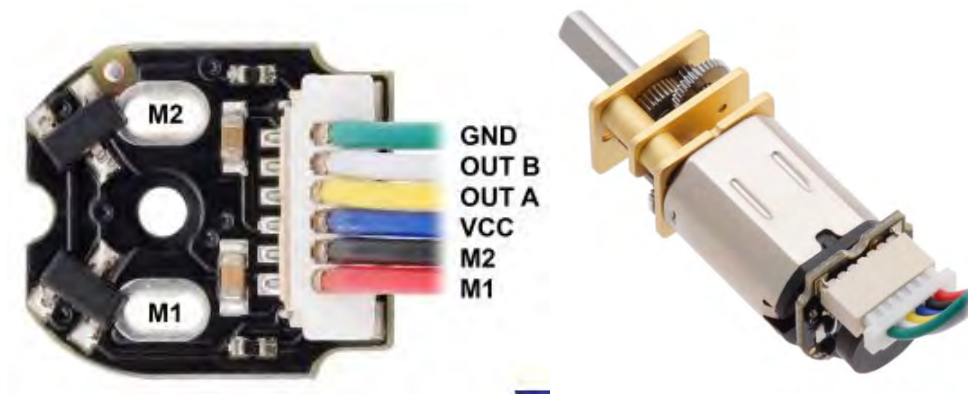


Figura 4.15. a) Encoder 12CPR con sus conexiones b) Encoder montado al motor Pololu

Fuente: Pololu

Tabla 4.7. Especificaciones del encoder

Especificaciones	Valor
Dimensiones	11.6 x 12.8 mm
Peso	1.5 g
Rango de voltaje	2.7 - 18 V
Conexiones	6 pines JST SH-type
Precio	\$9.95

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Algoritmo PID para el desplazamiento

Se ha seleccionado un controlador Proporcional-Integral-Derivativo para corregir el error posicional que pueda tener el robot al desplazarse por el entrehierro de una máquina eléctrica debido a que es ideal para aplicaciones que necesiten una rápida respuesta a perturbaciones como es el caso del sistema elaborado en la presente tesis. Además, le otorga estabilidad y mantiene el rendimiento del mismo, ajustando constantemente la salida en función del error medido. La Figura 4.16 muestra el diagrama de bloques de un controlador PID integrado a la solución óptima; en donde la referencia está dada por los comandos del teclado, los motores del robot son la “planta”, el error se produce mientras este se desplaza por la superficie irregular del entrehierro y los *encoders* ejercen la función de “sensores”.

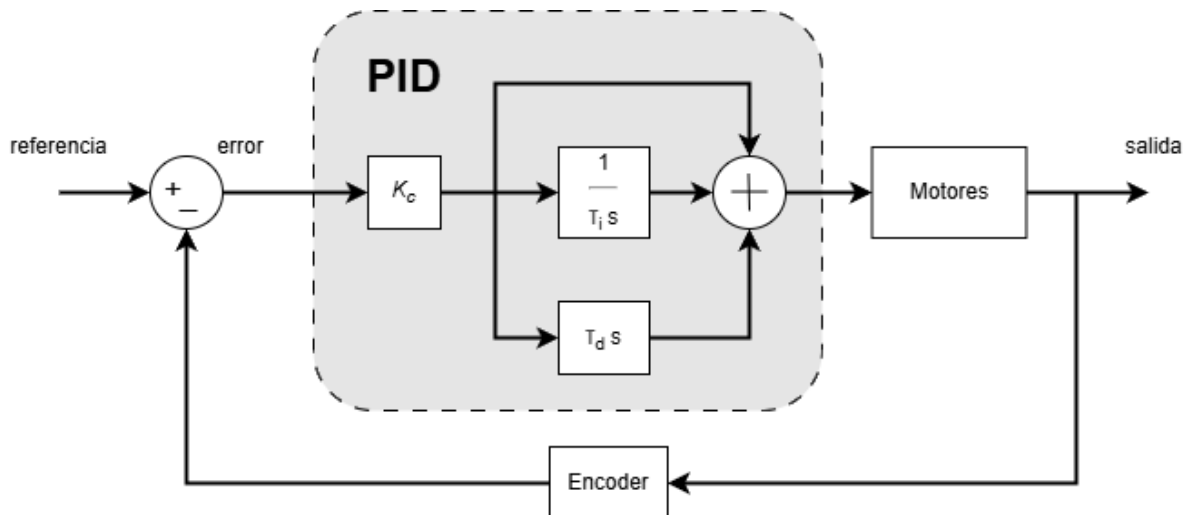


Figura 4.16. Diagrama de bloques PID

Fuente: Elaboración propia

Para representar la relación entre la entrada y la salida de la planta en el dominio de la frecuencia se utiliza una función de transferencia, la cual se describe en la ecuación 8. Esta representa la relación entre las distintas propiedades mecánicas que actúan en un motor DC para convertir energía eléctrica en cinética, en radianes por segundo. En el caso de un control PID, esta función tiene la forma descrita en la ecuación 9. Considerando los requerimientos del sistema, se calibra al controlador con una sobreoscilación máxima del 2.5% y un tiempo de establecimiento de 1 segundo.

$$G(s) = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad (8)$$

$$PID(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{\alpha \tau_d s + 1} \right) \quad (9)$$

En la Figura 4.17 se muestra gráfica de respuesta en el tiempo de paso unitario de la función de transferencia del lazo cerrado, tras haberla ajustado según los parámetros antes mencionados. En la Figura 4.18 se muestra la gráfica de bode, mostrando la estabilidad del sistema utilizando el controlador.

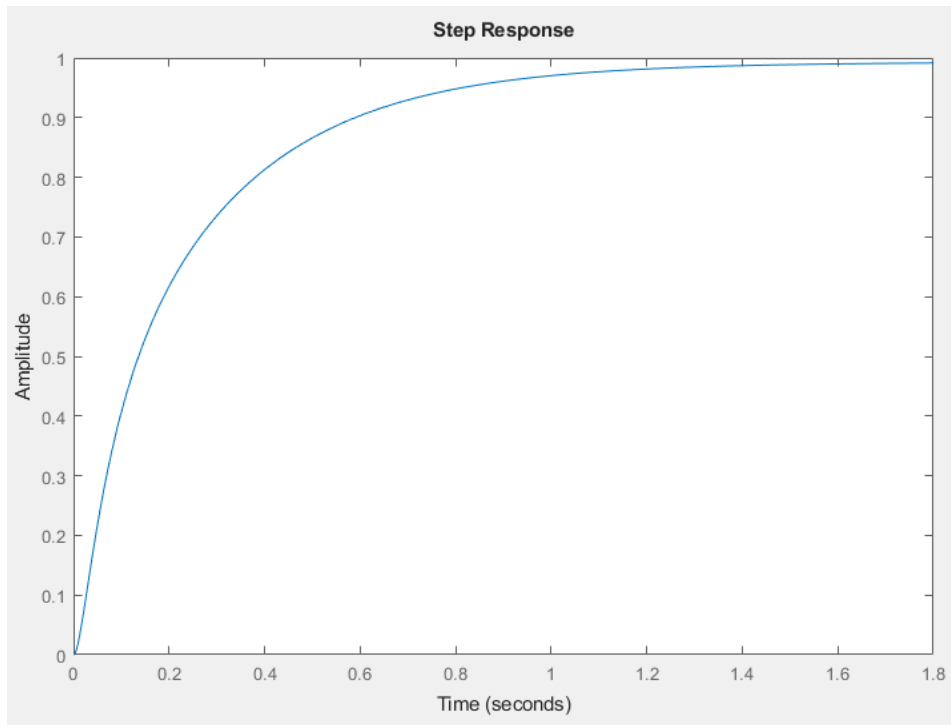


Figura 4.17. Respuesta de paso unitario con PID

Fuente: Elaboración propia

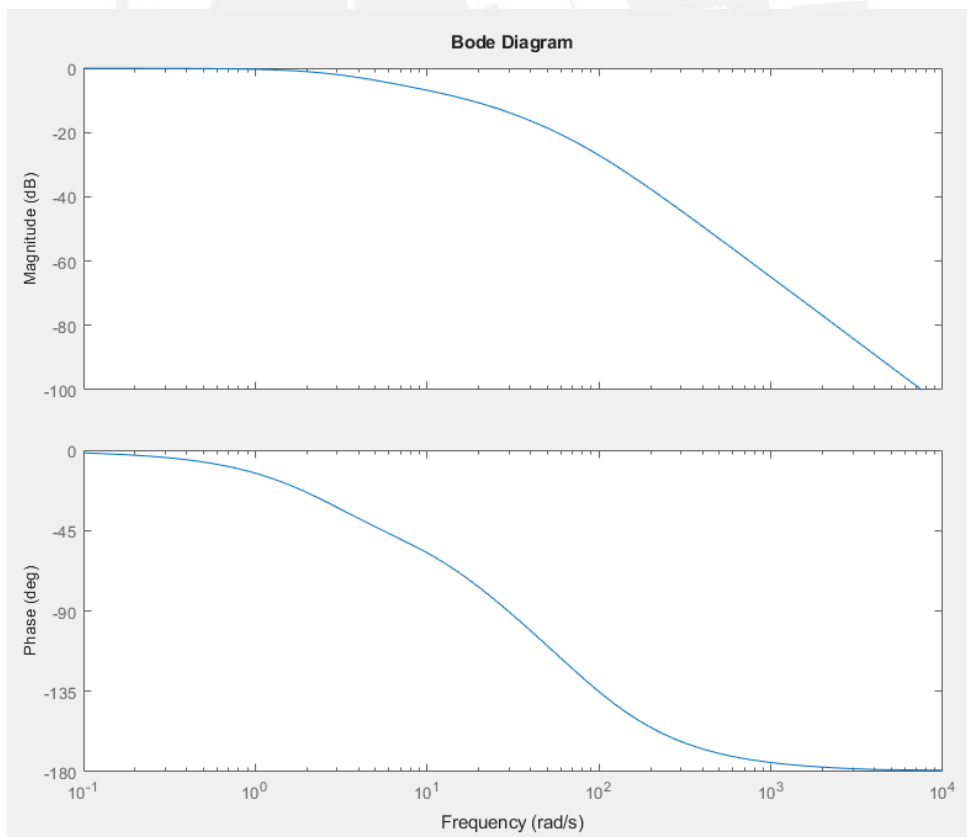


Figura 4.18. Diagrama de Bode del sistema con PID

Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Simulación mecánica

Se quiere comprobar la seguridad de la unión de las dos piezas principales del subsistema de desplazamiento simulando carga en las ruedas, de 5 N para hallar los esfuerzos y deformaciones máximas admisibles para los requerimientos establecidos. A partir del DCL mostrado en la Figura 4.19. de las ruedas se encuentran las reacciones en las dos piezas que conforman el chasis de este módulo.

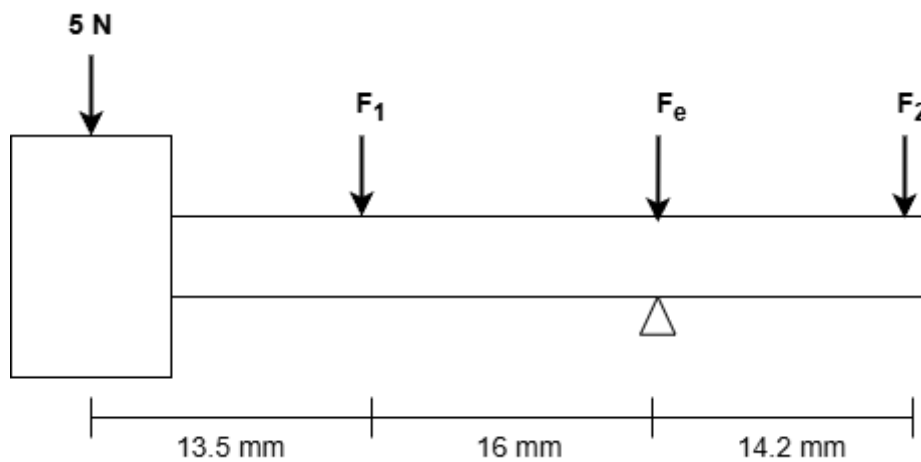


Figura 4.19. Diagrama de cuerpo libre de la rueda y eje

Fuente: Elaboración propia

$$F_1 + F_2 + F_{engranaje} + 5 = 0 \quad (10)$$

Σ de momentos lado izquierdo:

$$5 * 29.5 + F_1 * 16 = 0 \quad (11)$$

$$F_1 = -9.22 \text{ N} \quad (12)$$

Σ de momentos lado derecho:

$$F_2 = 0 \text{ N} \quad (13)$$

$$F_e = 4.22 \text{ N} \quad (14)$$

Debido a la dirección, la fuerza F_1 se evalúa en la pieza inferior, mientras que la fuerza F_e estará en la superior. Con estos datos se hallan las reacciones en las áreas de contacto con las uniones atornillada, el inserto y la cabeza de tornillo, respectivamente. Partiendo de estos resultados se plantean simulaciones en el software Inventor Professional 2025 con los componentes cargados en los puntos correspondientes y un apoyo fijo en las superficies donde se acoplan las bisagras.

Adicionalmente para la pieza inferior, se utilizan precargas distribuidas para simular el peso de los motores DC. Utilizando el método de Von Mises para hallar los esfuerzos en el elemento, se determinó que las cargas máximas de esfuerzo se encuentran en los apoyos de las bisagras, con un valor máximo de 5 MPa (Figura 4.20. a). Por otro lado, la deformación máxima fue de 1.129 mm en el primer apoyo del eje de la rueda, tal y como se muestra en la Figura 4.17. b.

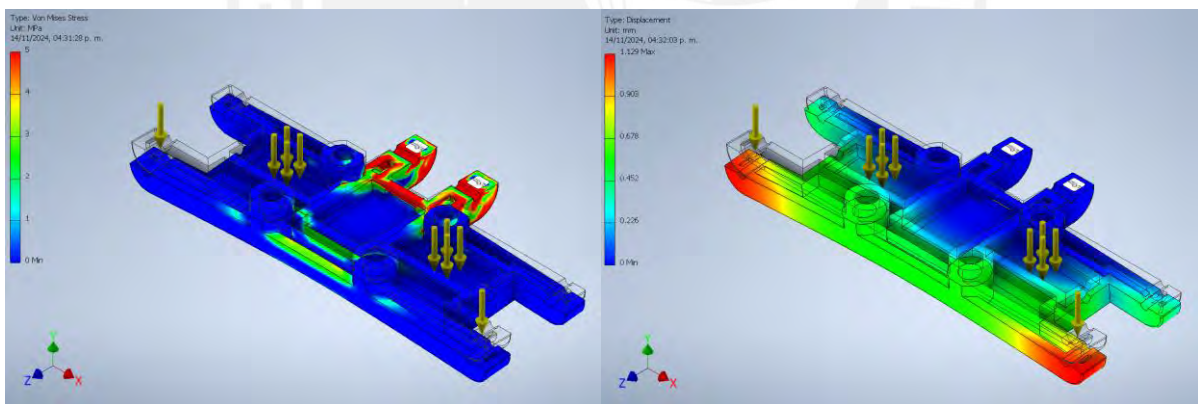


Figura 4.20. a) Esfuerzos en el elemento superior b) Deformaciones en el elemento superior

Fuente: Elaboración propia

Para la pieza superior se determinó que las cargas máximas de esfuerzo se encuentran en los apoyos de los tornillos, como era esperado, con un valor máximo de 1 MPa (Figura 4.21. a). Finalmente, la deformación máxima fue de 0.2677 mm en los extremos del elemento, tal y como se muestra en la Figura 4.21. b.

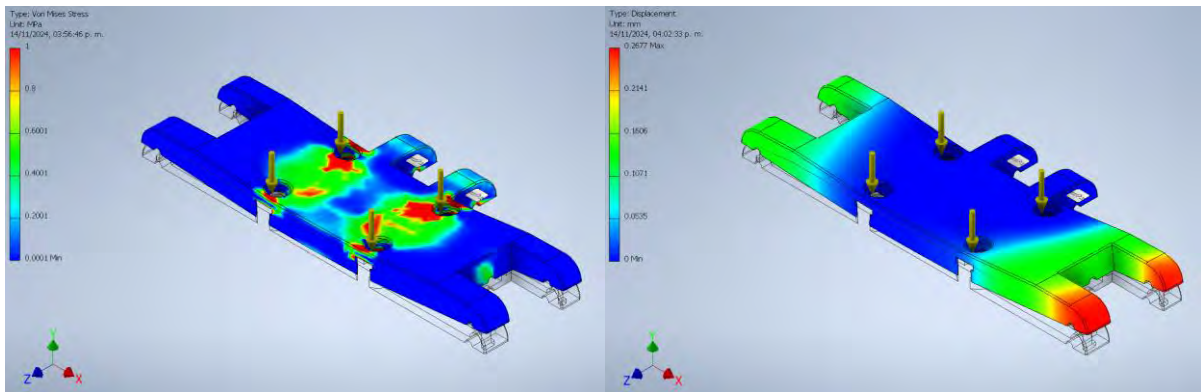


Figura 4.21. a) Esfuerzos en el elemento superior b) Deformaciones en el elemento superior

Fuente: Elaboración propia

4.4. Subsistema de Inspección Visual

En esta sección se detallan los componentes necesarios para la inspección visual de las cuñas del estator de las máquinas eléctricas. Estos son principalmente la selección de una cámara adecuada, proveer de suficiente iluminación y de un mecanismo de posicionamiento.

4.4.1. Selección de cámara

Para garantizar una correcta inspección visual se debe seleccionar una cámara de 1280x1024 píxeles de resolución y 15 fps tal cual se especificó en la sección de requerimientos. Además de que las dimensiones de esta no deben sobrepasar los 15 mm. La marca Raspberry ofrece una cámara compatible con sus microprocesadores, sin embargo, esta viene en una tarjeta demasiado grande para trabajar con ella. Por este motivo se seleccionó una alternativa en la cámara Sensor Spy de la marca ArduCAM basada en el sensor Omnivision OV5647. Esta cámara cumple con los requerimientos tal y como se muestra en la Tabla 4.8.



Figura 4.22. Cámara ArduCAM Sensor Spy con cable flexible

Fuente: ArduCAM

Tabla 4.8. Especificaciones de la cámara

Especificaciones	Valor
Dimensiones	300 mm x 6 mm, incluido cable flexible
Peso	3 g
Campo de visión	62° Horizontal, 47° Vertical
Resolución	2592 × 1944 píxeles
Calidad de video	1080p 30 fps, 720p 60fps, 480p 90fps
Precio	\$29.99

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Selección de actuadores

Los servomotores destinados a posicionar las cámaras no estarán sometidos a carga por lo que el único requerimiento son sus dimensiones. En la Tabla 4.9. se muestran los modelos encontrados en el mercado con sus principales características.

Tabla 4.9. Comparación de servomotores de posicionamiento

Características	Requerimiento	RSF-Supermini	Sub-micro POLOLU-1040
			
Dimensiones	<30 mm largo <12 mm ancho	ø14 x 47 mm	20.2 x 8.5 x 25 mm
Peso		31 g	4.4 g
Rango de voltaje		24 V	4.8 - 6 V
Corriente de operación		0.56 - 0.66 A	4 - 5 mA
Precio		\$25	\$5.95

Fuente: Elaboración propia

Según las dimensiones se escogieron los sub-micro POLOLU-1040, ya que permite de manera muy sencilla acoplarlos a la carcasa del sistema y montarle una cámara pues este componente incluye asas para el servo. Además, el peso y costo son mucho menores comparados con otros productos disponibles en el mercado. En la Figura 4.23. se presentan los gráficos que muestran dimensiones del servomotor.

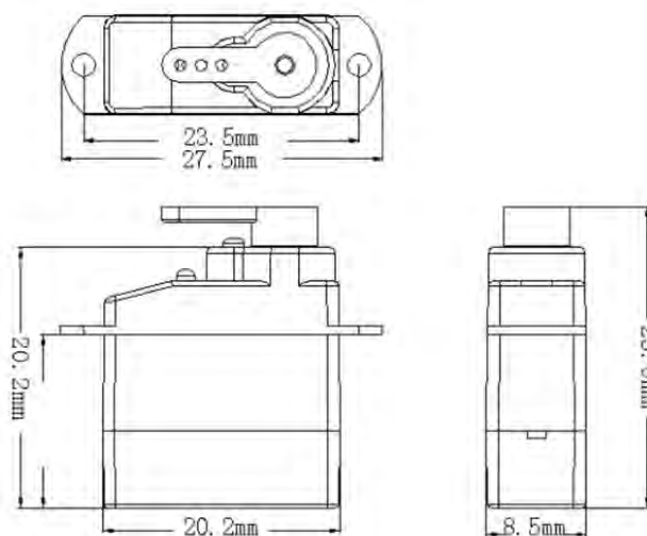


Figura 4.23. Servo Pololu 1040

Fuente: TME

Para iluminar el entorno y garantizar una inspección visual efectiva se emplearán LEDs de tipo SMD debido a su tamaño reducido y mayor tiempo de vida en comparación a LEDs similares. El ProLight Opto PJ2N-FFVE servirá para este propósito, proporcionando luz blanca.



Figura 4.24. LED PJ2N-FFVE

Fuente: TME

Tabla 4.10. Especificaciones del LED SMD

Especificaciones	Valor
Dimensiones	3.2x 3 x 0.55 mm
Luminosidad típica	60 lm
Voltaje máximo	3.6 V
Corriente máxima	150 mA
Precio (10x)	\$0.4

Fuente: Elaboración propia

4.5. Subsistema de Prueba de cuñas

En esta sección se detalla el proceso de diseño del sistema para la prueba de cuñas. Esta es la función más importante del robot junto con la inspección visual y el objetivo es estandarizar una prueba que actualmente se realiza de manera empírica.

4.5.1. Diseño del sistema

El diseño parte desde la información recopilada sobre la prueba hecha empíricamente con una herramienta metálica y el oído de un operario. Este subsistema reproduce un golpeo similar solo que controlado y mide su respuesta sonora con precisión para determinar su estado, es decir, si está floja o tiene un ajuste correcto. Para esto se emplea un actuador lineal y un sistema de brazo de palanca para transmitir la fuerza tal cual como se muestra en la Figura 4.25.

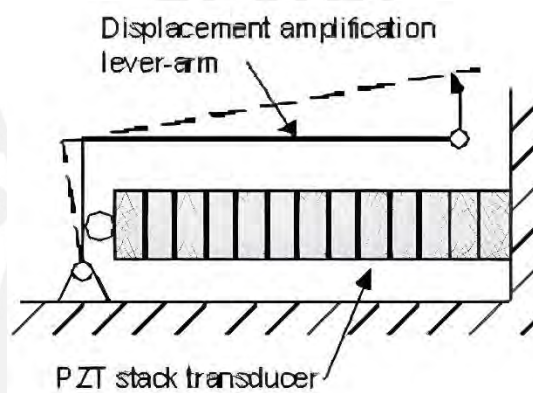


Figura 4.25. Sistema amplificador de brazo de palanca

Fuente: Dynamic Structures & Materials

4.5.2. Cálculos de potencia

El DCL de la Figura 4.26. muestra la configuración de las fuerzas en el elemento de golpe. La fuerza que golpea a la cuña se representa con la F mientras que la fuerza que ejecuta el actuador es f . Además, según la geometría del elemento de golpe, su lado de menor longitud se denota con la letra d mientras que su lado mayor es D . Por último, se tiene la carrera del actuador (δ) y el ángulo de giro del elemento de golpe en función de este (α).

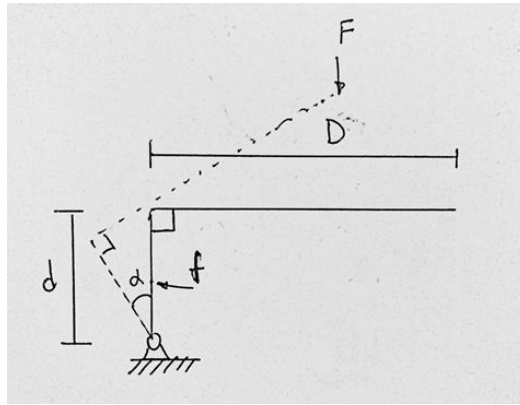


Figura 4.26. Diagrama de cuerpo libre del elemento de golpe

Fuente: Elaboración propia

$$F * (D * \cos(\alpha) - d * \text{sen}(\alpha)) = f * \left(d * \frac{\cos(\alpha)}{2} \right) \quad (15)$$

$$\text{sen}(\alpha) = 2 * \frac{\delta}{d} \quad (16)$$

$$\cos(\alpha) = \left(\frac{2}{d} \right) * \sqrt{\frac{d^2}{4} - \delta^2} \quad (17)$$

$$F = f * \frac{\sqrt{\frac{d^2}{4} - \delta^2}}{2 * \frac{D \sqrt{\frac{d^2}{4} - \delta^2}}{d} - 2 * \delta} \quad (18)$$

Se requiere una fuerza de golpe mínima aproximada de 5 N para que genere una intensidad de sonido considerable. Por otro lado, las consideraciones dimensionales permiten un ancho del elemento de golpe máximo de 12 mm y de largo se usarán 28 mm. Empleando las fórmulas anteriores se calcula una fuerza requerida del actuador de 16 N y una carrera de 4 mm.

4.5.3. Selección de materiales

Convencionalmente se utilizan herramientas comunes para realizar esta prueba manualmente. Estos suelen ser hechos de acero con aleaciones de cromo, tungsteno o carbono dependiendo del uso que se le vaya a dar. Para el caso de esta investigación, se empleó una aleación de aluminio para realizar las pruebas experimentales. Se deben realizar mayores experimentos para determinar el material óptimo de este elemento pues además de tener buena resistencia y moderada deflexión, se debe tomar en cuenta el timbre de los sonidos producidos al impactar contra las cuñas del estator, las cuales son hechas generalmente de material cerámico.

4.5.4. Simulación mecánica

Con las fuerzas calculadas previamente y empleando el aluminio como material base, se calcula la deflexión y esfuerzo máximo que deberá soportar el elemento de golpe con una simulación en el software Inventor Professional 2025. Cabe resaltar que estos son valores absolutos máximos que se realizan en el instante del golpe, no son valores de carga continua sin embargo servirán para hallar la fatiga más adelante. Utilizando el método de Von Mises para hallar los esfuerzos en el elemento, se halló que el brazo pequeño estará sometido a mayor carga siendo la máxima 29.42 MPa cerca del punto de apoyo (Figura 4.27.), el cual se considera fijo para hallar los valores máximos al momento del impacto. En cuanto a la deflexión máxima, ésta se encuentra en el extremo del brazo mayor y tiene una magnitud de 0.2 mm (Figura 4.28.).

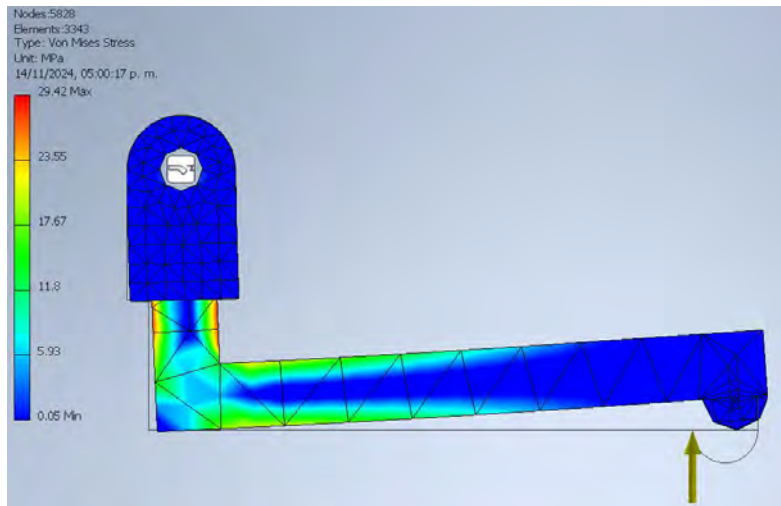


Figura 4.27. Esfuerzos en el elemento de golpe

Fuente: Elaboración propia

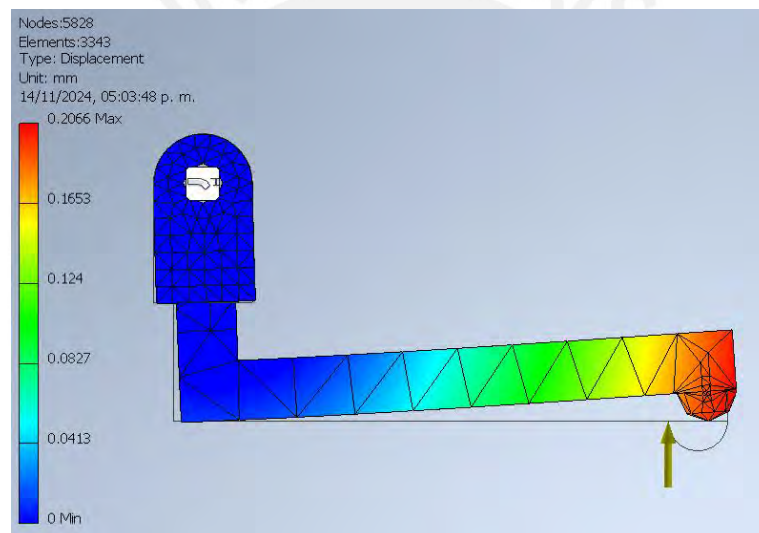


Figura 4.28. Deformaciones en el elemento de golpe

Fuente: Elaboración propia

4.5.5. Selección de componentes

Para accionar el golpeo se requiere de un actuador que cumpla los requerimientos de carrera y fuerza manteniéndose en las dimensiones limitadas. Se contemplaron, actuadores piezoeléctricos y actuadores lineales, pero estos fallaban en carrera y fuerza respectivamente. Por esto se eligió un actuador solenoide como es el caso de los de la serie LAH0 de Sensata Technologies de la cual se seleccionó su componente más pequeño, el modelo LAH04-10-000A. En la Tabla 4.11. se muestra las especificaciones del actuador.



Figura 4.29. Actuador lineal de cuerpo cilíndrico

Fuente: Sensata Technologies



Tabla 4.11. Especificaciones del actuador lineal

Especificaciones	Valor
Dimensiones	9.5 x 25.4 mm
Fuerza máxima	15.5 N
Carrera máxima	4 mm
Voltaje de trabajo	5.1 V
Potencia	5.1 W
Precio	\$401

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.12. se muestran dos sensores de sonido de características similares. Para el caso de estos componentes el requerimiento principal es la sensibilidad y el rango de frecuencias que detecta. Es por esto que se seleccionó un sensor de sonido de relativa alta resolución para captar los cambios sutiles en tono e intensidad como es el Grove Sensor LM358.

Tabla 4.12. Comparación de sensores de sonido

Características	Requerimiento	Waveshare 9534	Grove Sensor LM358
			
Dimensiones		18.67 x 34.42 x 6 mm	24 x 20 x 9.8 mm
Sensitividad	60 dB	52 dB	56~60 dB
Rango de frecuencias	15 - 20 kHz	50 Hz - 20kHz	16 - 30 kHz
Rango de voltaje		3.3 - 5.3 V	4 - 12 V
Precio		\$3.89	\$5.40

Fuente: Elaboración propia

4.6. Subsistema de Energía

Esta sección busca diseñar la circuitería necesaria para que todos los componentes trabajen eficientemente y calcular el consumo de energía del sistema, tanto por sus elementos pasivos como activos.

4.6.1. Cálculos de potencia

En un principio se pensó que la alimentación del sistema fuera dada mediante una conexión simple al tomacorriente, sin embargo, esto presenta problemas en el diseño como la necesidad de más circuitería para reducir el voltaje y convertir en corriente continua. Como alternativa se propone la alimentación vía ethernet o *Power over Ethernet*, por sus siglas en inglés. Al transmitir alimentación y datos a través del mismo cable, la PoE elimina la necesidad de cableado adicional y, así, permite ahorrar en costos y cableado redundante [Leviton, 2021]. De acuerdo a voltajes estandarizados de alimentación, se escoge una tensión de 12 voltios.

En la Tabla 4.13. se muestra la potencia consumida de los elementos seleccionados considerando una tensión de trabajo uniforme entre todos los componentes cuyo rango de voltajes lo permitan. Para llegar a estas tensiones se emplean circuitos de reducción de tensión, los cuales son detallados en la siguiente sección.

Tabla 4.13. Cálculos de potencia

Componente	Tensión de trabajo	Corriente de trabajo	Potencia consumida
Raspberry Pi Zero 2 W	5.1 V	2.5 A	12.75 W
Motores DC (4x)	6 V	133.33 - 233.33 mA	0.8 - 1.4 W
Drivers (2x)	6 V	1.2 A	7.2 W
Encoders (4x)	5 V	133.33 - 233.33 mA	0.8 - 1.4 W
Adaptador de cámara	5.1 V	1.5 A	7.65 W
Cámaras (2x)	3.3 V	121.21 - 424.24 mA	0.4 - 1.4 W
Servomotores (2x)	5 V	4 - 5 mA	24 - 30 mW
LEDs (4x)	3.6 V	150 mA	0.54 W
Actuador solenoide	5.1 V	1 A	5.1 W
Sensor de sonido	5 V	5 mA	25 mW

Fuente: Elaboración propia

Incluyendo todos los componentes descritos en la tabla anterior y considerando los elementos activos y pasivos necesarios para brindar dichas tensiones y corrientes, los cuales se explican en la sección siguiente, se tiene una potencia consumida por el sistema total de 43 watts.

4.6.2. Diseño de circuito de alimentación

Para alimentar a todos los componentes se debe regular la tensión de entrada mediante. Para esto se seleccionó el componente reductor de tensión LM2595 en su versión ajustable. Utilizando el Proteus 8 se realizaron simulaciones eléctricas mostrando el voltaje y corriente de salida. El circuito, mostrado en la Figura 4.30., emplea el reductor como base para brindar una tensión de salida de 6 voltios. En la Figura 4.31. se muestra el circuito para reducir la

alimentación de 12 a 5.1 voltios y la única diferencia entre estos dos es la proporción entre $R1$ y $R2$. Del mismo modo, si $R1$ fuera una resistencia de $1.94\text{ k}\Omega$ la tensión de salida sería 3.6 voltios.

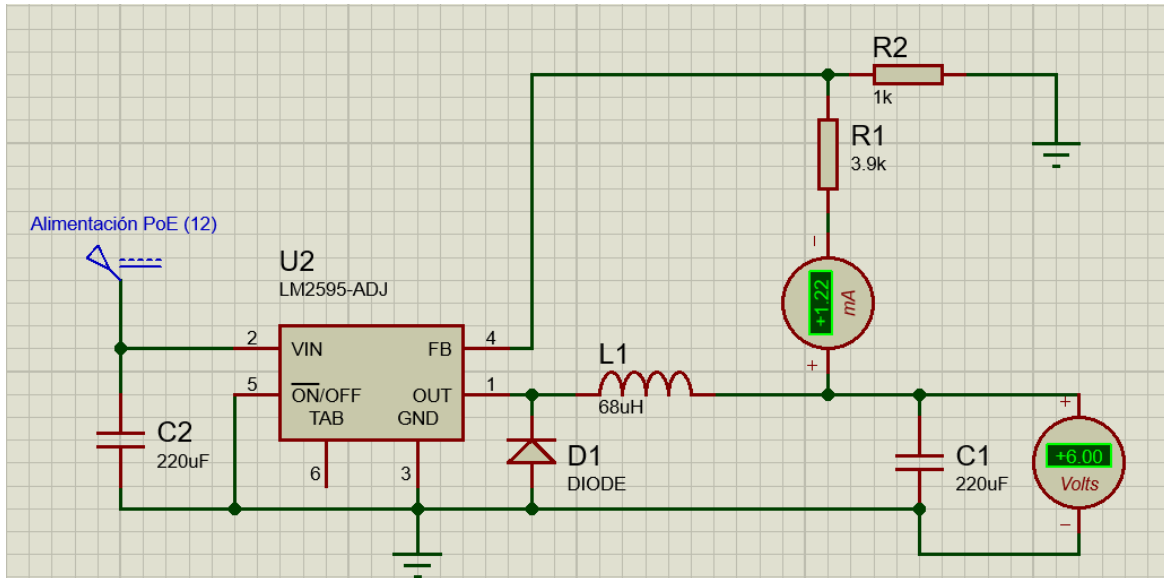


Figura 4.30. Simulación del step down de 12 V a 6 V

Fuente: Elaboración propia

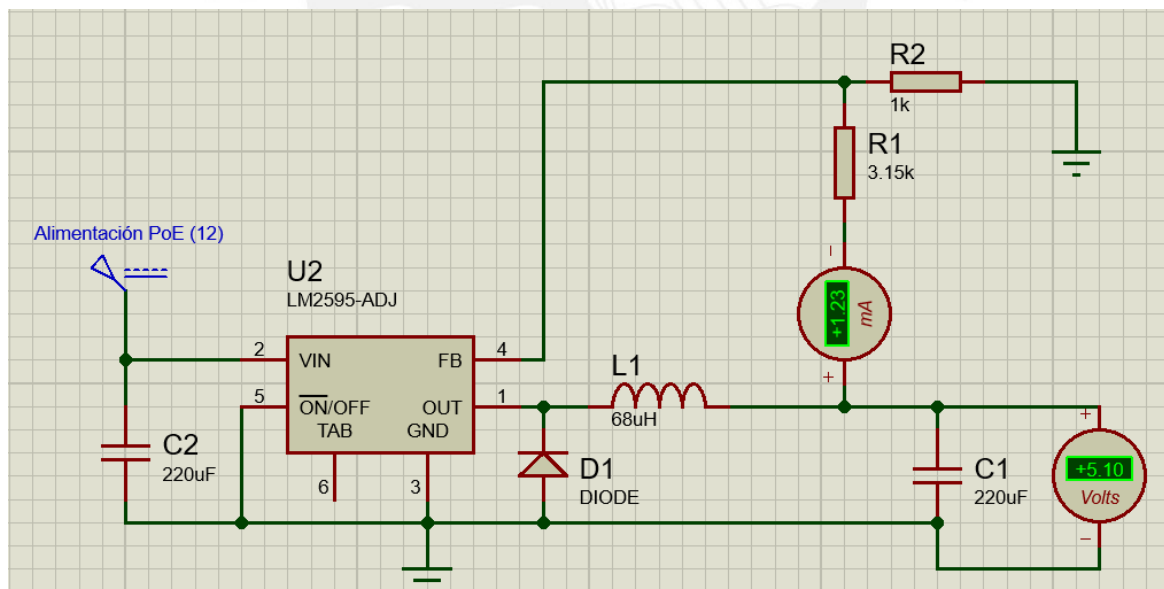


Figura 4.31. Simulación del step down de 12 V a 5.1 V

Fuente: Elaboración propia

4.7. Protocolo de Comunicación

La comunicación serial transmite la información de manera secuencial en forma de una cadena de bits. Todas las computadoras incluyen puertos seriales y estos pueden ser de distintos protocolos. Los más comunes son RS232 y RS485 normadas por los estándares EIA. El primero se utiliza para organizar los datos que fluyen desde un terminal de datos a un receptor de datos. En este protocolo la distancia entre los terminales influye en la velocidad de transmisión de información. Así como también tiene la capacidad de enviar y recibir datos simultáneamente, a esto se le conoce como modo dúplex. Por otro lado, el protocolo RS485 usa una topología multipunto por lo que permite mayor flexibilidad en los terminales y receptores, hasta 32 cada uno. Además, tiene buena protección contra el ruido producido por interferencias y un voltaje de trabajo menor. A continuación, en la Tabla 4.14. se muestran las principales características de estos dos protocolos.

Tabla 4.14. Comparación de protocolos seriales

Parámetros	RS232	RS485
Modo de funcionamiento	Simple o dúplex	Simple o semidúplex
Máxima distancia del cable	15.24 metros	1219.2 metros
Máxima velocidad de transmisión	20 kbits/s	10 kbits/s
Valores lógicos típicos	± 5 a ± 15 V	± 1.5 a ± 6 V
Sensibilidad del receptor	± 3 V	± 200 mV

Fuente: Elaboración propia

4.8. Diseño de la Interfaz

A continuación, se presenta la descripción de la interfaz de teleoperación a la cual tiene acceso el usuario. En la Figura 4.32. se muestra la pantalla al ingresar al programa. En ella se muestran las entradas de video provista por las dos cámaras, sliders que controlan la velocidad del robot y la posición de las cámaras, así como una representación en 3D de la ubicación del robot relativa al motor a inspeccionar. Para esto primero se debe cargar un motor compatible con el sistema dentro del catálogo disponible una vez se pulsa el botón “Catálogo de motores”.

Una vez seleccionada la máquina eléctrica, se indica dónde tiene que ser posicionado el robot y a partir de esa ubicación se calcula la posición gracias a los encoders de los motores. Además, al costado de los botones de minimizado y cierre de la ventana, se puede desplegar una pestaña de controles para indicar los controles correspondientes.

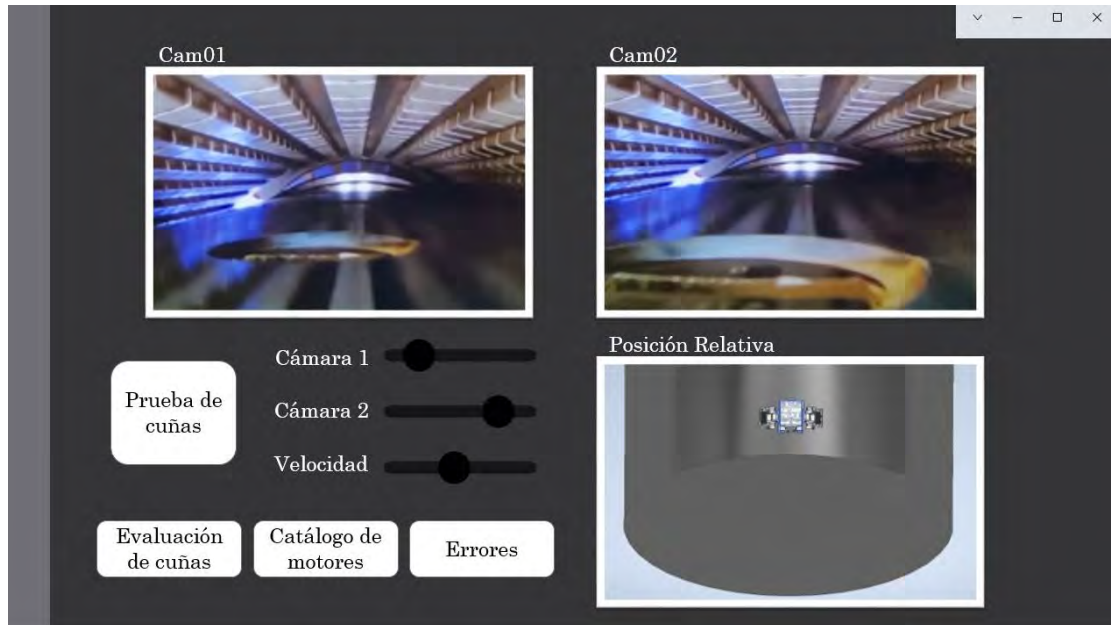


Figura 4.32. Ventana principal de la interfaz

Fuente: Elaboración propia

El robot se desplaza por el entrehierro y cuando se ubica por encima de una cuña se pulsa el botón “Prueba de cuñas” para activar el golpeteo y el sensado de la respuesta sonora. Los resultados de esta prueba se visualizan en la ventana mostrada en la Figura 4.33. En ella se tienen las pruebas ordenadas por filas y columnas ordenadas según la información posicional y el modelo precargado del motor en cuestión. También se indica el resultado de la prueba y se asigna una calificación numérica para su estado de ajuste, así como un color para mejor visualización. Los colores asignados son configurables y pueden tener el rango de calificaciones deseado.



Figura 4.33. Ventana de evaluación de cuñas

Fuente: Elaboración propia

4.9. Análisis de Costos

En esta sección se detallan los costos por componente seleccionado, así como la fabricación de aquellos que deban ser manufacturados a medida y adicionando el costo de diseño. Cabe resaltar que el tipo de cambio de dólares a soles utilizado fue de S/ 3.86 a la fecha del lunes 15 de noviembre de 2024 [Banco de la Nación, 2024].

4.9.1. Costos de componentes

En esta sección se hace un recuento de todos los componentes tanto eléctricos como mecánicos seleccionados para cumplir las funciones del robot. Todos estos elementos se encuentran en el mercado a excepción de la PCB. Para hallar su costo, se hizo una sumatoria del precio de todos sus componentes, el costo de ingeniería se toma en cuenta en la sección Costos de diseño.

Tabla 4.15. Costos de componentes electrónicos

Componente	Descripción	Costo unitario (\$)	Cantidad	Subtotal (\$)
Microprocesador	Raspberry Pi Zero 2 W	16	1	16
PCB	Elaboración propia	6	1	6
Motor	Pololu HPCB 12V 3040	25.44	4	101.76
Driver	DRV8833	6.95	2	13.9
Encoder	Pololu HPCB 12V 3040	9.95	4	39.8
Servomotor	Sub-micro Pololu-1040	5.95	2	11.9
Adaptador de Cámara	ArduCAM Doubleplexer	37.85	1	37.85
Cámara	ArduCAM Spy sensor	29.99	2	59.98
LEDs	(paquete de 10)	0.4	1	0.4
Solenoide	LAH04-10-000A	401	1	401
Sensor de sonido	Grove Sensor LM358	5.4	1	5.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16. Costos de componentes mecánicos

Componente	Descripción	Costo unitario (\$)	Cantidad	Subtotal
Ruedas		6.43	4	25.72
Ejes de transmisión		1	4	4
Banda magnética	1 metro	53.56	1	53.56
Engranajes cónicos	0,5 M 90°	3	8	24
Insertos para plásticos	Brass, M5 x 0.8 mm (Bolsa de 50 unidades)	13.55	1	13.55
Tornillos de cabeza plana	316 Stainless Steel Ultra- Low-Profile	4.6	12	55.2

Fuente: Elaboración propia

4.9.2. Costos de fabricación

Los costos cotizados para los componentes que conforman el chasis, así como otros elementos de unión con los servomotores y el elemento de golpe son los correspondientes a una impresión 3D mediante SLS utilizando polvo de Nylon, mientras que el brazo de palanca será mecanizado en aluminio para herramientas.

Tabla 4.17. Costos de fabricación

Pieza	Material	Cotización
Elementos de impresión 3D	Polvo de Nylon	S/124
Brazo de palanca	Aluminio 7075	S/ 60

Fuente: Elaboración propia

4.9.3. Costos de diseño

Para la estimación del costo de diseño se plantean los siguientes supuestos. En primer lugar, que solo una persona ha desarrollado el sistema presentado teniendo un ingreso mensual de 3500 soles por toda su experiencia en el área de investigación y que las horas trabajadas mensualmente equivalen a 160 horas. Se estima que para realizar el presente proyecto se ha invertido aproximadamente un total de 250 horas. Considerando esta información se calcula el costo total de diseño.

$$\text{Costo total de diseño} = \text{horas totales} * \text{costo por hora} \quad (19)$$

$$\text{horas totales} = 250 \text{ h} \quad (20)$$

$$\text{costo por hora} = 21.875 \frac{\text{soles}}{\text{h}} \quad (21)$$

$$\text{Costo total de diseño} = 5468.75 \text{ soles} \quad (22)$$

4.9.4. Costo total

Tabla 4.18. Costos totales del sistema

Razón	Costo (\$)	Costo (S/)
Componentes electrónicos	693.99	2 678.80
Componentes mecánicos	176.03	679.48
Fabricación de piezas	47.67	184
Costo de diseño	1 416.77	5 468.75
TOTAL	2 334.46	9 011.03

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Se logró diseñar un sistema factible que permita la inspección de máquinas eléctricas de una forma más rápida y segura que el método manual. La presente tesis demuestra con éxito la viabilidad de un sistema compacto y de bajo costo para la inspección automatizada de máquinas eléctricas rotativas. El diseño detallado incluye el sistema eléctrico, el algoritmo de control y la selección de componentes, así como también, el diseño mecánico de sus partes, junto con simulaciones CAE utilizando el método de elementos finitos.

Uno de los objetivos principales del diseño radica en minimizar sus dimensiones, en especial la anchura del robot. Esta característica crucial de diseño amplía significativamente la gama de máquinas eléctricas rotativas que el robot puede inspeccionar, ya que puede acceder a entrehierros más estrechos. Lograr las dimensiones finales de esta presente tesis requirió una consideración cuidadosa de los componentes disponibles comercialmente. Una menor medida requeriría el diseño y la fabricación de más piezas personalizadas, lo que aumentaría los costos iniciales de desarrollo, pero llegaría a expandir su alcance en el mercado.

Se comprueba que el mecanismo de prueba de cuñas puede estandarizar las pruebas manuales y brindar un análisis cuantitativo del estado de las mismas. Este método ofrece mejoras tanto en fiabilidad como en seguridad en comparación a los métodos tradicionales. La inspección automatizada reduce el tiempo de inactividad de la máquina eléctrica y reduce significativamente la necesidad de manipular maquinaria pesada para cada mantenimiento, lo que minimiza los riesgos asociados con el error humano y los posibles accidentes laborales.

El análisis de costos realizado indica que el sistema desarrollado es viable y competitivo, con margen para implementar mejoras y optimizaciones. Los costos presentados son considerando, en su mayor parte, elementos comerciales para una fase de prototipado. Al momento de considerar una producción en masa, se podría reducir significativamente el costo unitario. Esto convierte al robot en una alternativa viable para el mantenimiento e inspección, especialmente en operaciones a gran escala donde el costo del tiempo de inactividad es alto.

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES

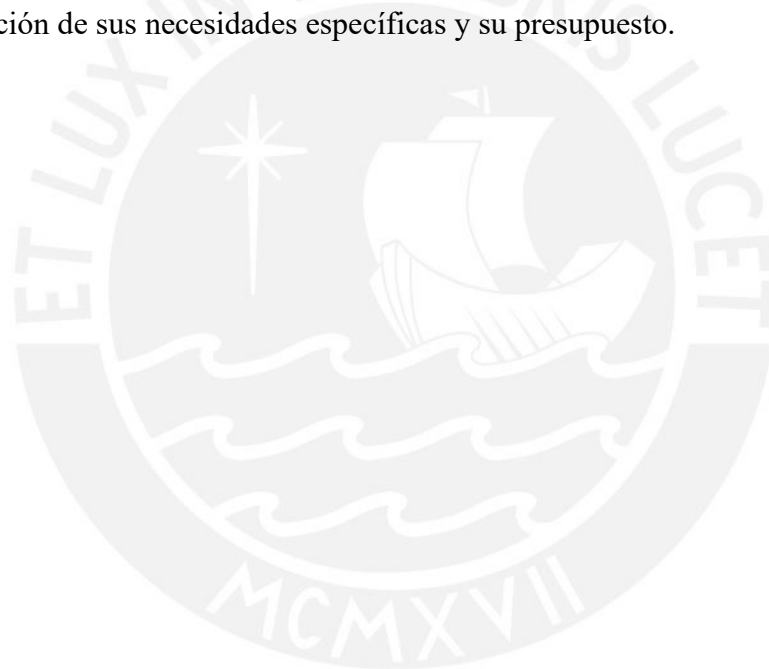
La presente tesis enfatiza la necesidad de realizar más pruebas en campo y validaciones experimentales, lo cual es crucial antes de implementar este sistema en un entorno del mundo real. Esto implicaría pruebas exhaustivas en diversas condiciones operativas para verificar su rendimiento, confiabilidad y solidez. La comparación de la precisión de diagnóstico del sistema robótico con los métodos manuales que sirvieron como referencia también agregaría un valor significativo.

Las simulaciones mecánicas revelaron ciertos puntos críticos donde podrían surgir fallas durante la operación. En concreto, los puntos de unión de las ruedas con el chasis del módulo de control son propensas a separarse debido al torque ejercido en movimiento. Las bisagras, que unen el módulo de control con los módulos de desplazamiento, podrían desgastarse prematuramente. La parte de la carcasa donde reposa el solenoide recibe parte del impacto del golpe. Se recomienda seguir iterando el diseño para optimizar estos posibles puntos de falla.

El uso de algoritmos de control más avanzados (más allá del PID), que podrían integrar inteligencia artificial y aprendizaje automático para la detección y el diagnóstico de fallas en

tiempo real, mejoraría las capacidades del sistema. La inteligencia artificial podría mejorar la precisión del diagnóstico al analizar los datos de los sensores de manera más efectiva y adaptarse a diferentes tipos de máquinas y condiciones de funcionamiento.

Si bien se dejó de lado diseñar un módulo que realice la prueba ELCID intencionalmente, para no incrementar el costo, se plantea la idea a futuro del diseño de un módulo adicional personalizable para el sistema robótico. Es decir, implementar una mejora opcional al sistema propuesto. El diseño modular permitiría a los usuarios seleccionar las características de prueba deseadas en función de sus necesidades específicas y su presupuesto.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pistone A., Canali C., Gloriani C., Leggieri S., Guardiani P. y Caldwell D. G. (2019) Reconfigurable inspection robot for industrial applications. *Procedia Manufacturing*, ScienceDirect, 24 de junio, 2019. Páginas: 598-604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.075>
- [2] Martínez O., Conte D., Aparicio J. y Zorzoli E. (2012). Monitoreo de Flujo Magnético Disperso y otros parámetros para diagnosticar integridad de bobinados en Generadores Eléctricos. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.5092.8003>
- [3] Fundación Endesa (2024). Los generadores eléctricos: Máquinas eléctricas y rotativas. Recuperado de: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-generator-electrico>
- [4] International Energy Agency, IEA (2019). Data & Statistics. Recuperado de: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=PERU&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons>
- [5] Ministerio de Energía y Minas (2024). Normas Técnicas Peruanas - Eficiencia Energética. Recuperado de: https://minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=12&idTitular=3094&idMenu=sub3006&idCateg=742
- [6] Campuzano-Martínez I. R. (2016). Diagnóstico de Generadores Eléctricos de Potencia con Técnicas de Monitoreo en Línea y Fuera de Línea. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Scielo. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000200003>
- [7] Gausemeier, J., & Moehring, S. (2002). VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems. IFAC Proceedings. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34035-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34035-1)

- [8] The Design Society. (2006). THE DEVELOPMENT OF THE GUIDELINE VDI 2221 - THE CHANGE OF DIRECTION. Recuperado de: <https://www.designsociety.org/publication/18983/THE+DEVELOPMENT+OF+THE+GUIDELINE+VDI+2221+-+THE+CHANGE+OF+DIRECTION>
- [9] University of Illinois, Chicago. (2024) Subject and Course Guides, Evidence Based Medicine: PICO. Recuperado de: <https://researchguides.uic.edu/c.php?g=252338&p=3954402>
- [10] Zhang G., Rossano G., Eakins W. Fuhlbrigge T., Choi S. (2015). A modular air-gap crawler for motor and generator in-situ inspection. ABB Corporate Research Center. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 17 de marzo, 2015. Páginas: 598-604 DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125565>
- [11] Mitsubishi Electric. (2020). Generator Smart & Precise Inspection Accomplished by Generator Dedicated Expert Robot GenSPIDER [Panfleto]. Recuperado de: https://www.mitsubishielectric.com/eig/energysystems/downloads/pdf/GenSPIDER_pamphlet.pdf
- [12] Dekra. (2016). Advanced Robotic Generator Inspection System (ARGIS). [Folleto]. Recuperado de: https://www.dekra.nl/sites/dekra.nl/files/argis_leaflet.pdf
- [13] Iris Power. (2021). Iris Power RIV 800 Robotic Inspection Vehicle with Camera System [Folleto]. Recuperado de: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2020/09/RIV-800-Iris-Qualitrol-Brochure-V1-9-20.pdf>
- [14] Robotic Inspection Vehicle And Camera System (RIV800). (2021). Iris Power: A Qualitrol Company. Recuperado de: <https://irispower.com/products/robotic-inspection-camera/>

- [15] Generator inspection: a robotic revolution. (2016). Modern Power Systems. Recuperado de: <https://www.modernpowersystems.com/analysis/generator-inspection-a-robotic-revolution-4847284/?cf-view>
- [16] MD&A. (2019) Robotic Generator In-Situ Inspection: MD&A Air-gap Bot [Folleto]. Recuperado de: <https://www.mdaturbines.com/services/generator/robotic-generator-in-situ-inspection/>
- [17] Uchino, K. (2003) Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. Penn State University, University Park. Researchgate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/235110841_Introduction_to_Piezoelectric_Actuators_and_Transducers
- [18] Piezoelectric Actuation Mechanisms: An Introduction | Dynamic Structures & Materials, LLC. (2021). Dynamic Structure & Materials. Recuperado de: <https://www.dynamic-structures.com/articles/piezoelectric-actuation-mechanisms-an-introduction>
- [19] Weis, O. (2020, 20 de Octubre). Diferencia entre RS232 y RS485 - casos de uso y tecnología. Virtual Serial Port Driver. Recuperado de: <https://www.virtual-serial-port.org/es/article/what-is-serial-port/rs232-vs-rs485.html>
- [20] Pololu - 75:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V. (2021). Pololu. Recuperado de: <https://www.pololu.com/product/2361/specs>
- [21] Pololu - DRV8833 Dual Motor Driver Carrier . (2021). Pololu. Recuperado de: <https://www.pololu.com/product/2130/specs>
- [22] POLOLU-1040 Motor: servo sub-micro (2021). TME. Recuperado de: <https://www.tme.eu/en/details/pololu-1040/servo-motors/pololu/>
- [23] DCX 10 S Ø10 mm, Precious Metal Brushes. (2021) Maxon DC Motors. Recuperado de: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/demotor/DCX/DCX10/DCX10S01EBKL633>

- [24] GLSeries Out-running Gimbal Motor. (2021). CubeMars - Motion Advanced Robotic System. Recuperado de: <https://store.cubemars.com/goods.php?id=1129>
- [25] The Raspberry Pi Foundation. (2021). Raspberry Pi Zero 2 W. Recuperado de: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>
- [26] The Raspberry Pi Foundation. (2021). Raspberry Pi 3 Model B+. Recuperado de: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [27] RSF Supermini Brushless Servo Actuator. (2021). Harmonic Drive. Recuperado de: <https://www.harmonicdrive.net/products/rotary-actuators/actuators-without-hollow-shaft/rsf-supermini>
- [28] PJ2N-FFVE ProLight Opto - LED | SMD; TME - Electronic components. (2021). TME. <https://www.tme.eu/en/details/pj2n-ffve/smd-white-leds/prolight-opto/>
- [29] Sensata - BEI Kimco LAH04-10-000A. (2021). Digikey Electronics. Recuperado de: <https://www.digikey.com/en/products/detail/sensata-bei-kimco/LAH04-10-000A/12091930>
- [30] Grove - Sound Sensor Based on LM358 amplifier - Arduino Compatible. (2018, April 23). Seeed. Recuperado de: <https://www.seeedstudio.com/Grove-Sound-Sensor-Based-on-LM358-amplifier-Arduino-Compatible.html>
- [31] 9574 Sound Sensor. (2021). Waveshare. Recuperado de: <https://www.waveshare.com/sound-sensor.htm>
- [32] Texas Instruments LM2595S-ADJ/NOPB. (2021). Mouser Electronics. Recuperado de: <https://www.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/LM2595S-ADJ-NOPB?qs=X1J7HmVL2ZER5gHPWpbVtw%3D%3D>
- [33] Formlabs. (n.d.). ¿Qué es el sinterizado selectivo por láser? Formlabs Blog LATAM. <https://formlabs.com/latam/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>

- [34] Osinergmin. Fichas técnicas de centrales en operación [PDF]. Osinergmin.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/generacion/1.Fichas_Tecnicas_Centrales_Operacion.pdf
- [35] ABB. *Synchronous HV compact generators for engines* [PDF]. ABB. Recuperado de:
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106113&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>



Anexos

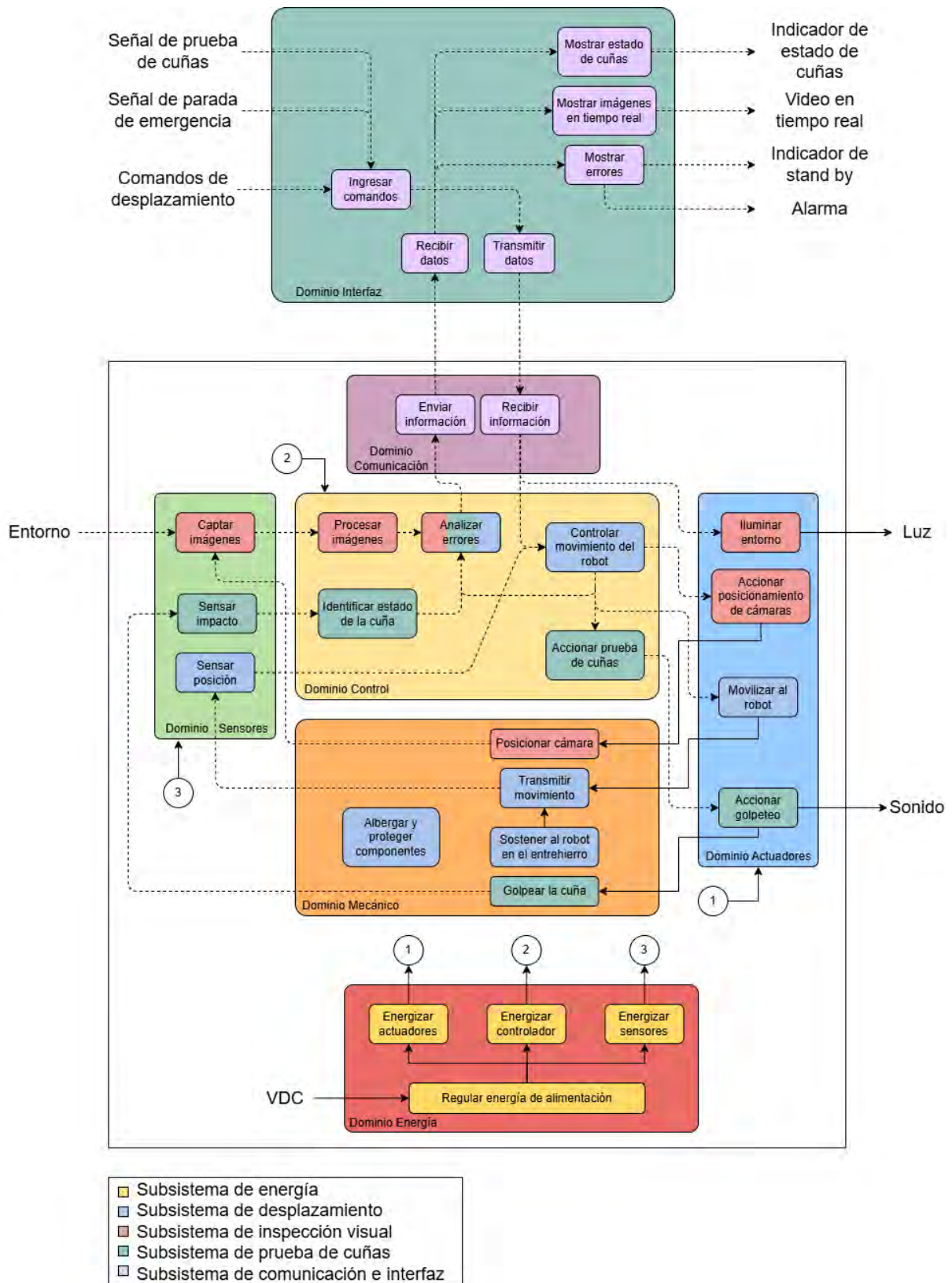
Anexo A: Lista de Exigencias

PROYECTO:	Diseño de un robot plano para diagnóstico de máquinas rotatorias eléctricas
REQUERIMIENTOS:	Pontificia Universidad Católica del Perú
1. <u>Función Principal</u>	El robot deberá ser capaz de introducirse en el entrehierro de un motor o generador eléctrico y realizar la prueba de apriete de las cuñas del estator y permitir al operario realizar inspección visual sin retirar el rotor.
2. <u>Geometría</u>	Las dimensiones no deben exceder de 300 mm de largo por 200 mm de ancho y 25 mm de grosor. El sistema debe ser capaz de curvarse para poder acomodarse mejor a los generadores y motores.
3. <u>Cinemática</u>	Velocidad máxima dentro del entrehierro 20 cm/s con un error posicional menor a 5 mm.
4. <u>Fuerzas</u>	El peso del robot será como máximo 2 kg.
5. <u>Energía</u>	La alimentación será DC con un voltaje admitido entre 5 y 48 vatios.





















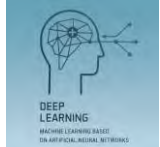

<p>6. <u>Señales</u></p>	<p>Señales de entrada: señales de movimiento del robot, señales de accionamiento del subsistema de inspección visual y la señal de accionamiento del subsistema de prueba de cuñas.</p> <p>Señales de salida: las imágenes captadas por las cámaras, los resultados de la prueba de apriete de las cuñas del estator y señal de emergencia.</p>
<p>7. <u>Comunicación</u></p>	<p>Transmitir video en tiempo real a tal 1280x1024 píxeles de resolución y a 15 cuadros por segundo (<i>fps</i>) como mínimo. Simultáneamente, enviará las señales de control de movimiento al robot para lo cual se usará comunicación serial RS232 o similares.</p>
<p>8. <u>Seguridad</u></p>	<p>Las máquinas eléctricas que este robot puede inspeccionar deben cumplir la norma europea EN 60529.</p>
<p>9. <u>Material</u></p>	<p>Resistencia moderada. Resistente a caídas de menos de 5 metros.</p>
<p>10. <u>Fabricación</u></p>	<p>La fabricación de la carcasa y el subsistema de prueba de apriete de cuñas será en el país debido a que deben cumplir todos los requerimientos específicos. Los sensores y actuadores serán modelos comerciales disponibles internacionalmente.</p>
<p>11. <u>Control</u></p>	<p>Control PID</p>

12. <u>Electrónica</u>	Controlador de capacidades similares a las del CompactRIO sbRIO-9637, microcámara(s) de alta definición, motores y drivers para el desplazamiento y el subsistema de prueba de apriete de cuñas del estator que puede utilizar un sensor de impacto o un acelerómetro.
13. <u>Operación</u>	2 operarios para la correcta instalación y monitoreo. El sistema será capaz de resistir temperaturas entre 0 a 50 °C.
14. <u>Interfaz</u>	Deberá visualizar las salidas de las cámaras y los resultados de la prueba de apriete de cuñas del estator.
15. <u>Montaje</u>	El sistema, conformado por piezas de fácil montaje y desmontaje, deberá ser capaz de ser manipulado por un operario calificado.
16. <u>Mantenimiento</u>	Mantenimiento completo semestral. De preferencia, previo a cada sesión de muestreo se hará una calibración de los sensores para garantizar la veracidad de las pruebas.
17. <u>Costos</u>	Costo de fabricación máximo: USD 5000.

Anexo B: Diagrama de Funciones



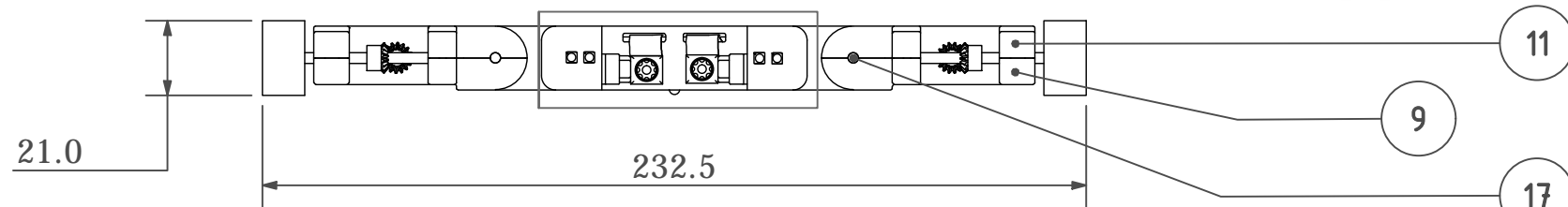
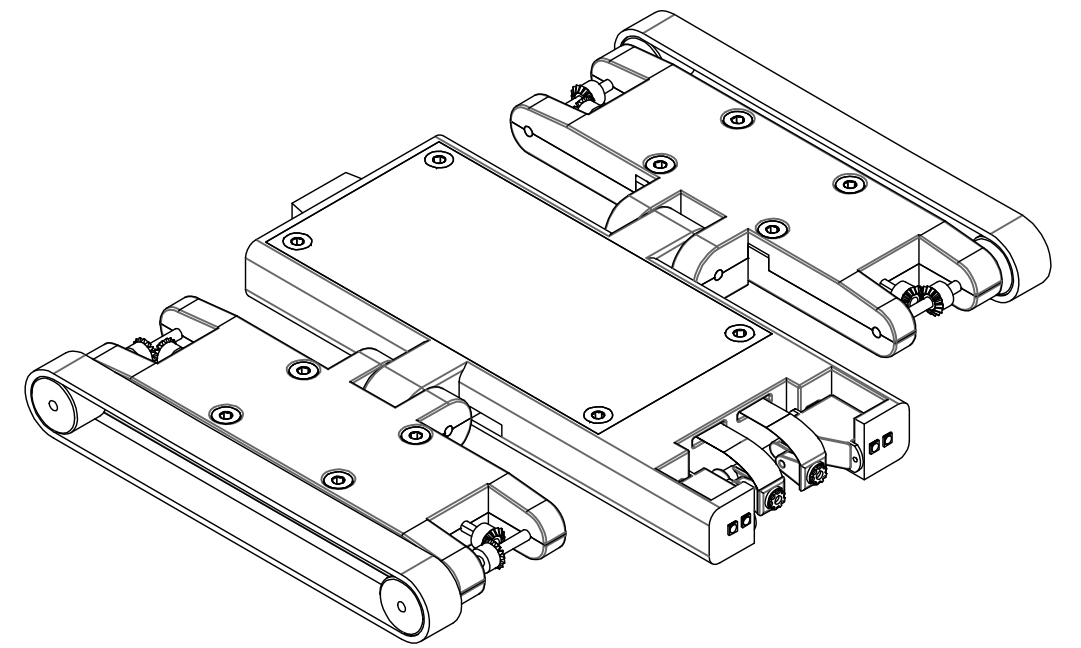
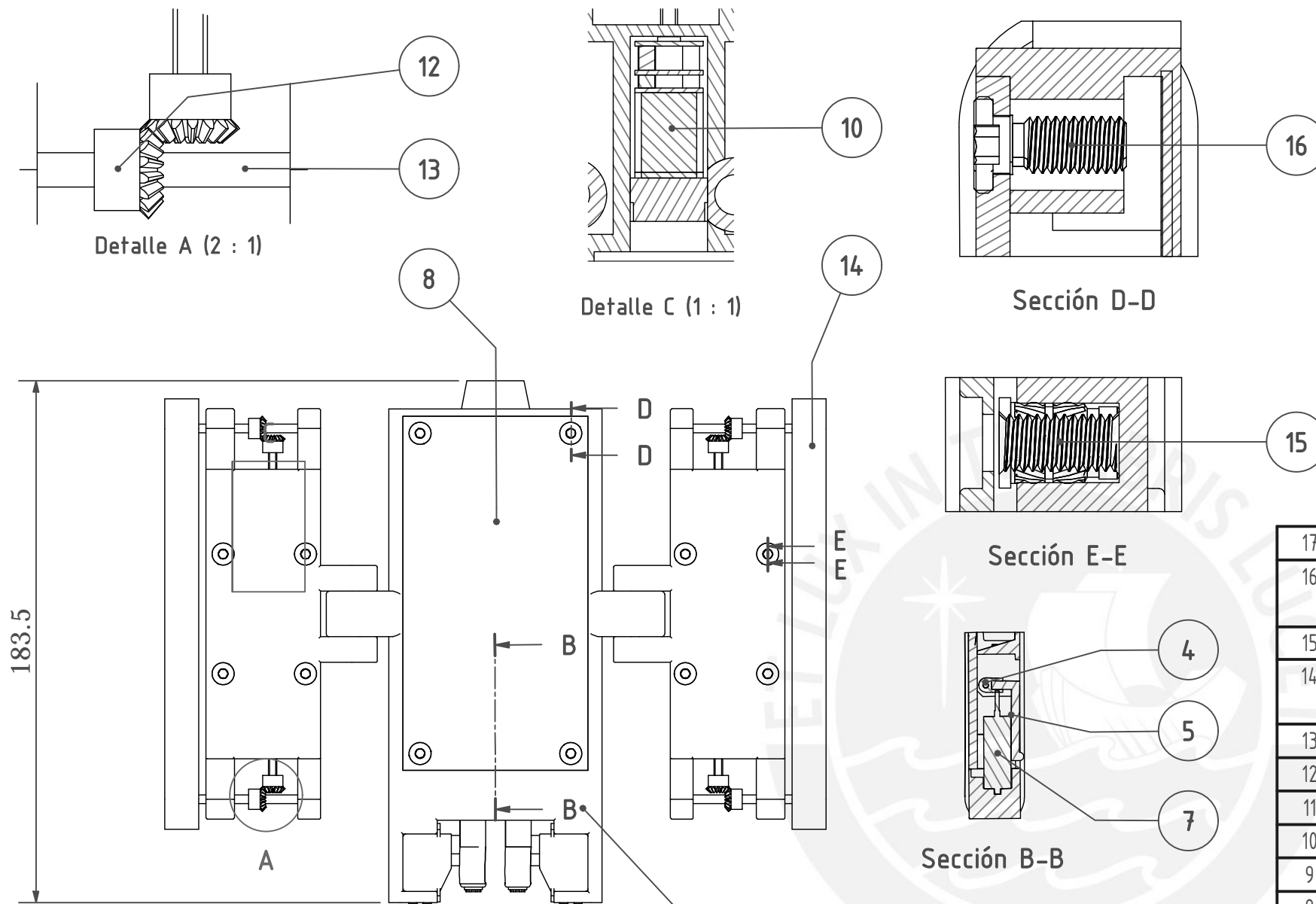
Anexo C: Matriz Morfológica

Dominio	Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Dom. Interfaz	Ingresar comandos	Pantalla táctil 	Joystick 	Teclado 
	Mostrar imágenes en tiempo real	Laptop 	Monitor 	Tablet 
	Mostrar estado de cuñas	Indicador numérico 	Indicador por código de color 	
	Mostrar errores	Consola de texto 	Indicador visual 	
	Transmitir datos	Cable Ethernet 	Cable USB tipo C 	Cable de Fibra óptica 
	Recibir datos			
Dom. Comunicación	Enviar información	RS485 	RS232 	ADSL 
	Recibir información			
Dom. Control	Procesar imágenes	Microcontrolador (8 bits) 	Microprocesador (32 bits) 	GPUS 
	Identificar estado de la cuña	Comparar con base de datos 	Aprendizaje profundo 	Peritaje (Tradicional) 

	Controlar movimiento del robot	Control PID 	Control difuso 	Lazo Abierto 
	Accionar prueba de cuñas			
	Analizar errores	Lógica condicional 	Forward error correction 	
Dom. Sensores	Captar imágenes	Micro Cámara 	Cámara PTZ 	
	Sensar Impacto	Acelerómetro 	Sensor de sonido 	
	Sensar posición	IMU 	Encoder 	INS 
Dom. Actuadores	Movilizar al robot	Motor AC 	Motor DC 	
	Accionar posicionamiento de cámaras	Cámara PTZ 	Servomotor 	
	Accionar golpeo	Servomotor 	Actuador lineal 	Solenoide 
	Iluminar entorno	LED DIP 	Chip LED SMD 	Chip LED COB 

Dom. Mecánico	Sostener al robot en el entrehierro	<p>Ruedas magnéticas</p> 	<p>Adherencia por fricción</p> 	<p>Sistema de rieles</p> 
	Transmitir movimiento	<p>Orugas</p> 	<p>Bandas de fricción</p> 	<p>Rodamientos</p> 
	Albergar y proteger componentes	<p>Contenedor IP54</p> 	<p>Contenedor IP55</p> 	<p>Contenedor IP65</p> 
	Golpear a la cuña	<p>Martillo de acero</p> 	<p>Martillo de aluminio</p> 	<p>Martillo para pruebas</p> 
	Posicionar la cámara	<p>Cámara PTZ</p> 	<p>Espejo rotativo</p> 	<p>Servomotor</p> 
	Dom. Energía	Regular energía de alimentación	<p>Fuente switching</p> 	<p>Transformador</p> 
Energizar sensores		<p>Buck converter</p> 	<p>Regulador</p> 	<p>Step down</p> 
Energizar actuadores				
Energizar controlador				

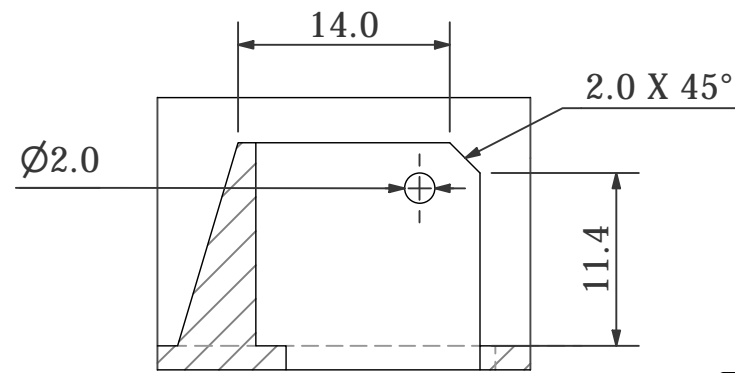
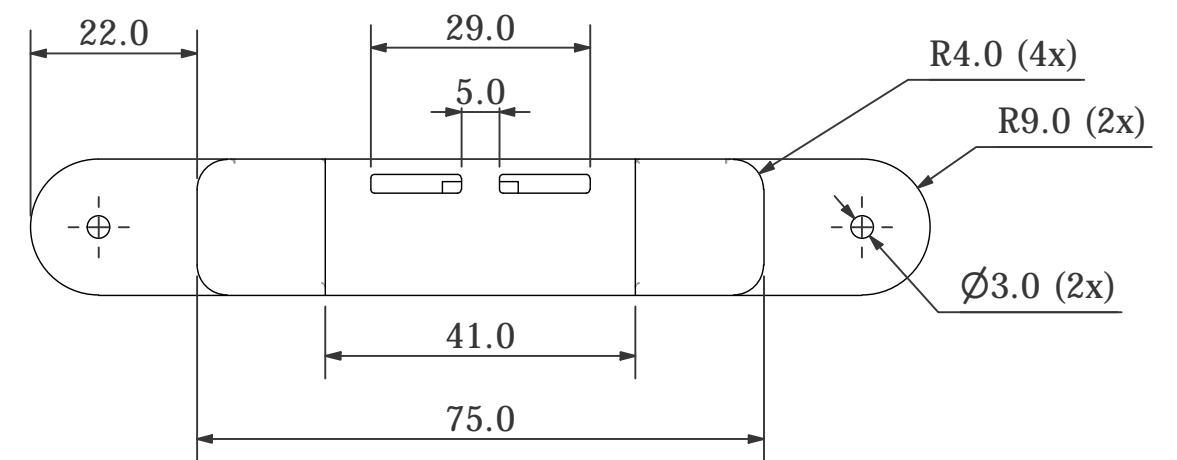
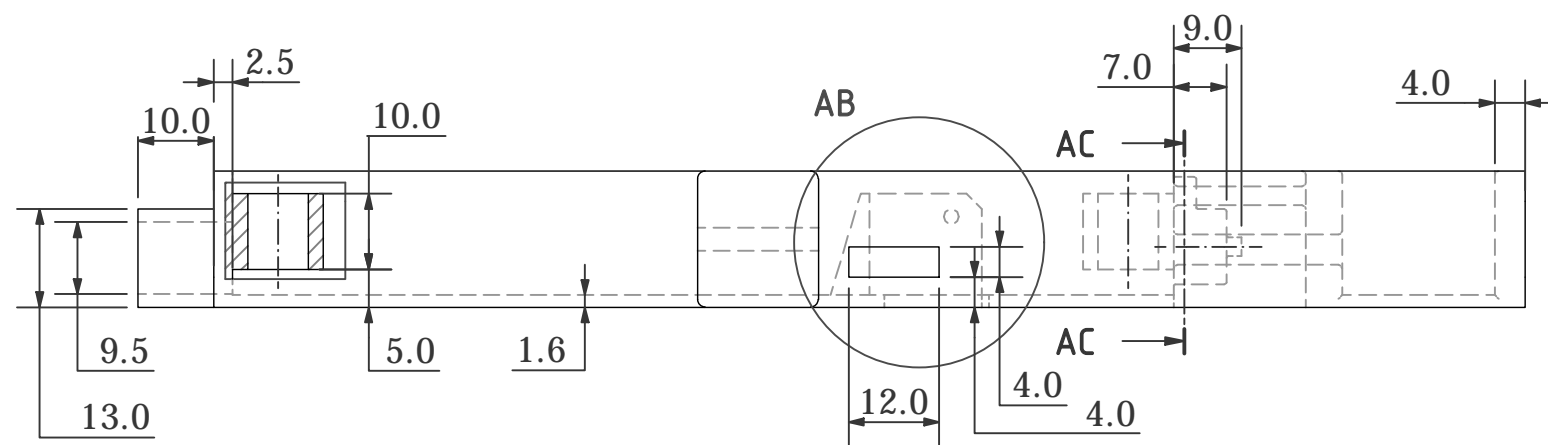
Anexo D: Planos Mecánicos



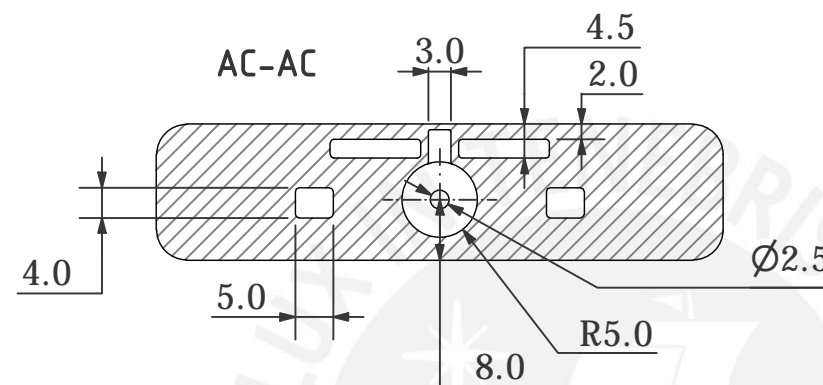
17	2	EJE DE ACOPLE		Aluminum 6061
16	12	Stainless Steel Ultra-Low-Profile Socket Head Screw	91223A429_316	Stainless Steel
15	12	Brass Heat-Set Inserts for Plastic	97171A350	Bronce
14	2	BANDA DE TRACCION		Silicone, Neodimium
13	4	EJE MOTRIZ		Aluminum 6061
12	8	ENGRANAJE CONICO		Bronce
11	2	MODULO SUPERIOR	PD-SP2-A3	NYLON 12
10	4	MICRO METAL GEAR MOTOR		Aluminum 6061
9	2	MODULO INFERIOR	PD-SP1-A3	NYLON 12
8	1	TAPA	PD-TP-A3	NYLON 12
7	1	ACTUADOR		
6	2	CAMARA		
5	1	ELEMENTO DE GOLPE	PD-EG-A3	Aluminum 6061
4	1	PORTA PIN	PD-PP-A3	NYLON 12
3	2	PORTA CAMARA	PD-PC-A3	NYLON 12
2	2	SERVOMOTOR	POLOLU 1040	
1	1	CARCAZA	PD-CA-A3	NYLON 12
IT	CANT	NOMBRE	DESCR.	MATERIAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	Presentación - Tesis Robot plano para inspección de máquinas eléctricas	ESCALA 1:2
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2025-01-14
		LÁMINA: PG-A3



AB (2 : 1)



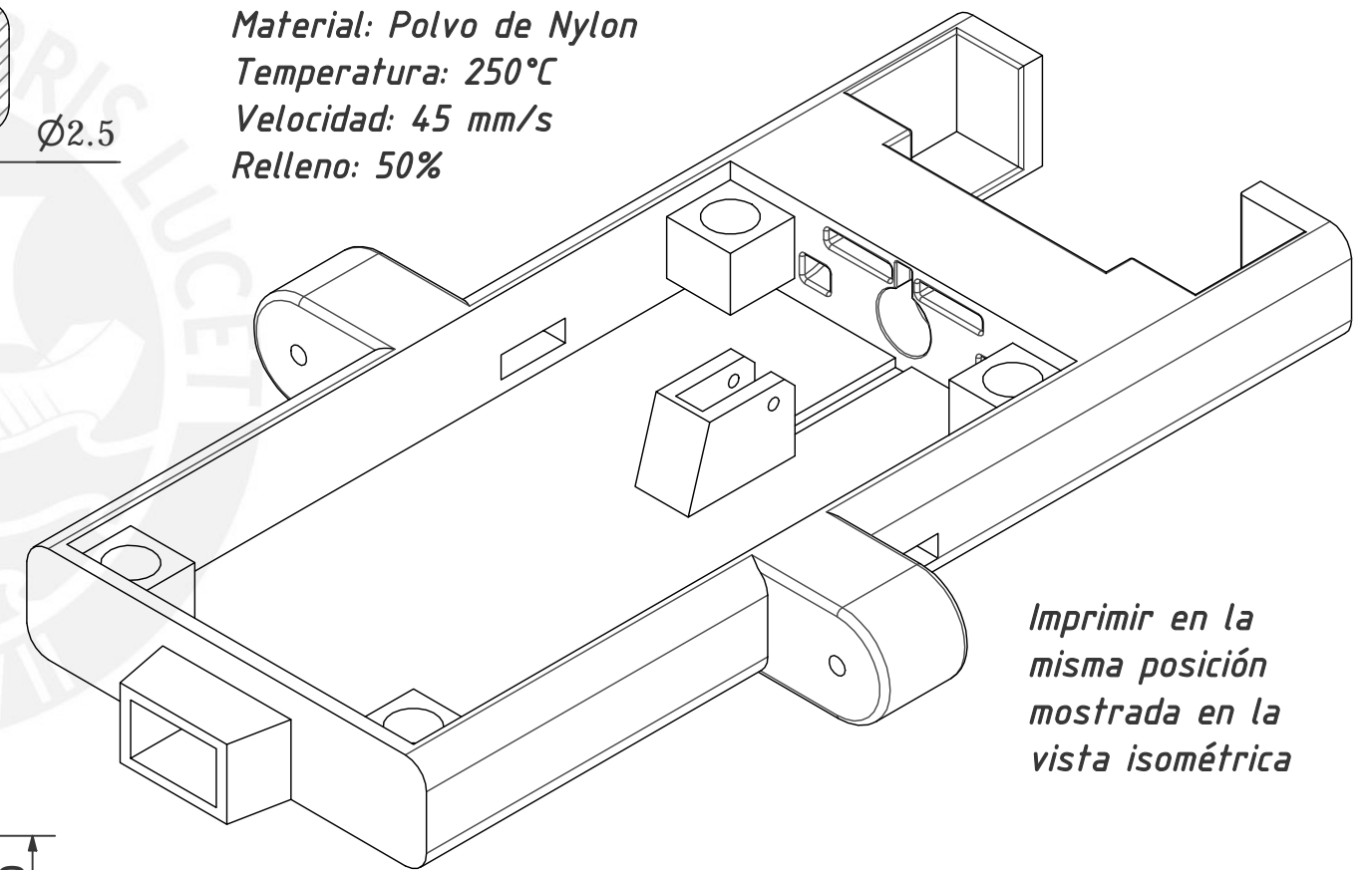
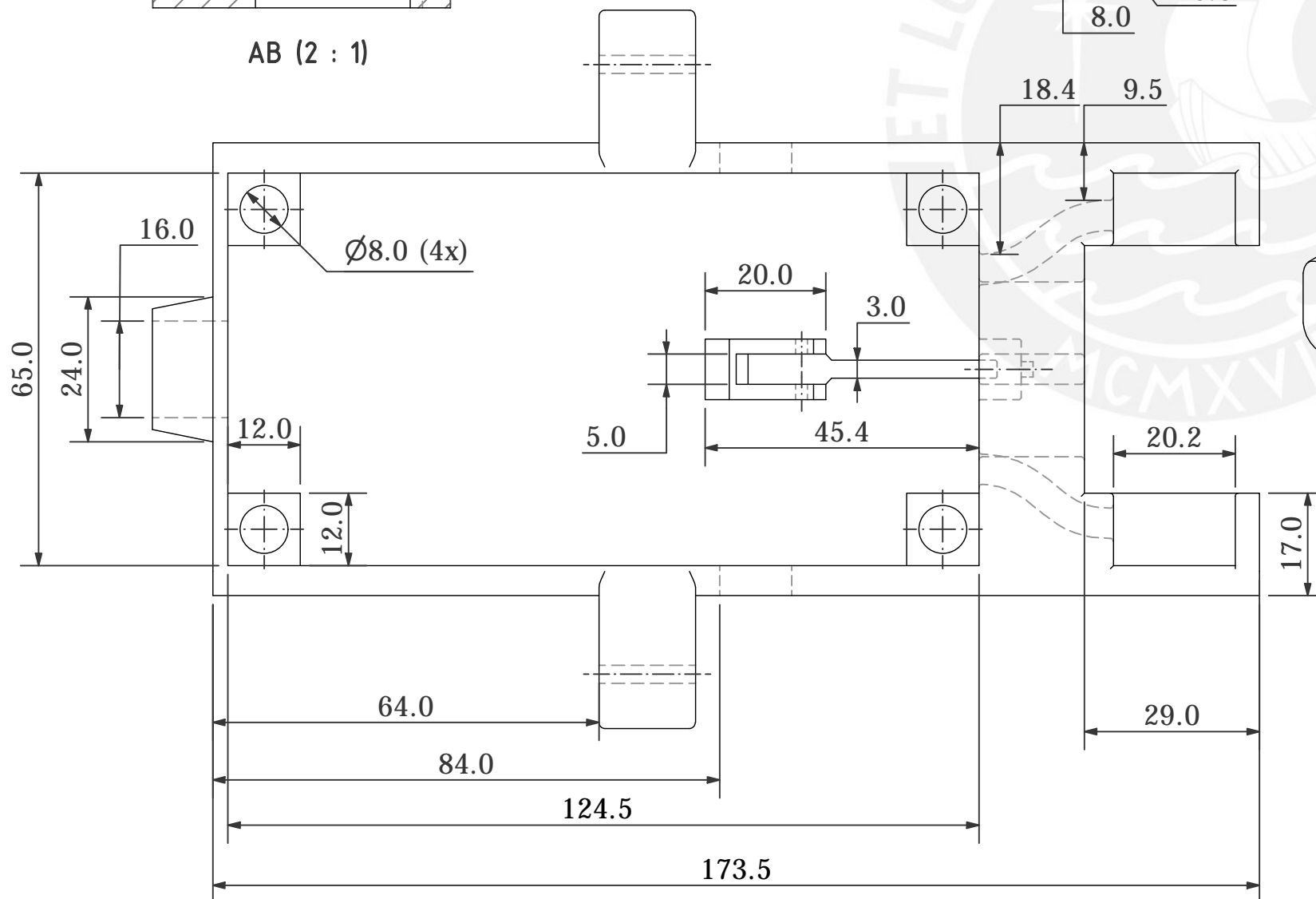
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Material: Polvo de Nylon

Temperatura: 250°C

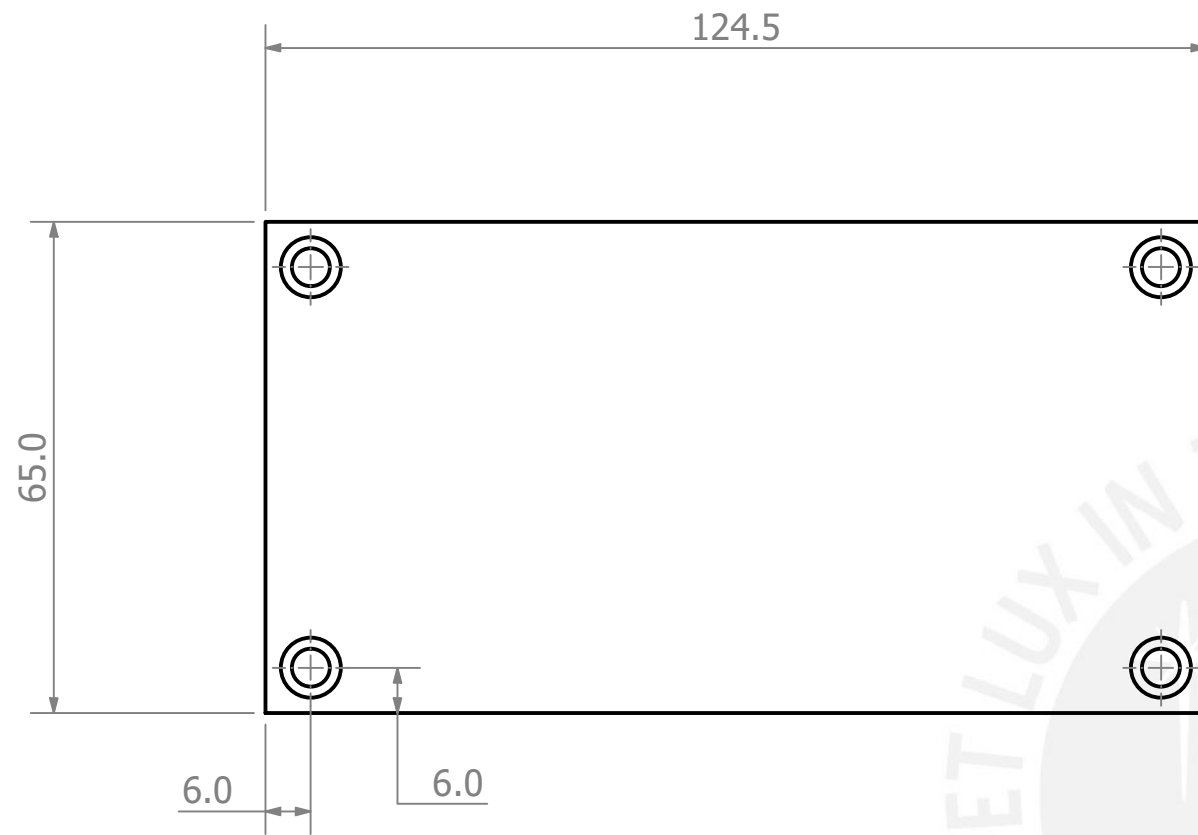
Velocidad: 45 mm/s

Relleno: 50%



Imprimir en la misma posición mostrada en la vista isométrica

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	Presentación - Tesis - HORARIO	ESCALA
	CARCASA	1:1
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2024-12-15
REVISADO POR:		LÁMINA: PD-CA-A3



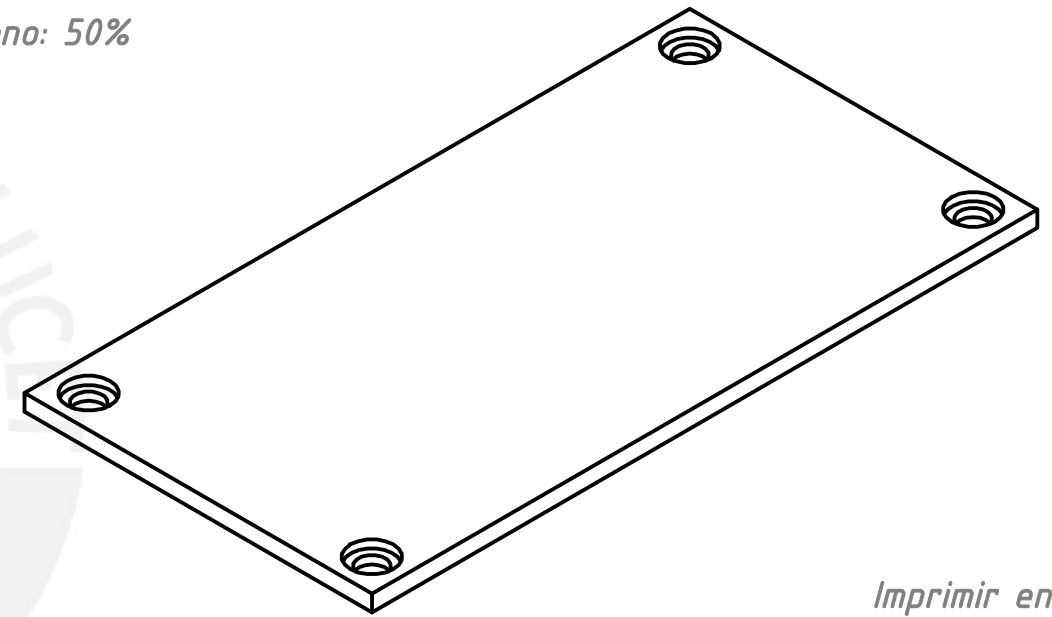
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Material: Polvo de Nylon

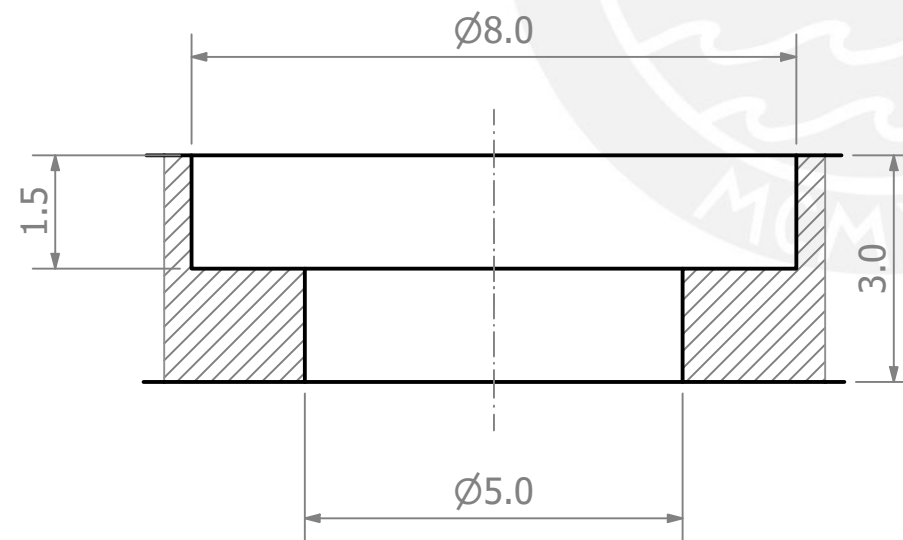
Temperatura: 250°C

Velocidad: 45 mm/s

Relleno: 50%

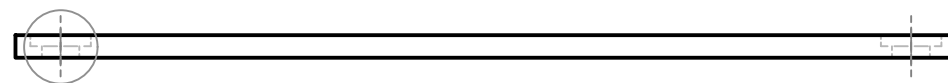


Imprimir en la misma posición mostrada en la vista isométrica

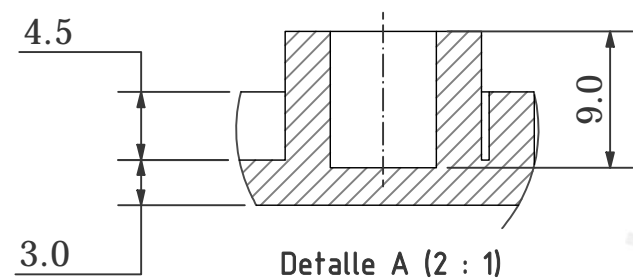
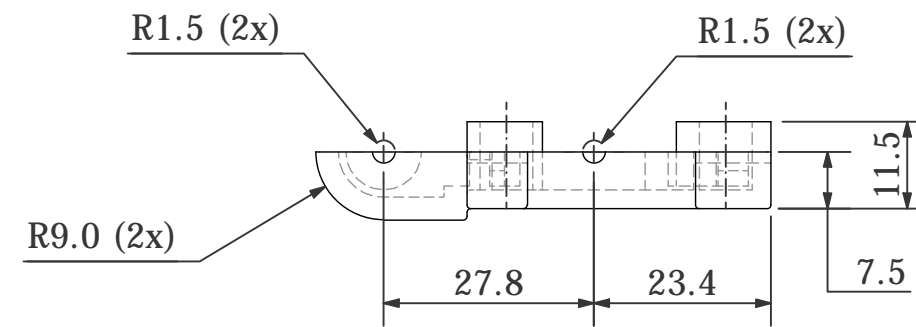
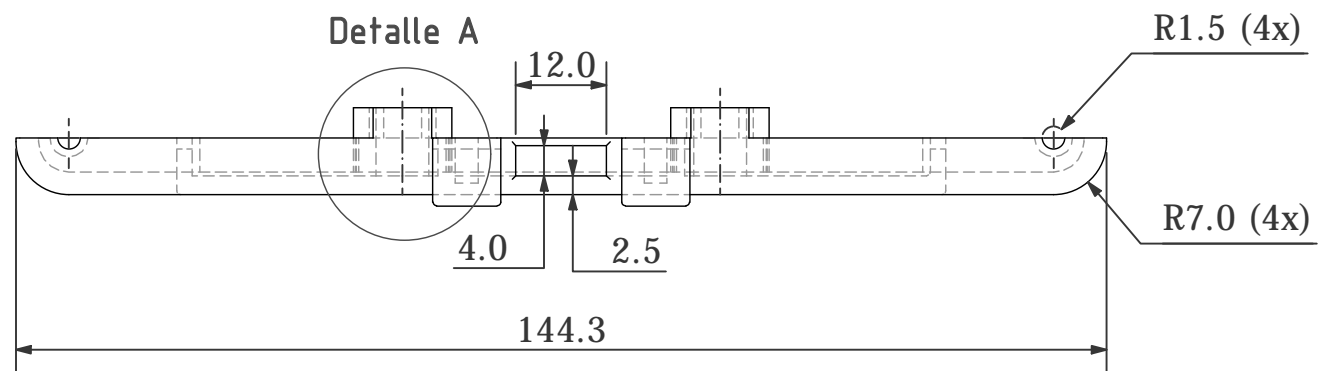


Detalle A (10 : 1)

Detalle A



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	Presentación - Tesis	ESCALA
	Tapa	1:1
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2024-11-15
REVISADO POR:		LÁMINA: PD-TP-A3



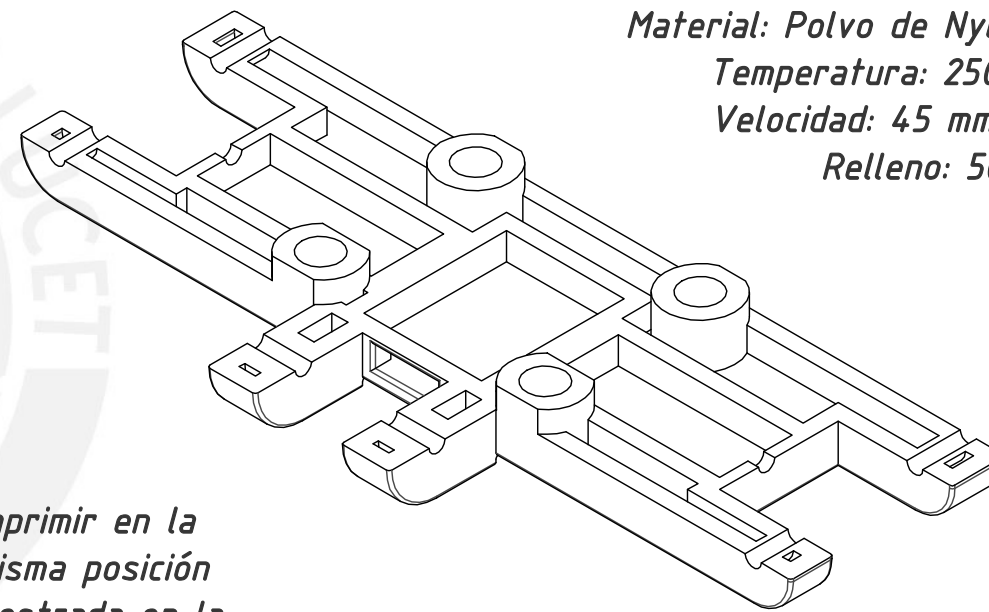
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Material: Polvo de Nylon

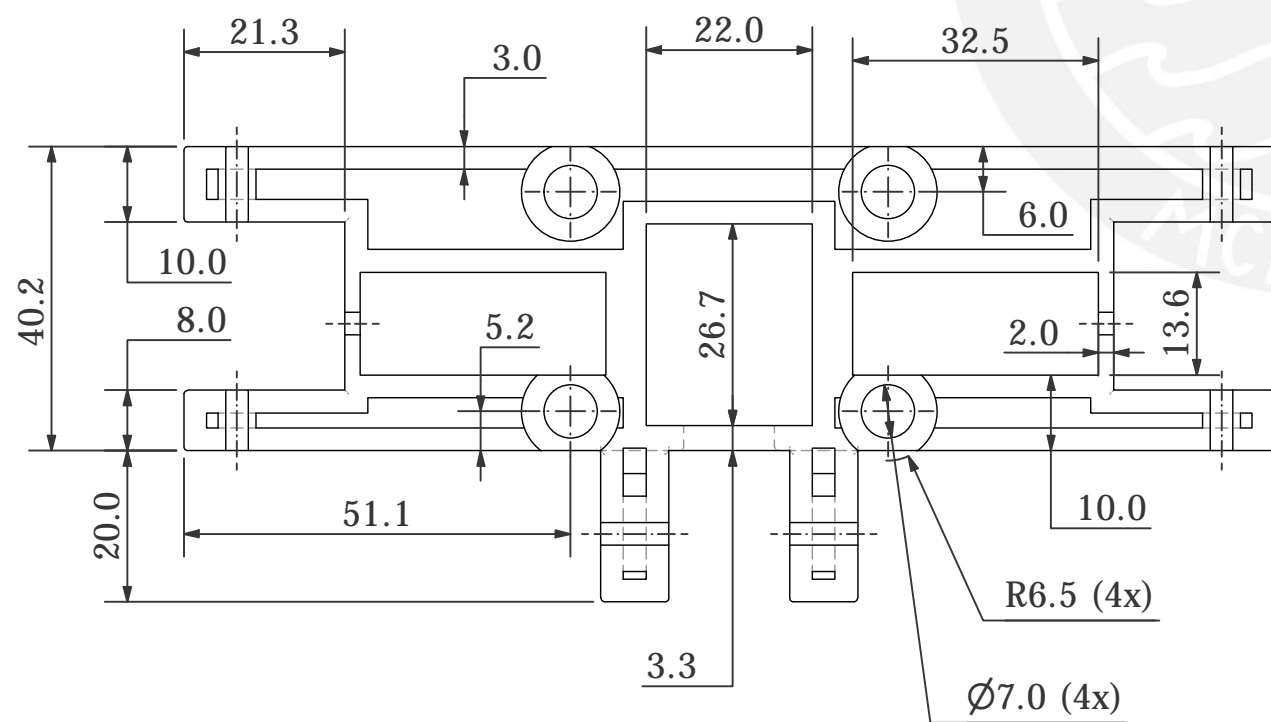
Temperatura: 250°C

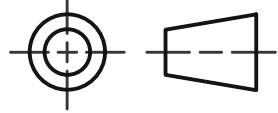
Velocidad: 45 mm/s

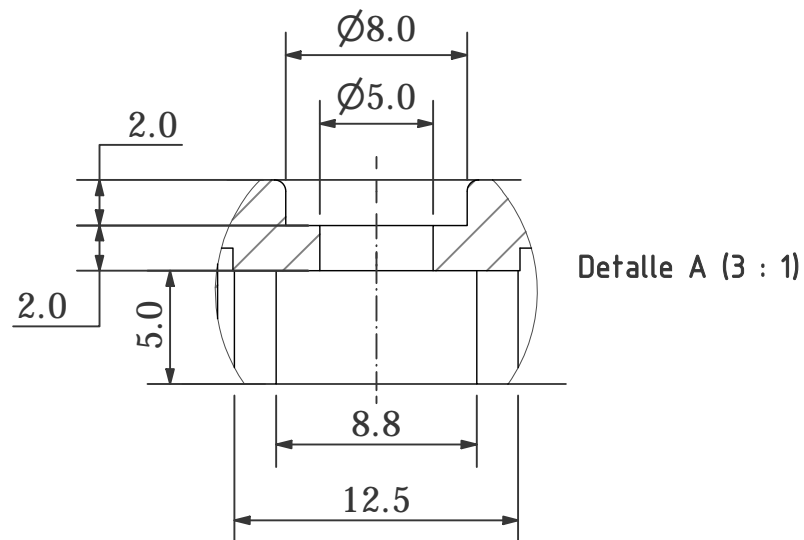
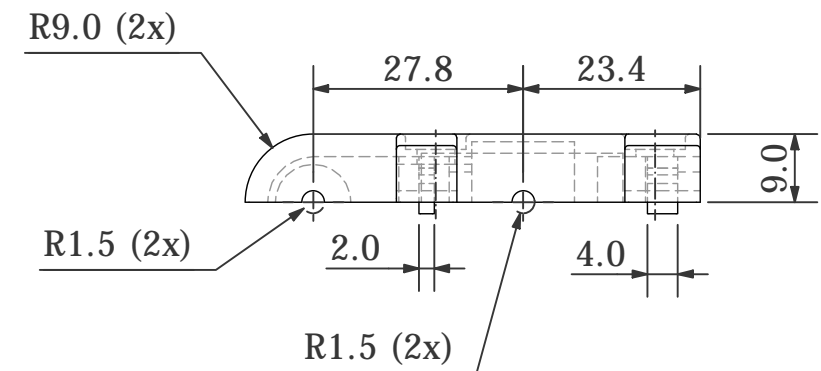
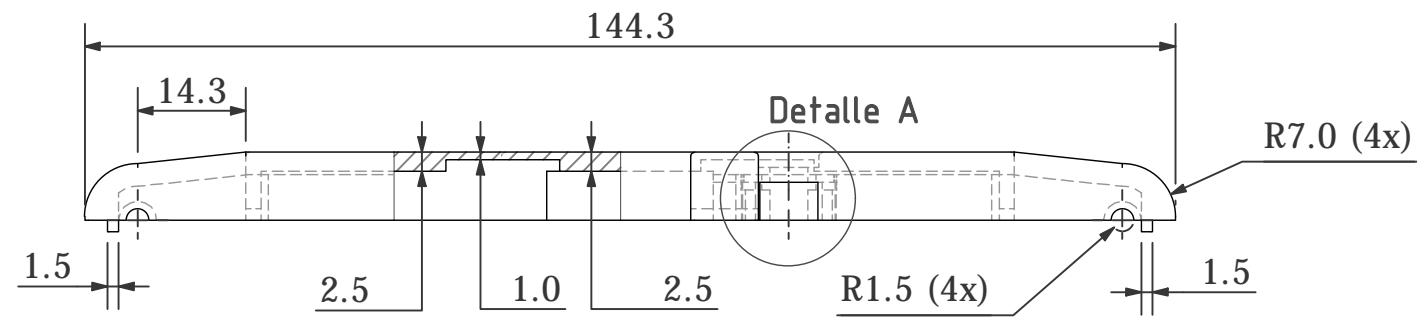
Relleno: 50%



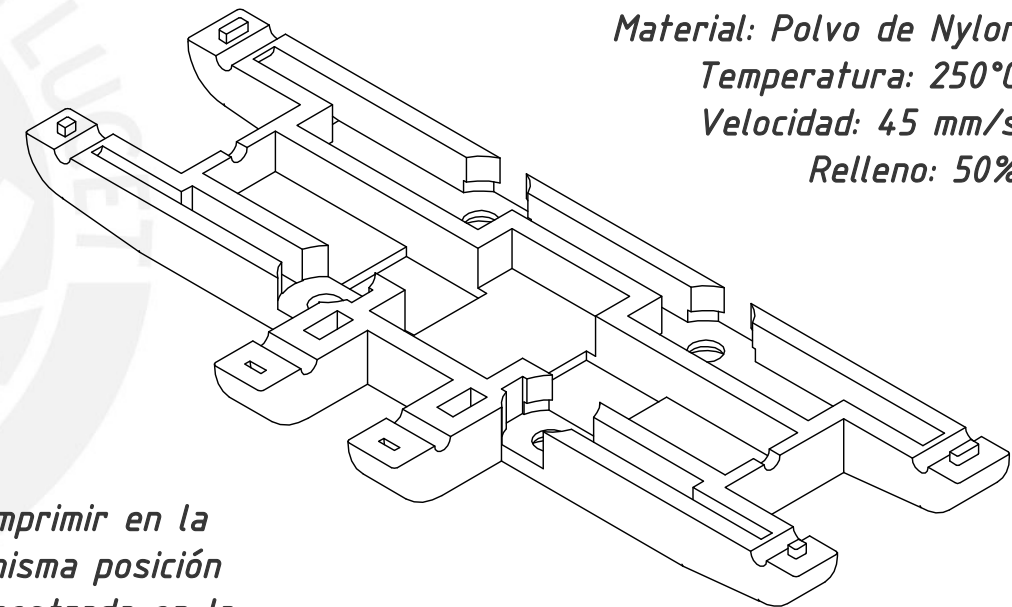
Imprimir en la misma posición mostrada en la vista isométrica



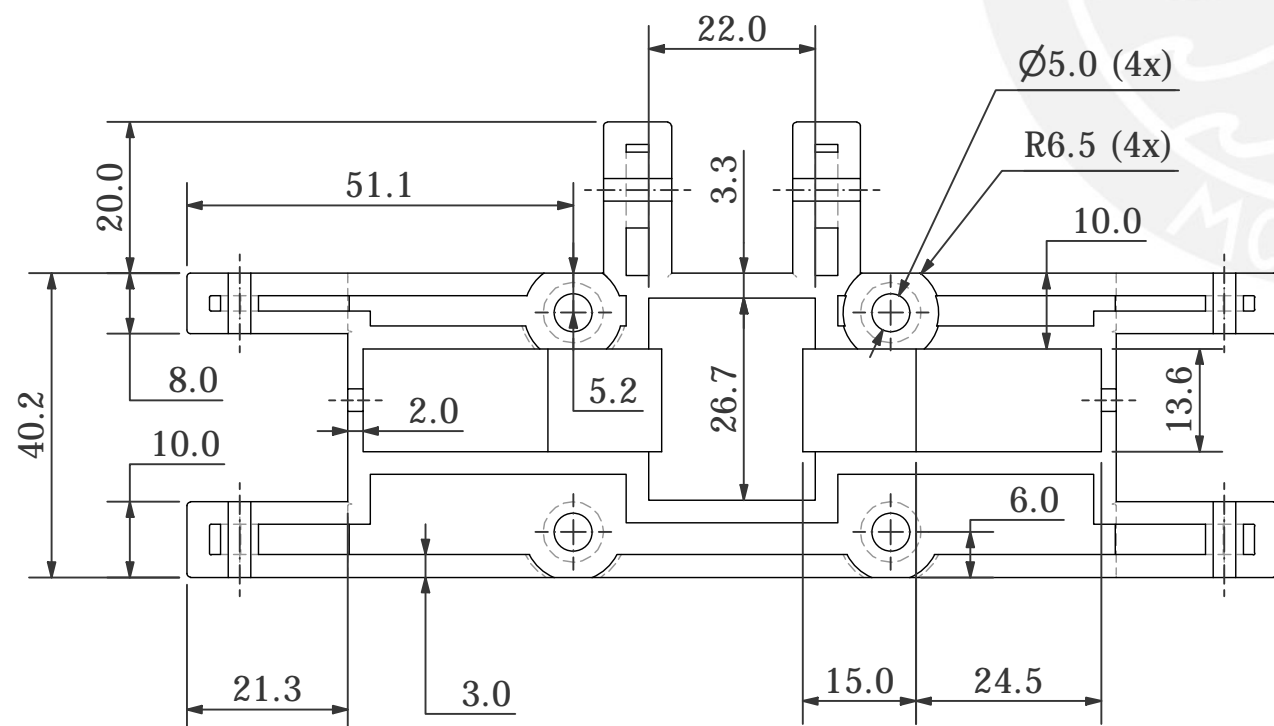
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	Presentación - Tesis	ESCALA
	Módulo inferior	1:1
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2024-12-15
REVISADO POR:		LÁMINA: PD-SP1-A3



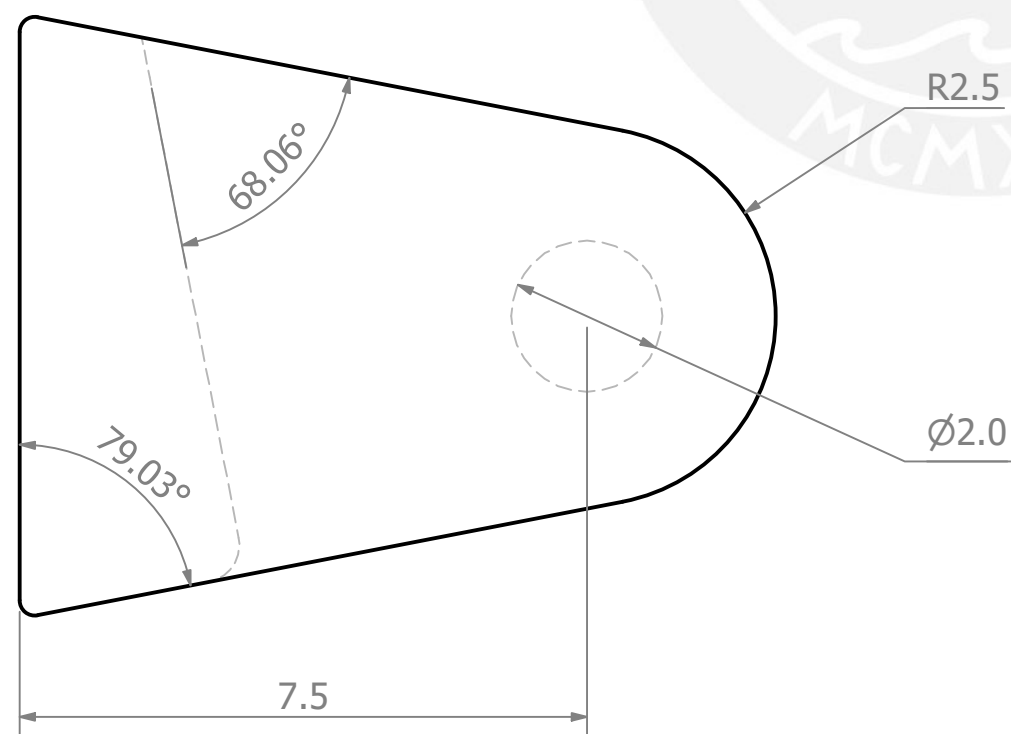
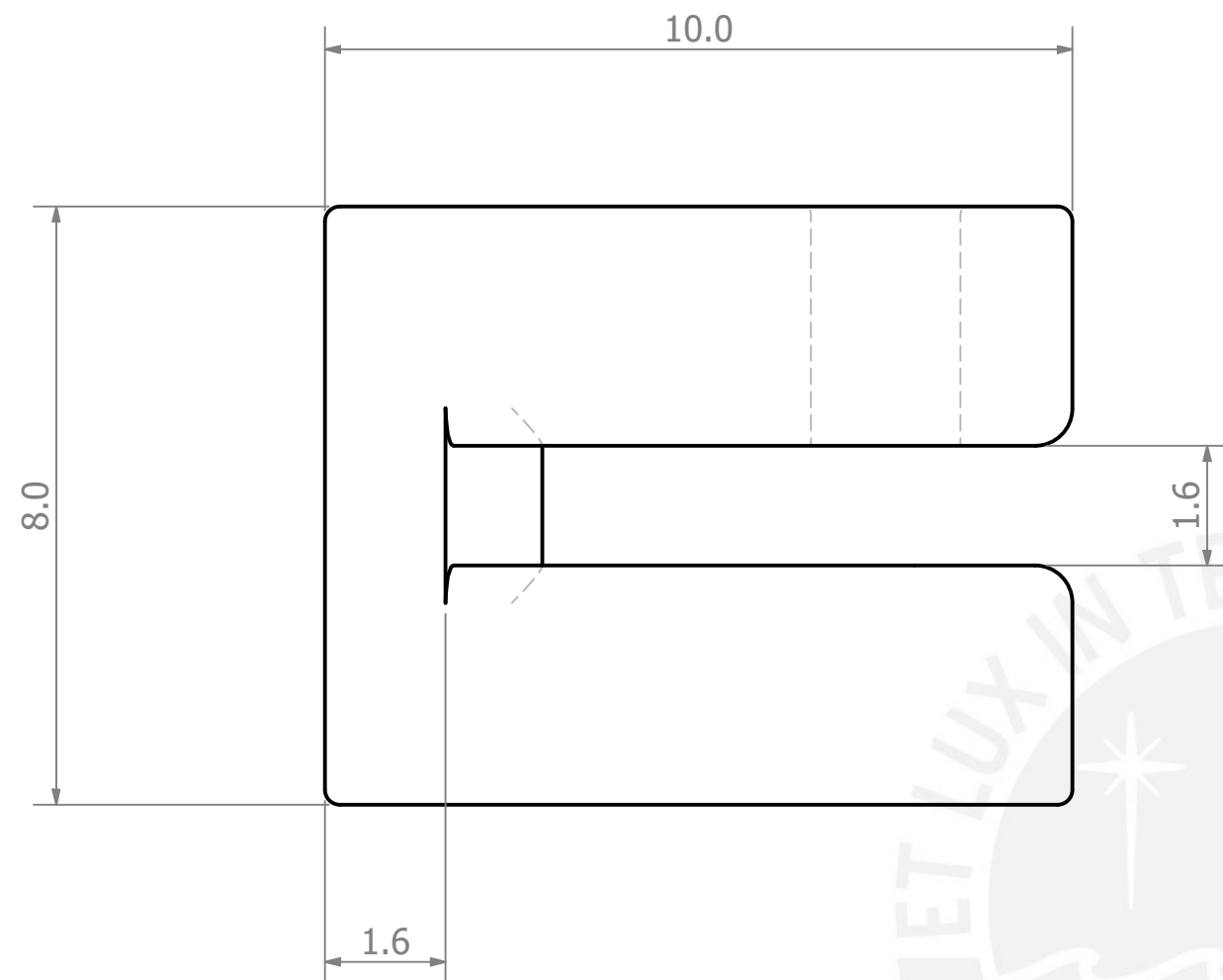
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN
 Material: Polvo de Nylon
 Temperatura: 250°C
 Velocidad: 45 mm/s
 Relleno: 50%



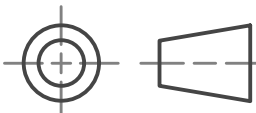
Imprimir en la misma posición mostrada en la vista isométrica

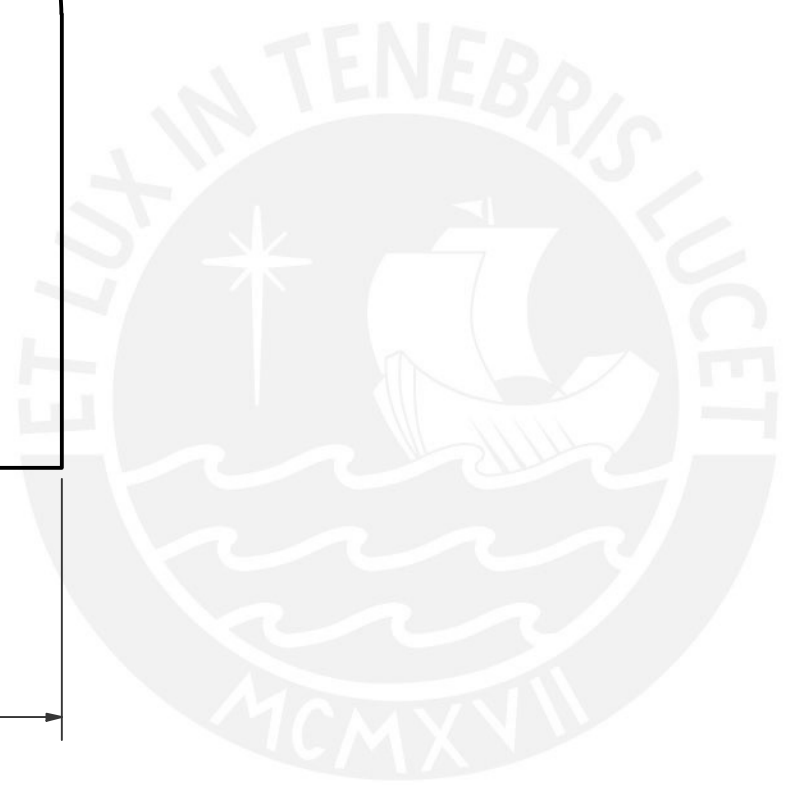
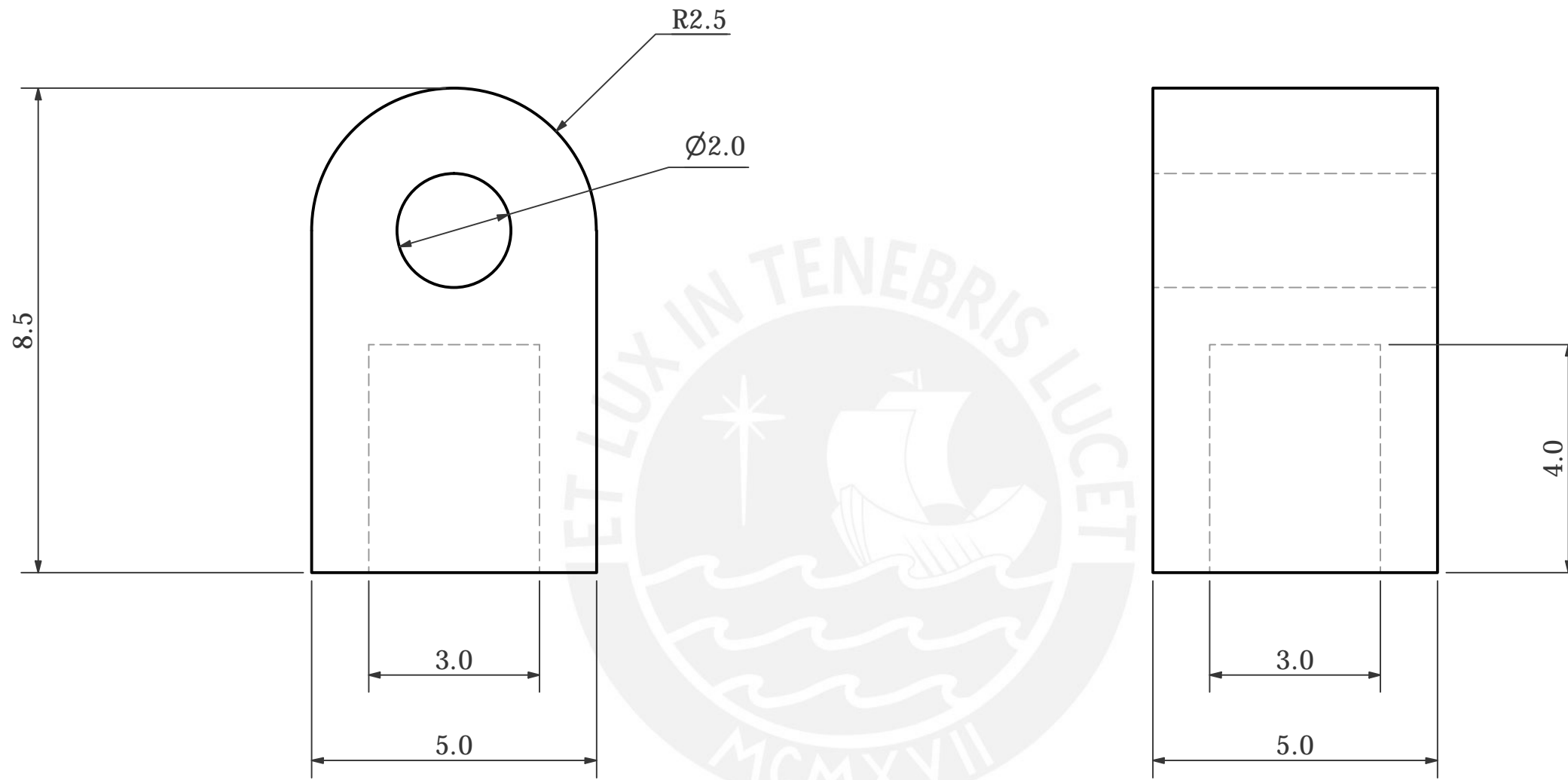


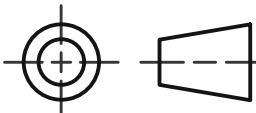
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	Presentación - Tesis	ESCALA
	Módulo superior	1:1
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2024-11-15
REVISADO POR:		LÁMINA: PD-SP2-A3

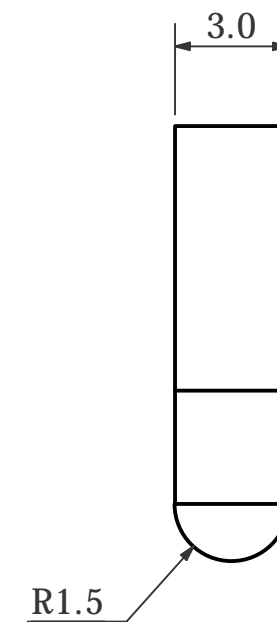
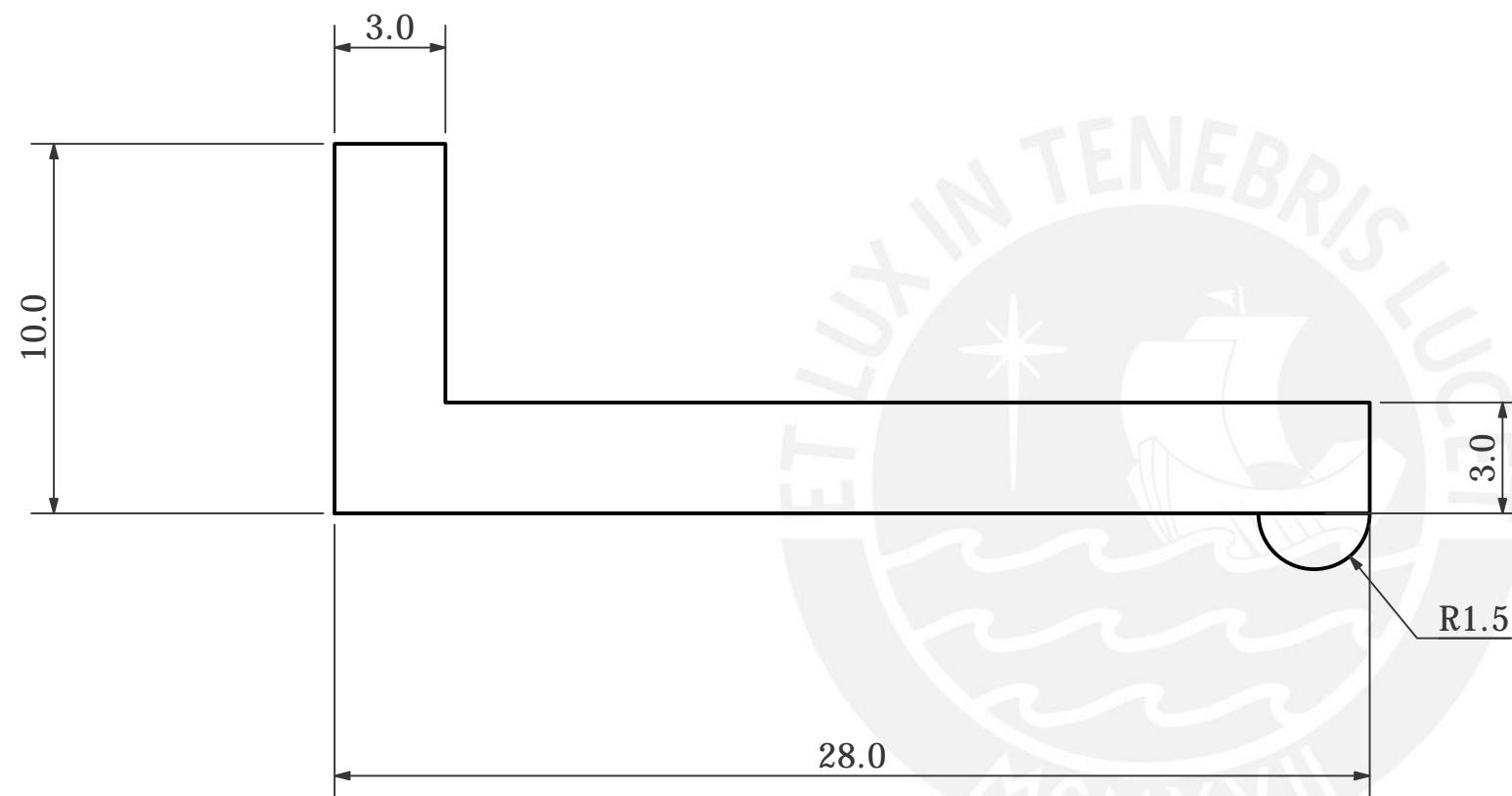


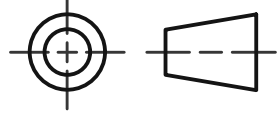
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN
Material: Polvo de Nylon
Temperatura: 250°C
Velocidad: 45 mm/s
Relleno: 50%

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	Presentación - Tesis	ESCALA
	Porta cámara	10:1
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2025-01-10
REVISADO POR:		LÁMINA: PD-PC-A3

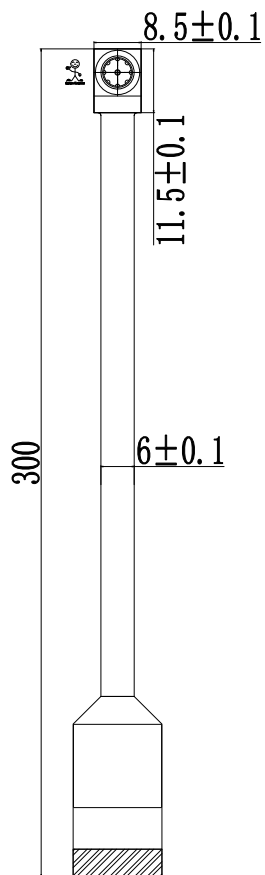


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	Presentación - Tesis <h2 style="text-align: center;">Portapin</h2>	ESCALA <h2 style="text-align: center;">10:1</h2>
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2025-01-14
		LÁMINA: PD-PP-A3

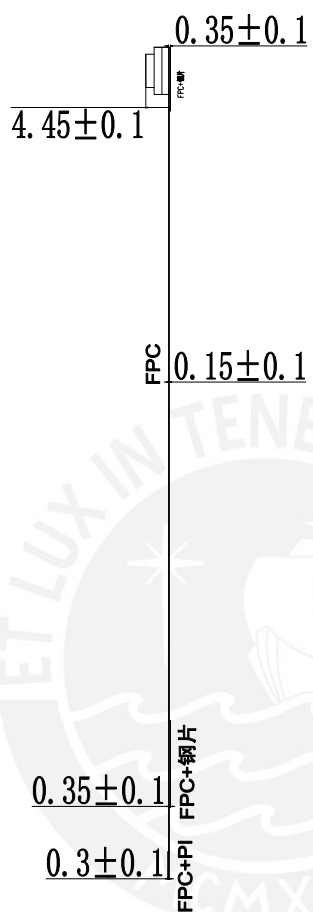


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	Presentación - Tesis Elemento de golpe	ESCALA 5:1
20150428	Peralta Vizquerra, Gonzalo Javier	FECHA: 2025-01-14
		LÁMINA: PD-EG-A3

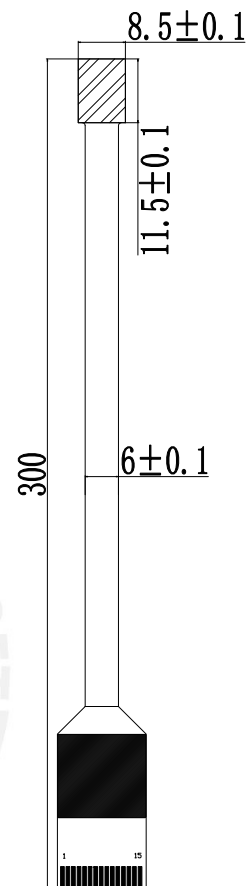
TOP VIEW



SIDE VIEW



BOTTOM VIEW



PIN DEFINITION 1

1	GND	
2	MDNO	
3	MDPO	
4	GND	
5	MDN1	
6	MDP1	
7	GND	
8	MCN	
9	MCP	
10	GND	
11	GPIO	
12	CLK	
13	SCL	
14	SDA	
15	+3V3	

SENSOR

LENS

Sensor	OV5647	Structure	4P (650nm)
Resolution	5 MP	TV Distortion	≤8.5%
Format	1/4"	EFL	2.8mm
FOV	81°	FNO	2mm

CONNECTOR

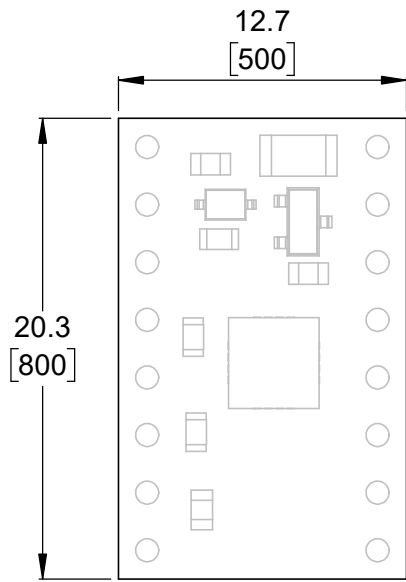
电压范围

型号	15PIN金手指
PIN	15
PEACH	0.5mm
对应socket	

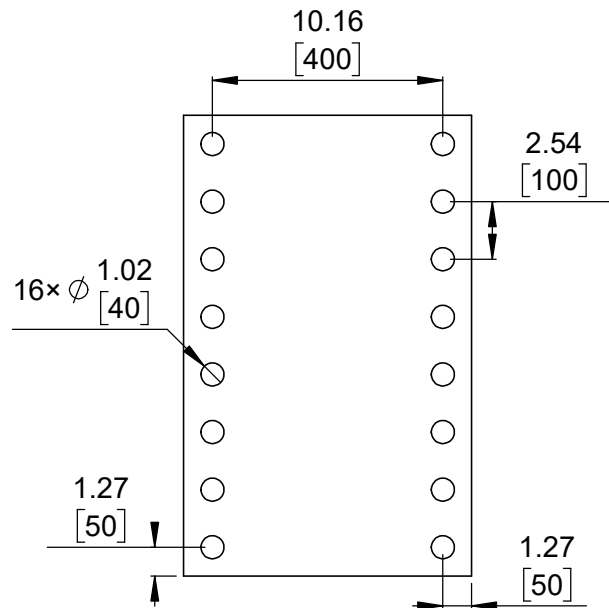
AVDD	2.7 ~ 3.0V (Typical 2.8V)
DVDD	1.45 ~ 1.55V
DOVDD	1.7 ~ 3.0V

线性尺寸未标注公差均为正负0.1MM

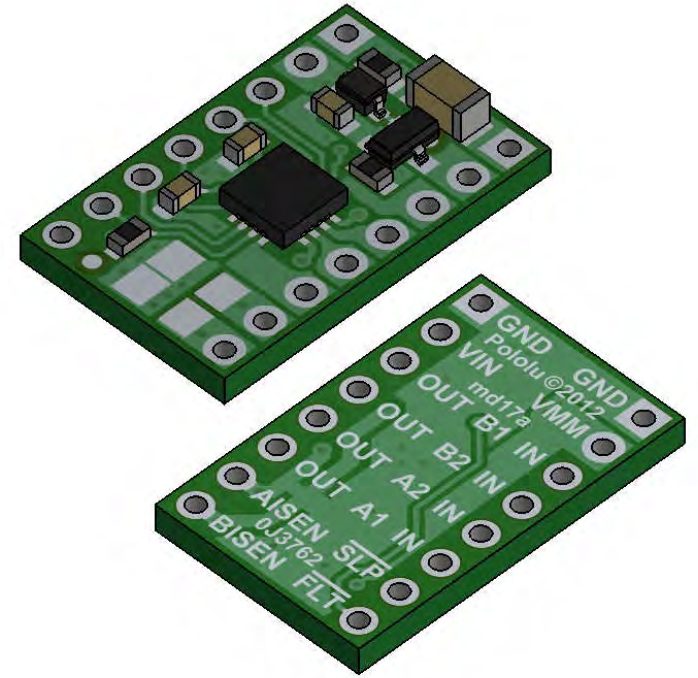
				图纸信息		绘图 DRAWING		KAI		2018.06.02	
4				SCALE	1:1	型号 P/N	UCT02-CM5647-V2	检查 CHECKED			
3				UNIT	mm						
2				SIZE	A4	客户型号 Customer P/N	UCT02-CM5647-V2	批准 APPROVED	Lee		2018.06.02
1				SHEET	1 OF 1						
NO.											



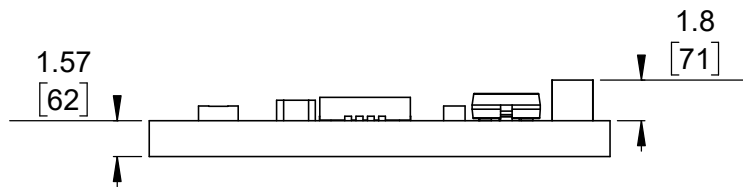
① Board dimensions (top view) Scale 3:1



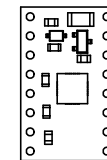
② Connector callouts (bottom view) Scale 3:1



③ Isometric view Scale 3:1



④ Profile Scale 3:1



⑤ Actual size Scale 1:1

1. To get the specified scale, select 100% in print settings.
2. Drill location tolerance: ± 0.1 [± 5].
3. Board edge tolerance: ± 0.3 [± 10].

<https://www.pololu.com/product/2130>

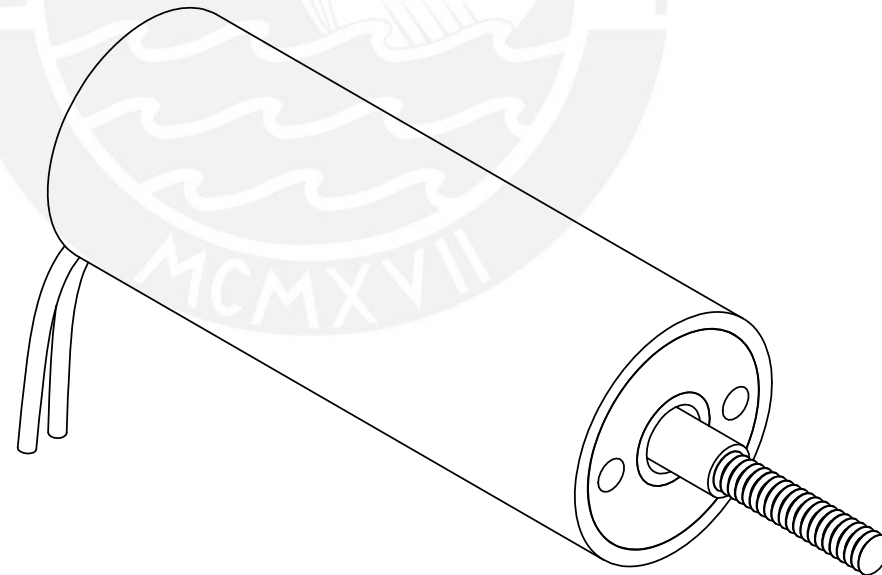
Name: DRV8833 Dual Motor Driver Carrier		Item number: 2130	
Drawing date: 26 October 2018		Dev code: md17a	
Units: mm [mil]		Material: mixed	



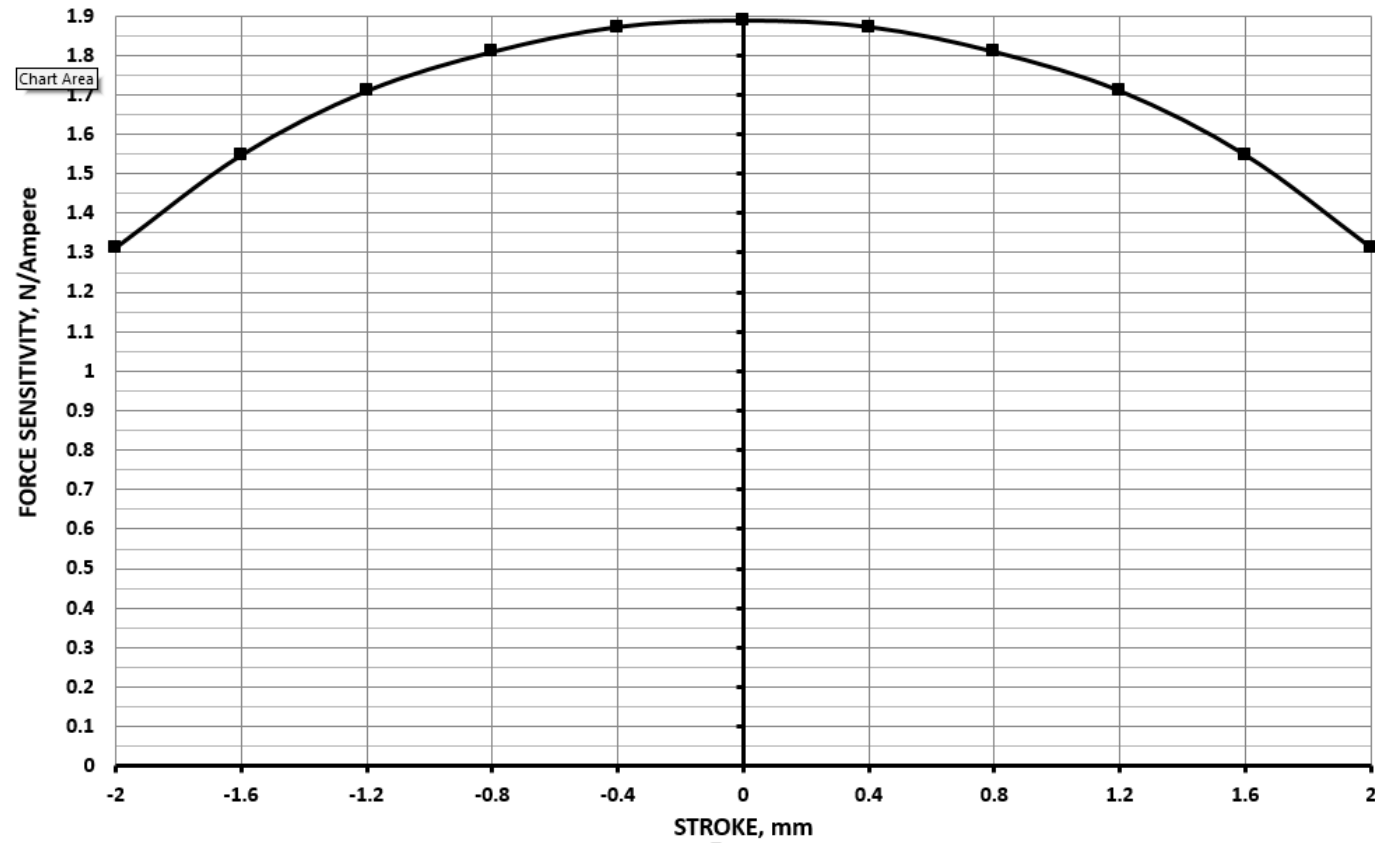
Winding Constants *	Units	Tol	Symbol	Wdg	A
DC Resistance	Ohms	± 12.5%	R	5.1	
Voltage @ F _p	Volts	NOMINAL	V _p	5.1	
Current @ F _p	Amps	NOMINAL	I _p	1.0	
Force Sensitivity	OZ/Amp	+ 10%	K _F	6.8	
	N/Amp	+ 10%		1.89	
Back EMF Constant	V/(ft/sec)	+ 10%	K _B	0.576	
	V/(m/sec)	+ 10%		1.89	
Inductance ****	micro-Henry	± 15%	L	220	

Linear Actuator Parameters *	Units	Symbol	Value
Peak Force **	OZ	F _p	6.8
	N		1.89
Continuos Stall Force ***	OZ	F _{CS}	3.98 (EST)
	N		1.11 (EST)
Actuator Constant *****	OZ/√Watt	K _A	3.01
	N/√Watt		0.84
Electrical Time Constant	micro-sec	τ _E	43.1
Mechanical Time Constant	milli-sec	τ _M	4.98
Theoretical Acceleration @ F _p	ft/sec ²	α _T	1776.9
	m/sec ²		541.6
Max Theoretical Frequency @ F _p , Full Stroke and Triangular Motion	Hz	f _{max}	92
Power I ² R @ F _p	Watts	P _p	5.1
Stroke:	± in		0.079
	± mm		2
Thermal Resistance of Coil	°C/Watt	θ _{TH}	50 (EST)
Maximum Allowable Coil Winding Temp	°C	Temp	155
Weight of Moving Field Assembly	OZ	WT _{F.A}	0.123
	g		3.49
Total Weight	OZ	WT _T	0.353
	g		10

* AT MID-STROKE POSITION & @ 25 °C AMBIENT TEMPERATURE.
 ** 10 SECONDS @ 25 °C AMBIENT & 155 °C COIL TEMPERATURE.
 *** @ 25 °C AMBIENT & 155 °C COIL TEMPERATURE.
 ***** MEASURED AT 1000 Hz.



ZONE	REV.	REVISION DESCRIPTION	ECN NO.	DATE
	X2			

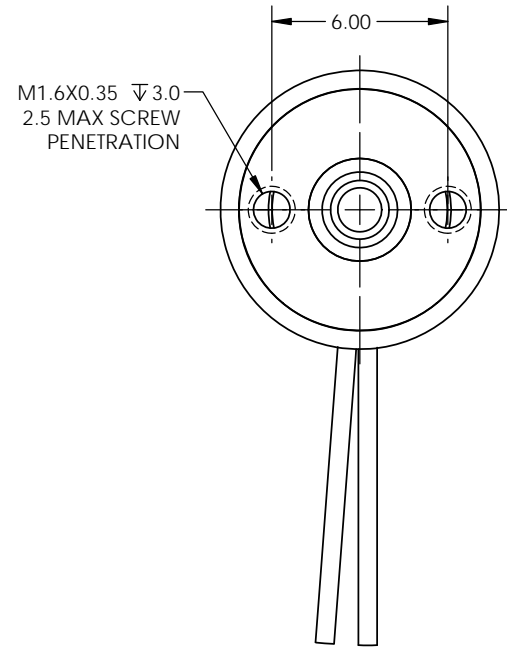
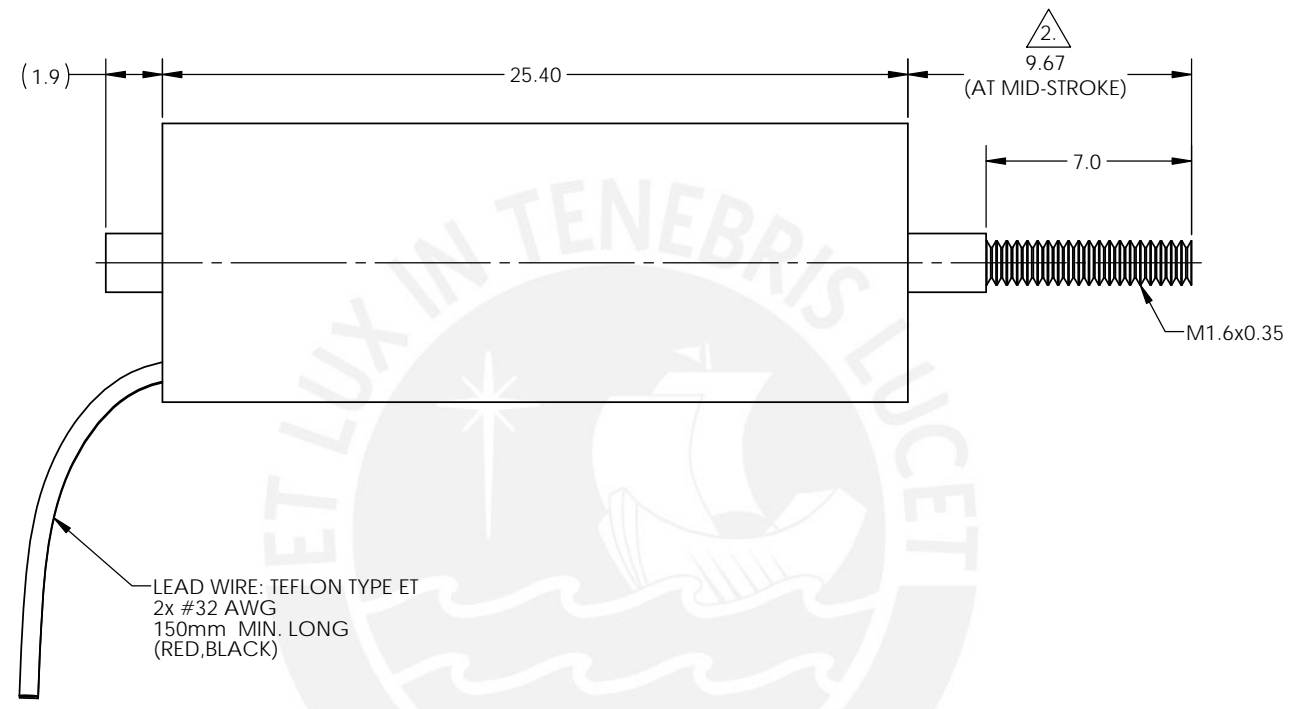
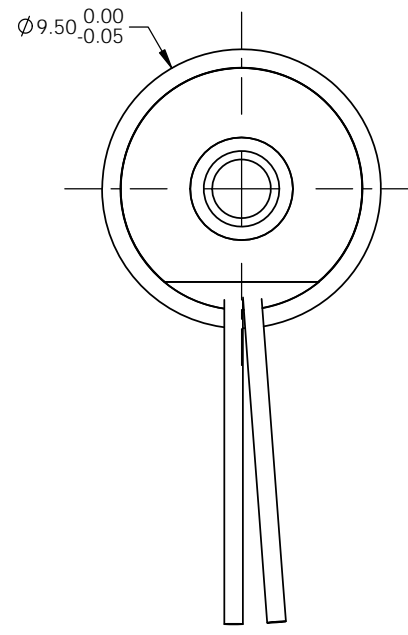


SOLIDWORKS

METRIC DRAWING

FOR REFERENCE ONLY, CHECK LATEST REVISION BEFORE USE.		529 PLEASANT STREET P.O. BOX 2964 ATTLEBORO, MA 02703	
DRAWN DATE ENGINEER	SENSATA TECHNOLOGIES PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL. NEITHER THIS PRINT NOR THE INFORMATION CONTAINED HEREON IS TO BE USED AGAINST THE INTERESTS OF ANY OF ITS AFFILIATED COMPANIES OR WHOLLY OWNED SUBSIDIARIES.		
DATE APPROVED M. GODKIN	INTERPRET DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5-2009. UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.		
DATE APPROVED	DECIMALS X ± 0.8 X.X ± 0.25 X.XX ± 0.13	ANGLES X.X° ± 0°30'	TITLE LINEAR ACTUATOR HOUSED
DATE APPROVED	DO NOT SCALE DRAWING	THIRD ANGLE PROJECTION	SIZE DWG NO. C LAH04-10-000A
			REV. X2
			SCALE NONE SHEET 1 OF 2





LEAD WIRE: TEFLON TYPE ET
2x #32 AWG
150mm MIN. LONG
(RED,BLACK)

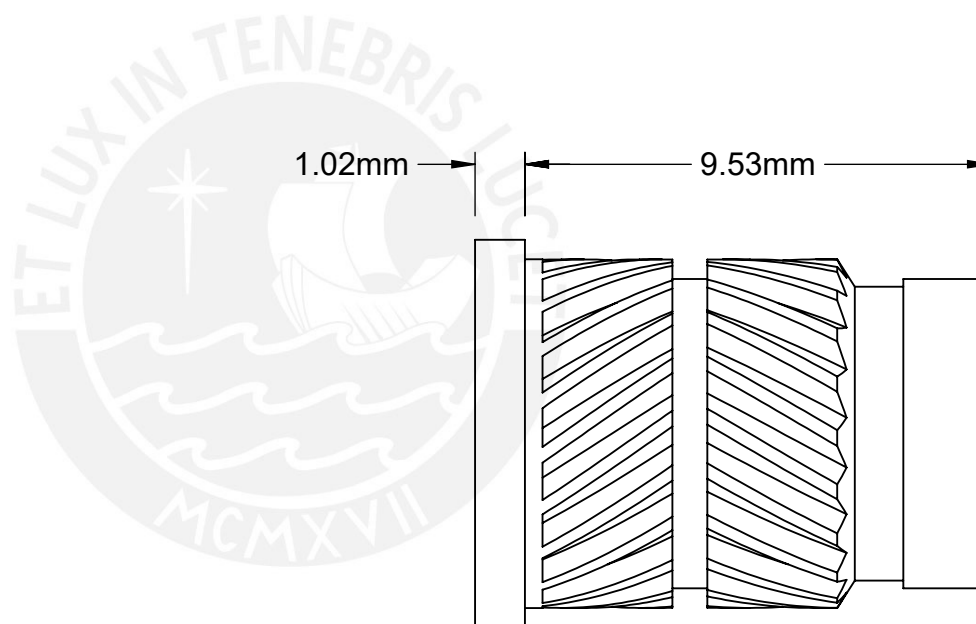
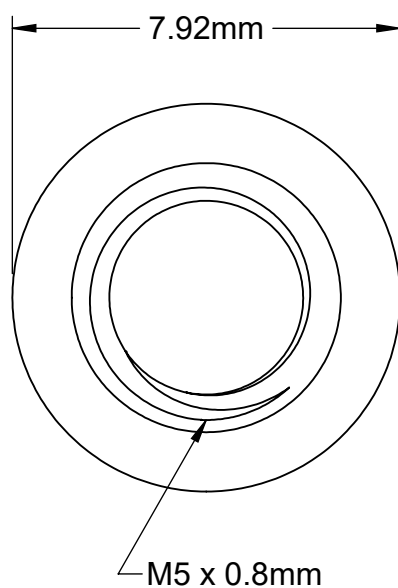
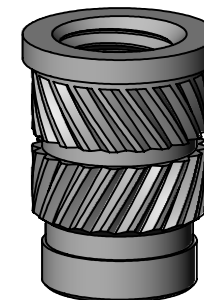
NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

- 1. METRIC DRAWING. DIMENSIONS IN BRACKETS [] ARE IN INCHES AND ARE FOR REFERENCE ONLY.
- 2. SHAFT SHOWN AT MID-STROKE POSITION. SYSTEM ALLOWS FOR 0.5 MECHANICAL OVER TRAVEL IN BOTH DIRECTION.
- 3. A POSITIVE (+) VOLTAGE APPLIED TO THE RED LEAD WIRE WILL PRODUCE A FORCE ON THE COIL ASSEMBLY IN THE POSITIVE (+) DIRECTION.


METRIC DRAWING

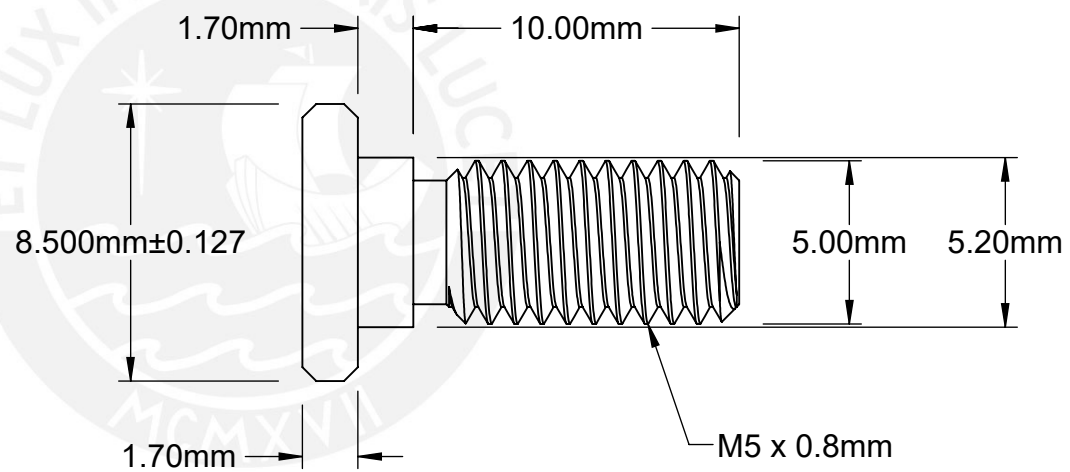
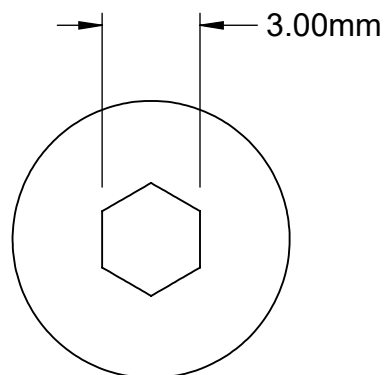
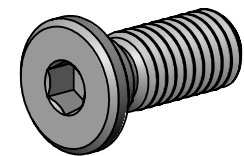
		529 PLEASANT STREET P.O. BOX 2964 ATTLEBORO, MA 02703	
SIZE	DWG NO.	REV.	
C	LAH04-10-000A	X2	
SCALE	2:1	SOLIDWORKS	SHEET 2 OF 2





For Minimum Material Thickness: 10.29mm
Drill Bit Size: 6.4mm
For Maximum Hole Diameter: 6.40mm

McMASTER-CARR  http://www.mcmaster.com © 2023 McMaster-Carr Supply Company Information in this drawing is provided for reference only.	PART NUMBER	97171A350
	Brass Heat-Set Inserts for Plastic	



McMASTER-CARR 

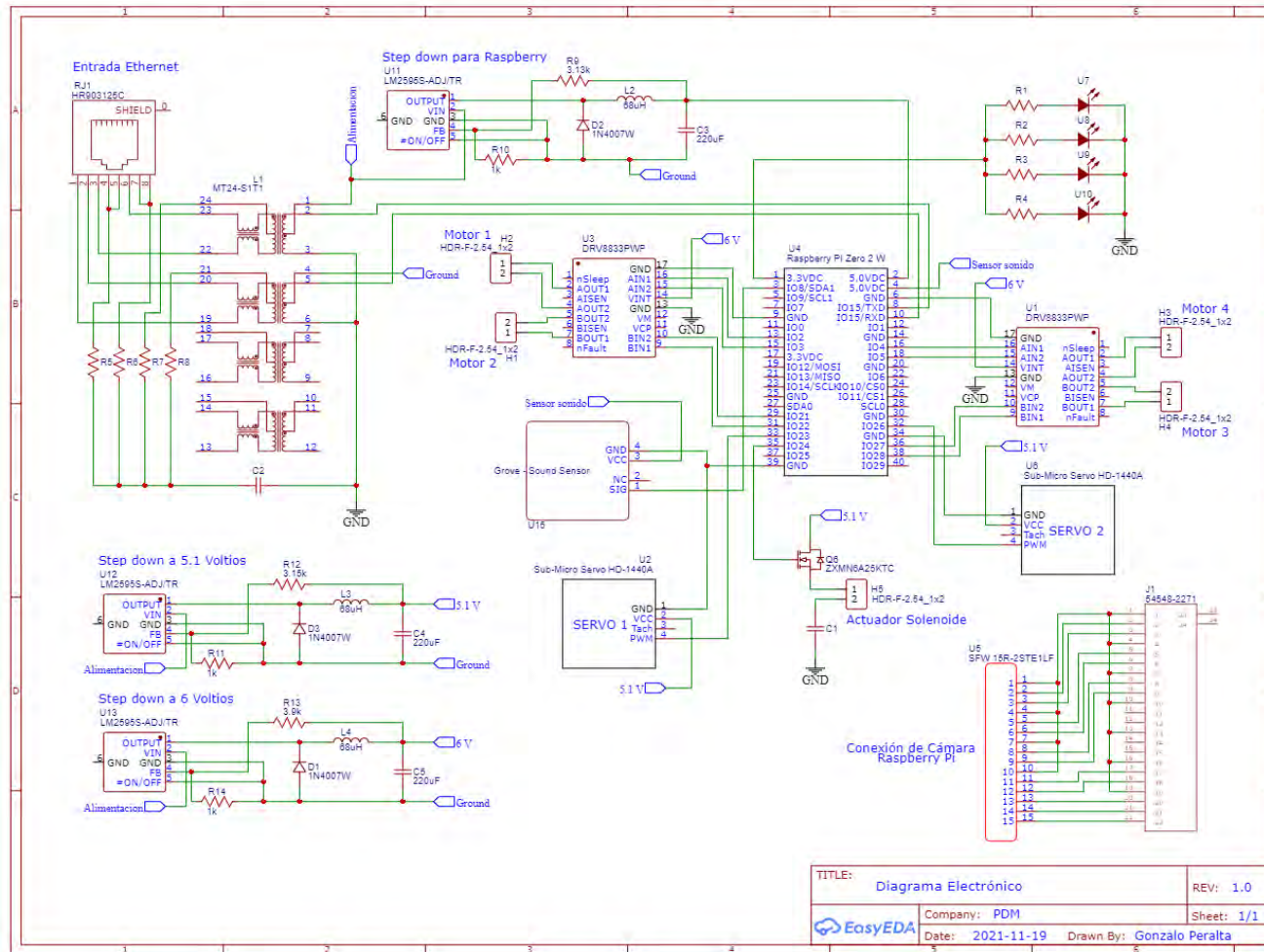
<http://www.mcmaster.com>
© 2022 McMaster-Carr Supply Company

Information in this drawing is provided for reference only.

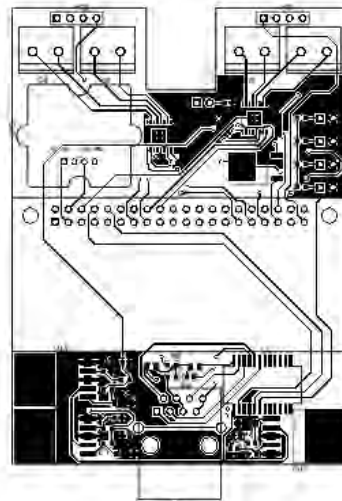
PART NUMBER **91223A429**

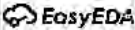
316 Stainless Steel Ultra-Low-Profile Socket Head Screw

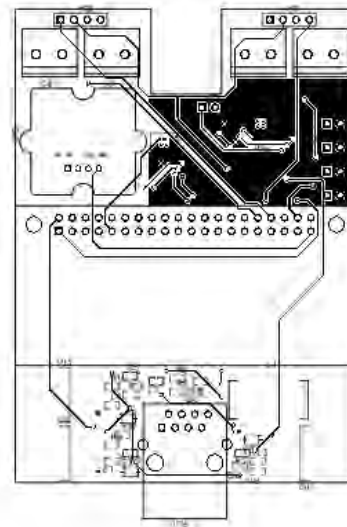
Anexo E: Diagrama de conexiones



Anexo F: Planos Eléctricos



TITLE:	Placa Electronica de Robot plano	00 0: 0.0
 EasyEDA	Company: PUCP	Sheet: 1/3
	Date: 2021-11-22	Drawn By: Gonzalo Perella



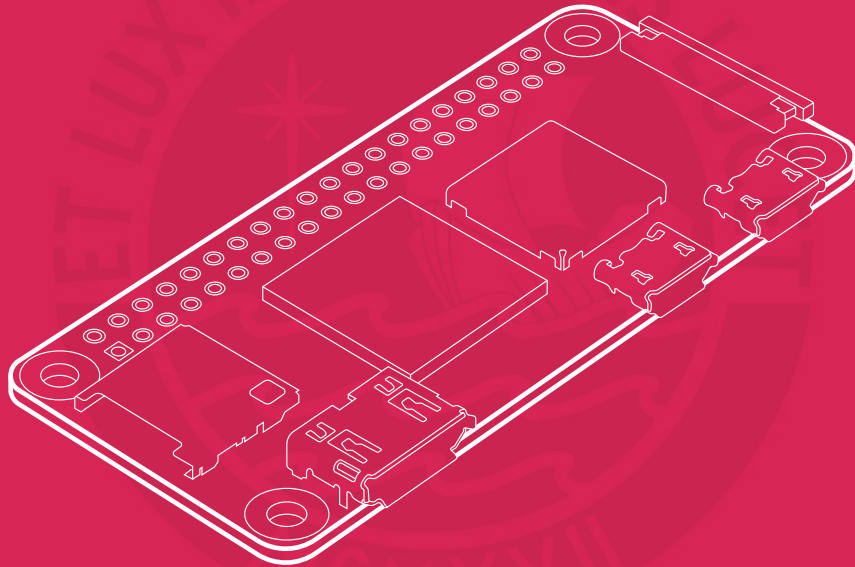
TITLE: Placa Electronica de Robot piang	REV: 1.0
Company: PUCP	Sheet: 2/2
Date: 2021-11-22	Drawn By: Gonzalez Peralta

Anexo G: Datasheets



Raspberry Pi Zero 2 W

Published April 2024



HDMI[™]
HIGH-DEFINITION MULTIMEDIA INTERFACE

The terms HDMI, HDMI High-Definition Multimedia Interface, and the HDMI Logo are trademarks or registered trademarks of HDMI Licensing Administrator, Inc.

Overview



Raspberry Pi Zero 2 W is the latest product in our most affordable range of single-board computers. The successor to the breakthrough Raspberry Pi Zero W, Raspberry Pi Zero 2 W is a form factor-compatible drop-in replacement for the original board.

The board incorporates a quad-core 64-bit Arm Cortex-A53 CPU, clocked at 1GHz. At its heart is a Raspberry Pi RP3A0 system-in-package (SiP), integrating a Broadcom BCM2710A1 die with 512MB of LPDDR2 SDRAM. The upgraded processor provides Raspberry Pi Zero 2 W with 40% more single-threaded performance, and five times more multi-threaded performance, than the original single-core Raspberry Pi Zero.

Raspberry Pi Zero 2 W offers 2.4GHz 802.11 b/g/n wireless LAN and Bluetooth 4.2, along with support for Bluetooth Low Energy (BLE), and modular compliance certification.

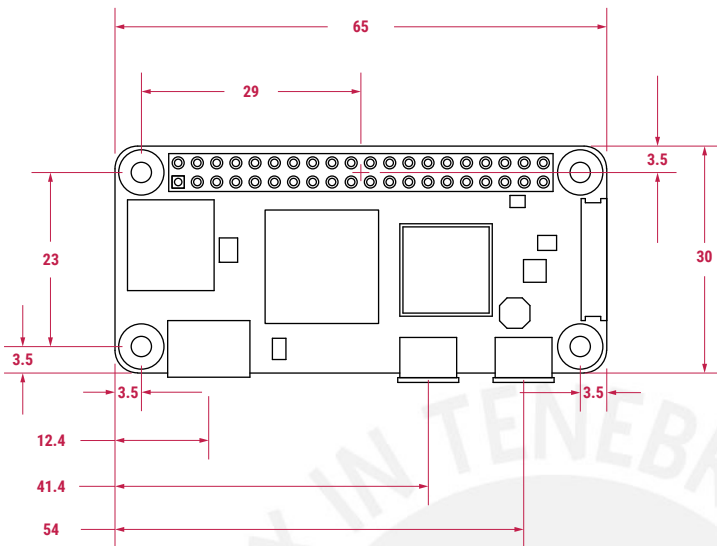
The board has a microSD card slot, a CSI-2 camera connector, a USB On-The-Go (OTG) port, and an unpopulated footprint for a HAT-compatible 40-pin GPIO header. It is powered via a micro USB socket. Video output is via a mini HDMI port; composite video output can easily be made available via test points if needed.

Sharing the same form factor as the original Raspberry Pi Zero, Raspberry Pi Zero 2 W fits inside most existing Raspberry Pi Zero cases.

Specification

Form factor:	65mm × 30mm
Processor:	Broadcom BCM2710A1, quad-core 64-bit SoC (Arm Cortex-A53 @ 1GHz)
Memory:	512MB LPDDR2
Connectivity:	<ul style="list-style-type: none">• 2.4GHz IEEE 802.11b/g/n wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE, onboard antenna• 1 × USB 2.0 interface with OTG• HAT-compatible 40-pin I/O header footprint• microSD card slot• Mini HDMI port• CSI-2 camera connector
Video:	<ul style="list-style-type: none">• HDMI interface• Composite video
Multimedia:	<ul style="list-style-type: none">• H.264, MPEG-4 decode (1080p30)• H.264 encode (1080p30)• OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
Input power:	5V DC 2.5A
Operating temperature:	-20°C to +70°C
Production lifetime:	Raspberry Pi Zero 2 W will remain in production until at least January 2030
Compliance:	For a full list of local and regional product approvals, please visit pip.raspberrypi.com

Physical specification



Note: all dimensions in mm

WARNINGS

- Any external power supply used with Raspberry Pi Zero 2 W shall comply with relevant regulations and standards applicable in the country of intended use.
- This product should be operated in a well-ventilated environment, and if used inside a case, the case should not be covered.
- Whilst in use, this product should be placed on a stable, flat, non-conductive surface, and should not be contacted by conductive items.
- The connection of incompatible devices to Raspberry Pi Zero 2 W may affect compliance, result in damage to the unit, and invalidate the warranty.
- All peripherals used with this product should comply with relevant standards for the country of use and be marked accordingly to ensure that safety and performance requirements are met. These articles include but are not limited to keyboards, monitors, and mice when used in conjunction with Raspberry Pi Zero 2 W.
- The cables and connectors of all peripherals used with this product must have adequate insulation so that relevant safety requirements are met.

SAFETY INSTRUCTIONS

To avoid malfunction or damage to this product, please observe the following:

- Do not expose to water or moisture, or place on a conductive surface whilst in operation.
- Do not expose to heat from any source; Raspberry Pi Zero 2 W is designed for reliable operation at normal ambient temperatures.
- Take care whilst handling to avoid mechanical or electrical damage to the printed circuit board and connectors.
- Whilst it is powered, avoid handling the printed circuit board, or only handle it by the edges to minimise the risk of electrostatic discharge damage.



Raspberry Pi is a trademark of Raspberry Pi Ltd

Arducam 1/4 Inch 5 Megapixels Sensor Spy Camera Module with Flex Cable for Raspberry Pi



Specifications

Sensor	Omnivision OV5647 sensor
Optical Size	1/4" (OV5647)
Resolution	5MP 2592x1944
Frame Rates	1080p 30 fps, 720p 60fps, 480p 90fps
IR Sensitivity	Integral IR-cut filter, visible light only
Focus Distance	1 m to infinity
Field of View(FOV)	62°(H), 47°(V)
Full-frame SLR lens equivalent	35mm
Focus Type	Fixed Focus
Lens Type	Stock Lens
Dimension	300 x 16 mm flex cable, neck wide is 6mm

1. 使用環境條件

Apply Environmental Condition :

No.	項目 item	規格 standard
1-1	保存溫度 Storage Temperature Range	-20°C ~ 60°C
1-2	操作溫度 Operating Temperature Range	-10°C ~ 50°C
1-3	操作電壓 Operating Voltage Range	4.8V~6.0V

2. 測試環境

Standard Test Environment :

2-1	測試環境 Standard Test Environment	<p>每一个检查必须是正常的温度和湿度进行测量，温度 $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$，相对湿度 $65 \pm 10\%$，在按照本规范的标准测试条件下判断特征。</p> <p>Every characteristic of the inspect must be normal temperature and humidity carry out the test , temperature $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ and relative humidity $65 \pm 10\%$ of judgment made in accordance with this specification standard testing conditions.</p>
-----	-----------------------------------	---

3. 外觀檢查

Appearance Inspection :

No.	項目 item	規格 standard
3-1	外觀尺寸 Outline Drawing	尺寸见附件 Dimension see the attachment
3-2	外觀 Appearance	无损坏，不允许影响功能 No damage which affects functions allowed

4. 電氣特性

Electrical Specification (Function of the Performance) :

No.	項目 item	4.8V	6.0V
4-1	空載轉速 Operating speed (at no load)	0.12 sec/60°	0.10 sec/60°
4-2	空載電流 Running current (at no load)	100 mA	110 mA
4-3	停止扭力 Stall torque (at locked)	0.6 kg-cm	0.8 kg-cm
4-4	停止電流 Stall current (at locked)	270 mA	320 mA
4-5	待機電流 Idle current (at stopped)	4 mA	5 mA

注：項目 4-2 定义平均值时，伺服器无负荷运行

Note: Item 4-2 definition is average value when the servo running with no load

5. 機械特性

Mechanical Specification :

No.	項目 item	規格 standard
5-1	外觀尺寸 Overall Dimensions	见附件 See the drawing
5-2	機構極限角度 Limit angle	180° ± 10°
5-3	重量 Weight	4.4 ± 1g
5-4	導線規格 Connector wire gauge	# 32 PVC
5-5	導線長度 Connector wire length	100 ± 5 mm
5-6	舵片規格 Horn gear spline	20T/φ 3.85
5-7	舵片種類 Horn type	十字，條型 Cross , Double
5-8	減速比 Reduction ratio	1/378



Product Name
模拟伺服器 Analog Servo

Model No.
1440A

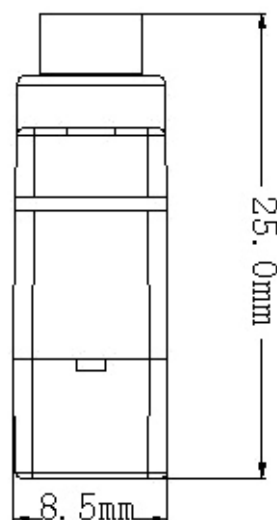
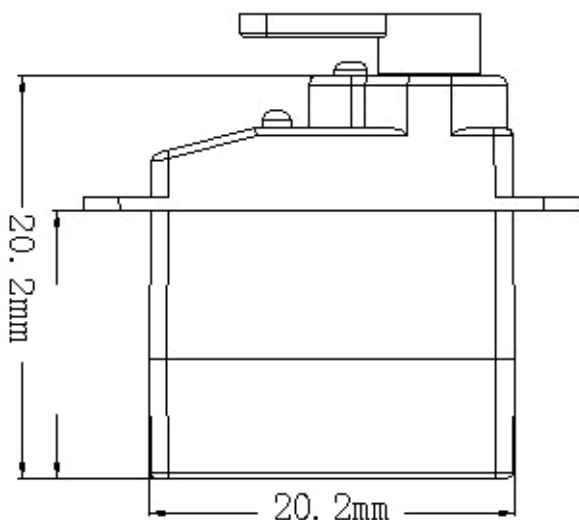
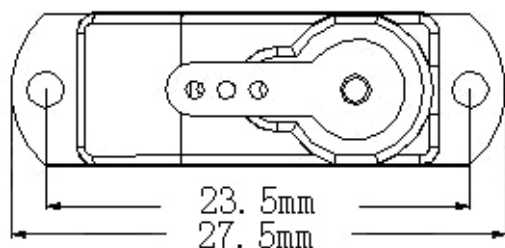
Version
V1

Page
2/3

6. 控制特性

Control Specification :

No.	項目	規格
6-1	控制系統 Control system	改變脈沖寬度 Pulse Width Modification
6-2	放大器種類 Amplifier type	模擬控制器 Analog Controller
6-3	操作角度 Operating travel	90° (在 1000→2000 μ sec)
6-4	中立位置 Neutral position	1500 μ sec
6-5	脈波訊號虛位 Dead band width	7 μ sec
6-6	旋轉方向 Rotating direction	順時針 (在 1500→2000 μ sec) Counterclockwise (when 1500→2000 μ sec)
6-7	脈波寬度範圍 Pulse width range	800→2200 μ sec
6-8	可作動角度範圍 Maximum travel	大約 165° (在 800→2200 μ sec) Approx 165° (when 800→2200 μ sec)



Product Name
模擬伺服器 Analog Servo

Model No.
1440A

Version
V1

Page
3/3



ProLight PJ2N-FFxE
0.5W Power LED
Technical Datasheet
Version: 1.2

ProLight Opto ® PJ2N Series

Features

- Good color uniformity
- Lead free reflow soldering
- RoHS compliant
- Instant light (less than 100ns)
- No UV

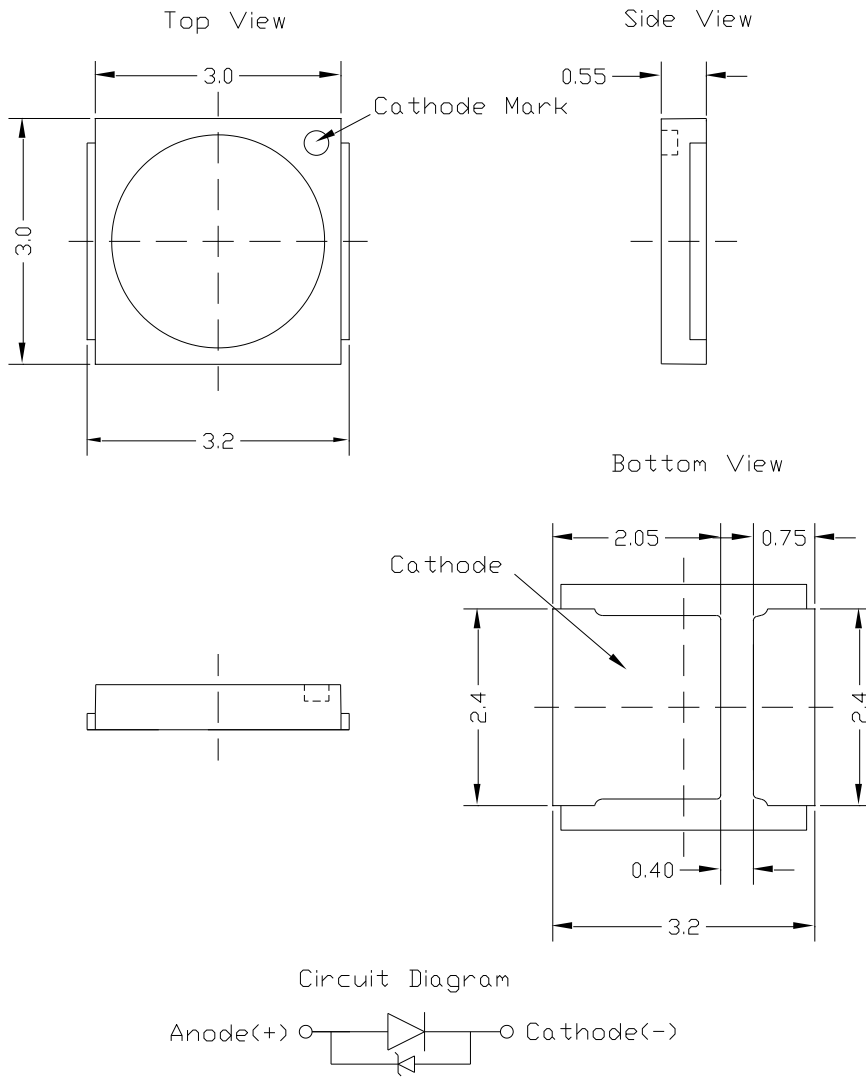
Main Applications

- Backlighting
- Signaling
- Exterior Automotive Lighting
- Automotive Interior Lighting

Introduction

· PJ2N qualifies as the JEDEC Level 1 MSL sensitivity level and suitable for SMD process, Pb_free reflow soldering capability, and full compliance with EU Reduction of Hazardous Substances (RoHS) legislation.

Emitter Mechanical Dimensions



Notes:

1. The cathode side of the device is denoted by the chamfer on the part body.
2. Drawing not to scale.
3. All dimensions are in millimeters.
4. Unless otherwise indicated, tolerances are $\pm 0.10\text{mm}$.
5. Please do not solder the emitter by manual hand soldering, otherwise it will damage the emitter.
6. **Please do not use a force of over 0.3kgf impact or pressure on the lens of the LED, otherwise it will cause a catastrophic failure.**

*The appearance and specifications of the product may be modified for improvement without notice.

Flux Characteristics at 150mA, T_j = 25°C

Radiation Pattern	Color	Part Number Emitter	Luminous Flux Φ _v (lm)	
			Minimum	Typical
Lambertian	White	PJ2N-FFWE	55	60
	Warm White	PJ2N-FFVE	50	58
	Red	PJ2N-FFRE	18.1	20
	Green	PJ2N-FFGE	30.6	35
	Blue	PJ2N-FFBE	6.3	8

- ProLight maintains a tolerance of ± 7% on flux and power measurements.
- Please do not drive at rated current more than 1 second without proper heat sink.

Electrical Characteristics at 150mA, T_j = 25°C

Color	Forward Voltage V _F (V)			Thermal Resistance Junction to Slug (°C/W)
	Min.	Typ.	Max.	
White	2.8	3.2	3.6	25
Warm White	2.8	3.2	3.6	25
Red	1.8	2.2	2.6	20
Green	2.8	3.2	3.6	20
Blue	2.8	3.2	3.6	20

- ProLight maintains a tolerance of ± 0.1V for Voltage measurements.

Optical Characteristics at 150mA, T_j = 25°C

Radiation Pattern	Color	Dominant Wavelength λ _D , or Color Temperature CCT			Total included Angle (degrees) θ _{0.90V}	Viewing Angle (degrees) 2 θ _{1/2}
		Min.	Typ.	Max.		
		Lambertian	White	4745 K	5850 K	6950 K
Warm White	2580 K		2900 K	3250 K	160	120
Red	613.5 nm		623 nm	631 nm	160	120
Green	515 nm		525 nm	535 nm	160	120
Blue	455 nm		465 nm	475 nm	160	120

- ProLight maintains a tolerance of ± 1nm for dominant wavelength measurements.
- ProLight maintains a tolerance of ± 5% for CCT measurements.

Absolute Maximum Ratings

Parameter	White/Warm White/Red/Green/Blue
DC Forward Current (mA)	150
Peak Pulsed Forward Current (mA)	220 (less than 1/10 duty cycle@1KHz)
ESD Sensitivity (HBM per MIL-STD-883E Method 3015.7)	±4000V (Class III)
LED Junction Temperature	120°C
Operating Board Temperature at Maximum DC Forward Current	-40°C - 90°C
Storage Temperature	-40°C - 120°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3
Reverse Voltage	Not designed to be driven in reverse bias

Photometric Luminous Flux Bin Structure

Color	Bin Code	Minimum Photometric Flux (lm)	Maximum Photometric Flux (lm)	Available Color Bins
White	S2	55	60	All [1]
	S3	60	65	[1]
	S4	65	70	[1]
Warm White	S1	50	55	All
	S2	55	60	All [1]
	S3	60	65	[1]
Red	N	18.1	23.5	All
	P	23.5	30.6	[1]
Green	Q	30.6	39.8	All
	R	39.8	51.7	[1]
Blue	J	6.3	8.2	All
	K	8.2	10.7	[1]

- ProLight maintains a tolerance of $\pm 7\%$ on flux and power measurements.
- The flux bin of the product may be modified for improvement without notice.
- ^[1] The rest of color bins are not 100% ready for order currently. Please ask for quote and order Possibility.

Dominant Wavelength Bin Structure

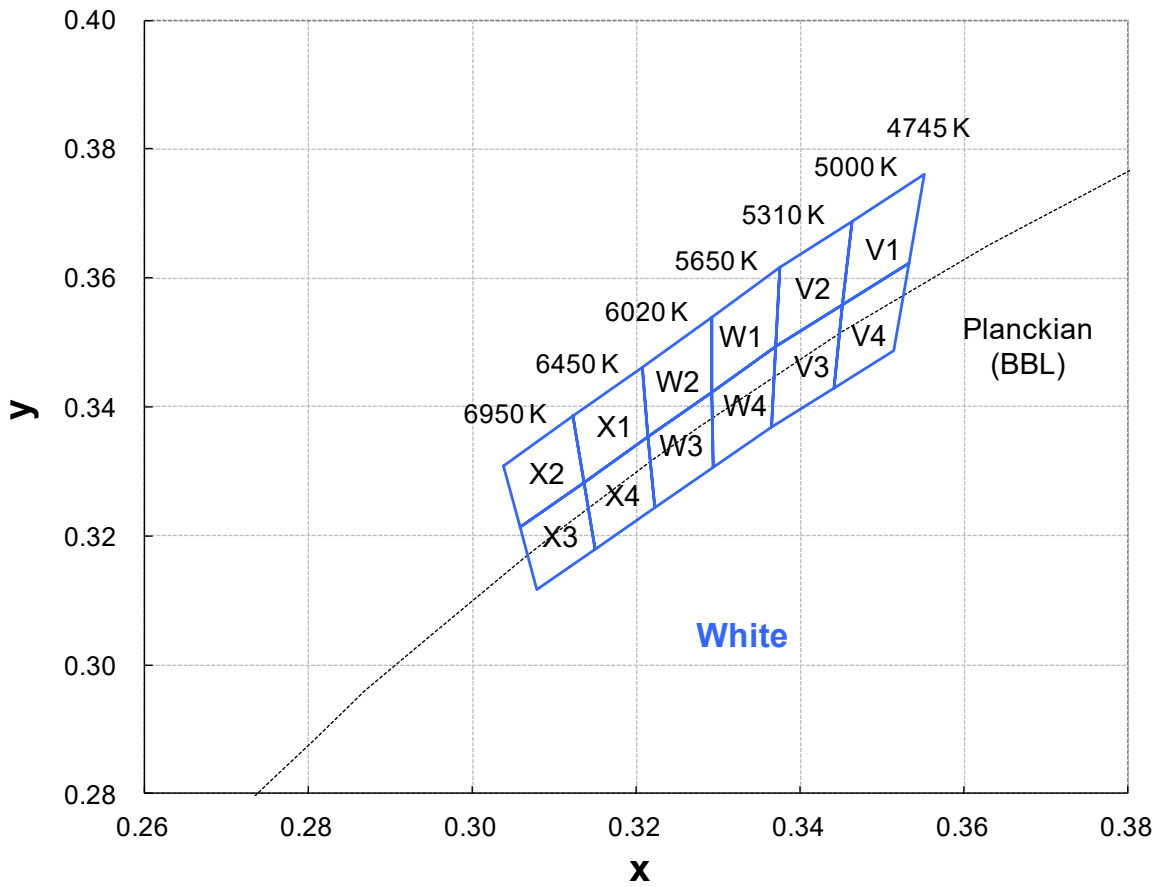
Color	Bin Code	Minimum Dominant Wavelength (nm)	Maximum Dominant Wavelength (nm)
Red	2	613.5	620.5
	4	620.5	631.0
Green	A	515	520
	1	520	525
	2	525	530
	3	530	535
Blue	A	455	460
	1	460	465
	2	465	470
	3	470	475

- ProLight maintains a tolerance of ± 1 nm for dominant wavelength measurements.

Note: Although several bins are outlined, product availability in a particular bin varies by production run and by product performance. Not all bins are available in all colors.

Color Bin

White Binning Structure Graphical Representation



Color Bins

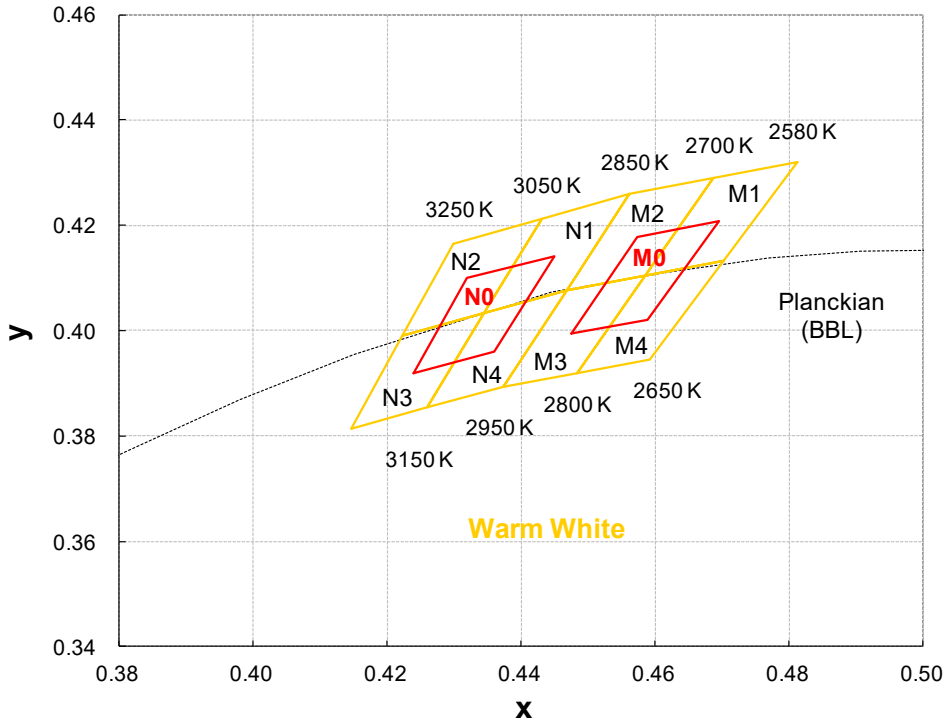
White Bin Structure

Bin Code	x	y	Typ. CCT (K)	Bin Code	x	y	Typ. CCT (K)
V1	0.3464	0.3688	4870	W2	0.3207	0.3462	5830
	0.3551	0.3760			0.3292	0.3539	
	0.3533	0.3624			0.3293	0.3423	
	0.3452	0.3558			0.3215	0.3353	
V4	0.3452	0.3558	4870	W3	0.3215	0.3353	5830
	0.3533	0.3624			0.3293	0.3423	
	0.3515	0.3487			0.3294	0.3306	
	0.3441	0.3428			0.3222	0.3243	
V2	0.3376	0.3616	5155	X1	0.3123	0.3385	6240
	0.3464	0.3688			0.3207	0.3462	
	0.3452	0.3558			0.3215	0.3353	
	0.3371	0.3493			0.3136	0.3283	
V3	0.3371	0.3493	5155	X4	0.3136	0.3283	6240
	0.3452	0.3558			0.3215	0.3353	
	0.3441	0.3428			0.3222	0.3243	
	0.3366	0.3369			0.3150	0.3180	
W1	0.3292	0.3539	5475	X2	0.3038	0.3308	6700
	0.3376	0.3616			0.3123	0.3385	
	0.3371	0.3493			0.3136	0.3283	
	0.3293	0.3423			0.3058	0.3213	
W4	0.3293	0.3423	5475	X3	0.3058	0.3213	6700
	0.3371	0.3493			0.3136	0.3283	
	0.3366	0.3369			0.3150	0.3180	
	0.3294	0.3306			0.3078	0.3117	

- Tolerance on each color bin (x , y) is ± 0.005

Color Bin

Warm White Binning Structure Graphical Representation



Color Bin

Warm White Bin Structure

Bin Code	x	y	Typ. CCT (K)	Bin Code	x	y	Typ. CCT (K)
M1	0.481	0.432	2650	N1	0.443	0.421	2950
	0.469	0.429			0.456	0.426	
	0.459	0.410			0.447	0.408	
	0.470	0.413			0.435	0.403	
M4	0.470	0.413	2650	N4	0.435	0.403	2950
	0.459	0.410			0.447	0.408	
	0.448	0.392			0.437	0.389	
	0.459	0.394			0.426	0.385	
M0	0.448	0.399	2700	N0	0.424	0.392	3050
	0.457	0.418			0.432	0.410	
	0.470	0.421			0.445	0.414	
	0.459	0.402			0.436	0.396	
M2	0.469	0.429	2800	N2	0.430	0.417	3150
	0.456	0.426			0.443	0.421	
	0.447	0.408			0.435	0.403	
	0.459	0.410			0.422	0.399	
M3	0.459	0.410	2800	N3	0.422	0.399	3150
	0.447	0.408			0.435	0.403	
	0.437	0.389			0.426	0.385	
	0.448	0.392			0.415	0.381	

- Tolerance on each color bin (x , y) is ± 0.005

Note:

1. Although several bins are outlined, product availability in a particular bin varies by production run and by product performance. Not all bins are available in all colors.
2. ProLight **SmartBin** is working to make the color bin smarter, by selecting that intelligence is infused into major **M0 , N0** bin with minor M1-M4 , N1-N4 bins and processes that make assembly easily

Forward Voltage Bin Structure

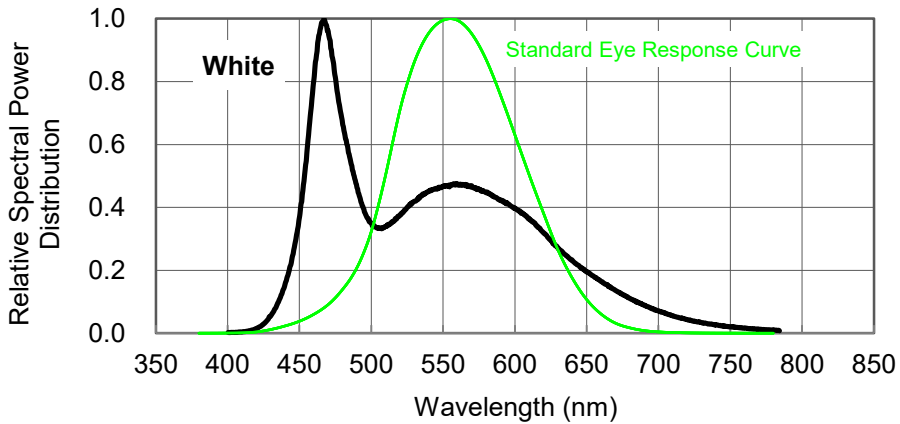
Color	Bin Code	Minimum Voltage (V)	Maximum Voltage (V)
White	A	2.8	3.0
	B	3.0	3.2
	D	3.2	3.4
	E	3.4	3.6
Warm White	A	2.8	3.0
	B	3.0	3.2
	D	3.2	3.4
	E	3.4	3.6
Red	A	1.8	2.0
	B	2.0	2.2
	D	2.2	2.4
	E	2.4	2.6
Green	A	2.8	3.0
	B	3.0	3.2
	D	3.2	3.4
	E	3.4	3.6
Blue	A	2.8	3.0
	B	3.0	3.2
	D	3.2	3.4
	E	3.4	3.6

- ProLight maintains a tolerance of $\pm 0.1V$ for Voltage measurements.

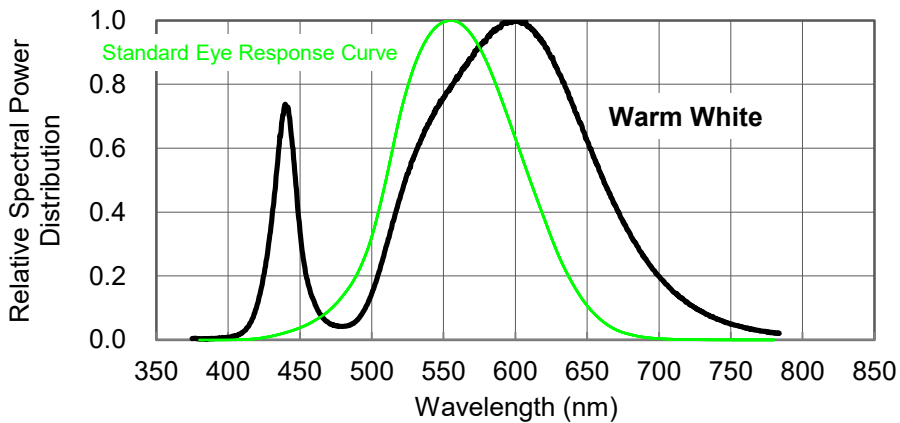
Note: Although several bins are outlined, product availability in a particular bin varies by production run and by product performance. Not all bins are available in all colors.

Color Spectrum, $T_j = 25^\circ\text{C}$

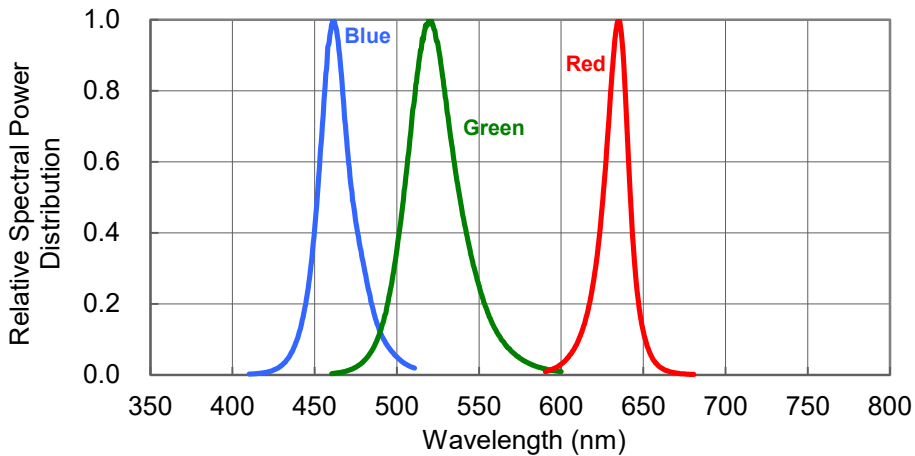
1. White



2. Warm White

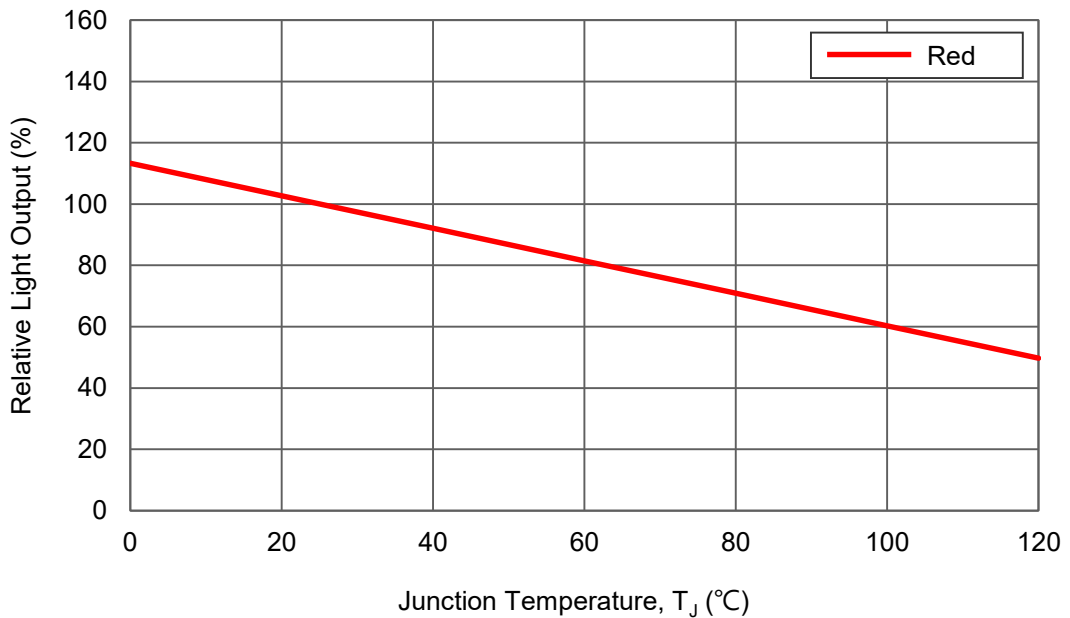
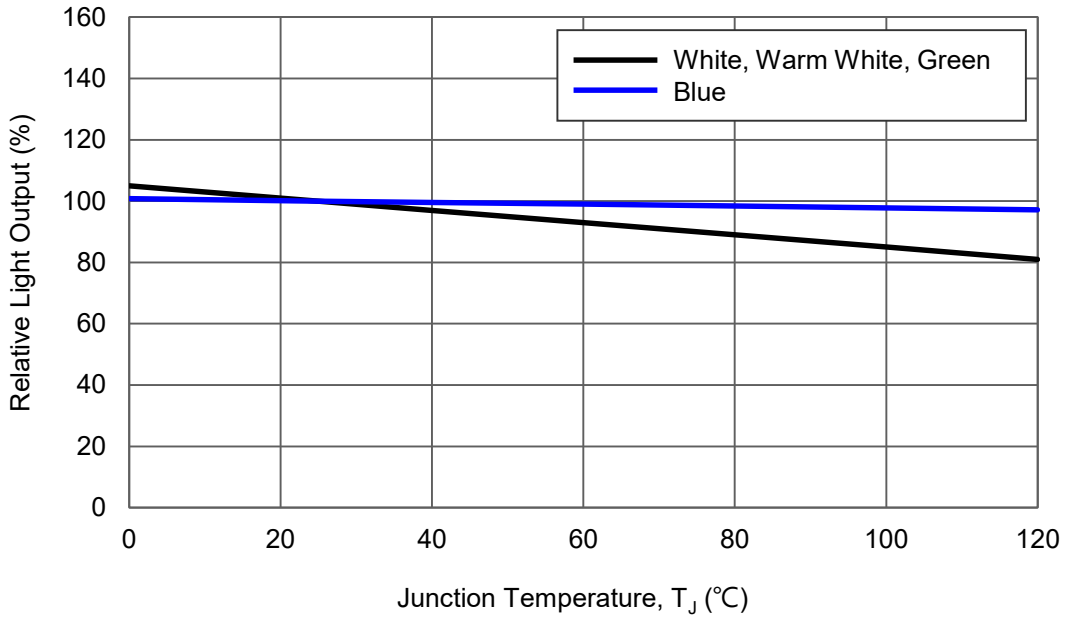


3. Blue 、 Green 、 Red



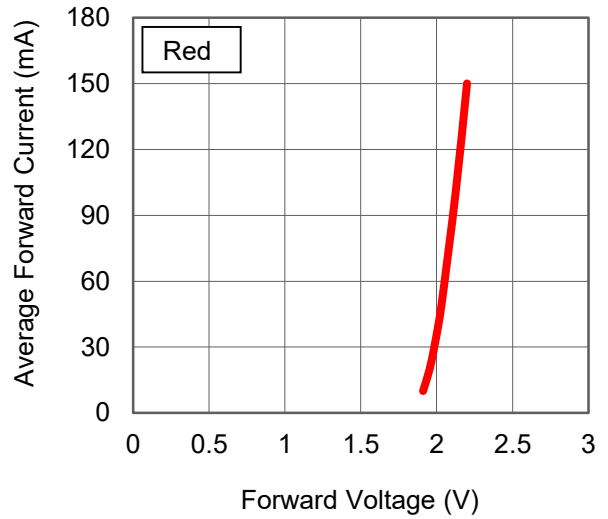
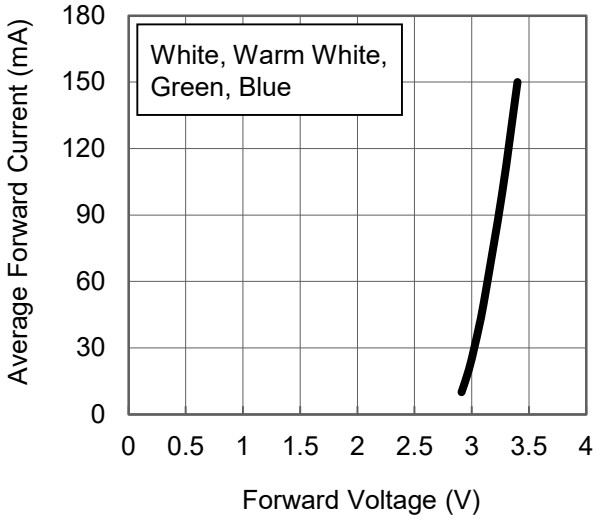
Light Output Characteristics

Relative Light Output vs. Junction Temperature at 150mA

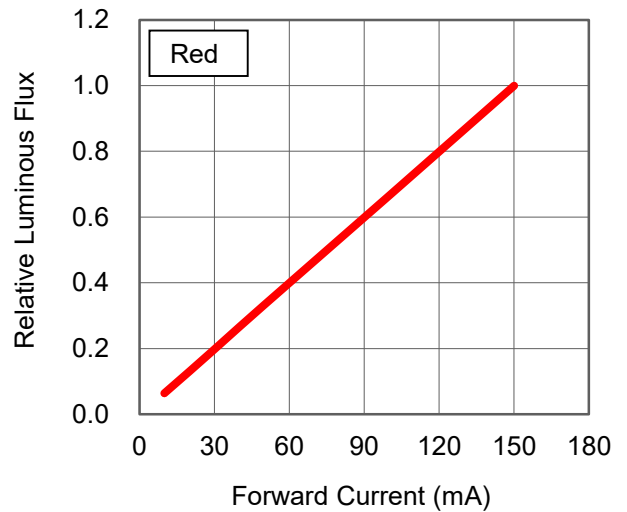
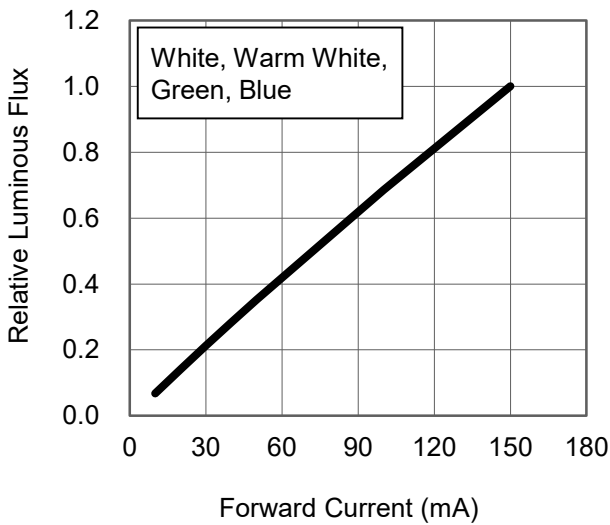


Forward Current Characteristics, $T_j = 25^\circ\text{C}$

1. Forward Voltage vs. Forward Current

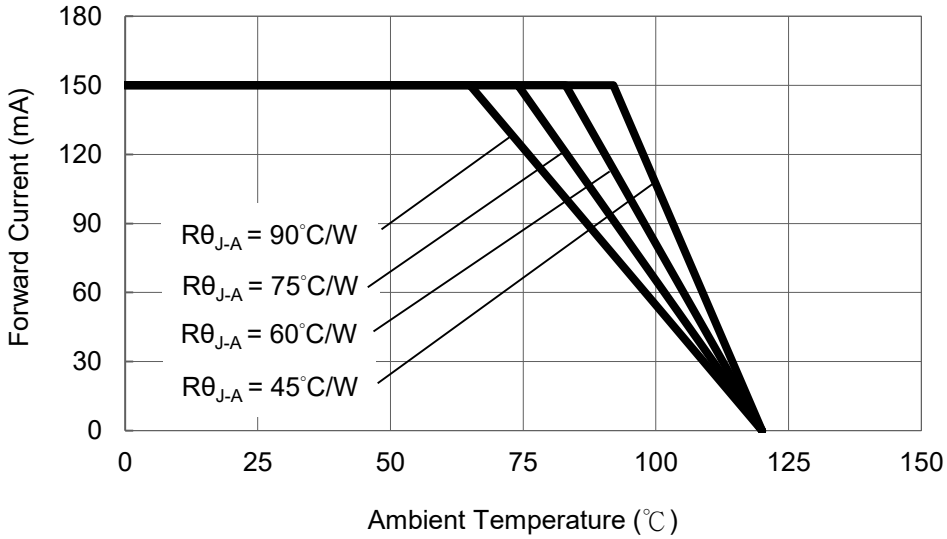


2. Forward Current vs. Normalized Relative Luminous Flux

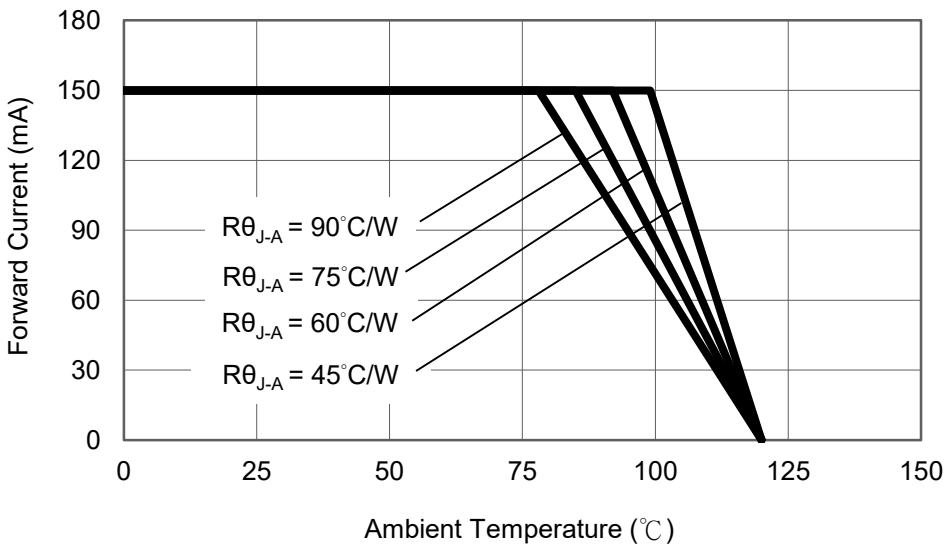


Ambient Temperature vs. Maximum Forward Current

1. White, Warm White, Green, Blue ($T_{JMAX} = 120^{\circ}C$)

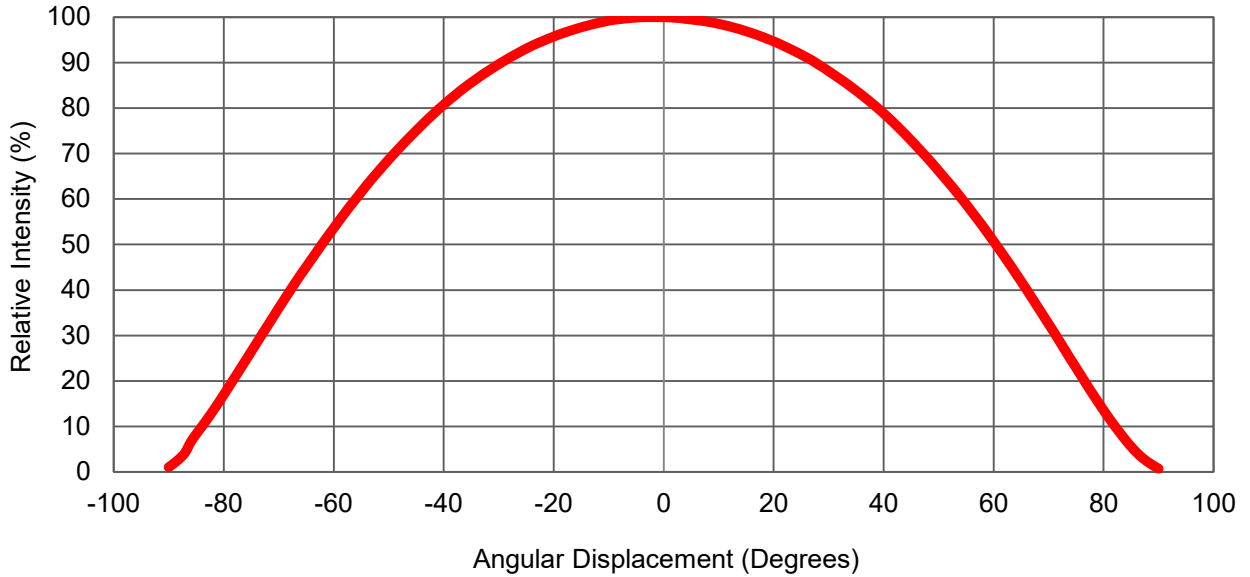


2. Red ($T_{JMAX} = 120^{\circ}C$)



Typical Representative Spatial Radiation Pattern

Lambertian Radiation Pattern



Moisture Sensitivity Level - JEDEC Level 1

Level	Floor Life		Soak Requirements			
			Standard		Accelerated Environment	
	Time	Conditions	Time (hours)	Conditions	Time (hours)	Conditions
1	Unlimited	≤30°C / 85% RH	168 +5/-0	85°C / 85% RH	NA	NA

- The standard soak time includes a default value of 24 hours for semiconductor manufacture's exposure time (MET) between bake and bag and includes the maximum time allowed out of the bag at the distributor's facility.
- Table below presents the moisture sensitivity level definitions per IPC/JEDEC's J-STD-020C.

Level	Floor Life		Soak Requirements			
			Standard		Accelerated Environment	
	Time	Conditions	Time (hours)	Conditions	Time (hours)	Conditions
1	Unlimited	≤30°C / 85% RH	168 +5/-0	85°C / 85% RH	NA	NA
2	1 year	≤30°C / 60% RH	168 +5/-0	85°C / 60% RH	NA	NA
2a	4 weeks	≤30°C / 60% RH	696 +5/-0	30°C / 60% RH	120 +1/-0	60°C / 60% RH
3	168 hours	≤30°C / 60% RH	192 +5/-0	30°C / 60% RH	40 +1/-0	60°C / 60% RH
4	72 hours	≤30°C / 60% RH	96 +2/-0	30°C / 60% RH	20 +0.5/-0	60°C / 60% RH
5	48 hours	≤30°C / 60% RH	72 +2/-0	30°C / 60% RH	15 +0.5/-0	60°C / 60% RH
5a	24 hours	≤30°C / 60% RH	48 +2/-0	30°C / 60% RH	10 +0.5/-0	60°C / 60% RH
6	Time on Label (TOL)	≤30°C / 60% RH	Time on Label (TOL)	30°C / 60% RH	NA	NA

Qualification Reliability Testing

Stress Test	Stress Conditions	Stress Duration	Failure Criteria
Room Temperature Operating Life (RTOL)	25°C, $I_F = \text{max DC}$ (Note 1)	1000 hours	Note 2
Wet High Temperature Operating Life (WHTOL)	85°C/60%RH, $I_F = \text{max DC}$ (Note 1)	1000 hours	Note 2
Wet High Temperature Storage Life (WHTSL)	85°C/85%RH, non-operating	1000 hours	Note 2
High Temperature Storage Life (HTSL)	110°C, non-operating	1000 hours	Note 2
Low Temperature Storage Life (LTSL)	-40°C, non-operating	1000 hours	Note 2
Non-operating Temperature Cycle (TMCL)	-40°C to 120°C, 30 min. dwell, <5 min. transfer	200 cycles	Note 2
Mechanical Shock	1500 G, 0.5 msec. pulse, 5 shocks each 6 axis		Note 3
Natural Drop	On concrete from 1.2 m, 3X		Note 3
Variable Vibration Frequency	10-2000-10 Hz, log or linear sweep rate, 20 G about 1 min., 1.5 mm, 3X/axis		Note 3
Solder Heat Resistance (SHR)	260°C ± 5°C, 10 sec.		Note 3
Solderability	Steam age for 16 hrs., then solder dip at 260°C for 5 sec.		Solder coverage on lead

Notes:

1. Depending on the maximum derating curve.
2. Criteria for judging failure

Item	Test Condition	Criteria for Judgement	
		Min.	Max.
Forward Voltage (V_F)	$I_F = \text{max DC}$	--	Initial Level x 1.1
Luminous Flux or Radiometric Power (Φ_V)	$I_F = \text{max DC}$	Initial Level x 0.7	--

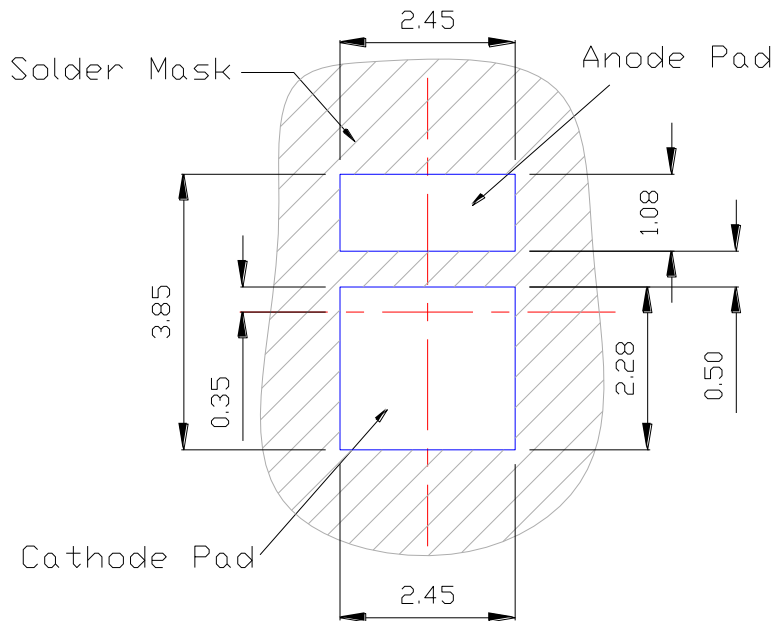
* The test is performed after the LED is cooled down to the room temperature.

3. A failure is an LED that is open or shorted.

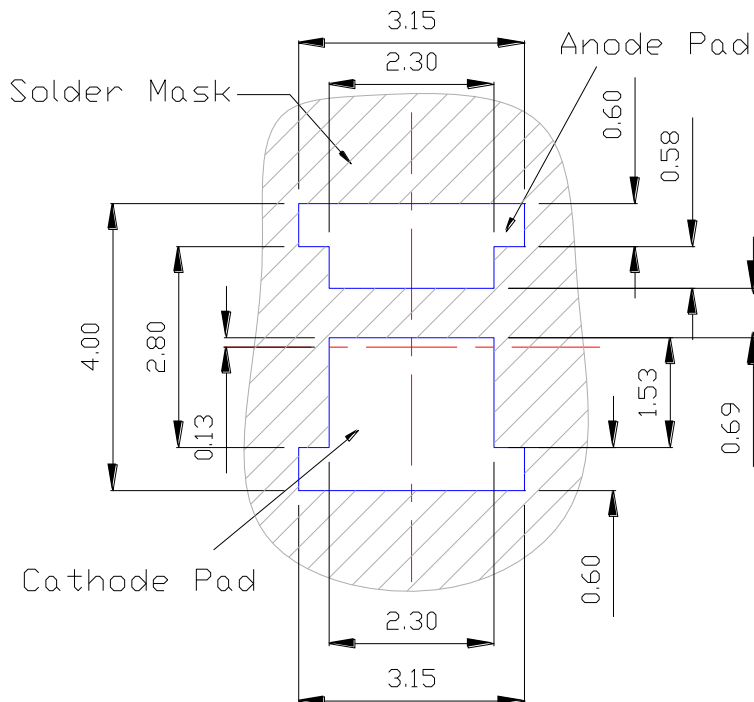
Recommended Solder Pad Design

Standard Emitter

TYPE A.



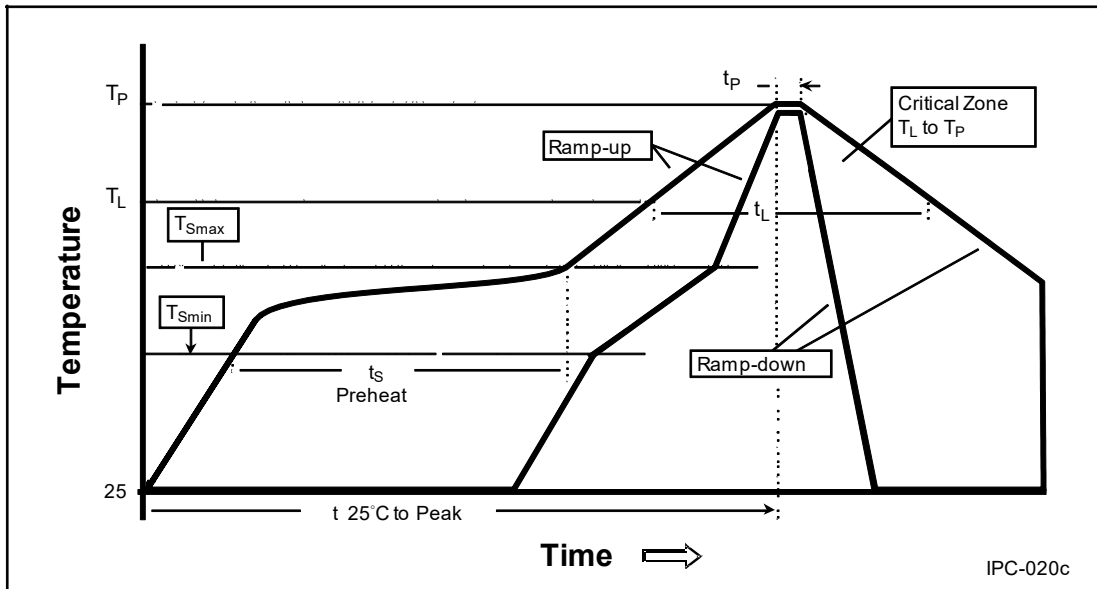
TYPE B.



- All dimensions are in millimeters.

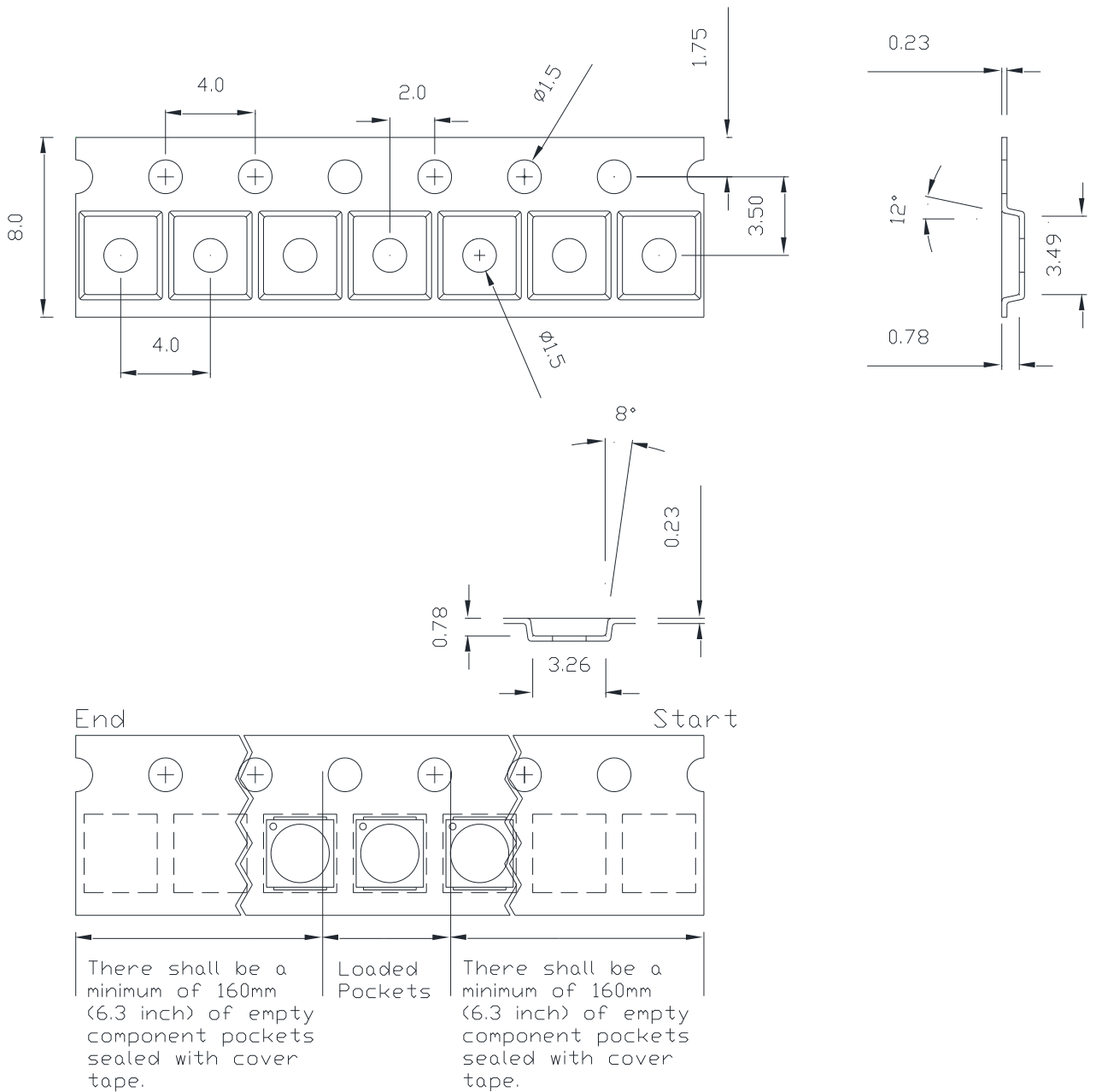
Reflow Soldering Condition

Profile Feature	Sn-Pb Eutectic Assembly	Pb-Free Assembly
Average Ramp-Up Rate (T_{Smax} to T_p)	3°C / second max.	3°C / second max.
Preheat <ul style="list-style-type: none"> – Temperature Min (T_{Smin}) – Temperature Max (T_{Smax}) – Time (t_{Smin} to t_{Smax}) 	100°C 150°C 60-120 seconds	150°C 200°C 60-180 seconds
Time maintained above: <ul style="list-style-type: none"> – Temperature (T_L) – Time (t_L) 	183°C 60-150 seconds	217°C 60-150 seconds
Peak/Classification Temperature (T_p)	240°C	260°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature (t_p)	10-30 seconds	20-40 seconds
Ramp-Down Rate	6°C/second max.	6°C/second max.
Time 25°C to Peak Temperature	6 minutes max.	8 minutes max.



- We recommend using the M705-S101-S4 solder paste from SMIC (Senju Metal Industry Co., Ltd.) for lead-free soldering.
- Do not use solder pastes with post reflow flux residue > 47%. (58Bi-42Sn eutectic alloy, etc) This kind of solder pastes may cause a reliability problem to LED.
- All temperatures refer to topside of the package, measured on the package body surface.
- Repairing should not be done after the LEDs have been soldered. When repairing is unavoidable, a double-head soldering iron should be used. It should be confirmed beforehand whether the characteristics of the LEDs will or will not be damaged by repairing.
- Reflow soldering should not be done more than three times.
- When soldering, do not put stress on the LEDs during heating.
- After soldering, do not warp the circuit board.

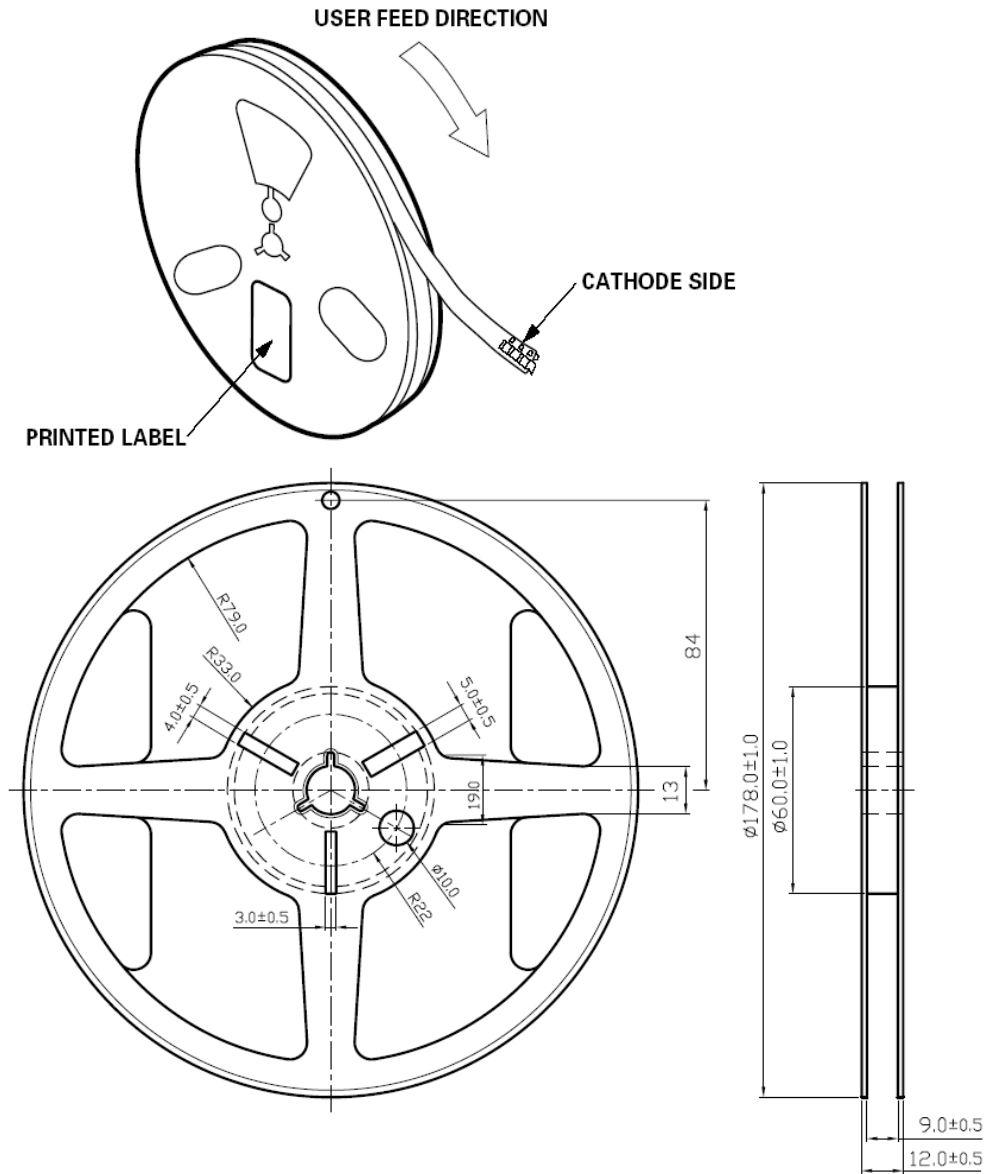
Emitter Reel Packaging



Notes:

1. Drawing not to scale.
2. All dimensions are in millimeters.
3. Unless otherwise indicated, tolerances are ± 0.10 mm.

Emitter Reel Packaging



Notes:

1. Empty component pockets sealed with top cover tape.
2. 3000 pieces per reel.
3. Drawing not to scale.
4. All dimensions are in millimeters.

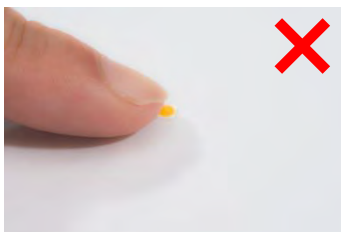
Precaution for Use

- Storage
Please do not open the moisture barrier bag (MBB) more than one week. This may cause the leads of LED discoloration. We recommend storing ProLight's LEDs in a dry box after opening the MBB. The recommended storage conditions are temperature 5 to 30 °C and humidity less than 40% RH. It is also recommended to return the LEDs to the MBB and to reseal the MBB.
- The slug is is not electrically neutral. Therefore, we recommend to isolate the heat sink.
- **We recommend using the M705-S101-S4 solder paste from SMIC (Senju Metal Industry Co., Ltd.) for lead-free soldering.**
- **Do not use solder pastes with post reflow flux residue>47%. (58Bi-42Sn eutectic alloy, etc) This kind of solder pastes may cause a reliability problem to LED.**
- Any mechanical force or any excess vibration shall not be accepted to apply during cooling process to normal temperature after soldering.
- Please avoid rapid cooling after soldering.
- Components should not be mounted on warped direction of PCB.
- Repairing should not be done after the LEDs have been soldered. When repairing is unavoidable, a heat plate should be used. It should be confirmed beforehand whether the characteristics of the LEDs will or will not be damaged by repairing.
- This device should not be used in any type of fluid such as water, oil, organic solvent and etc. When cleaning is required, isopropyl alcohol should be used.
- When the LEDs are illuminating, operating current should be decide after considering the package maximum temperature.
- The appearance, specifications and flux bin of the product may be modified for improvement without notice. Please refer to the below website for the latest datasheets.
<http://www.prolightopto.com/>

Handling of Silicone LEDs

Notes for handling of silicone LEDs

- Please do not use a force of over 0.3kgf impact or pressure on the silicone , otherwise it will cause a catastrophic failure.
- The LEDs should only be picked up by making contact with the sides of the LED body.
- Avoid touching the silicone especially by sharp tools such as Tweezers.
- Avoid leaving fingerprints on the silicone.
- Please store the LEDs away from dusty areas or seal the product against dust.
- When populating boards in SMT production, there are basically no restrictions regarding the form of the pick and place nozzle, except that mechanical pressure on the silicone lens must be prevented.
- Please do not mold over the silicone lens with another resin. (epoxy, urethane, etc)



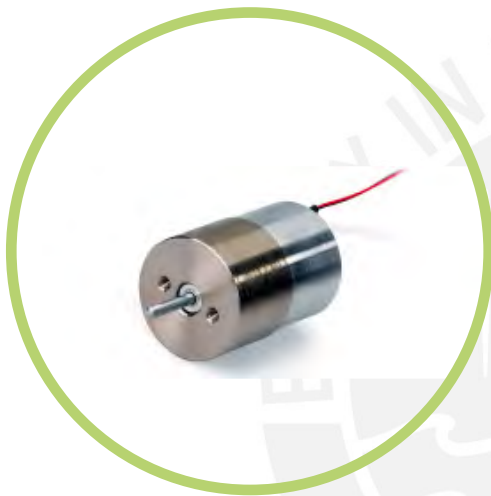


CYLINDRICAL HOUSED LINEAR VOICE COIL ACTUATORS (VCA)

Introduction

A fully housed voice coil actuator (VCA) further expands upon the idea of the semi-housed VCA, incorporating the self-aligning bushings and shaft, but fully captures the coil assembly to keep it concentric with the field assembly, adds an internal flex circuit to protect external moving wires and also limits the axial travel on both ends of the stroke.

As a single piece, the linear actuator can be mounted on one side and does not require a customer supplied alignment system, making it easy to integrate into applications. Housed voice coil actuators feature all of the inherent advantages of VCA technology, such as direct-drive, zero backlash and cog free operation for accurate motion, as well as high acceleration and use of single phase.



Features

- Designs available with magnet springs and/or latches
- Different shaft options available
- Housing offers additional mechanical and environmental protection
- Single unit that is more easily integrated into customer applications
- Life tested in excess of 500 million cycles



CYLINDRICAL HOUSED LINEAR VOICE COIL ACTUATOR (VCA) CONFIGURATIONS

Part Number	Peak Force (N / lb)	Total Stroke (mm / in)	Continuous Stall Force (N / lb)	Actuator Constant (N $\sqrt{\text{watt}}$ / lb $\sqrt{\text{watt}}$)	Outside Diameter/Width (mm / in)	Length at Mid-stroke (mm / in)
LAH04-10-000A	1.89 / 0.42	4.00 / 0.16	1.11 / 0.25	0.84 / 0.19	10.1 / 0.40	25.4 / 1.00
LAH13-18-000A-3E	15.5 / 3.50	6.36 / 0.25	5.07 / 1.14	2.36 / 0.53	31.6 / 1.24	45.7 / 1.80
LAH13-18-000A-3S	15.5 / 3.50	6.36 / 0.25	5.07 / 1.14	2.36 / 0.53	31.6 / 1.24	45.7 / 1.80
LAH16-23-000A-4E	89.0 / 20.0	6.08 / 0.24	17.0 / 3.82	5.83 / 1.31	40.0 / 1.57	58.4 / 2.30
LAH16-23-000A-4S	89.0 / 20.0	6.08 / 0.24	17.0 / 3.82	5.83 / 1.31	40.0 / 1.57	58.4 / 2.30
LAH28-53-000A-12E	266 / 60.0	25.0 / 0.98	60.1 / 13.5	13.0 / 2.94	70.0 / 2.76	132 / 5.22
LAH28-53-000A-12I	266 / 60.0	25.0 / 0.98	60.1 / 13.5	13.0 / 2.94	70.0 / 2.76	132 / 5.22
LAH28-53-000A-12S	266 / 60.0	25.0 / 0.98	60.1 / 13.5	13.0 / 2.94	70.0 / 2.76	132 / 5.22
LAH43-86-001Z	1512 / 340	31.7 / 1.25	386 / 86.9	38.3 / 8.61	218 / 8.60	108 / 4.25



Sensata Technologies, Inc. ("Sensata") data sheets are solely intended to assist designers ("Buyers") who are developing systems that incorporate Sensata products (also referred to herein as "components"). Buyer understands and agrees that Buyer remains responsible for using its independent analysis, evaluation and judgment in designing Buyer's systems and products. Sensata data sheets have been created using standard laboratory conditions and engineering practices. Sensata has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular data sheet. Sensata may make corrections, enhancements, improvements and other changes to its data sheets or components without notice.

Buyers are authorized to use Sensata data sheets with the Sensata component(s) identified in each particular data sheet. HOWEVER, NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER SENSATA INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY THIRD PARTY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, IS GRANTED HEREIN. SENSATA DATA SHEETS ARE PROVIDED "AS IS". SENSATA MAKES NO WARRANTIES OR REPRESENTATIONS WITH REGARD TO THE DATA SHEETS OR USE OF THE DATA SHEETS, EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, INCLUDING ACCURACY OR COMPLETENESS. SENSATA DISCLAIMS ANY WARRANTY OF TITLE AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, QUIET ENJOYMENT, QUIET POSSESSION, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS WITH REGARD TO SENSATA DATA SHEETS OR USE THEREOF.

All products are sold subject to Sensata's terms and conditions of sale supplied at www.sensata.com SENSATA ASSUMES NO LIABILITY FOR APPLICATIONS ASSISTANCE OR THE DESIGN OF BUYERS' PRODUCTS. BUYER ACKNOWLEDGES AND AGREES THAT IT IS SOLELY RESPONSIBLE FOR COMPLIANCE WITH ALL LEGAL, REGULATORY AND SAFETY-RELATED REQUIREMENTS CONCERNING ITS PRODUCTS, AND ANY USE OF SENSATA COMPONENTS IN ITS APPLICATIONS, NOTWITHSTANDING ANY APPLICATIONS-RELATED INFORMATION OR SUPPORT THAT MAY BE PROVIDED BY SENSATA.

Mailing Address: Sensata Technologies, Inc., 529 Pleasant Street, Attleboro, MA 02703, USA.

CONTACT US

Americas

+1 (760) 597 7042
sales.beikimco@sensata.com
Europe, Middle East & Africa
+1 (760) 597 7042
support@sensata.com

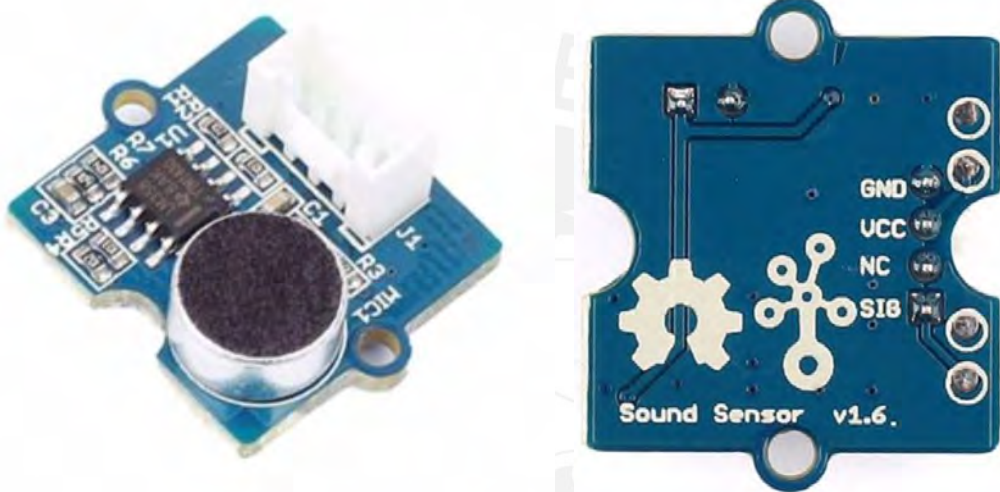
Asia Pacific

sales.isasia@list.sensata.com
China +86 (21) 2306 1500 Japan
+81 (45) 277 7117 Korea +82
(31) 601 2004 India +91 (80)
67920890

Rest of Asia +603-5566 6001

Grove - Sound Sensor Based on LM358 amplifie

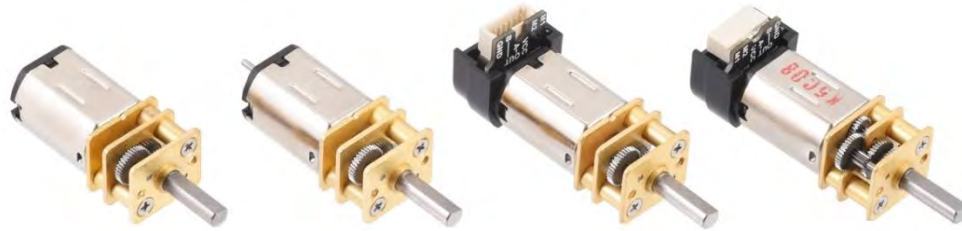
The Grove-Sound Sensor is a simple microphone compatible with many microcontrollers and SBCs like Arduino and Raspberry Pi. It can be used to detect whether there's sound (like the sound of clapping, noise, etc) surrounding or not and output the sound strength of the environment. The main component of the module is a simple microphone, which is based on the LM358 amplifier and an electret microphone. This module can easily integrate with logic modules on the input side of Grove circuits and its output is analog. With its tiny size and high performance, it is perfect for Raspberry Pi audio detection projects and interactive projects.



Specification

Dimensions	24mm x20mm x9.8mm
Weight	G.W 9g
Battery	Exclude
Operating Voltage Range	5 V
Operating Current(Vcc=5V)	4~5 mA
Voltage Gain(V=6V, f=1kHz)	26 dB
Microphone sensitivity(1kHz)	52-48 dB
Microphone Impedance	2.2k Ohm
Microphone Frequency	16-20 kHz
Microphone S/N Ratio	54 dB

Microphone	Electret Condenser Microphone
Price	\$4.90
Voltage Range	4V - 12V
Operating Current	4mA - 5mA
Sensitivity	-60~-56dBV/Pa
Size of Microphone	Medium
Amplifier	LM358
Quality of Microphone	★★★



The [Pololu Micro Metal Gearmotor family](#) consists of small, bidirectional, brushed DC metal gearmotors with nitride-hardened martensitic stainless steel gears. They are available in a wide range of gear ratios, motor windings, brushes, and encoder configurations:

Gear ratio options	Motor winding/brush options	Encoder options
<ul style="list-style-type: none"> • 5:1 • 10:1 • 15:1 • 30:1 • 50:1 • 75:1 • 100:1 • 150:1 • 210:1 • 250:1 • 298:1 • 380:1 • 1000:1 	<ul style="list-style-type: none"> • HPCB 12V: high-power 12V with long-life carbon brushes • HPCB 6V: high-power 6V with long-life carbon brushes • HP 6V: high-power 6V with precious metal brushes • MP 6V: medium power 6V with precious metal brushes • LP 6V: low-power 6V with precious metal brushes 	<ul style="list-style-type: none"> • Integrated 12 CPR quadrature encoder with back connector • Integrated 12 CPR quadrature encoder with side connector • Encoder-compatible (extended motor shaft for adding an encoder) • No encoder

Motor winding and brush options

The 6V and 12V HPCB are high-power motors with long-life carbon brushes. They offer nearly the same performance at their respective nominal voltages, just with the 12 V motor drawing half the current of the 6 V motor.



The HP, MP, and LP motors are intended for operation around 6V and offer three different power levels, with the lowest-power LP versions drawing the least current and the highest-power HP versions drawing the most current. These motors have shorter-life precious metal brushes, which are lower-friction than carbon brushes and generally preferred for lower-current applications.



carbon brushes

precious metal brushes

The HPCB versions can be differentiated from versions with precious metal brushes by their copper-colored terminals. Note that the HPCB terminals are 0.5 mm wider than those on the HP/MP/LP versions (2 mm vs. 1.5 mm), and they are approximately 1 mm closer together (6 mm vs. 7 mm).

Encoder options

Each motor/gearbox combination is optionally available with an integrated incremental quadrature encoder on the motor shaft (i.e. the input to the gearbox). The two-channel Hall effect encoder senses the rotation of a 6-pole magnetic disc on a rear protrusion of the motor shaft, providing a resolution of 12 counts per revolution (CPR) of the motor shaft when counting both edges of both channels. To compute the gearbox output CPR, multiply 12 by the gearbox reduction factor. For example, for a 50:1 gearbox, the encoder would provide approximately 617 CPR of the gearbox output shaft (see exact gear ratios below).



The encoders are available in two styles—*Back Connector*, which has a connector oriented parallel to the motor, and *Side Connector*, which has a connector perpendicular to the motor—and work with Pololu’s assortment of [6-pin JST SH-style cables](#) and [6-pin JST SH-style connector boards](#). More generally, the encoder connectors are compatible with JST part number SHR-06V-S. A plastic snap-on housing covers the encoder disc and electronics.

Motor versions are also optionally available with an extended motor shaft but no encoder. These are intended for those who want to implement their own encoder solutions or who want to assemble them with separately available [encoder modules](#).



No encoder



Encoder-compatible (extended motor shaft)



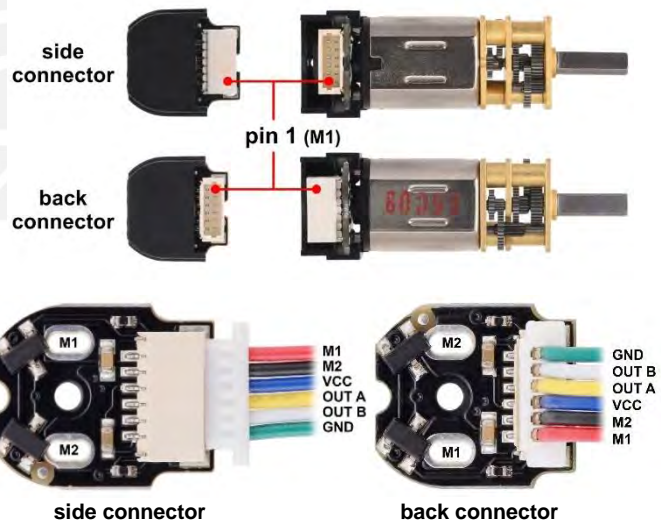
Encoder with back connector



Encoder with side connector

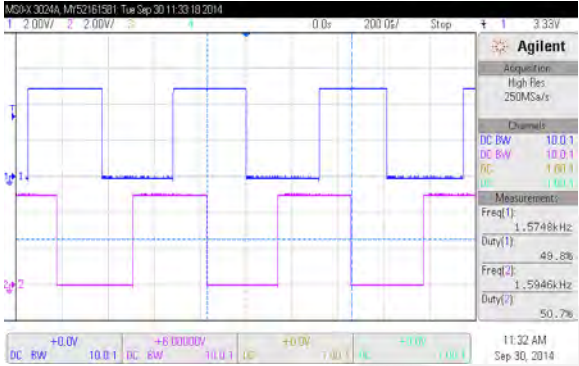
Using the encoder (for versions with encoders)

Pin	Cable Color	Function
1	Red	Motor power M1 (“+” terminal)
2	Black	Motor power M2
3	Blue	Encoder Vcc (2.7 V to 18 V)
4	Yellow	Encoder channel A output
5	White	Encoder channel B output
6	Green	Encoder GND

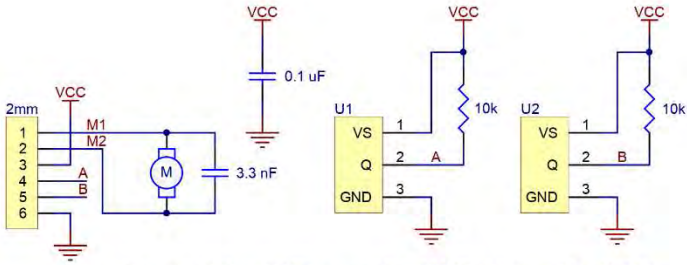


The table above shows the encoder connector pinout and the corresponding cable colors when used with Pololu JST cables. Note that the connector side with pin 1 is different for the two different connector styles, but they are drop-in compatible with each other when using Pololu cables. For consistency, pin 1 always connects to the motor terminal marked with a “+” on the end cap. This mark gets covered by the encoder, but it can be seen on the versions without encoders. (Note that this is just an identifying mark, and the motor is intended to be operated in both directions by alternating the polarity of the power to the motor leads.)

The encoder is powered through the Vcc and GND pins. Vcc should be between 2.7 V and 18 V. The quadrature outputs A and B are digital signals that are either driven low (0 V) or pulled to Vcc through 10 kΩ pull-up resistors, depending on the orientation of the motor. The sensors' comparators have built-in hysteresis, which prevents spurious signals in cases where the motor is near a transition point. The A and B signals are square waves with roughly 50% duty cycles that are approximately 90° out of phase. The order of the A and B transitions indicates motor direction (B will always lead A when the positive supply is connected to M1 and trail A when polarity is flipped), and the frequency indicates motor speed.



Example of encoder A and B outputs with Vcc = 6V, HP 6V version running at 6V, no load.



Note: U1 and U2 are Hall Effect sensor ICs in SOT-23 packages, e.g. TLE4946-2K.

Encoder schematic diagram.

Gearbox options

Nominal	Exact	Nominal	Exact
5 : 1	$\frac{27 \times 37}{20 \times 10} = 4.995 : 1$	150 : 1	$\frac{25 \times 32 \times 34 \times 35 \times 38}{12 \times 11 \times 14 \times 13 \times 10} \approx 150.5828 : 1$
10 : 1	$\frac{35 \times 37}{13 \times 10} \approx 9.9615 : 1$	210 : 1	$\frac{25 \times 34 \times 34 \times 35 \times 38}{12 \times 9 \times 13 \times 13 \times 10} \approx 210.5906 : 1$
15 : 1	$\frac{25 \times 34 \times 31}{12 \times 9 \times 16} \approx 15.2488 : 1$	250 : 1	$\frac{25 \times 34 \times 37 \times 35 \times 38}{12 \times 10 \times 10 \times 14 \times 10} \approx 248.9792 : 1$
30 : 1	$\frac{31 \times 33 \times 35 \times 34}{16 \times 14 \times 13 \times 14} \approx 29.8609 : 1$	298 : 1	$\frac{25 \times 34 \times 37 \times 35 \times 38}{12 \times 9 \times 10 \times 13 \times 10} \approx 297.9238 : 1$
50 : 1	$\frac{32 \times 33 \times 35 \times 38}{15 \times 14 \times 13 \times 10} \approx 51.4462 : 1$	380 : 1	$\frac{25 \times 35 \times 39 \times 36 \times 39}{12 \times 9 \times 9 \times 13 \times 10} = 379.1\bar{6} : 1$
75 : 1	$\frac{34 \times 34 \times 35 \times 38}{13 \times 12 \times 13 \times 10} \approx 75.8126 : 1$	1000 : 1	$\frac{25 \times 34 \times 35 \times 34 \times 34 \times 34 \times 27}{12 \times 9 \times 12 \times 14 \times 14 \times 14 \times 9} \approx 986.4064 : 1$
100 : 1	$\frac{35 \times 37 \times 35 \times 38}{12 \times 11 \times 13 \times 10} \approx 100.3700 : 1$		

The table above shows the exact gear ratios for the available options. All gearboxes have the same overall dimensions except for 1000:1, which is 3.5 mm longer than the others. Gearbox plates are brass on all versions except 380:1, which has steel plates for increased durability and resistance to wear from radial loads.

Note that the highest gear ratios can generate enough torque to damage themselves if exposed to loads beyond what they are rated for (25 kg-mm for 1000:1 and 380:1, 20 kg-mm for everything else). The point of these highest gear ratios is not to deliver more overall torque but rather to allow for slower speeds at a given voltage and to draw less current for a given torque within its rated operating range.



Micro Metal Gearmotors

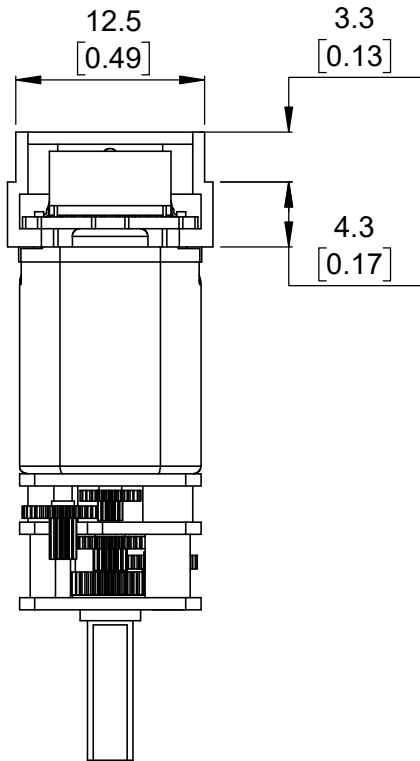


Performance summary and graph table of contents

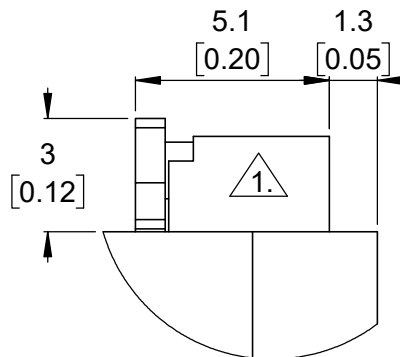
Motor Type	Rated Voltage	Pololu Item # ⁽⁴⁾				Approx Gear Ratio	No Load		At Maximum Efficiency					Max Power	Stall Extrapolation ⁽²⁾		Graph Page			
		A	B	C	D		Speed	Current	Speed	Torque	Current	Output	Eff.		Torque	Current				
		:1					RPM (±20%)	mA (±50%)	RPM	kg-mm	A	W	%		W	kg-mm		A		
Low-Power (LP 6V)	6 V	1100, 2200, 5100, 5101				4.995	2500	50	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	0.37	0.5	0.36				
		1099, 2201, 5102, 5103				9.96	1300		- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	0.37	1.0		9			
		4780, 4781, 5104, 5105				15.25	860		640	0.40	0.11	0.27	40	0.37	1.7		10			
		993, 2202, 5106, 5107				29.86	450		320	0.66	0.11	0.22	34	0.31	2.9		11			
		1098, 2203, 5108, 5109				51.45	270		200	1.0	0.10	0.20	34	0.29	4.4		12			
		2360, 2209, 5110, 5111				75.81	180		140	1.3	0.10	0.19	33	0.29	6.4		13			
		992, 2204, 5112, 5113				100.37	130		100	1.7	0.10	0.17	28	0.25	7.4		14			
		1097, 2205, 5114, 5115				150.58	90		67	2.6	0.11	0.18	28	0.25	11		15			
		1096, 2206, 5116, 5117				210.59	65		46	4.1	0.12	0.19	27	0.25	16		16			
		1095, 2207, 5118, 5119				248.98	54		39	4.2	0.11	0.17	26	0.23	17		17			
		1094, 2208, 5120, 5121				297.92	45		34	4.4	0.09	0.15	27	0.22	20		18			
		4790, 4791, 5122, 5123				379.17	36		29	5.4	0.08	0.16	34	0.27	29		19			
		1596, 3058, 5124, 5125				986.41	13		10	12	0.09	0.12	24	- ⁽³⁾	55					
		Medium-Power (MP 6V)	6 V	2362, 2376, 5126, 5127				4.995	4400	80	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾		0.70	0.6	0.67	
				2363, 2377, 5128, 5129				9.96	2200		- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾		0.70	1.1		20
				4782, 4783, 5130, 5131				15.25	1400		1000	0.47	0.21	0.50	39		0.70	2.0		21
				2364, 2378, 5132, 5133				29.86	720		510	0.80	0.21	0.41	33		0.57	3.3		22
				2365, 2379, 5134, 5135				51.45	420		310	1.2	0.19	0.38	33		0.55	5.4		23
				2366, 2380, 5136, 5137				75.81	290		220	1.6	0.17	0.35	34		0.54	7.8		24
2367, 2381, 5138, 5139						100.37	220		170	1.9	0.17	0.32	33	0.50	9.4	25				
2368, 2382, 5140, 5141						150.58	150		110	2.6	0.15	0.30	33	0.48	13	26				
2369, 2383, 5142, 5143						210.59	100		83	3.4	0.16	0.29	31	0.46	17	27				
2370, 2384, 5144, 5145						248.98	88		69	4.5	0.17	0.31	31	0.48	22	28				
2371, 2385, 5146, 5147						297.92	73		56	5.0	0.17	0.29	29	0.44	24	29				
4792, 4793, 5148, 5149						379.17	57		46	6.9	0.16	0.33	34	0.53	36	30				
2372, 3059, 5150, 5151						986.41	22		17	13	0.16	0.23	24	- ⁽³⁾	67					
High-Power (HP 6V)	6 V			1000, 2210, 5152, 5153				4.995	6100	120	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	1.6	1.1	1.6		
		999, 2211, 5154, 5155				9.96	3100		2300	0.46	0.42	1.1	43	1.6	2.2	31				
		4784, 4785, 5156, 5157				15.25	2000		1600	0.58	0.37	0.95	42	1.5	3.0	32				
		1093, 2212, 5158, 5159				29.86	1000		830	1.0	0.36	0.89	41	1.5	5.7	33				
		998, 2213, 5160, 5161				51.45	590		490	1.5	0.32	0.75	38	1.3	8.6	34				
		2361, 2215, 5162, 5163				75.81	410		340	2.3	0.34	0.80	40	1.4	13	35				
		1101, 2214, 5164, 5165				100.37	310		250	2.9	0.33	0.73	37	1.3	17	36				
		997, 2386, 5166, 5167				150.58	210		170	3.9	0.31	0.68	37	1.2	24	37				
		996, 2216, 5168, 5169				210.59	150		120	5.0	0.32	0.62	32	1.1	30	38				
		995, 2217, 5170, 5171				248.98	120		100	5.5	0.30	0.59	32	1.1	34	39				
		994, 2218, 5172, 5173				297.92	100		87	6.5	0.31	0.58	31	1.1	40	40				
		4794, 4795, 5174, 5175				379.17	84		70	8.4	0.28	0.61	36	- ⁽³⁾	55	41				
		1595, 2373, 5176, 5177				986.41	31		26	20	0.32	0.53	28	- ⁽³⁾	120	42				
		High-Power, Carbon Brushes (HPCB 6V)	6 V	3060, 3082, 5178, 5179				4.995	6500	170	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	1.3	0.9		1.5	
3061, 3071, 5180, 5181						9.96	3300		2300	0.42	0.51	1.0	33	1.3	1.7	43				
4786, 4787, 5182, 5183						15.25	2100		1500	0.60	0.49	0.94	32	1.3	2.5	44				
3062, 3072, 5184, 5185						29.86	1100		840	1.0	0.43	0.85	33	1.2	4.5	45				
3063, 3073, 5186, 5187						51.45	650		490	1.6	0.42	0.80	32	1.2	7.4	46				
3064, 3074, 5188, 5189						75.81	430		330	2.5	0.43	0.87	34	1.3	11	47				
3065, 3075, 5190, 5191						100.37	330		260	3.3	0.44	0.86	33	1.3	16	48				
3066, 3076, 5192, 5193						150.58	220		170	4.1	0.39	0.73	31	1.1	20	49				
3067, 3077, 5194, 5195						210.59	160		120	5.9	0.40	0.74	31	1.1	28	50				
3068, 3078, 5196, 5197						248.98	130		100	6.6	0.40	0.71	29	1.1	32	51				
3069, 3079, 5198, 5199						297.92	110		85	7.4	0.42	0.65	26	1.0	34	52				
4796, 4797, 5200, 5201						379.17	85		68	10	0.40	0.71	30	- ⁽³⁾	50	53				
3070, 3080, 5202, 5203						986.41	33		26	22	0.39	0.59	25	- ⁽³⁾	110	54				
High-Power, Carbon Brushes (HPCB 12V)	12 V			3036, 3047, 5204, 5205				4.995	6800	100	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	1.5	0.9	0.75		
		3037, 3048, 5206, 5207				9.96	3400		2500	0.43	0.25	1.1	37	1.5	1.7	55				
		4788, 4789, 5208, 5209				15.25	2200		1700	0.59	0.23	1.0	37	1.4	2.5	56				
		3038, 3049, 5210, 5211				29.86	1100		840	1.0	0.23	0.82	30	1.1	3.9	57				
		3039, 3050, 5212, 5213				51.45	650		500	1.5	0.22	0.79	31	1.1	6.7	58				
		3040, 3051, 5214, 5215				75.81	450		350	2.1	0.20	0.76	31	1.1	10	59				
		3041, 3052, 5216, 5217				100.37	330		260	2.9	0.21	0.78	31	1.1	13	60				
		3042, 3053, 5218, 5219				150.58	220		170	4.2	0.22	0.73	28	1.0	18	61				
		3043, 3054, 5220, 5221				210.59	160		120	5.6	0.21	0.71	28	1.0	25	62				
		3044, 3055, 5222, 5223				248.98	130		110	6.6	0.21	0.72	29	1.1	30	63				
		3045, 3056, 5224, 5225				297.92	110		87	7.3	0.21	0.65	26	1.0	33	64				
		4798, 4799, 5226, 5227				379.17	85		67	11	0.20	0.75	31	- ⁽³⁾	50	65				
		3046, 3057, 5228, 5229				986.41	35		27	21	0.19	0.59	25	- ⁽³⁾	100	66				

Notes:

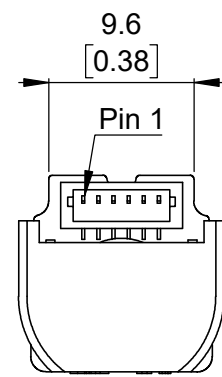
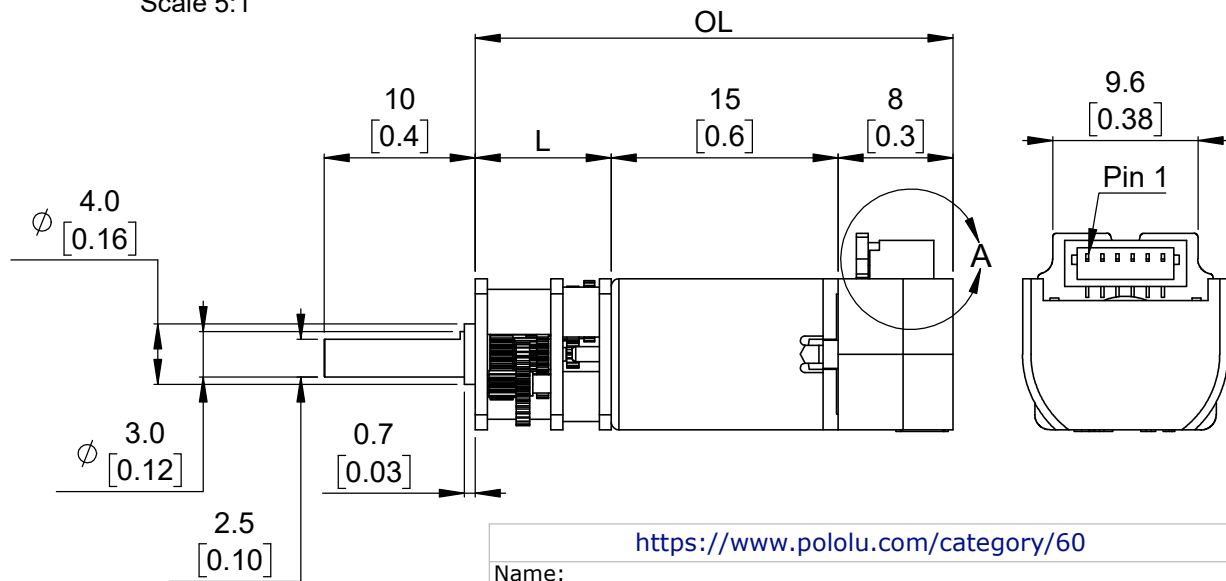
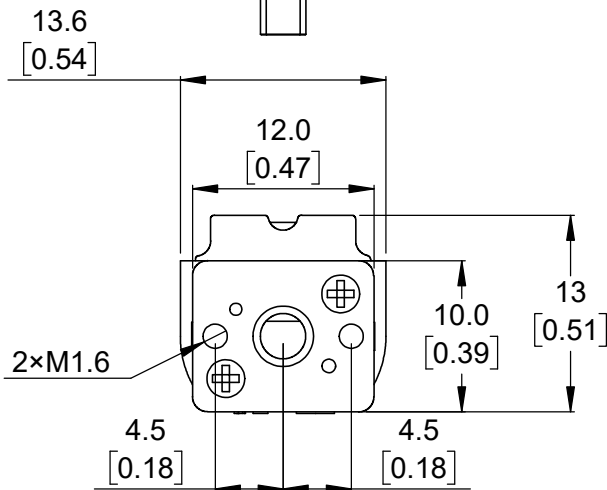
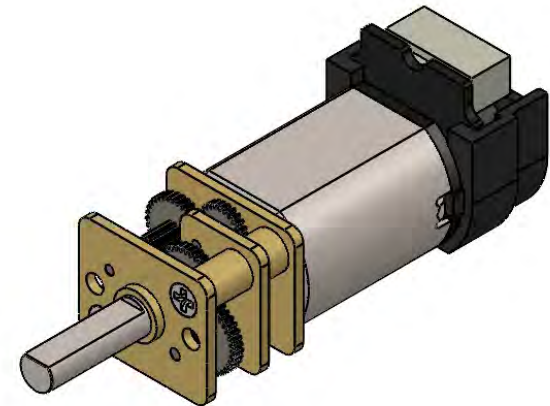
- (1) Max efficiency data and performance graphs are currently unavailable for 5:1 gear ratios and LP and MP 10:1 gear ratios.
- (2) Listed stall torques and currents are theoretical extrapolations; units will typically stall well before these points as the motors heat up. Stalling or overloading gearmotors can greatly decrease their lifetimes and even result in immediate damage. The recommended upper limit for instantaneous torque is 25 kg-mm for the 380:1 and 1000:1 gearboxes, and 20 kg-mm for all other gear ratios; **we strongly advise keeping applied loads well under these limits**. Stalls can also result in rapid (potentially on the order of seconds) thermal damage to the motor windings and brushes, especially for the versions that use high-power (HP and HPCB) motors; a general recommendation for brushed DC motor operation is 25% or less of the stall current.
- (3) Operating these versions at maximum power is likely to damage the gearboxes.
- (4) A = no encoder; B = encoder-compatible (extended motor shaft); C = integrated encoder, back connector; D = integrated encoder, side connector.



Gear Ratio	L	OL max. (overall length maximum)
1000:1	12.5 mm [0.5 in]	36 mm [1.42 in]
All others	9 mm [0.35 in]	32.5 mm [1.28 in]



Detail A
Scale 5:1



1. This connector is compatible with JST part number SHR-06V-S and Pololu 6-Pin Female JST SH-Style Cables.
2. To get the specified scale, select 100% in print settings.


Scale 2:1

<https://www.pololu.com/category/60>

Name:
Micro Metal Gearmotors with 12 CPR Encoder, Back Connector

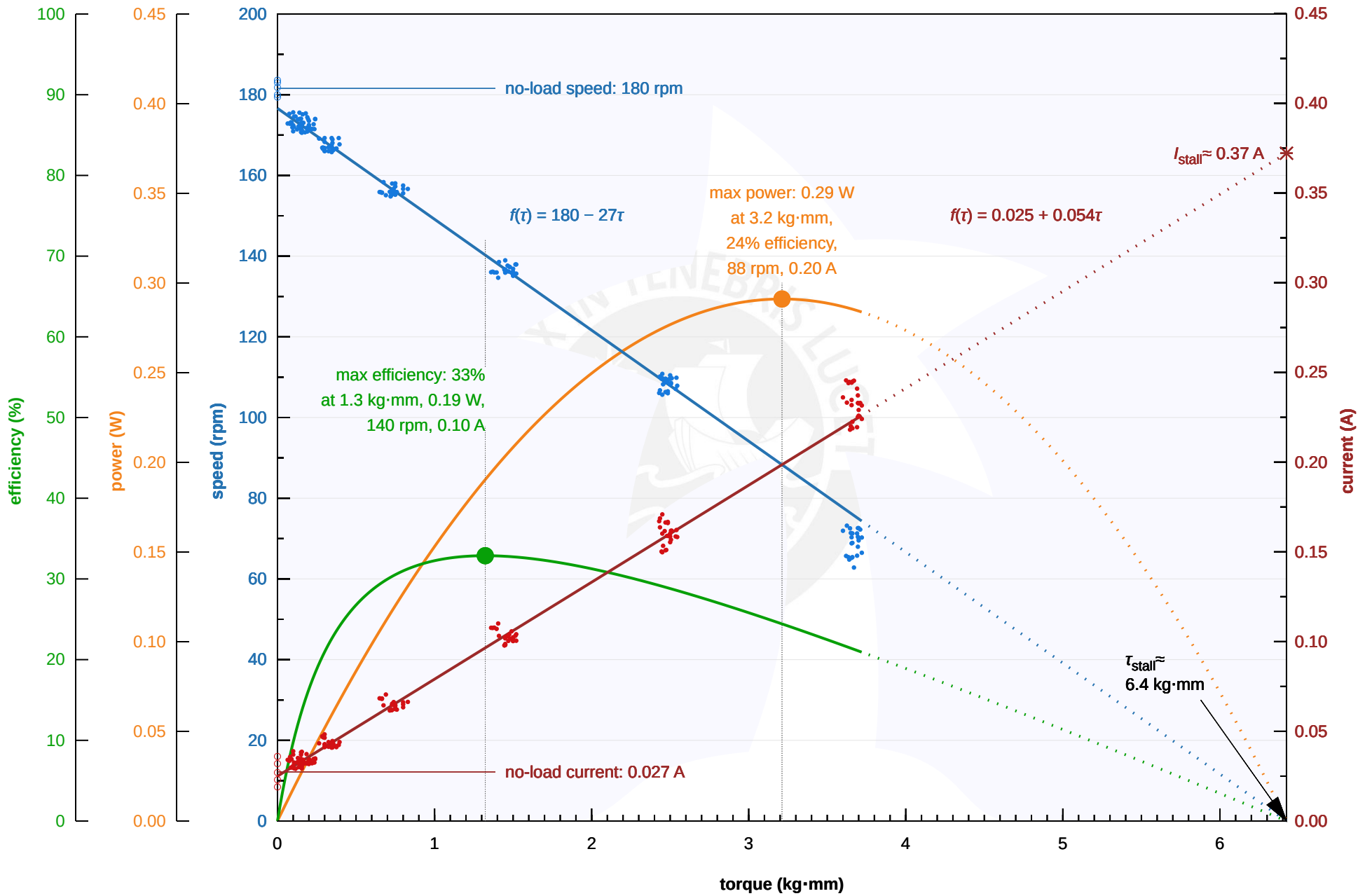
Drawing date:
02 April 2024

Units: mm [in] Material: mixed

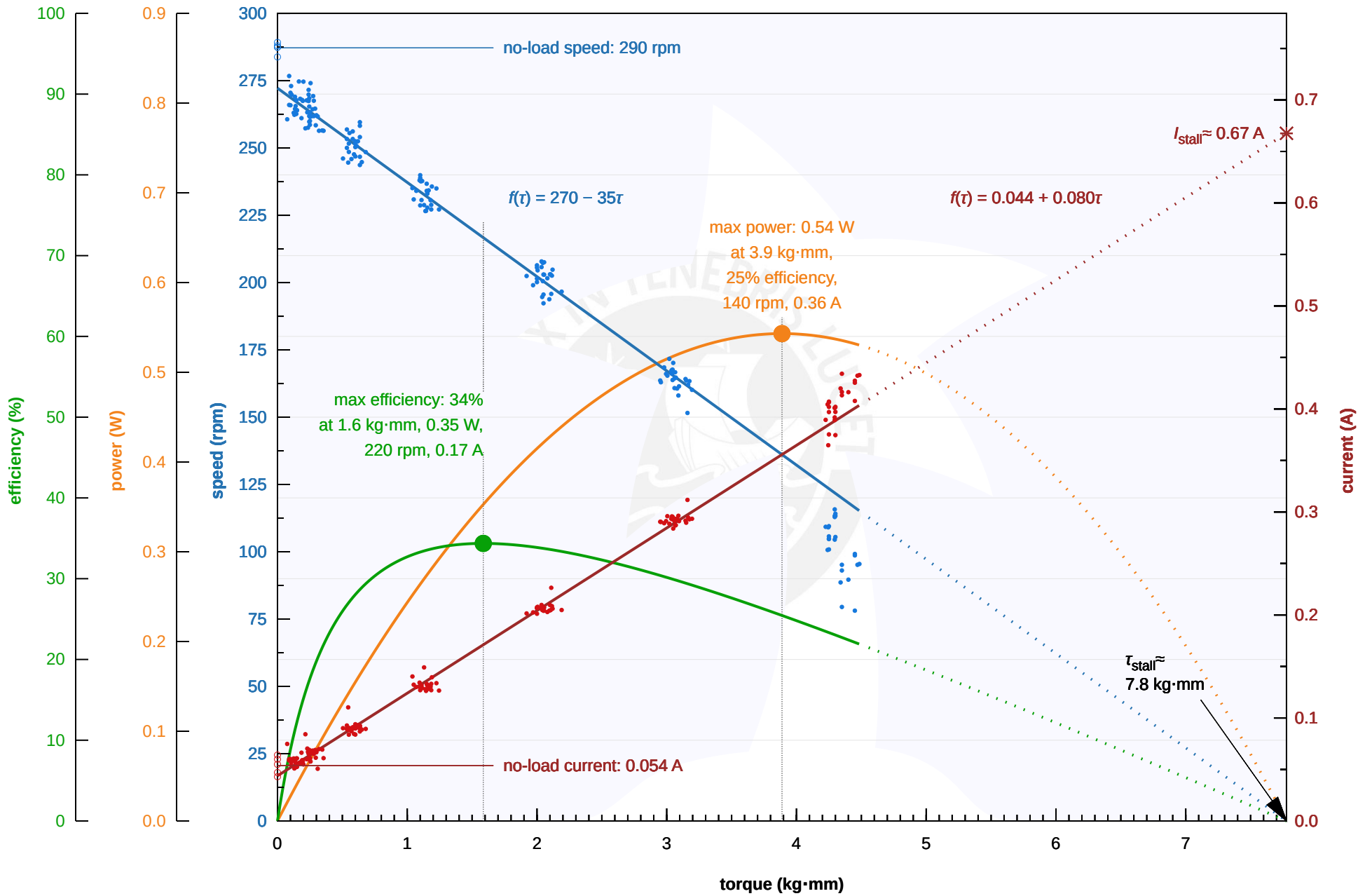


© 2024 Pololu Corporation

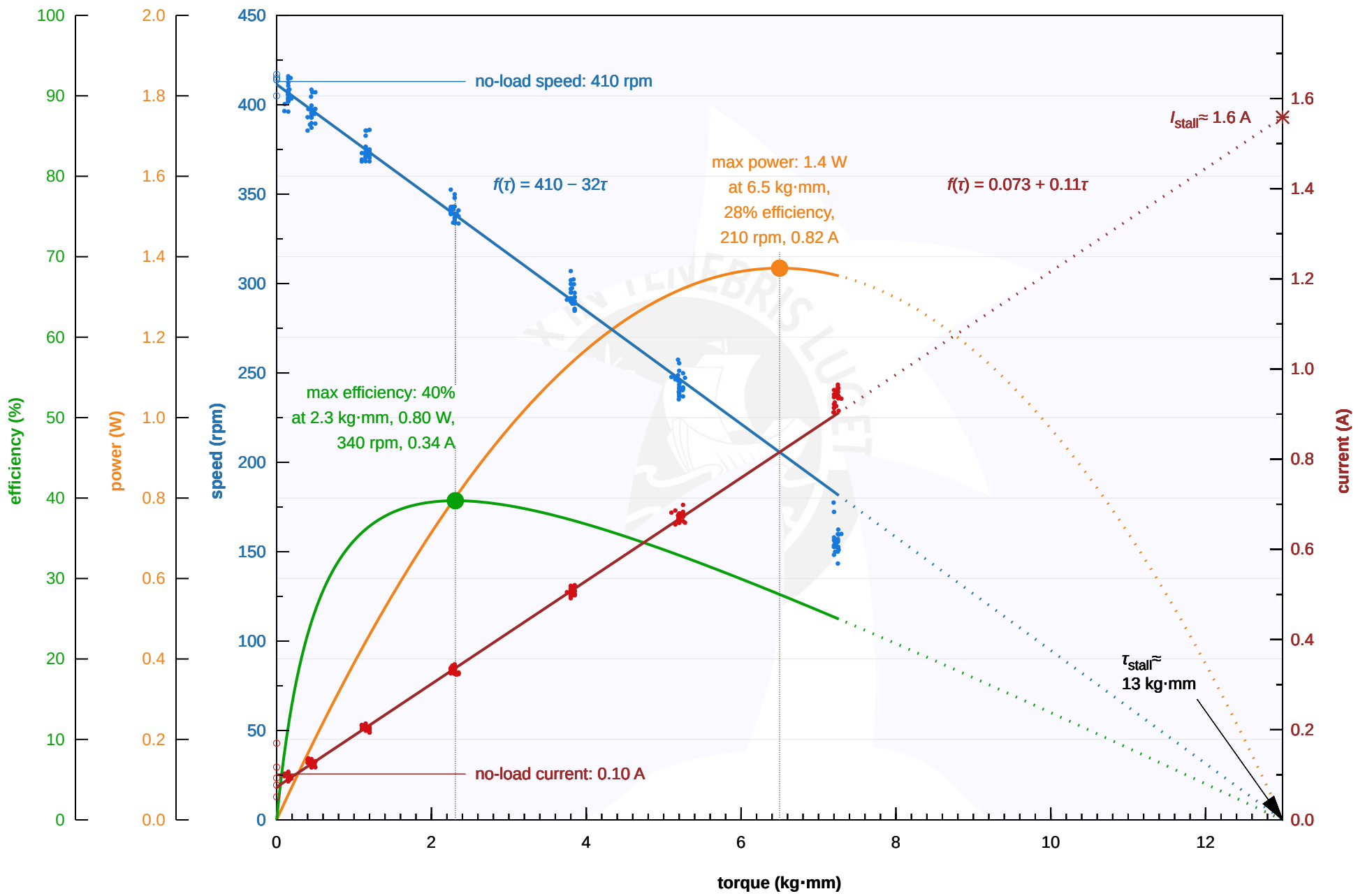
Pololu Items #2360, #2209, #5110, #5111 (75:1 Micro Metal Gearmotor LP 6V) Performance at 6 V



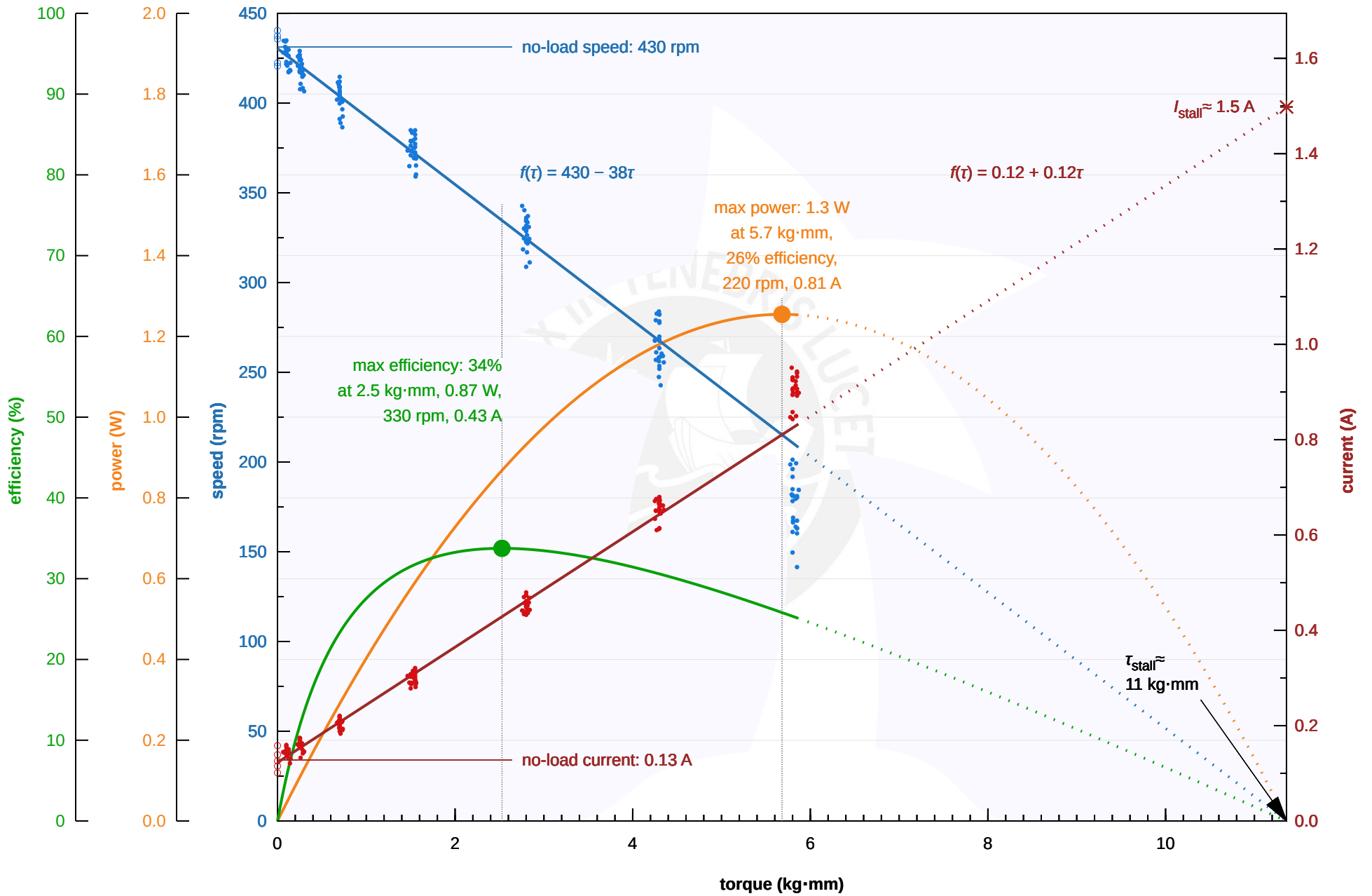
Pololu Items #2366, #2380, #5136, #5137 (75:1 Micro Metal Gearmotor MP 6V) Performance at 6 V



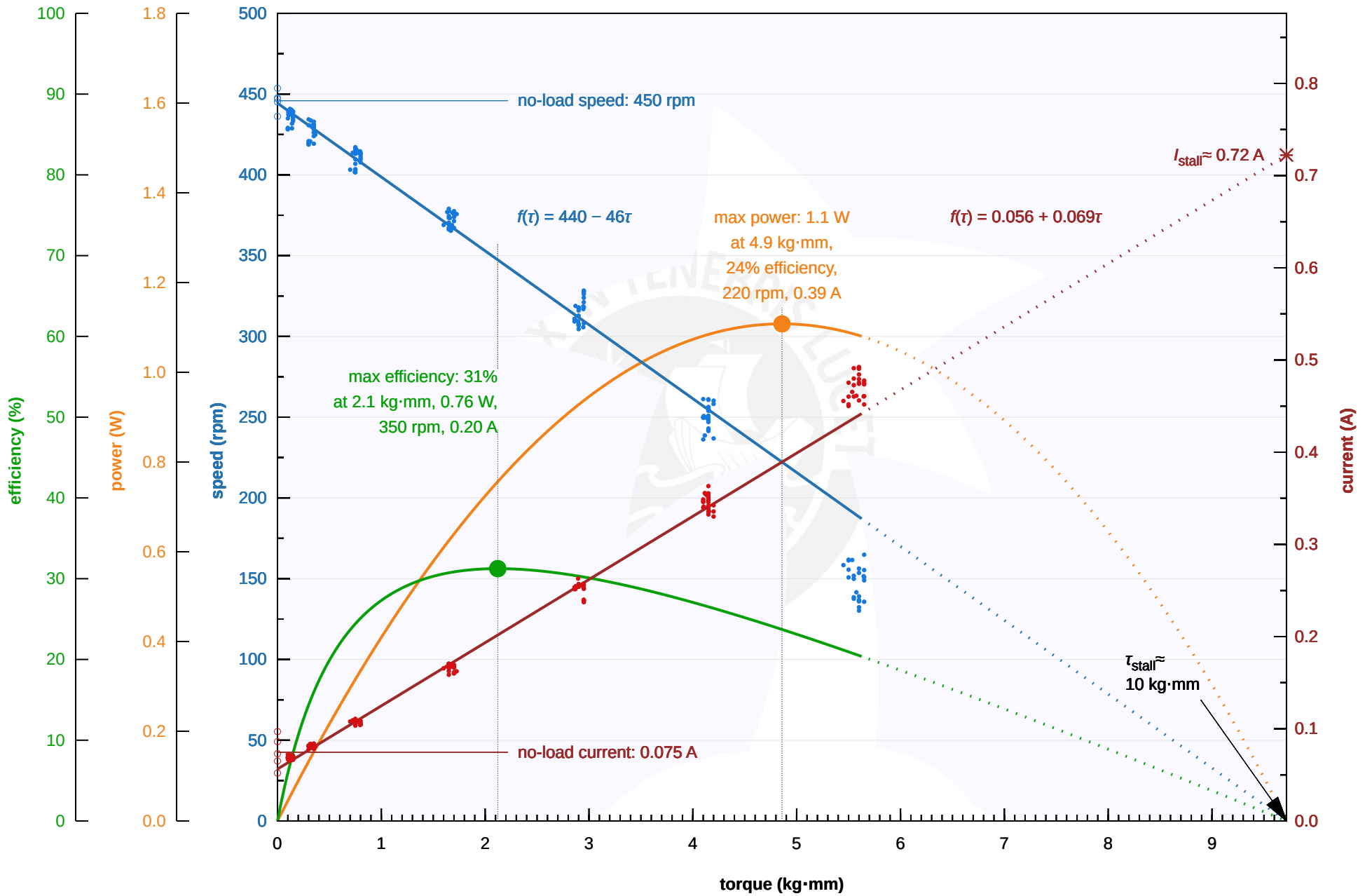
Pololu Items #2361, #2215, #5162, #5163 (75:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V) Performance at 6 V



Pololu Items #3064, #3074, #5188, #5189 (75:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 6V) Performance at 6 V



Pololu Items #3040, #3051, #5214, #5215 (75:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V) Performance at 12 V



MATERIAL PARA INGENIERÍA

Nylon 12 Powder

Nylon 12 Powder para la fabricación de prototipos funcionales y piezas de uso final resistentes

Gracias a su elevada resistencia a la rotura por tracción, ductilidad y estabilidad medioambiental, el Nylon 12 Powder es un material adecuado para la creación de ensamblajes complejos y de piezas duraderas con un nivel de absorción de agua mínimo.

El Nylon 12 Powder se ha desarrollado específicamente para su uso en la Fuse 1.



V1 FLP12G01

formlabs 

Redactado 19/ 08/ 2020
Rev 01 19/ 08/ 2020

A nuestro saber y entender, la información contenida en este documento es precisa. No obstante, Formlabs Inc. no ofrece ninguna garantía, expresa o implícita, con respecto de la exactitud de los resultados derivados del uso de estos productos.

DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL NYLON 12 POWDER

	MÉTRICO ^{1,2}	IMPERIAL ^{1,2}	MÉTODO
Propiedades de tracción			
Resistencia a la rotura por tracción	50 MPa	7252 psi	ASTM D638 Tipo I
Módulo de tracción	1850 MPa	268 ksi	ASTM D638 Tipo I
Alargamiento de rotura (X/Y)	11 %	11 %	ASTM D638 Tipo I
Alargamiento de rotura (Z)	6 %	6 %	ASTM D638 Tipo I
Propiedades de flexión			
Resistencia a la flexión	66 MPa	9572 psi	ASTM D790 A
Módulo de flexión	1600 MPa	232 ksi	ASTM D790 A
Propiedades de impacto			
Resiliencia Izod	32 J/m	0,60 ft-lb/in	ASTM D256
Propiedades térmicas			
Temp. de flexión bajo carga @ 1,8 MPa	87 °C	189 °F	ASTM D648
Temp. de flexión bajo carga @ 0,45 MPa	171 °C	340 °F	ASTM D648
Temperatura de reblandecimiento Vicat (VST)	175 °C	347 °F	ASTM D1525
Otras propiedades			
Contenido de humedad (polvo)	0,25 %	0,25 %	ISO 15512 Método D
Nivel de absorción de agua (pieza impresa)	0,66 %	0,66 %	ASTM D570

Las muestras impresas con el Nylon 12 Powder se han evaluado de conformidad con la Norma ISO 10993-1:2018 y han superado los requisitos en relación con los siguientes riesgos de biocompatibilidad:

Norma ISO	Resultado ^{3,4}
EN ISO 10993-5:2009	No citotóxico
ISO 10993-10:2010/(R)2014	No es un irritante
ISO 10993-10:2010/(R)2014	No es un sensibilizante

COMPATIBILIDAD DE LOS DISOLVENTES

Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas para un cubo impreso de 1 × 1 × 1 cm inmerso en el disolvente correspondiente:

Disolvente	Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas (%)	Disolvente	Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas (%)
Ácido Acético 5 %	0,10	Aceite mineral, pesado	0,66
Acetona	0,14	Aceite mineral, ligero	0,54
Lejía ~5 % NaOCl	0,21	Agua salada (3,5 % NaCl)	0,15
Acetato de butilo	0,18	Skydrol 5	0,59
Combustible diesel	0,43	Solución de hidróxido de sodio (0,025 % pH = 10)	0,20
Éter monometílico de dietilenglicol	0,49	Ácido fuerte (concentración de cloruro de hidrógeno)	0,76
Aceite hidráulico	0,59	Éter monometílico de tripropilenglicol	0,31
Peróxido de hidrógeno (3 %)	0,20	Agua	0,05
Isoctano	0,01	Xileno	0,12
Alcohol isopropílico	0,19		

¹ Las propiedades de los materiales pueden variar en función de la geometría de la pieza, la orientación de la impresión y la temperatura.

² Las piezas se imprimieron en una Fuse 1 con el Nylon 12 Powder. Las piezas se acondicionaron a 23 °C y a una humedad relativa del 50 % durante 7 días antes de la realización de los ensayos.

³ Las propiedades de los materiales pueden variar según el diseño de las piezas y los métodos de fabricación. Es responsabilidad del fabricante determinar la idoneidad de las piezas impresas para su uso previsto.

⁴ El Nylon 12 Powder se sometió a ensayo en la sede mundial de NAMS, OH, EE. UU.

Anexo H: Código Python



```

# TESIS MECATRONICA: Robot plano para diagnóstico de máquinas eléctricas
#
#
# Programmer: Gonzalo Javier Peralta Vizquerra

# Instalar bibliotecas a utilizar
import keyboard
import threading
import time
import control as co

#from flask import Flask, request
from gpiozero import PWMOutputDevice, DigitalInputDevice, DigitalOutputDevice
from picamera import PiCamera

#app = Flask(__name__)

# FUNCION DESPLAZAMIENTO
# Se ajustan a los pines de acuerdo al diagrama de conexiones (Anexo E)
# Pines PWM para el Driver Izquierdo
AIN1L = PWMOutputDevice(13)
AIN2L = PWMOutputDevice(15)
BIN1L = PWMOutputDevice(31)
BIN2L = PWMOutputDevice(29)

# Pines PWM para el Driver Derecho
AIN1D = PWMOutputDevice(16)
AIN2D = PWMOutputDevice(18)
BIN1D = PWMOutputDevice(38)
BIN2D = PWMOutputDevice(36)

# Definición de velocidades
velocidades = {

```

```

    '1': 0.2,
    '2': 0.4,
    '3': 0.6,
    '4': 0.8,
    '5': 1.0
}
velocidad_actual = 0.0

def mover_robot(direccion):
    global velocidad_actual

    if direccion == 'forward':
        AIN1L.value = velocidad_actual
        AIN2L.value = 0
        BIN1L.value = velocidad_actual
        BIN2L.value = 0
        AIN1D.value = velocidad_actual
        AIN2D.value = 0
        BIN1D.value = velocidad_actual
        BIN2D.value = 0
    elif direccion == 'backward':
        AIN1L.value = 0
        AIN2L.value = velocidad_actual
        BIN1L.value = 0
        BIN2L.value = velocidad_actual
        AIN1D.value = 0
        AIN2D.value = velocidad_actual
        BIN1D.value = 0
        BIN2D.value = velocidad_actual
    elif direccion == 'left':
        AIN1L.value = velocidad_actual
        AIN2L.value = 0
        BIN1L.value = velocidad_actual
        BIN2L.value = 0

```

```
    AIN1D.value = 0
    AIN2D.value = velocidad_actual
    BIN1D.value = 0
    BIN2D.value = velocidad_actual
elif direccion == 'right':
    AIN1L.value = 0
    AIN2L.value = velocidad_actual
    BIN1L.value = 0
    BIN2L.value = velocidad_actual
    AIN1D.value = velocidad_actual
    AIN2D.value = 0
    BIN1D.value = velocidad_actual
    BIN2D.value = 0
elif direccion == 'stop':
    AIN1L.value = 0
    AIN2L.value = 0
    BIN1L.value = 0
    BIN2L.value = 0
    AIN1D.value = 0
    AIN2D.value = 0
    BIN1D.value = 0
    BIN2D.value = 0
```

Asignar teclas con direcciones

```
keyboard.add_hotkey('up', lambda: mover_robot('forward'))
keyboard.add_hotkey('down', lambda: mover_robot('backward'))
keyboard.add_hotkey('left', lambda: mover_robot('left'))
keyboard.add_hotkey('right', lambda: mover_robot('right'))
keyboard.add_hotkey('space', lambda: mover_robot('stop'))
```

Asignar las teclas de velocidad

```
for key in velocidades.keys():
    keyboard.add_hotkey(key, lambda k=key: set_velocidad(k))
```

```

def set_velocidad(tecla):
    global velocidad_actual
    # Definición de la planta
    kp = 0.01
    taup = 0.06
    td_p = 10
    L = 0.5
    np = [kp]
    dp = [kp*L, taup, 0.01001]
    gp = co.tf(np, dp)
    # Ajuste por Cohen - Coon PID
    kc = 1/kp*taup/td_p*((3*td_p + 16*taup)/(12*taup))
    tauI = td_p*(32 + 6*td_p/taup)/(13 + 8*td_p/taup)
    tauD = 4*td_p/(11 + 2*td_p/taup)
    alpha = 0.1 # Condiciones NO ideales

    # Función de transferencia del controlador PID
    nc = [kc*(alpha*tauI*tauD+tauI*tauD), kc*(tauI+alpha*tauD), kc]
    dc = [alpha*tauI*tauD, tauI, 0]

    gc = tf(nc, dc)

    # Función de transferencia de lazo cerrado
    Gcl = (gp*gc)/(1+gp*gc)
    velocidad_actual = Gcl * velocidades[tecla]
    print(f'Velocidad establecida en: {velocidad_actual}')

# FUNCION PRUEBA DE CUÑAS
# Pin de lectura del sensor de sonido
sensor_sonido = DigitalInputDevice(3)
# Pin de actuador lineal
elemento_golpe = DigitalOutputDevice(35)

# Definir el Timbre breakpoint

```

```
# Valor de referencia para la comparación, el valor adecuado debe ser
obtenido mediante pruebas experimentales
```

```
timbre_breakpoint = 100
```

```
def prueba_golpe():
```

```
    mover_robot('stop') # Detener el robot
```

```
    time.sleep(1) # Esperar un segundo para asegurar que se detenga
```

```
    print("Iniciando prueba de golpe")
```

```
    # Leer el valor del sensor de sonido
```

```
    sonido = sensor_sonido.value
```

```
    # Activar el elemento de golpe
```

```
    elemento_golpe.on()
```

```
    time.sleep(0.5)
```

```
    elemento_golpe.off()
```

```
    # Esperar a que se procese la señal y determinar el resultado
```

```
    sonido = sensor_sonido.value
```

```
    # Comparar con el parámetro de referencia
```

```
    if sonido < timbre_breakpoint:
```

```
        print("Ajuste flojo")
```

```
    else:
```

```
        print("Ajuste correcto")
```

```
    keyboard.add_hotkey('p', prueba_golpe) # Tecla P para iniciar la prueba
de golpe
```

```
# FUNCION DE INSPECCION VISUAL
```

```
# Pines de los posicionadores de las cámaras
```

```
servo1 = PWMOutputDevice(32)
```

```
servo2 = PWMOutputDevice(33)
```

```

servo1_pos = 0.0
servo2_pos = 0.0

def mover_servo1(direccion):
    global servo1_pos
    if direccion == 'forward':
        servo1_pos = min(1.0, servo1_pos + incremento_servos) # Limitar
a max 1.0
        servo1.value = servo1_pos
    elif direccion == 'backward':
        servo1_pos = max(0.0, servo1_pos - incremento_servos) # Limitar
a min 0.0
        servo1.value = servo1_pos

def mover_servo2(direccion):
    global servo2_pos
    if direccion == 'forward':
        servo2_pos = min(1.0, servo2_pos + incremento_servos) # Limitar
a max 1.0
        servo2.value = servo2_pos
    elif direccion == 'backward':
        servo2_pos = max(0.0, servo2_pos - incremento_servos) # Limitar
a min 0.0
        servo2.value = servo2_pos

    keyboard.add_hotkey('w', lambda: mover_servo1('forward')) # Servomotor 1
hacia adelante
    keyboard.add_hotkey('s', lambda: mover_servo1('backward')) # Servomotor 1
hacia atrás
    keyboard.add_hotkey('e', lambda: mover_servo2('forward')) # Servomotor 2
hacia adelante
    keyboard.add_hotkey('d', lambda: mover_servo2('backward')) # Servomotor 2
hacia atrás

# Apagado de emergencia del programa

```

```
keyboard.wait('esc')
```

