

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Facultad de Ciencias e Ingeniería**



**PUCP**

**ROBOT ARÁCNIDO INTELIGENTE PARA DETECCIÓN DE  
MINAS ANTIPERSONALES METÁLICAS EN TERRENO  
IRREGULAR**

**Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico**

**AUTOR:**

Daniel Alcides Saromo Mori

**ASESORA:**

Elizabeth Roxana Villota Cerna, PhD.

**Lima, Octubre del 2020**

## Resumen

Debido a su bajo costo y a su simplicidad, enterrar minas antipersonales en el campo de batalla ha sido, lastimosamente, una estrategia bélica muy común en el siglo pasado. Sin embargo, la contaminación de tierras con minas antipersonales es una problemática aún vigente en la actualidad, ya que más de sesenta países siguen contaminados con estos explosivos. El desminado humanitario busca erradicar todas las minas restantes en el mundo. Lamentablemente, el método más utilizado actualmente para ejecutar labores de desminado es hacerlo de forma manual, debido al elevado costo que representan los sistemas autónomos actuales. Aunque existen propuestas de robots móviles que asisten estas labores, la mayoría de ellas carece de versatilidad de desplazamiento sobre terreno irregular, ya que utilizan ruedas para permitir el movimiento de estos sistemas.

En esta tesis, se propone el diseño de un robot arácnido para el traslado de un sensor que permite la detección de minas antipersonales en terreno irregular.

En el ámbito mecánico, el robot tiene cuatro patas y presenta simetría sagital. Los elementos electrónicos están alojados dentro del tórax, que se encuentra en el centro del robot. El detector de minas se sujetó desde el tórax apuntando hacia abajo. Se hizo el análisis dinámico del mecanismo las patas, con su respectiva simulación cinemática y cinética. Además, se realizaron dos simulaciones de esfuerzos en la estructura del robot mediante el método de elementos finitos.

Con respecto al diseño electrónico, se desarrollaron cálculos para los circuitos de las fuentes de voltaje internas del robot. Se verificó la estabilidad de dichas fuentes frente a ruidos eléctricos, ejecutando una simulación de los circuitos reguladores de voltaje agregando ruido sinusoidal. Se realizó también la selección de los demás componentes electrónicos del robot.

El ámbito de control es el aspecto más desarrollado de la presente tesis. Se plantea un algoritmo innovador, que fusiona perspectivas de aprendizaje de máquina e inteligencia artificial bioinspirada, para permitir que el robot aprenda a caminar. De esta manera, se espera que el robot mejore su desempeño con el tiempo, a medida que vaya obteniendo más experiencia y haya recolectado más datos de su entorno. El algoritmo propuesto permite entrenar un agente inteligente para maximizar una métrica de recompensa, pero sin aplicar técnicas de aprendizaje por refuerzo, que son usualmente utilizadas en este tipo de problemas.

# **Intelligent spider robot for detecting anti-personnel metallic landmines in uneven terrain**

## **Abstract**

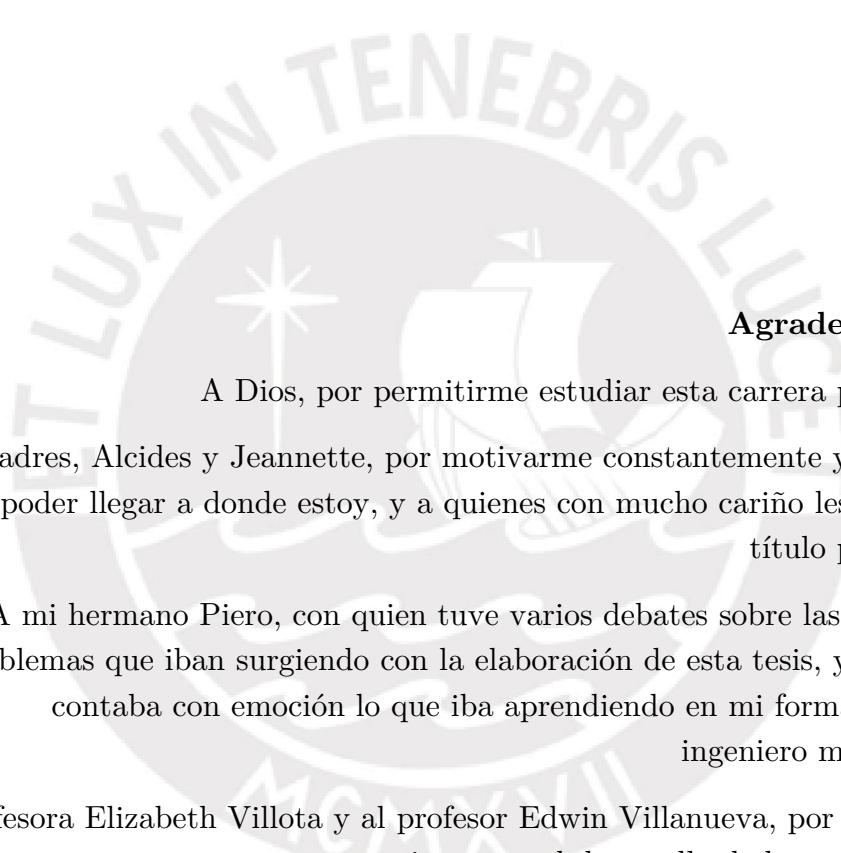
Due to its low cost and simplicity, burying anti-personnel landmines on the battlefield has unfortunately been a ubiquitous war strategy in the last century. However, land contamination with anti-personnel landmines is yet in force today since more than sixty countries are still polluted with these explosives. Humanitarian demining seeks to eradicate all remaining landmines worldwide. Unfortunately, today's most widely used demining method is manual due to the high cost of existing autonomous systems. Although there are proposals for mobile robots that assist these tasks, most of them lack the versatility of movement on uneven terrain since they use wheels for their locomotion.

In this thesis, an arachnid robot's design is proposed to carry a sensor that allows the detection of anti-personnel landmines on uneven terrain.

In the mechanical domain, the robot has four legs and has sagittal symmetry. The electronic components are housed within the thorax, which is located in the center of the robot. The mine detector is held by the thorax, pointing downwards. A dynamic analysis of the leg mechanism was made, with its respective kinematic and kinetic simulation. Also, two stress simulations were made for the robot structure using the finite element method (FEM).

Regarding the electronic design, calculations were performed for the circuits of the robot's internal voltage sources. The stability of these sources against electrical noise was verified. A simulation of the voltage regulator circuits' was developed to check their response while adding sinusoidal noise. Additionally, the selection of the other electronic components of the robot was made.

The control domain is the most developed aspect of this thesis. An innovative algorithm is proposed, which merges machine learning and bio-inspired artificial intelligence perspectives to allow the robot to learn to walk. In this way, the robot improves its performance over time as it gains more experience and collects more data from its environment. The proposed algorithm allows training an intelligent agent to maximize a reward metric without applying reinforcement learning techniques, which are usually the way to solve this type of problem.



## Agradecimientos

A Dios, por permitirme estudiar esta carrera profesional.

A mis padres, Alcides y Jeannette, por motivarme constantemente y apoyarme para poder llegar a donde estoy, y a quienes con mucho cariño les dedico mi título profesional.

A mi hermano Piero, con quien tuve varios debates sobre las ideas y los problemas que iban surgiendo con la elaboración de esta tesis, y a quien le contaba con emoción lo que iba aprendiendo en mi formación como ingeniero mecatrónico.

A la profesora Elizabeth Villota y al profesor Edwin Villanueva, por orientarme y guiarme en el desarrollo de la presente tesis.

# Índice de Contenidos

	Pág.
Índice de Contenidos .....	i
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tablas .....	x
Lista de Acrónimos.....	xiv
Lista de Anexos .....	xvi
Lista de Símbolos.....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES .....	3
1.1.    Problemática: minas antipersonales en la actualidad .....	3
1.2.    Problema técnico: velocidad, veracidad, y versatilidad .....	4
1.3.    Objetivos de la tesis .....	6
1.3.1.    Objetivo general .....	6
1.3.2.    Objetivos específicos.....	6
1.4.    Alcance.....	7
CAPÍTULO 2: MARCO DE REFERENCIA .....	9
2.1.    Minas antipersonales: aspectos técnicos relevantes.....	9
2.1.1.    Clasificación .....	9
2.1.2.    Activación .....	9
2.1.3.    Detección.....	10
2.1.4.    Terreno .....	11
2.2.    Estado del arte.....	11
2.2.1.    Robots para desminado con locomoción por patas .....	11
2.2.2.    Mecanismo de las patas.....	13
2.2.3.    Algoritmos de navegación .....	14
CAPÍTULO 3: REQUERIMIENTOS Y DISEÑO CONCEPTUAL .....	16
3.1.    Definición de requerimientos .....	16

3.1.1.	Función principal .....	16
3.1.2.	Requerimientos mecánicos.....	16
3.1.3.	Requerimientos de control.....	17
3.1.4.	Requerimientos electrónicos .....	17
3.1.5.	Requerimientos eléctricos .....	18
3.1.6.	Requerimientos adicionales.....	19
3.2.	Estructura de funciones.....	19
3.2.1.	Diagrama de entradas y salidas.....	19
3.2.2.	Descripción general de procesos.....	20
3.2.3.	Estructura de funciones de la base remota.....	20
3.2.4.	Estructura de funciones del robot .....	21
3.2.5.	Descripción detallada de la estructura de funciones del robot.....	23
3.3.	Matrices morfológicas del robot.....	26
3.3.1.	Detección de minas .....	27
3.3.2.	Mecánica .....	28
3.3.3.	Telemetría: sensores y comunicación .....	29
3.3.4.	Eléctrica: energía, potencia y actuadores.....	30
3.3.5.	Procesamiento y control .....	30
3.4.	Conceptos de solución .....	32
3.4.1.	Concepto de solución 1.....	33
3.4.2.	Concepto de solución 2.....	34
3.4.3.	Concepto de solución 3.....	35
3.5.	Evaluación técnico-económica .....	36
3.6.	Transición del diseño conceptual al diseño ingenieril .....	38
CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO .....		39
4.1.	Diseño para no sobrepasar la presión umbral de detonación de las minas antipersonales metálicas enterradas.....	39
4.1.1.	Cálculo de la masa total del robot .....	39
4.1.2.	Factor de seguridad de explosión .....	40
4.2.	Características del mecanismo de las patas del robot.....	40

4.2.1.	Análisis cinemático del levantamiento del robot .....	41
4.2.2.	Análisis dinámico del levantamiento del robot .....	46
4.3.	Simulaciones mediante FEM de cargas en condición estática.....	51
4.3.1.	Esfuerzos mecánicos en la plancha inferior del tórax.....	52
4.3.2.	Esfuerzos mecánicos en cada extremo de las patas.....	54
4.4.	Estabilidad mecánica durante la caminata.....	56
4.5.	Planos mecánicos.....	57
<b>CAPÍTULO 5: DISEÑO ELECTRÓNICO.....</b>		<b>58</b>
5.1.	Selección de componentes.....	58
5.1.1.	Unidad de medición inercial .....	58
5.1.2.	Sensor de obstáculos LIDAR.....	59
5.1.3.	Sensor de corriente basado en el efecto Hall.....	61
5.1.4.	Conversor análogo digital (ADC) .....	62
5.1.5.	Servomotores.....	63
5.1.6.	Driver de servomotores .....	64
5.1.7.	Transceptor inalámbrico .....	66
5.1.8.	Controlador: Computadora de placa reducida (SBC).....	67
5.1.9.	Regulador de voltaje .....	68
5.1.10.	Baterías de Polímero de Litio (LiPo) .....	70
5.1.11.	Resumen de los elementos seleccionados .....	71
5.2.	Diagrama de bloques del sistema electrónico.....	72
5.3.	Diseño y simulación de la fuente de voltaje para el transceptor.....	72
5.4.	Diseño y simulación del circuito para la medición de la carga energética remanente en las baterías .....	74
5.5.	Diagramas esquemáticos.....	75
5.6.	Placa de circuito impreso .....	77
5.7.	Conexiones de elementos fuera del PCB .....	78
<b>CAPÍTULO 6: DISEÑO ALGORÍTMICO.....</b>		<b>79</b>
6.1.	Arquitectura de control del sistema .....	79
6.2.	Funciones de navegación .....	80

6.3.	Segmentación de trayectorias .....	80
6.4.	Cálculo de la pose del robot .....	81
6.5.	Cálculo del consumo de corriente .....	81
6.6.	Cálculo de los ángulos requeridos por las articulaciones utilizando Inteligencia Artificial Bioinspirada y Machine Learning.....	82
6.6.1.	Aspectos preliminares.....	82
6.6.2.	Etapa de predicción usando técnicas de Machine Learning .....	84
6.6.3.	Etapa de generación del dataset.....	88
6.6.4.	Etapa de optimización usando técnicas de Computación Evolutiva..	89
6.7.	Cálculo de los sentidos de rotación y desplazamiento requeridos para llegar al siguiente nodo de la ruta segmentada.....	91
6.8.	Lógica general de control .....	93
<b>CAPÍTULO 7: INTEGRACIÓN DEL ROBOT ARÁCNIDO INTELIGENTE .</b>		<b>97</b>
7.1.	Descripción del robot arácnido inteligente para detección de minas antipersonales metálicas en terreno irregular.....	97
7.2.	Funcionamiento del sistema completo.....	98
7.2.1.	Etapa de entrenamiento del algoritmo híbrido.....	98
7.2.2.	Etapa de pruebas del algoritmo de seguimiento de trayectorias.....	98
7.2.3.	Etapa de exploración del terreno minado .....	99
<b>CAPÍTULO 8: ESTIMACIÓN DE COSTOS .....</b>		<b>100</b>
8.1.	Costos de materiales.....	100
8.2.	Costo de fabricación y ensamble .....	101
8.3.	Costo de diseño .....	102
8.4.	Otros costos por hora .....	102
8.5.	Costo total .....	102
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>103</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>105</b>

# Índice de Figuras

Pág.

## CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Distribución mundial de víctimas de minas antipersonales (1997-2013) [11].....	3
Figura 1.2: Sistemas autónomos para desminado humanitario: (a) Robot AMRU [35]. (b) Robot HUMI [36]. .....	5
Figura 1.3: Ejemplo comparativo de trayectorias de un robot con locomoción con ruedas (en color rojo) y otro con patas (en color azul). Elaboración propia. ....	6

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Principales tipos de minas: (a) Mina antipersonal metálica [40]. (b) Mina antitanque desenterrada [41]. .....	9
Figura 2.2: Trayectoria y secciones generadas utilizando el algoritmo de Wong et al. Fuente: [62].....	15

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Esquema general de entradas y salidas del sistema mecatrónico. Elaboración propia.....	20
Figura 3.2: Descripción general de procesos internos del sistema mecatrónico. Elaboración propia.....	20
Figura 3.3: Diagrama de funciones de la base remota. Elaboración propia.....	21
Figura 3.4: Ejemplo de una posible representación del modelo virtual del robot arácnido. Fuente: [65]. .....	21
Figura 3.5: Diagrama de funciones del robot. Elaboración propia. ....	22
Figura 3.6: Diagrama de funciones del subsistema de sensores. Elaboración propia. ....	23
Figura 3.7: Diagrama de funciones del subsistema mecánico. Elaboración propia. ....	23
Figura 3.8: Diagrama de funciones del subsistema de energía. Elaboración propia. ....	24
Figura 3.9: Diagrama de funciones del subsistema de potencia. Elaboración propia. ....	24
Figura 3.10: Diagrama de funciones del subsistema de actuadores. Elaboración propia. ....	25

Figura 3.11: Diagrama de funciones del subsistema de procesamiento/control. Elaboración propia.....	25
Figura 3.12: Diagrama de funciones del subsistema de comunicación. Elaboración propia. ....	26
Figura 3.13: Boceto de la estructura de unión del sensor ALIS con el tórax. Elaboración propia.....	32
Figura 3.14: Boceto del concepto de solución 1 - Cuerpo en forma de estrella. Elaboración propia.....	34
Figura 3.15: Boceto del concepto de solución 2 - Cuerpo octogonal. Elaboración propia. ....	35
Figura 3.16: Boceto del concepto de solución 3 - Cuerpo cilíndrico. Elaboración propia. ....	36
Figura 3.17: Evaluación técnica normalizada de los conceptos de solución. Elaboración propia.....	37
Figura 3.18: Evaluación económica normalizada de los conceptos de solución. Elaboración propia.....	37
Figura 3.19: Gráfica de comparación técnico-económica de los conceptos de de solución. Elaboración propia.....	38

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Rango de valores angulares de los servomotores de tipo A (desde una vista superior del robot). Elaboración propia. ....	40
Figura 4.2: Modelamiento CAD de la sección transversal (izquierda) y diagrama cinemático del mecanismo de levantamiento de las patas del robot (derecha). Elaboración propia.....	41
Figura 4.3: Relaciones geométricas presentes en el mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.....	44
Figura 4.4: Simulación cinemática del mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia. ....	46
Figura 4.5: Diagramas de cuerpo libre de los elementos que componen dos patas no contiguas del robot: pata A en la izquierda y pata C en la derecha. Elaboración propia. ....	46
Figura 4.6: Simulación de la dinámica del mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.....	49
Figura 4.7: Variación del coeficiente de fricción $\mu_{robot}$ y el ángulo $\theta_2$ en la simulación. Elaboración propia.....	50
Figura 4.8: Variación del torque requerido por el mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.....	50

Figura 4.9: Gráfica de la convergencia del máximo esfuerzo encontrado en cada iteración del análisis FEM de la plancha inferior del tórax. Elaboración propia.	52
Figura 4.10: Malla de elementos finitos de la plancha inferior (con valores de factor de seguridad). Elaboración propia. ....	53
Figura 4.11: Detalle de los elementos finitos generados en el punto crítico de la plancha inferior del tórax. Elaboración propia.....	53
Figura 4.12: Simulación FEM de deformaciones en las regiones de la plancha inferior del tórax. Elaboración propia. ....	54
Figura 4.13: Gráfica de la convergencia del máximo esfuerzo encontrado en cada iteración del análisis FEM de cada extremo de las patas. Elaboración propia...55	55
Figura 4.14: Malla de elementos finitos de cada extremo de las patas (con valores de factor de seguridad). Elaboración propia. ....	55
Figura 4.15: Detalle de los elementos finitos generados en el punto crítico de las patas. Elaboración propia. ....	56
Figura 4.16: Simulación FEM de deformaciones en las regiones de cada extremo de las patas. Elaboración propia. ....	56
Figura 4.17: Centro de masa del robot arácnido. Elaboración propia. ....	57

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Módulo BNO055.....	59
Figura 5.2: Sensor RPLIDAR A1. ....	60
Figura 5.3: Sensor de corriente basado en efecto Hall ACS723.....	61
Figura 5.4: Módulo MCP3004.....	62
Figura 5.5: Servomotor HS-7245MH. ....	64
Figura 5.6: Driver de servomotores PCA9685.....	65
Figura 5.7: Diagrama de bloques del módulo PCA9685. Elaboración propia....65	65
Figura 5.8: Controlador Jetson Nano. ....	67
Figura 5.9: Comparación de desempeño de diversas placas de desarrollo para inteligencia artificial. Fuente: developer.nvidia.com. ....	68
Figura 5.10: Módulo LM2596.....	69
Figura 5.11: Circuito de las fuentes de voltaje de 5 y 6 voltios a 3 amperios usando el módulo LM2596. Elaboración propia. ....	70
Figura 5.12: Batería Lumenier 2250. ....	70
Figura 5.13: Diagrama de bloques del sistema electrónico del robot. Elaboración propia. ....	72
Figura 5.14: Simulación del circuito regulador de voltaje diseñado para el transceptor. Elaboración propia.....	73

Figura 5.15: Resultados de la simulación de la fuente diseñada para el transceptor.	
Elaboración propia.....	73
Figura 5.16: Simulación del circuito para medición de carga restante en los arreglos de baterías. Elaboración propia.....	75
Figura 5.17: Acondicionamiento de la señal de voltaje de las baterías para la medición de carga restante. Elaboración propia.....	75
Figura 5.18: Circuitos para la medición de la carga restante en las baterías. Elaboración propia.....	75
Figura 5.19: Diagramas esquemáticos del robot. Elaboración propia.....	76
Figura 5.20: Modelamiento tridimensional del PCB. Elaboración propia .....	77
Figura 5.21: Tarjeta PCB en el robot. Elaboración propia.....	77
Figura 5.22: Diagrama de conexiones del driver PCA9685 a los servomotores. Elaboración propia.....	78

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1: Arquitectura de control del robot. Elaboración propia.....	79
Figura 6.2: Segmentación de la trayectoria generada. Elaboración propia.....	81
Figura 6.3: Posiciones angulares permitidas para los servomotores. Elaboración propia.....	82
Figura 6.4: Distribución de los servomotores en el robot y ejes de referencia para traslación y rotación. Elaboración propia.....	83
Figura 6.5: Etapas que conforman un paso $k$ de la caminata del robot. Elaboración propia.....	84
Figura 6.6: Predicción de ángulos de las articulaciones para el instante $k$ para $N = 3$ . Elaboración propia.....	86
Figura 6.7: Variación del uso de los agentes durante la locomoción del robot. Elaboración propia.....	87
Figura 6.8: Exploración aleatoria de secuencias para generar población de individuos del GA. Elaboración propia.....	90
Figura 6.9: Generación del fitness y del individuo correspondientes a una determinada muestra en el GA. Elaboración propia.....	91
Figura 6.10: Ajuste gaussiano de la distribución probabilística de la rotación. Elaboración propia.....	92
Figura 6.11: Diagrama de flujo de la función de cálculo de los sentidos de rotación y desplazamiento. Elaboración propia .....	93
Figura 6.12: Diagrama de flujo del algoritmo de locomoción del robot. Elaboración propia.....	94

Figura 6.13: Verificación conceptual del algoritmo de locomoción. Elaboración propia.....	95
Figura 6.14: Diagrama de flujo de la función de interrupción para ejecutar el retorno de emergencia. Elaboración propia.....	96

## CAPÍTULO 7

Figura 7.1: Modelamiento tridimensional del sistema mecatrónico. Elaboración propia.....	97
Figura 7.2: Modelamiento tridimensional del robot arácnido (vista seccionada). Elaboración propia.....	98



## Índice de Tablas

	Pág.
<b>CAPÍTULO 2</b>	
Tabla 2.1: Comparación de los principales tipos de minas. Elaboración propia..	9
Tabla 2.2: Comparación de tecnologías de detección de minas. Elaboración propia.	
.....	10
Tabla 2.3: Categorización de los suelos para desminado con máquinas según Mikulic [28].....	11
Tabla 2.4: Robots de locomoción con patas orientados a la detección de minas.	
Elaboración propia.....	12
Tabla 2.5: Mecanismos de las patas de robots móviles poliarticulados. Elaboración propia.	
.....	13
<b>CAPÍTULO 3</b>	
Tabla 3.1: Leyenda de colores de los conceptos de solución generados en las matrices morfológicas. Elaboración propia.....	27
Tabla 3.2: Matriz morfológica del subsistema de detección de minas. Elaboración propia.	
.....	27
Tabla 3.3: Matriz morfológica del subsistema mecánico. Elaboración propia. ....	28
Tabla 3.4: Matriz morfológica del apartado de telemetría. Elaboración propia.	
29	
Tabla 3.5: Matriz morfológica del apartado eléctrico. Elaboración propia.....	30
Tabla 3.6: Matriz morfológica del subsistema de procesamiento y control.	
Elaboración propia.....	31
Tabla 3.7: Características de los algoritmos de navegación para los conceptos de solución del robot. Elaboración propia.....	33
Tabla 3.8: Evaluación técnica de los conceptos de solución. Elaboración propia.	
.....	36
Tabla 3.9: Evaluación económica de los conceptos de solución. Elaboración propia.	
.....	37
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Tabla 4.1: Cálculo de las masas de los elementos mecánicos a ser manufacturados.	
Elaboración propia.....	39
Tabla 4.2: Estimación de la masa total del robot. Elaboración propia. ....	40
Tabla 4.3: Verificación de seguridad de explosión del robot. Elaboración propia.	
.....	40

Tabla 4.4: Longitudes de los eslabones del mecanismo de las patas del robot.	
Elaboración propia.....	42
Tabla 4.5: Variables usadas en el análisis dinámico del mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.....	47
Tabla 4.6: Lista de planos mecánicos. Elaboración propia.....	57

## CAPÍTULO 5

Tabla 5.1: Principales sensores inerciales encontrados. Fuente: www.adafruit.com.	
.....	59
Tabla 5.2: Requerimientos técnicos para el LIDAR. Elaboración propia.....	60
Tabla 5.3: Principales sensores LIDAR encontrados. Elaboración propia.....	60
Tabla 5.4: Características principales del sensor RPLIDAR A1. Fuente: www.slamtec.com. ....	60
Tabla 5.5: Requerimientos técnicos para el sensor de corriente Hall. Elaboración propia. ....	61
Tabla 5.6: Características de los principales sensores de corriente Hall encontrados. Fuentes: www.digikey.com y www.sparkfun.com.....	61
Tabla 5.7: Características principales del sensor Hall ACS723. Fuente: www.allegromicro.com. ....	62
Tabla 5.8: Requerimientos técnicos para el ADC. Elaboración propia.....	62
Tabla 5.9: Principales ADC encontrados. Fuentes: www.adafruit.com y www.microchip.com.....	62
Tabla 5.10: Características principales del módulo MCP3004. Fuente: www.adafruit.com.....	63
Tabla 5.11: Requerimientos técnicos de los servomotores del robot. Elaboración propia. ....	63
Tabla 5.12: Características de los principales servomotores encontrados. Fuente: www.servocity.com. ....	63
Tabla 5.13: Características principales del servomotor HS-7245MH. Fuente: www.servocity.com. ....	64
Tabla 5.14: Requerimientos técnicos del driver de servomotores. Elaboración propia. ....	64
Tabla 5.15: Características de los principales drivers de servomotores encontrados. Fuente: www.adafruit.com.....	64
Tabla 5.16: Características principales del driver PCA9685. Fuente: www.naylampmechatronics.com. ....	65
Tabla 5.17: Requerimientos técnicos del transceptor inalámbrico. Elaboración propia. ....	66

Tabla 5.18: Características de los principales transceptores FM encontrados. Fuente: www.sparkfun.com.....	66
Tabla 5.19: Características electrónicas del transceptor NRF24LS01 y su ubicación en el robot. Fuente: www.openhardware.pe. ....	66
Tabla 5.20: Características principales del controlador Jetson Nano. Fuente: developer.nvidia.com. ....	67
Tabla 5.21: Características del cable flex GPIO Breakout para Raspberry Pi. Fuente: www.adafruit.com.....	68
Tabla 5.22: Consumo de corriente de los elementos electrónicos del robot. Elaboración propia.....	68
Tabla 5.23: Requerimientos de corriente de las fuentes de voltaje. Elaboración propia. ....	69
Tabla 5.24: Características de los principales reductores de voltaje encontrados. Fuentes: www.pololu.com y www.ti.com. ....	69
Tabla 5.25: Requerimientos técnicos para la batería del robot (por cada fuente de voltaje). Elaboración propia. ....	70
Tabla 5.26: Características principales de la batería Lumenier 2250. Fuente: www.dekasto.com. ....	71
Tabla 5.27: Masa de los elementos electrónicos del robot. Elaboración propia. .71	71
Tabla 5.28: Características más importantes del diodo zener 1N4728A. Fuente: www.vishay.com. ....	73
Tabla 5.29: Características del consumo de corriente simulado del transceptor. Elaboración propia.....	73
Tabla 5.30: Características más importantes del capacitor para la fuente de voltaje del transceptor. Fuente: www.mouser.com. ....	74

## CAPÍTULO 6

Tabla 6.1: Leyenda de los colores de fondo de las casillas de la Figura 6.7. Elaboración propia.....	87
Tabla 6.2: Arquitectura externa de los agentes inteligentes. Elaboración propia. ....	87
Tabla 6.3: Representación cualitativa de los coeficientes en las funciones de recompensa para las acciones positivas de locomoción (rotación y desplazamiento). Elaboración propia. ....	88
Tabla 6.4: Parámetros propuestos para el algoritmo genético. Elaboración propia. ....	91
Tabla 6.5: Leyenda de símbolos de la verificación conceptual del algoritmo de locomoción. Elaboración propia. ....	95

## CAPÍTULO 8

Tabla 8.1: Estimación de los costos de los componentes electrónicos del robot.	
Elaboración propia.....	100
Tabla 8.2: Estimación de los costos de las materias primas. Elaboración propia.	
.....	100
Tabla 8.3: Estimación de los costos de manufactura de las piezas mecánicas.	
Elaboración propia.....	101
Tabla 8.4: Estimación de los costos de ensamble. Elaboración propia. ....	101
Tabla 8.5: Estimación de los costos de diseño. Elaboración propia.....	102
Tabla 8.6: Estimación de otros costos por hora. Elaboración propia. ....	102
Tabla 8.7: Estimación del costo total del robot. Elaboración propia. ....	102



## Lista de Acrónimos

<b>ADC</b>	:	Analog to Digital Converter
<b>ANN</b>	:	Artificial Neural Network
<b>ADC</b>	:	Analog to Digital Converter
<b>ARP</b>	:	Auto-Rotating Perceptrons
<b>CAD</b>	:	Computer Aided Design
<b>CAE</b>	:	Computer Aided Engineering
<b>CNC</b>	:	Computer Numerical Control
<b>EOD</b>	:	Explosive Ordnance Disposal
<b>ERW</b>	:	Explosive Remnants of War
<b>ESA</b>	:	Equiangular Spiral Antenna
<b>EMI</b>	:	Electromagnetic Induction
<b>FM</b>	:	Frecuencia Modulada
<b>FS</b>	:	Factor de Seguridad
<b>GA</b>	:	Genetic Algorithm
<b>GDL</b>	:	Grados de Libertad
<b>GPR</b>	:	Ground-Penetrating Radar
<b>GPU</b>	:	Graphics Processing Unit
<b>IA</b>	:	Inteligencia Artificial
<b>IED</b>	:	Improvised Explosive Device
<b>IMU</b>	:	Inertial Measurement Unit
<b>I<sup>2</sup>C</b>	:	Inter-Integrated Circuit
<b>LIDAR</b>	:	Laser Imaging Detection and Ranging
<b>LPDA</b>	:	Log-Periodic Dipole Antenna
<b>LSTM</b>	:	Long Short-Term Memory
<b>MD</b>	:	Metal Detector
<b>ML</b>	:	Machine Learning
<b>MMSR</b>	:	Mobiles Minensuch und Räumsystem
<b>NTP</b>	:	Normativa Técnica Española de Prevención

<b>PCB</b>	:	Printed Circuit Board
<b>PWM</b>	:	Pulse-Width Modulation
<b>RF</b>	:	Radiofrecuencia
<b>RNE</b>	:	Reglamento Nacional de Edificaciones
<b>RNN</b>	:	Recurrent Neural Network
<b>RRT</b>	:	Rapidly-Exploring Random Tree
<b>SBC</b>	:	Single Board Computer
<b>SLAM</b>	:	Simultaneous Location And Mapping
<b>SPI</b>	:	Serial Peripheral Interface
<b>SI</b>	:	Sistema Internacional de Unidades
<b>STC</b>	:	Spanning Tree Coverage
<b>UART</b>	:	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>UGV</b>	:	Unmanned Ground Vehicles
<b>USAR</b>	:	Urban Search and Rescue
<b>UXO</b>	:	Unexploded Ordnance

## Lista de Anexos

- Anexo A** : Lista de Requerimientos  
**Anexo B** : Matriz Morfológica  
**Anexo C** : Memoria de Cálculo  
**Anexo D** : Códigos de Programación  
**Anexo E** : Datos Técnicos de Componentes  
**Anexo F** : Planos de Ensamble  
**Anexo G** : Planos de Despiece  
**Anexo H** : Cotizaciones



## Lista de Símbolos

### MECÁNICA ( $i = 1,2,3$ )

$\theta_i$	: Posición angular del eslabón $i$ [rad]
$\omega_i$	: Velocidad angular del eslabón $i$ [rad/s]
$\alpha_i$	: Aceleración angular del eslabón $i$ [rad/s <sup>2</sup> ]
$g$	: Módulo de la aceleración de la gravedad terrestre ( $g = 9.81$ m/s <sup>2</sup> )
$m_i$	: Masa del eslabón $i$ [kg]
$G_i$	: Centro de masa del eslabón $i$
$I_{G_i}$	: Momento de inercia del eslabón $i$ respecto de su centro de masa $G_i$ [kg·m <sup>2</sup> ]
$\vec{a}_{G_i}$	: Aceleración lineal del centro de masa del eslabón $i$ del mecanismo de cuatro barras [m/s <sup>2</sup> ]
$a_{G_{i_x}}$	: Componente horizontal de la aceleración $\vec{a}_{G_i}$ del eslabón $i$ [m/s <sup>2</sup> ]
$a_{G_{i_y}}$	: Componente vertical de la aceleración $\vec{a}_{G_i}$ del eslabón $i$ [m/s <sup>2</sup> ]
$W$	: Cantidad de eslabones del mecanismo de cuatro barras
$O_{pq}$	: Polo relativo del par cinemático formado por los eslabones $p$ y $q$
$\vec{F}_{ij}$	: Fuerza de reacción del eslabón $i$ sobre el eslabón $j$ ( $j = 1,2,3$ ) [N]
$F_{ij_x}$	: Componente horizontal de la reacción $\vec{F}_{ij}$ [N]
$F_{ij_y}$	: Componente vertical de la reacción $\vec{F}_{ij}$ [N]
$\vec{r}_{ij}$	: Posición de la fuerza $\vec{F}_{ij}$ respecto del centroide del eslabón $i$ [m]
$r_{ij_x}$	: Componente horizontal de la posición $\vec{r}_{ij}$ [m]
$r_{ij_y}$	: Componente vertical de la posición $\vec{r}_{ij}$ [m]
$\vec{P}_i$	: Fuerza externa aplicada sobre el eslabón $i$ [N]
$W_C$	: Módulo del peso estimado del cuerpo central del robot [N]
$\vec{r}_{P_i}$	: Posición de la fuerza $\vec{P}_i$ respecto del centroide del eslabón $i$ [N]
$r_{P_{i_x}}$	: Componente horizontal de la posición $\vec{r}_{P_i}$ [m]
$r_{P_{i_y}}$	: Componente vertical de la fuerza $\vec{r}_{P_i}$ [m]
$\lambda$	: Distancia vertical entre el centro de masa del eslabón 3 y el punto de contacto con el suelo [m]
$T_z$	: Torque requerido mover el mecanismo de cuatro barras [N·m]
$f$	: Fricción del punto en contacto con el piso en el mecanismo de cuatro barras [N]

## ELECTRÓNICA

$I_{load}$	: Amperaje consumido por el transceptor en la simulación [A]
$I_{medida}$	: Amperaje medido por el sensor de corriente [A]
$ksp$	: Miles de muestras por segundo
$R_A$	: Resistencia inferior de los circuitos de medición de carga de las baterías [ $\Omega$ ]
$R_B$	: Resistencia inferior de los circuitos de medición de carga de las baterías [ $\Omega$ ]
$V_{BATT_X}$	: Voltaje del arreglo de baterías $X$ [V]
$V_{B_{LEVEL\_X}}$	: Voltaje a ser medido por el módulo ADC del arreglo de baterías $X$ [V]
$V_{I_{OUT}}$	: Voltaje proporcionado por el sensor de corriente [V]
$V_{load}$	: Voltaje de alimentación del transceptor en la simulación [V]

## ALGORÍTMICA

$M$	: Cantidad de motores por cada pata ( $M = 2$ )
$L$	: Cantidad de patas del robot ( $L = 4$ )
$\eta$	: Cantidad de variables target a predecir ( $\eta = 8$ )
$k$	: Índice de cada uno de los instantes de tiempo que transcurren durante la caminata
$S$	: Cantidad de mediciones sensoriales usados por los predictores ( $S = 4$ )
$a_k$	: Vector que contiene los ángulos discretizados de todas las articulaciones del robot (en el instante $k$ )
$s_k$	: Vector de mediciones de los sensores del robot (en el instante $k$ ) usados por los predictores
$E_k$	: Estado del robot en el instante $k$ ( $E_k = \{s_k, a_k\}$ )
$N$	: Cantidad de estados pasados requeridos para predecir $a_k$ ( $N = 3$ )
$\tau_0$	: Cantidad de configuraciones aleatorias de los actuadores del robot para generar el conjunto de datos inicial ( $\tau_0 = 1000$ )
$\tau_{0_p}$	: Porcentaje de muestras del conjunto de datos inicial usadas para el entrenamiento de los predictores ( $\tau_{0_p} = 70\%$ )
$h$	: Índice de cada una de las iteraciones del algoritmo genético
$j$	: Índice de cada uno de los individuos del algoritmo genético
$\mathcal{F}(s_k)$	: Símbolo genérico para las cuatro funciones de recompensa
$\xi$	: Factor de decaimiento de la función $\mathcal{F}(\cdot)$ del algoritmo genético ( $\xi = 0.85$ )
$p_c$	: Probabilidad de cruzamiento de los individuos del algoritmo genético ( $p_c = 0.6$ )

## INTRODUCCIÓN

En los enfrentamientos bélicos del siglo pasado, era una práctica común enterrar minas antipersonales en la periferia de regiones que se buscaban repeler de tropas enemigas, así como en la llamada "tierra de nadie" durante las batallas de la primera guerra mundial. Sin embargo, estos explosivos siguen generando estragos mucho después de que han concluido los conflictos armados. Se estima que, actualmente, más de 60 países aún presentan regiones contaminadas con minas.

El tipo de mina más común es la antipersonal, la cual está diseñada para explotar cuando un soldado pase sobre ellas. No obstante, estos artefactos no distinguen entre civiles y combatientes, generando un problema social que aún está vigente. Es por ello que se requiere realizar una búsqueda para localizar e inutilizar estas minas. Dicho procedimiento es denominado desminado humanitario, y es mayormente realizado de manera manual.

Actualmente, existen propuestas de robots móviles que detectan estos explosivos, para que luego pueda participar un equipo especializado para desenterrarlos y desactivarlos. Sin embargo, estos robots suelen presentar un elevado costo. Además, poseen poca flexibilidad de locomoción, debido a que frecuentemente utilizan ruedas para desplazarse.

Se propone el diseño de un robot móvil que sea capaz de trasladar un sistema de sensado que permita detectar la presencia de minas antipersonales enterradas. El presente robot, cuya morfología fue inspirada en las arañas, utiliza cuatro extremidades articuladas para desplazarse sobre un terreno irregular.

Con el objetivo de controlar la locomoción del robot, se propone un algoritmo innovador, el cual es un híbrido entre Inteligencia Artificial Bioinspirada y Machine Learning. Esto permite que el robot mejore continuamente su desempeño a medida que se utilice por más tiempo en las exploraciones de regiones contaminadas por minas, al tener una mayor cantidad de datos para el entrenamiento del algoritmo.

El presente trabajo de investigación está orientado al dominio de control del robot; y describe la solución desarrollada para los otros dominios, como el aspecto mecánico y electrónico. Sin embargo, se hacen cálculos y simulaciones de características relevantes dentro de estos últimos dos dominios, para verificar la viabilidad de la solución propuesta.

La presente tesis se divide en ocho capítulos a desarrollarse de la siguiente manera:

**Capítulo 1:** Se plantea la problemática que se pretende abordar, resaltando los aspectos técnicos más relevantes. Además, se plantean los objetivos y se delimita el alcance del trabajo.

**Capítulo 2:** Se presentan las características técnicas de las minas antipersonales. También, se hace una revisión del estado del arte, que incluye sistemas integrados existentes, mecanismos para locomoción por patas, y algoritmos de navegación.

**Capítulo 3:** Se definen los requerimientos del sistema mecatrónico, divididos en aspectos mecánicos, electrónicos, de control, y otros. Asimismo, se desarrolla la estructura de funciones, con la cual se generan las matrices morfológicas. Se culmina este capítulo con el planteamiento de los conceptos de solución, junto con su respectiva evaluación y selección en base a criterios técnicos y económicos.

**Capítulo 4:** Se inicia el diseño ingenieril del robot, partiendo del concepto de solución óptimo previamente seleccionado. En este capítulo se muestra el diseño mecánico y las validaciones realizadas mediante las simulaciones computacionales respectivas.

**Capítulo 5:** Contiene el diseño electrónico, que abarca la selección de componentes electrónicos, los cálculos y sus simulaciones correspondientes, así como los esquemáticos.

**Capítulo 6:** Aquí se describe el software de control, que incluye al algoritmo híbrido propuesto para el control de las articulaciones del robot.

**Capítulo 7:** Presenta al sistema mecatrónico integrado y una descripción de su funcionamiento.

**Capítulo 8:** Se realiza una estimación de los costos requeridos para poder implementar el robot diseñado.

**Conclusiones y Recomendaciones:** Contiene las conclusiones finales resultantes del trabajo, así como las recomendaciones para proyectos que se podrían realizar tomando como punto de partida al robot diseñado.

Con el objetivo de facilitar la navegación durante la lectura del documento de tesis, considerar que dentro de los capítulos se encuentran los subcapítulos (también llamados secciones), y dentro de los estos se tienen las subsecciones.

# CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En el presente capítulo, se muestra la problemática en la que se enmarca el presente trabajo. Además, se caracterizan los aspectos técnicos más relevantes que las soluciones existentes no satisfacen en su totalidad. Para finalizar, se enuncian los objetivos y los alcances.

## 1.1. Problemática: minas antipersonales en la actualidad

Las minas antipersonales y otras *municiones no explotadas* (ERW, por sus siglas en inglés) constituyen un problema social a largo plazo, incluso luego de que la guerra ha terminado [1], [2]. Debido a que la explosión de minas antipersonales afecta principalmente a no combatientes [3] y el terreno minado debe ser abandonado por representar un riesgo potencial para los pobladores de esa zonas, se torna necesario realizar el desminado de dichas regiones.

Actualmente, más de 60 países en el mundo aún están contaminados por minas [4]. De acuerdo a la ONU, cada 20 minutos una persona muere o queda mutilada como consecuencia de la explosión de minas terrestres [5], [6]. Es por ello que diversas organizaciones alrededor del globo han prohibido la producción de este tipo de armas y hacen esfuerzos para eliminar las que ya fueron colocadas [7], [8]. Para resaltar la importancia de esta problemática, la ONU declaró como efeméride anual el 4 de abril, haciendo un llamado a la reflexión y apoyo a las actividades relacionadas al desminado humanitario [9].

La Figura 1.1 muestra la reducción de víctimas de minas antipersonales, luego de ejecutado el Tratado de Ottawa (1997) sobre la prohibición de minas antipersonales. Este tratado fue firmado por 122 países, incluido el Perú [10].



Figura 1.1: Distribución mundial de víctimas de minas antipersonales (1997-2013) [11].

Si bien es cierto que es significativa la reducción de las zonas que presentan afectados por minas antipersonales, aún hay mucho por hacer sobre este tema. En el Perú, la prensa ha reportado incidentes y agraviados relacionados con estos explosivos [12]–[16]. Los sobrevivientes de las explosiones de minas requieren tanto de rehabilitación física [17]–[21] como de ayuda psicológica [22] para mejorar su calidad de vida luego del accidente.

El desminado humanitario consiste en la detección y remoción de minas posterior a la finalización de un conflicto armado [23]. El método más frecuente para realizar esta tarea es el desminado manual, que se enfoca en minas antipersonales debido a su poca profundidad en comparación con las del tipo antitanque. En líneas generales, el procedimiento consta de un escaneo de la zona usando un *detector de metales* (MD, por sus siglas en inglés). Luego, se usa una sonda palpadora que permite localizar al objeto que está generando la señal, para posteriormente quitar tierra o vegetación que lo esté cubriendo. Finalmente, se lo retira para su desactivación [24] o se lo neutraliza usando otro explosivo [25].

Sin embargo, realizar el desminado de forma manual genera un riesgo potencial para los encargados de estas labores, llegando varios de ellos a resultar heridos, mutilados o, en el peor de los casos, perder la vida [8], [26], [27]. Actualmente, para disminuir el número de agraviados, se usan robots móviles para detección y mapeo de un campo minado [28].

En su mayoría, estos vehículos usan ruedas u orugas para su locomoción, pero son incapaces de desplazarse eficientemente en terreno irregular y abrupto. Es por ello que se hace necesario desarrollar mecanismos robóticos que permitan pasar sobre los obstáculos y mantener los sensores suficientemente nivelados horizontalmente para garantizar una adecuada medición. Existen soluciones propuestas en la literatura que usan móviles con desplazamiento basado en patas para realizar el desminado [29]–[32]. La presente tesis propone el uso de este tipo de locomoción, ya que presentan una mayor versatilidad de movimiento.

## 1.2. Problema técnico: velocidad, veracidad, y versatilidad

A la velocidad actual de despejado de las zonas contaminadas ejecutando desminado manual, se estima que tomaría más de 100 años terminar de retirar todas las minas restantes en el mundo [25]. Se ha reportado que, al utilizar máquinas para desminado, se aumenta en un factor de 15 la velocidad de limpieza de las regiones contaminadas con estos explosivos [28].

Por otro lado, el desminado con MD es el procedimiento más común debido a que la mayoría de los ERW son metálicos [24]. Sin embargo, este método presenta una tasa de falsos positivos de 99.9% [25], [33], ocasionado por la presencia de pequeñas partículas ferrosas en el suelo. Haciendo uso de otro tipo de sensores, como los *radares de penetración terrestre* (GPR, por sus siglas en inglés), se logra mejorar la eficiencia, ya que al generar una imagen de los objetos metálicos sensados es posible identificar de forma visual si se trata del espectro que corresponde a una mina antipersonal, reduciendo así el porcentaje de falsos positivos a 57% [34]. No obstante, los sensores GPR necesitan de un elaborado procesamiento de las señales con un elevado costo computacional. Es por ello que este procedimiento no suele ser realizado en tiempo real [34].

Por otra parte, no siempre el terreno donde se encuentran minas antipersonales es regular y uniforme, provocando que los vehículos con ruedas puedan presentar dificultades en su desplazamiento. Los robots con patas presentan una alternativa interesante, ya que son omnidireccionales [31], [35], lo que les da una mayor flexibilidad de movimiento en relación a vehículos tradicionales (ver Figura 1.2).

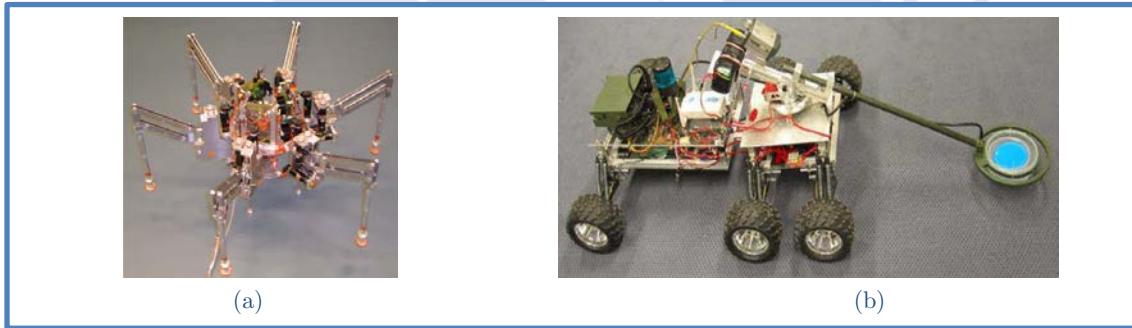


Figura 1.2: Sistemas autónomos para desminado humanitario:  
 (a) Robot AMRU [35]. (b) Robot HUMI [36].

Además, los robots con locomoción basada en patas están en la capacidad de pasar sobre obstáculos pequeños como piedras o vegetación, pudiendo inspeccionar zonas que los robots tradicionales se verían obligados a esquivar. Por ejemplo, considerando el caso donde una mina fue colocada en una zona rodeada de este tipo de obstáculos (ver Figura 1.3), la geometría de los robots con ruedas u orugas les dificultaría escanear dicha mina, y aun colocando el sensor detector en voladizo (como es el caso del Robot HUMI [36]), esta configuración afecta su estabilidad mecánica al momento de la toma de mediciones. La Figura 1.3 representa en color rojo la trayectoria que seguiría un robot con ruedas, en la cual se bordea a los obstáculos (representados con círculos de color verde), por lo que

no se puede detectar la mina. En color azul se muestra la trayectoria que podría seguir un robot con patas, el cual puede pasar por sobre los obstáculos periféricos para poder escanear la región central, en donde detectaría la mina enterrada.

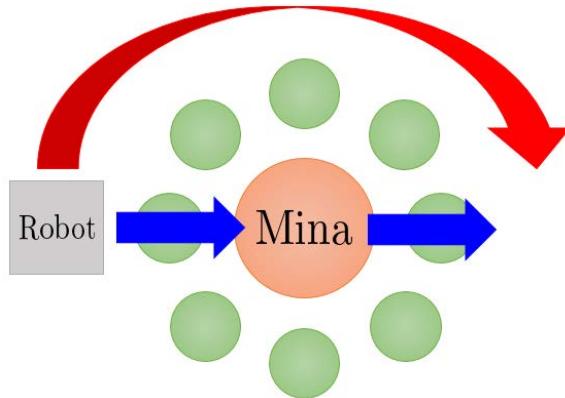


Figura 1.3: Ejemplo comparativo de trayectorias de un robot con locomoción con ruedas (en color rojo) y otro con patas (en color azul). Elaboración propia.

Como se ha mostrado, aun se debe mejorar tecnológicamente el desminado manual. Asimismo, considerando que alrededor del mundo las minas antipersonales están enterradas en terrenos no necesariamente uniformes, es necesario un enfoque de diseño que resulte en un robot que combine versatilidad de desplazamiento en suelos irregulares con una adecuada fiabilidad de los resultados de las detecciones de ERW enterradas.

### 1.3. Objetivos de la tesis

Existe la necesidad de un robot que pueda trasladar un sensor sobre un terreno con minas antipersonales enterradas para determinar su localización, y así un equipo especializado pueda ejecutar una posterior extracción, desactivación y eliminación de dichos explosivos. Además, este robot debe ejecutar su locomoción usando patas, para poder desplazarse en terrenos irregulares. Se propone el diseño de una plataforma robótica que pueda trasladar sensores de elevada confiabilidad de detección, para contribuir con las labores de desminado humanitario.

#### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar un robot arácnido inteligente para detección de minas antipersonales metálicas en terreno irregular.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- a) Establecer los requerimientos de diseño del robot considerando las características del terreno a escanear.

- b) Realizar el diseño conceptual del robot, que incluye la elaboración del diagrama de entradas y salidas, así como la estructura de funciones.
- c) Proponer conceptos de solución en base a los requerimientos definidos, evaluarlos desde una perspectiva técnico-económica, ejecutar una selección, y desarrollar el concepto de solución óptimo.
- d) Diseñar el sistema mecánico del robot que le permita desplazarse y escanear una región cuyo relieve es irregular. Además, elaborar los planos mecánicos del ensamblaje general, así como los planos de despiece de los elementos que deben ser fabricados.
- e) Diseñar el sistema electrónico del robot que le permita obtener y procesar la información que requieren los diversos algoritmos para interactuar con el entorno. Asimismo, elaborar los diagramas esquemáticos que muestren la conexión entre los distintos elementos electrónicos del robot.
- f) Diseñar el algoritmo de locomoción del robot. Además, seleccionar los algoritmos de localización y navegación necesarios para planear la trayectoria y determinar cómo seguirla, logrando una cobertura total del terreno.
- g) Estimar los costos totales del robot a ser diseñado.

#### 1.4. Alcance

El presente trabajo desarrollará el diseño de un robot arácnido inteligente para detección de minas antipersonales en terrenos semiáridos irregulares que tengan poca pendiente (para simplificación del diseño).

El robot se diseñará considerando únicamente la detección de minas antipersonales basadas en componentes metálicos. Esto se hace debido a que las minas antitanque son enterradas a mayor profundidad en comparación con las antipersonales (mayor a 4 veces [28], [37]), lo que hace difícil sensarlas; y a la elevada complejidad técnica que presenta la detección de minas no metálicas (combina inducción electromagnética y retropropagación de neutrones por dispersión [38]).

El subsistema de medición y almacenamiento de las señales obtenidas de los detectores de minas, así como sus circuitos de excitación y energización, se tomarán en conjunto como una *caja negra* que opera de forma continua e independiente al resto de los sistemas del robot. Esto es debido a que la labor de diseñar sensores adecuados para detección de minas antipersonales metálicas enterradas a la profundidad propuesta, requiere un trabajo especializado de

ingeniería que va más allá del alcance de la presente tesis. El robot a ser diseñado tiene como función trasladar dichos sensores a través de la región a escanear.

La propuesta no contempla una descripción detallada del método de localización, planeamiento de la trayectoria, ni mapeo del terreno. Estos algoritmos son requeridos por el robot para que pueda escanear toda la zona esquivando los obstáculos que encuentre. Sin embargo, se hace una revisión de los ya existentes en el estado del arte, y se elige el algoritmo más adecuado. Además, se seleccionan los sensores que permitan tener la información que requiera dicho algoritmo. Tampoco se diseña la estación remota para la comunicación con el robot, pero se deja planteada la definición de su estructura de funciones.

Se hace una simplificación de la mecánica del suelo para el análisis en los extremos de las patas del robot, seleccionando un tipo de suelo cuyas partículas están lo suficientemente sueltas como para permitir que la pata se hunda durante el desplazamiento del robot. Además, se considera que durante la caminata, el hundimiento del suelo permite que la pata se mantenga vertical, y hace que la reacción del suelo sobre cada una de las patas sea una fuerza sin un torque asociado. Esta simplificación se realiza debido a que, de existir un torque de reacción del suelo, este sería difícil de calcular. Sin embargo, se contempla que existe una fricción horizontal generada en los puntos de contacto de las patas con el suelo, además de la fuerza de reacción vertical. Un análisis detallado del proceso de hundimiento requiere de hacer ensayos mecánicos tomando muestras del suelo, lo cual es un proceso de ingeniería que está fuera del alcance de la tesis.

Se diseña un algoritmo híbrido basado en Inteligencia Artificial Bioinspirada y Aprendizaje de Máquina (ML, por sus siglas en inglés) para el control de las articulaciones de las patas del robot, que le permita desplazarse en la dirección requerida. Como todo algoritmo de este tipo, el diseño contempla el uso de hiperparámetros que deben ser ajustados con la implementación física del robot.

## CAPÍTULO 2: MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo presenta conceptos técnicos relacionados a las minas antipersonales y el estado de la tecnología de desminado usando máquinas. De esta manera, se tiene un panorama más amplio para así contribuir en la solución de la problemática presentada en el capítulo anterior.

### 2.1. Minas antipersonales: aspectos técnicos relevantes

#### 2.1.1. Clasificación

De los aproximadamente 2000 tipos de minas existentes globalmente [33], en la Tabla 2.1 se listan las características de las más comunes [28], [33], [37], [39].

Tabla 2.1: Comparación de los principales tipos de minas. Elaboración propia.

Tipo de mina	Masa [kg]	Fuerza de activación [kgf]	Diámetro [mm]	Profundidad [mm]
Antipersonal simple	0.1	3 - 10	< 80	4 - 50
Antitanque	~ 5	>150	~ 350	> 200

En la Figura 2.1, se tienen fotografías de estos dos tipos de minas. En la Figura 2.1.a, se muestra la comparación del tamaño de una mina antipersonal en relación a una mano humana. Por otro lado, en la Figura 2.1.b, se puede observar la irregularidad del terreno en donde son colocados estos explosivos.



(a)



(b)

Figura 2.1: Principales tipos de minas:

(a) Mina antipersonal metálica [40]. (b) Mina antitanque desenterrada [41].

#### 2.1.2. Activación

El principio físico de activación de las minas antipersonales simples, se basa en sobrepassar un esfuerzo mecánico umbral sobre su superficie superior [36], [37]. Esta consideración permite calcular la masa máxima admisible del robot, de forma que no exista riesgo de explosión de la mina, aunque el móvil llegue a posarse sobre uno de estos artefactos.

### 2.1.3. Detección

Los métodos más usuales para detectar minas antipersonales metálicas están basados en diversos principios [42], tales como: biológicos (usando animales para la detección; como perros, roedores, abejas, plantas, y bacterias), electromagnéticos (con sensores como detectores de metales, antenas GPR, y láser infrarrojo), y mecánicos (mediante sondas palpadoras y máquinas de limpieza diseñadas para resistir la explosión de estos artefactos).

De estos procedimientos, los más usados son los GPR y los detectores de metales. En el caso de las antenas GPR, el principio físico de detección se basa en emitir una señal electromagnética hacia el suelo, y detectar la señal reflejada en el receptor, por lo que se requiere de un par de antenas [43]. Además, es necesario que estén ubicadas horizontalmente a una distancia máxima de 25 cm sobre el suelo y que el conjunto se mueva como máximo a una rapidez de 0.15 m/s [44]. Por otro lado, los detectores de metales encuentran las minas usando *inducción electromagnética* (EMI, por sus siglas en inglés). Este procedimiento, de bajo costo, es confiable incluso en presencia de humedad en el suelo [42]. A continuación, en la Tabla 2.2, se analizan ambos tipos de sensores.

Tabla 2.2: Comparación de tecnologías de detección de minas. Elaboración propia.

Tipo de sensor	Ventajas	Desventajas
GPR	<ul style="list-style-type: none"><li>- Brinda información acerca de la profundidad a la cual está enterrada una mina.</li><li>- Tasa de falsos positivos de 57%.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Si la mina es muy pequeña (menor a 10 cm), puede ser difícil de distinguirla de una ya explotada.</li><li>- Requiere un circuito electrónico y procesamiento de las señales de complejidad elevada.</li></ul>
MD	<ul style="list-style-type: none"><li>- Es barato y de casi nula complejidad técnica.</li><li>- Se puede saber instantáneamente si el sensor ha captado la presencia de algún metal.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- No permite diferenciar una mina de escombros o partículas metálicas que podrían estar enterradas en el suelo, lo que genera una alta tasa de falsos positivos (99.9%).</li></ul>

Como se puede ver en la Tabla 2.2, ambos tipos de detección tienen sus beneficios e inconvenientes. Para compensar las desventajas del uso por separado de estos sensores, se han reportado el uso de detectores híbridos que combinan ambas tecnologías, como el sensor ALIS [45], que logra reducir la tasa de falsos positivos a 35%. Por otro lado, usando técnicas de aprendizaje automático con *redes neuronales artificiales* (ANN, por sus siglas en inglés), se ha reportado una disminución de este ratio de falsas alarmas a un 4% en el conjunto de datos de validación [46].

#### 2.1.4. Terreno

Las minas antipersonales han estado presentes en diversos conflictos armados a lo largo de los años. Actualmente, las que quedan activas están repartidas en más de 68 países [24], [28], pudiendo así encontrarlas en varios tipos de terrenos. La Tabla 2.3 muestra las clases de suelos en donde es posible hacer uso de desminado usando máquinas, de acuerdo a una clasificación propuesta en la literatura (véase la Tabla 2.1 en [28]).

Tabla 2.3: Categorización de los suelos para desminado con máquinas según Mikulic [28].

Categoría del suelo	Características del suelo
I	Suelo cubierto de vegetación, humus, loam, y arena compacta.
II	Tierra mezclada con rocas pequeñas: prevalencia de tierra con rara presencia de vegetación de menor tamaño. Las rocas son de caliza y esquisto, son suaves y fácilmente rompibles por una herramienta o máquina.
III	Suelo rocoso presenta láminas de roca con tierra entre ellas. Terreno tiene poca vegetación y puede ser pantanoso.

En la etapa de diseño ingenieril de la presente tesis se considera que las minas están enterradas en suelos de categoría II. Según la normativa peruana, este tipo de suelo corresponde a la denominación de gravoso, de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (véase la Figura 4 en [47]).

#### 2.2. Estado del arte

Se encontró en la literatura que existen diversos modelos de robots desminadores basados en mecanismos bioinspirados. Los más comunes son los robots cuya forma es inspirada en arañas (sistemas arácnidos). No obstante, son soluciones de un precio muy elevado (mayor a los 15 000 € por cada robot [41]), lo que dificulta su implementación en países en vías de desarrollo, para su uso más allá del campo académico y de investigación.

##### 2.2.1. Robots para desminado con locomoción por patas

Existen diversas tecnologías reportadas en la literatura cuyo objetivo es automatizar la limpieza de regiones con minas antipersonales enterradas. Debido a las ventajas inherentes del desplazamiento con extremidades, es una línea de desarrollo que se ha venido implementando en diversos prototipos académicos. En la Tabla 2.4 se observa un resumen comparativo de distintos robots desminadores con patas. Se muestran datos de autonomía (S: semiautónomo, A: autónomo), la cantidad de *grados de libertad* (GDL) totales (en caso presenten manipuladores que sujetan los sensores en voladizo, estos son sumados a los GDL de las patas),

los sensores presentes en el robot enfocados a la detección de minas (no se consideran los sensores requeridos para los lazos de control de movimiento ni de localización), las velocidades de desplazamiento promedio (durante el escaneo y transporte), las dimensiones máximas (largo, ancho y alto), y el peso total del sistema (incluyendo el equipamiento que llevan). Los robots presentados son prototipos diseñados para fines de investigación. Además, se encontró en la literatura que la geometría de un robot hexápodo le permite alcanzar una mayor velocidad de avance que un cuadrúpedo [30], [48].

Tabla 2.4: Robots de locomoción con patas orientados a la detección de minas. Elaboración propia.

Robot y Autonomía	GDL	Sensores	Velocidad [mm/s]	Dimensiones [mm]	Peso [kg]
 AMRU5 [31]: S y A	18	MD	-	-	-
 COMET I [49], [50]: S	18	MD, GPR, óptico (proximidad)	41.6	-	-
 COMET II [49], [50]: S	18+4	MD, GPR	83.3	1600 x 1400 x 600	120
 COMET III [49]–[51]: S	18+4	MD, GPR	-	4000 x 2500 x 800	990

(continúa en la página siguiente)

Tabla 2.4: Robots de locomoción con patas orientados a la detección de minas. Elaboración propia (continuación).

Robot y autonomía	GDL	Sensores	Velocidad [mm/s]	Dimensiones [mm]	Peso [kg]
Multisensor Demining Robot [52]: S	12	MD, IR y químico	8.3 – 41.7	750 x 750 x 280	118
SILO6 [30]: S	18+5	MD, IR	50	880 x 200 x 260 (sin el manipulador de 1 m)	71.34

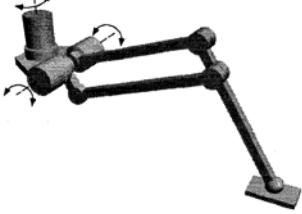
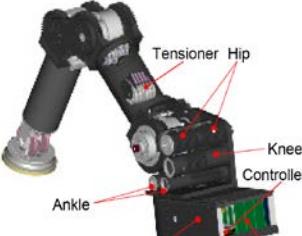
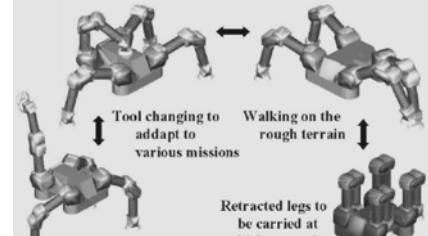
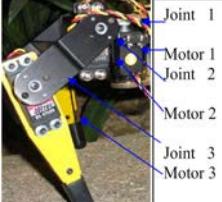
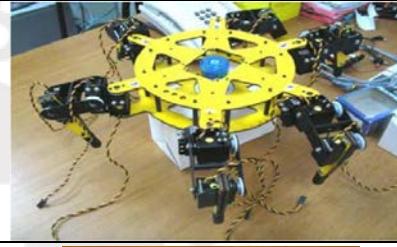
### 2.2.2. Mecanismo de las patas

Se hizo una revisión en la literatura con respecto al mecanismo de las patas, ya que define la capacidad de locomoción del robot y la complejidad del algoritmo de control usado para las articulaciones. En la Tabla 2.5, se presentan a detalle las configuraciones físicas de distintos mecanismos de extremidades de robots con locomoción por patas, cuyo diseño no necesariamente es enfocado al desminado humanitario, ya que se buscan referencias mecánicas. Esta información servirá como punto de partida para el diseño de las extremidades del sistema requerido. Nótese que cada una de las patas mostradas en dicha tabla tiene 3 GDL.

Tabla 2.5: Mecanismos de las patas de robots móviles poliarticulados. Elaboración propia.

Robot	Ilustraciones	
AMRU [31]	Diagrama 3D de la pata del robot AMRU, mostrando la configuración poliarticular.	Diagrama de la pata del robot AMRU, mostrando los tres grados de libertad (GDL) y sus respectivas articulaciones.
SILO6 [29], [30]	Diagrama de la pata del robot SILO6, mostrando los tres grados de libertad (GDL) y sus respectivas articulaciones.	Diagrama 3D de la pata del robot SILO6, mostrando la configuración poliarticular.
(continúa en la página siguiente)		

Tabla 2.5: Mecanismos de patas de robots móviles. Elaboración propia (continuación).

Robot	Ilustraciones		
TITAN 8 - VK1 [53], [54]			
TITAN 9 [54]			
Walking Hexapod Robot [55]			
BiLBIQ [56]			

### 2.2.3. Algoritmos de navegación

En la presente tesis, se denomina *navegación* a los procedimientos que involucran las siguientes tres funciones: localización, mapeo del terreno, y generación de trayectorias. Como fue definido en los alcances, no se diseñará un algoritmo de navegación para el robot, sino que se seleccionará uno ya existente.

El objetivo de la navegación es conseguir que el robot escanee toda una región cerrada para localizar minas antipersonales enterradas, por lo que se requiere que el robot pase al menos una vez por cada zona del terreno a analizar. El procedimiento para crear trayectorias de este tipo es conocido como *algoritmo generador de rutas de cobertura completa*. Se analizaron diversos algoritmos de generación de trayectorias para robots móviles vistos en la literatura. Algunos de ellos están ideados para su aplicación en agricultura. Sin embargo, pueden ser utilizados para el planeamiento de rutas para detección de explosivos en campos minados, ya que se mantienen los objetivos de su formulación original [57], [58].

Con respecto a las dos primeras funciones relacionadas a la navegación, los algoritmos encontrados realizan *localización* y *mapeo simultáneo* del terreno (SLAM, por sus siglas en inglés). Existen algoritmos de fusión de información odométrica visual y de las patas; en donde se estima la posición y orientación del robot combinando datos de sensores iniciales, odometría relativa a la rotación de las articulaciones de las patas, y captura de imágenes estéreo en tiempo real [59]. Otro tipo de algoritmos son los de *exploración rápida de árboles aleatorios* (RRT, por sus siglas en inglés), en los cuales se generan árboles cuyos nodos representan una configuración cinemática del robot, la cual se va ajustando utilizando información de sensores de distancia infrarrojos omnidireccionales, sensores iniciales y sensores de fuerza colocados en las patas del robot [60].

En relación a la función de navegación vinculada a la generación de trayectorias de cobertura completa sobre un polígono cerrado, se encontró el Algoritmo Hameed [6]. Este método propone generar rutas formadas por segmentos paralelos, buscando minimizar la cantidad de giros que realiza el robot durante su desplazamiento. Por otro lado, se ha reportado en la literatura el algoritmo de *cobertura de árbol de expansión en espiral* (STC, por sus siglas en inglés) [61], el cual divide al terreno en una grilla y genera recursivamente trayectorias hasta que todo el terreno sea cubierto. Estos algoritmos pueden recibir la información de un mapa ya generado del terreno junto con la ubicación del robot (usando técnicas SLAM, por ejemplo), para así conseguir que se cumplan las tres funciones de navegación sin requerir de sensores extra.

Asimismo, se encontró un tipo de algoritmo en el cual se descompone al terreno en secciones, utilizando los obstáculos presentes en el terreno como hitos para realizar el mapeo de la región, al asumir que sus posiciones son estáticas durante el desplazamiento del robot. Una implementación de este tipo, propuesta por Wong et al., logra cumplir las tres funciones requeridas para la navegación con un único algoritmo, utilizando sensores de distancia infrarrojos omnidireccionales. De acuerdo a los autores, este método requiere menor cantidad de memoria y potencia computacional que los algoritmos que generan grillas. Además, este algoritmo fue validado en simulación y con un robot físico (véase la Figura 2.2), por lo que es el recomendado para su aplicación en la presente tesis.

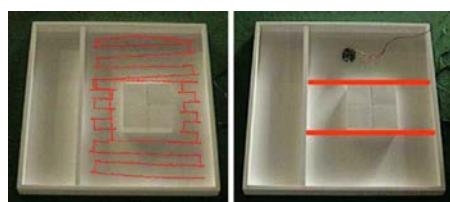


Figura 2.2: Trayectoria y secciones generadas utilizando el algoritmo de Wong et al. Fuente: [62].

## CAPÍTULO 3: REQUERIMIENTOS Y DISEÑO CONCEPTUAL

El presente capítulo contiene los requerimientos y el diseño conceptual del sistema mecatrónico, que permiten definir las funciones del robot. Además, se incluye la estructura de funciones del sistema, junto con las matrices morfológicas. Con ellas, se pueden plantear soluciones, evaluarlas, y optimizarlas; para así tener el concepto de solución final a ser desarrollado en los capítulos posteriores.

### 3.1. Definición de requerimientos

En el Anexo A, se adjunta la tabla que resume los requerimientos del sistema mecatrónico, los cuales son etiquetados con la letra (E).

#### 3.1.1. Función principal

La función principal del robot es movilizar un sistema de detección de minas antipersonales metálicas de 8 mm de diámetro, enterradas a una profundidad de 4 a 50 mm, por un terreno irregular.

#### 3.1.2. Requerimientos mecánicos

1. (E) **Masa:** Se puede observar que los robots encontrados en la literatura tienen una masa muy elevada (véase Tabla 2.4). Esto ocurre debido a que poseen sistemas de sensado y procesamiento que son suficientemente sofisticados para permitirles saber la ubicación de las minas en tiempo real y así no pasar sobre ellas. Además, en caso el robot se pose sobre uno de estos explosivos, la estructura mecánica es suficientemente robusta como para permitirles resistir un determinado número de explosiones antes de dejar de funcionar correctamente. Para disminuir la masa del robot, el costo económico, y la complejidad de los sensores; se requiere diseñar el móvil con una masa y geometría que no ocasionen que se supere el umbral mínimo de detonación de las minas, en caso se llegue a posar encima de estos explosivos. Así, el robot puede desplazarse sin riesgo de explotar algún ERW durante el escaneo del terreno, aun cuando se desconoce la ubicación exacta de las minas. En conclusión, es un requerimiento que la masa total del robot debe permitir que la presión ejercida por el móvil en sus puntos de contacto con el suelo, sea menor al umbral mínimo de detonación ( $\sigma_{explosión} = 9.81 \text{ kPa}$ , véase el Anexo C).
2. (E) **Geometría:** El cuerpo central del robot debe tener unas dimensiones máximas (L x A x Al) de 0.75 x 0.75 x 0.75 m. Además, posee una

estructura que permite una sujeción estable de los componentes internos y externos.

3. (E) **Geometría:** La estructura mecánica del robot debe permitir que los sensores usados en la detección estén como máximo a  $25\text{ cm}$  sobre el suelo, debido a que esa es la distancia adecuada de funcionamiento de los sensores detectores de minas que son de los tipos MD y GPR [44].
4. (E) **Movilidad:** Durante la inspección, la velocidad de los detectores de minas debe ser menor a  $150\text{ mm/s}$ , de acuerdo a restricciones encontradas en la literatura [44].
5. (E) **Transporte:** El sistema completo debe ser de fácil transporte, realizable por 2 personas, como máximo. Se considera que una persona puede levantar sin problemas desde el piso una masa de hasta  $25\text{ kg}$ , de acuerdo a la normativa peruana vigente [63].
6. (E) **Operación:** El terreno a inspeccionar debe tener una tolerancia de planitud de  $5\text{ cm}$  (sin considerar los obstáculos que podrían estar presentes sobre el suelo), para garantizar estabilidad del robot durante su locomoción.
7. (E) **Operación:** El robot debe poder desplazarse en terreno semiárido de tipo II (este tipo de suelo no presenta partículas internas de gran tamaño, véase la Tabla 2.3) sin pendientes pronunciadas, lluvia ni lodo.
8. (E) **Operación:** El terreno a examinar puede contener obstáculos cuyas dimensiones máximas ( $L \times A \times Al$ ) sean de  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ .

### 3.1.3. Requerimientos de control

1. (E) **Control:** El robot debe contar con un algoritmo de **detección de obstáculos** en tiempo real.
2. (E) **Control:** El robot debe tener un algoritmo para calcular su **localización y orientación**.
3. (E) **Control:** El robot debe poseer un algoritmo de **seguimiento de trayectorias**, que use información de la localización del móvil en el terreno mapeado y una ruta de cobertura total generada a priori.
4. (E) **Control:** El robot debe tener un algoritmo de control de las articulaciones de las patas, que le permita ejecutar las acciones de rotación y desplazamiento.

### 3.1.4. Requerimientos electrónicos

1. (E) **Sensores:** El robot debe contar con un arreglo de sensores para **detectar minas** antipersonales metálicas enterradas a una profundidad de 4 a  $50\text{ mm}$  en terreno irregular.

2. (E) **Sensores:** El robot debe tener sensores para **detectar obstáculos** en el terreno, cuyas dimensiones sean menores a  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  (L x A x Al).
3. (E) **Sensores:** El robot debe contar con sensores para obtener su **localización** en el campo minado a medida que se desplaza y escanea el terreno.
4. (E) **Sensores:** El robot debe contar con sensores que le permitan saber su **orientación** tridimensional completa (roll, pitch, yaw) en tiempo real.
5. (E) **Actuadores:** El robot debe tener actuadores que le permitan realizar su **desplazamiento** por el terreno irregular.
6. (E) **Actuadores:** El robot debe tener actuadores que le permitan **girar** sobre su misma posición.
7. (E) **Procesamiento:** El controlador del robot debe contar con dispositivos electrónicos adecuados para el almacenamiento continuo de la información recibida de los **sensores de minas**, para su procesamiento ulterior al escaneo del terreno.
8. (E) **Procesamiento:** El controlador del robot debe tener capacidad de procesamiento de los datos obtenidos de la **detección de obstáculos**.
9. (E) **Procesamiento:** El controlador del robot debe poder calcular su **localización** en el terreno, así como su **orientación** tridimensional.
10. (E) **Procesamiento:** El controlador del robot debe tener capacidad computacional para generar **trayectorias** de cobertura total, es decir, que dicha ruta permita el escaneo de la región completa.
11. (E) **Procesamiento:** El controlador del robot debe contar con capacidad computacional suficiente para generar las señales de control que requieren sus actuadores, y así lograr su **desplazamiento** siguiendo una trayectoria definida.
12. (E) **Envío de datos:** El robot debe tener un controlador que permita el envío y recepción de información, a través de un módulo de **comunicación** bidireccional, hacia una base remota ubicada a una distancia de  $1\text{ km}$  como máximo.

### 3.1.5. Requerimientos eléctricos

1. (E) **Eléctrica:** El móvil debe contar con baterías que le permitan tener una autonomía energética mínima de 50 minutos. Este es un valor recomendado para sistemas de desminado automatizado [28], [33], [36].

### 3.1.6. Requerimientos adicionales

1. (E) **Estación remota:** Debe haber una base remota desde la cual un operador pueda recibir información de uno o varios de los robots diseñados.
2. (E) **Control de calidad:** Los robots encontrados en la literatura usan tecnologías de sensado que tienen un índice de falsos positivos mayor al 50% (véanse la Tabla 2.2 y la Tabla 2.4). Ante ello, una solución atractiva es el desarrollo de un sistema robótico con patas cuya estructura mecánica sea diseñada especialmente para transportar sensores más modernos y eficientes, como los sensores duales ALIS (veáse la sección 2.1, página 10). De esta manera, se justifica el presente requerimiento: que el robot deber presentar un porcentaje de falsos positivos de explosivos detectados menor a 50%.
3. (E) **Comunicación:** El robot debe enviar su nivel de batería restante a la base remota.
4. (E) **Comunicación:** El robot debe ejecutar un retorno de emergencia ante una señal de entrada manual enviada desde la base remota.
5. (E) **Mantenimiento:** El tiempo que toma realizar el reemplazo de baterías del móvil debe ser menor a 30 minutos, de acuerdo a una recomendación vista en la literatura [64].
6. (E) **Costo:** Se requiere de un sistema de bajo costo para así poder tener una mayor cantidad de estos robots operando al mismo tiempo en las regiones afectadas. De esta manera, si uno de los robots deja de funcionar, no se detiene la inspección del terreno, aumentando la eficiencia de la labor de desminado. Se propone como requerimiento que los costos totales de fabricación y diseño deben ser menores a \$10 000 (USD). Este es un costo menor al que suelen presentar este tipo de sistemas [41].

## 3.2. Estructura de funciones

### 3.2.1. Diagrama de entradas y salidas

Se muestra en la Figura 3.1 el diagrama de caja negra del sistema mecatrónico (black box, por su denominación en inglés), diferenciando entre los tipos de entradas y salidas, con el uso de distintos tipos de flechas. En los siguientes diagramas, el intercambio de energía se representa con flechas de líneas continuas (energía eléctrica de color rojo y demás tipos en negro); el flujo de información del sistema mechatrónico con el exterior, con flechas de líneas discontinuas de color dorado; el intercambio de información interno, con flechas de líneas discontinuas de color negro y la entrega de materia con flechas de líneas dobles de color negro.

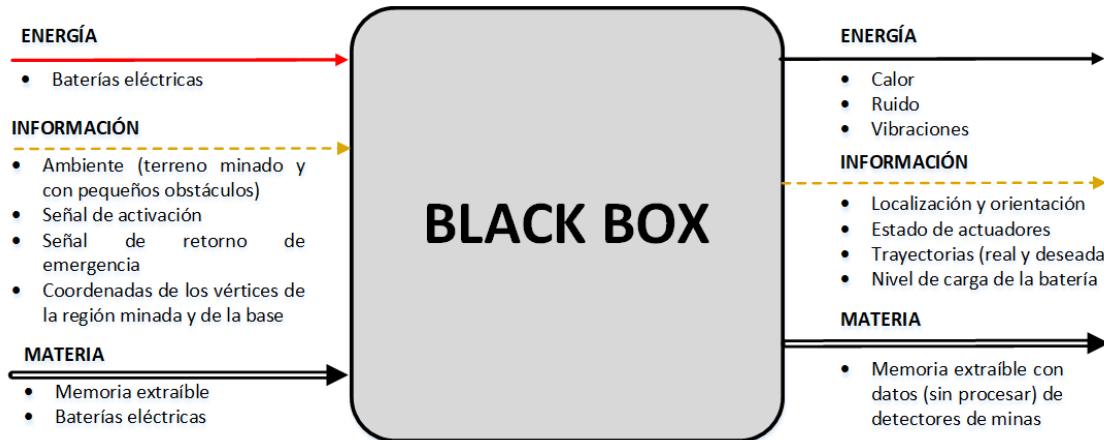


Figura 3.1: Esquema general de entradas y salidas del sistema mecatrónico. Elaboración propia.

### 3.2.2. Descripción general de procesos

De manera que exista una comunicación bidireccional con el robot desde una localización distante del terreno minado donde se realiza la exploración, el *sistema mecatrónico* se dividirá en dos partes: un mando ubicado en la estación remota y el robot arácnido detector de minas. En la Figura 3.2 se observa el intercambio de señales y energía entre los sistemas internos del robot, así como la interacción de estos con el exterior. Este tipo de diagramas es conocido como *gray box*.

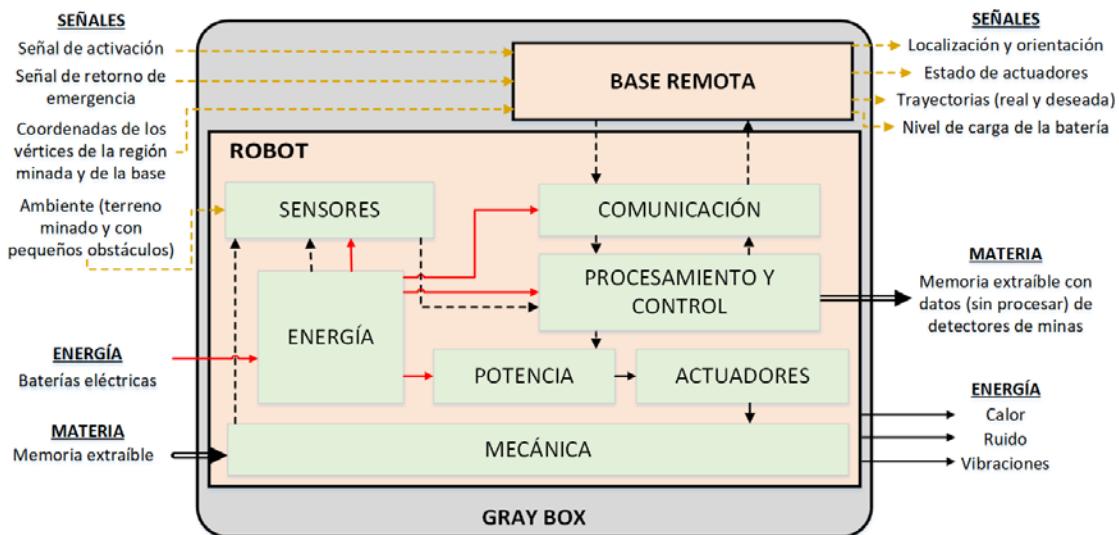


Figura 3.2: Descripción general de procesos internos del sistema mecatrónico. Elaboración propia.

### 3.2.3. Estructura de funciones de la base remota

En la Figura 3.3, se observa la estructura de funciones de la base remota para comunicación con el robot. Este tipo de esquemas es también llamado *diagrama de funciones*. Como fue mencionado en los alcances, el presente trabajo se limitará a sugerir las funciones de la estación de monitoreo, sin proponer portadores de solución para sus funciones internas.

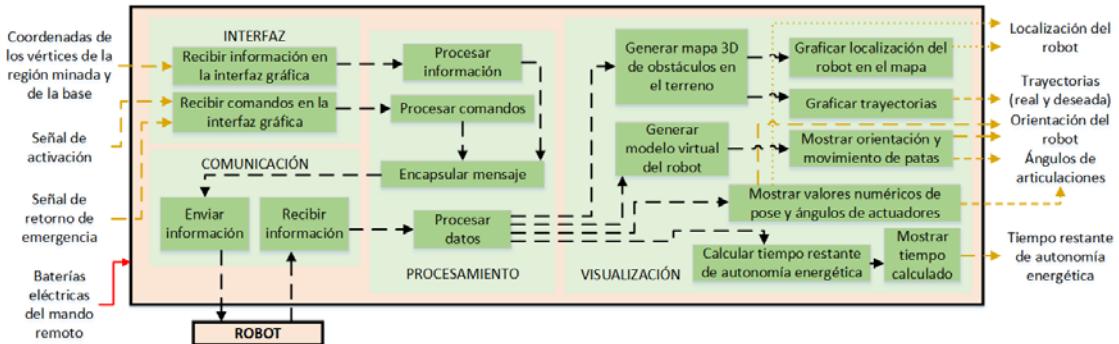


Figura 3.3: Diagrama de funciones de la base remota. Elaboración propia.

El usuario ingresa las coordenadas de los vértices de la región poligonal que delimita el área que se desea escanear, las coordenadas de la base remota, las señales de activación, y el indicador de retorno de emergencia. Con esta información, sumada a la recibida desde los sensores colocados en el robot, se puede generar un modelo virtual en el que se pueda visualizar al robot desplazándose en el terreno mapeado.

En la Figura 3.4, se muestra un modelo virtual de un robot arácnido de 4 patas. Se sugiere utilizar una representación similar, en la que se pueda ver en tiempo real: las trayectorias (tanto la que ha recorrido el robot, como la ruta segmentada deseada), la localización del robot, su orientación tridimensional, y los ángulos de sus articulaciones.



Figura 3.4: Ejemplo de una posible representación del modelo virtual del robot arácnido. Fuente: [65].

### 3.2.4. Estructura de funciones del robot

En la Figura 3.5, se muestra la estructura de funciones completa del robot, el cual se comunica inalámbricamente con la base remota. Los bloques de color celeste representan las funciones correspondientes al subsistema de detección de minas. Los demás bloques corresponden a tareas que son ejecutadas por el robot arácnido. Para una mejor visualización de las funciones del subsistema de procesamiento y control, algunas flechas que representan intercambio de información son de diferente color o longitud de guion, pero todas son flechas de líneas discontinuas.

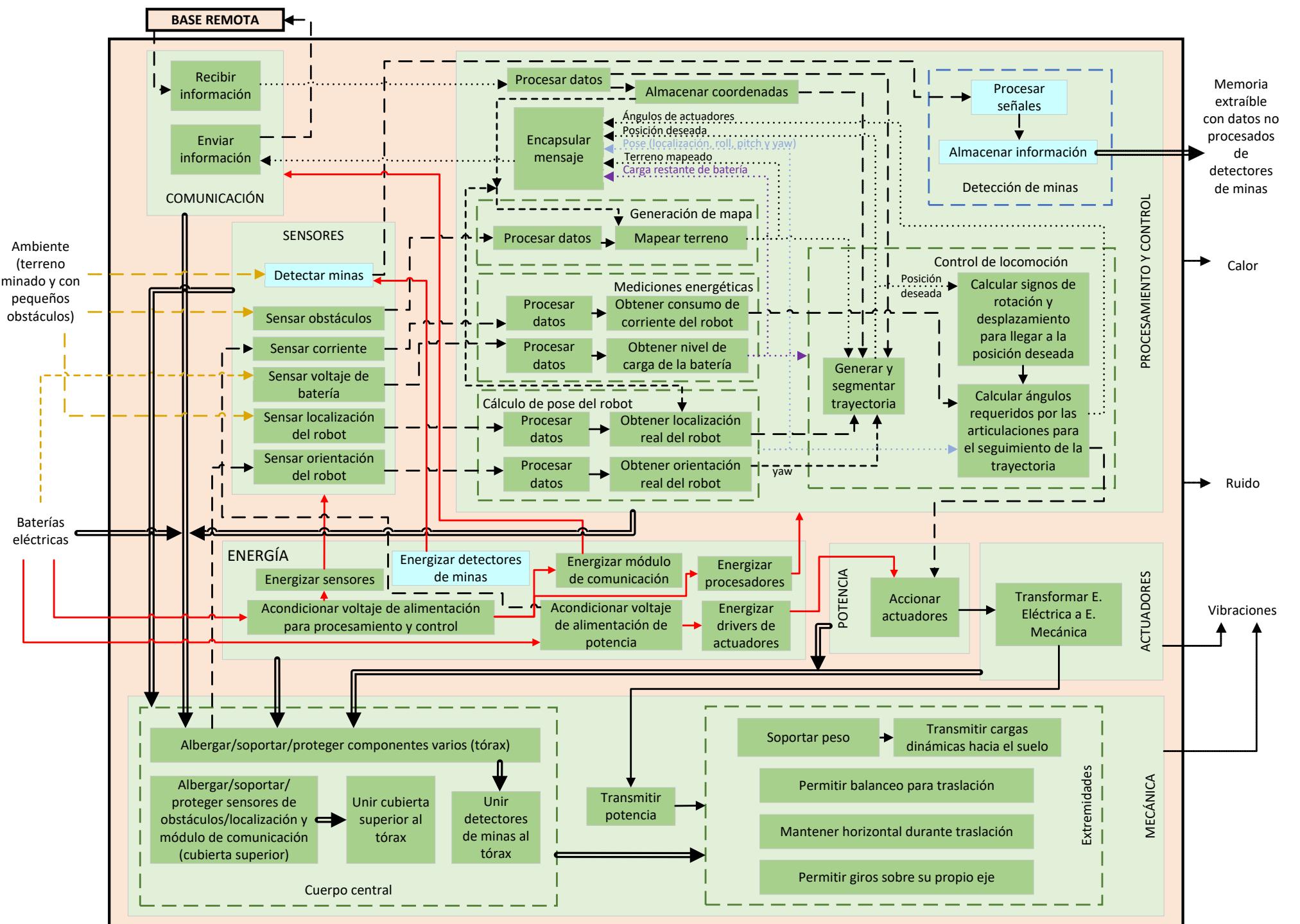


Figura 3.5: Diagrama de funciones del robot. Elaboración propia.

### 3.2.5. Descripción detallada de la estructura de funciones del robot

- Subsistema de sensores

En la Figura 3.6, se observa el diagrama de funciones del subsistema de sensores del robot. Las variables internas medidas son: corriente consumida por los actuadores, que es tomada del subsistema de energía; y orientación, que obtiene su información de la estructura mecánica. Las variables externas a ser medidas proporcionan información del ambiente; permitiendo que el robot se localice en su entorno, ejecute un mapeo del terreno, y detecte la presencia de minas antipersonales enterradas. Además, se obtiene información de las baterías eléctricas para determinar el tiempo de autonomía energética restante.

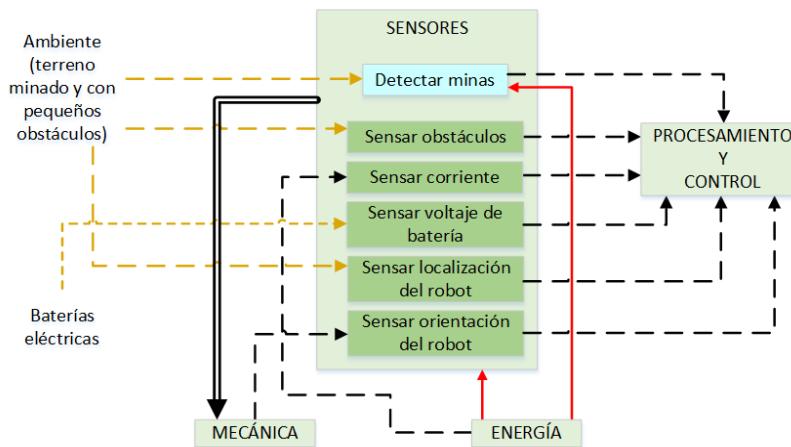


Figura 3.6: Diagrama de funciones del subsistema de sensores. Elaboración propia.

- Subsistema mecánico

En la Figura 3.7, se muestra el diagrama de funciones del subsistema mecánico. Para el diseño, se denomina *tórax* a la estructura mecánica a la cual se unen todas las patas. Además, sobre el tórax se ubica la *cubierta superior*, que contiene al sistema de sensores de obstáculos y localización, debido a que no se desea que se interrumpa su línea de visión con ningún otro componente del robot durante su movimiento. Asimismo, el *cuerpo central* es la unión del tórax con el detector de minas, la cubierta superior, y la estructura mecánica que los ensambla.



Figura 3.7: Diagrama de funciones del subsistema mecánico. Elaboración propia.

- Subsistema de energía

En la Figura 3.8 se presenta el diagrama de funciones del subsistema de energía. Se busca conseguir estabilidad de las fuentes de voltaje en los subsistemas de sensores, comunicación, procesamiento y control; frente al ruido eléctrico de los actuadores. Por ello, se tienen dos fuentes de energía: una para la parte de potencia, y otra para la etapa de control; asignándole a cada parte su correspondiente arreglo de baterías. Todas las baterías son extraíbles para su recarga, por lo que son consideradas como una entrada de materia que proporciona energía ya que son tomadas como componentes externos del robot.

Por otro lado, la fuente de energía de los detectores de minas es independiente se localiza dentro de un circuito especializado relacionado al sistema de sensado de los explosivos ya existente y que no va a ser diseñado, como se mencionó en los alcances de la tesis.

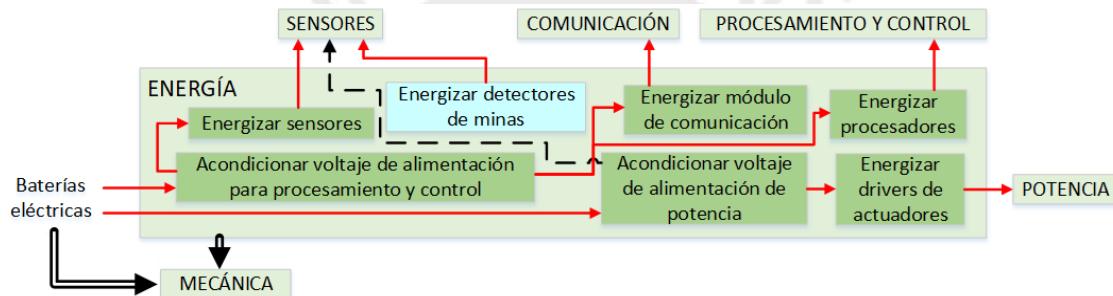


Figura 3.8: Diagrama de funciones del subsistema de energía. Elaboración propia.

- Subsistema de potencia

En la Figura 3.9, se detalla el diagrama de funciones del subsistema de potencia. Esta etapa es la encargada de conectar las señales de control con los actuadores, de manera que tengan el comportamiento deseado. Se recibe energía eléctrica de un circuito independiente, como fue mencionado previamente, y se transforma en energía eléctrica de potencia que se utiliza para excitar los actuadores.



Figura 3.9: Diagrama de funciones del subsistema de potencia. Elaboración propia.

- Subsistema de actuadores

En la Figura 3.10, se desarrolla el diagrama de funciones del subsistema de actuadores. Los actuadores reciben energía eléctrica del subsistema de potencia, y la convierten en energía mecánica, la cual es utilizada para mover la estructura del robot, permitiendo así su desplazamiento.

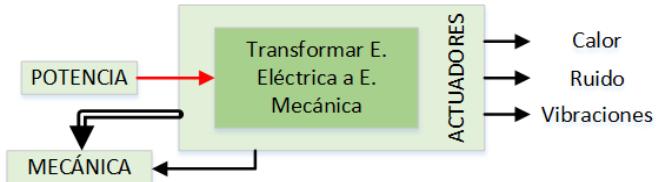


Figura 3.10: Diagrama de funciones del subsistema de actuadores. Elaboración propia.

- Subsistema de procesamiento y control

En la Figura 3.11, se tiene el diagrama de funciones del subsistema de procesamiento y control. Se observa que se divide a la navegación en sus funciones elementales (localización, mapeo del terreno mediante detección de obstáculos y generación de rutas). Además, se agrega el procedimiento de segmentación de trayectorias. De esta manera, se simplifica el control de la locomoción, haciendo que el robot se traslade siguiendo tramos rectos.

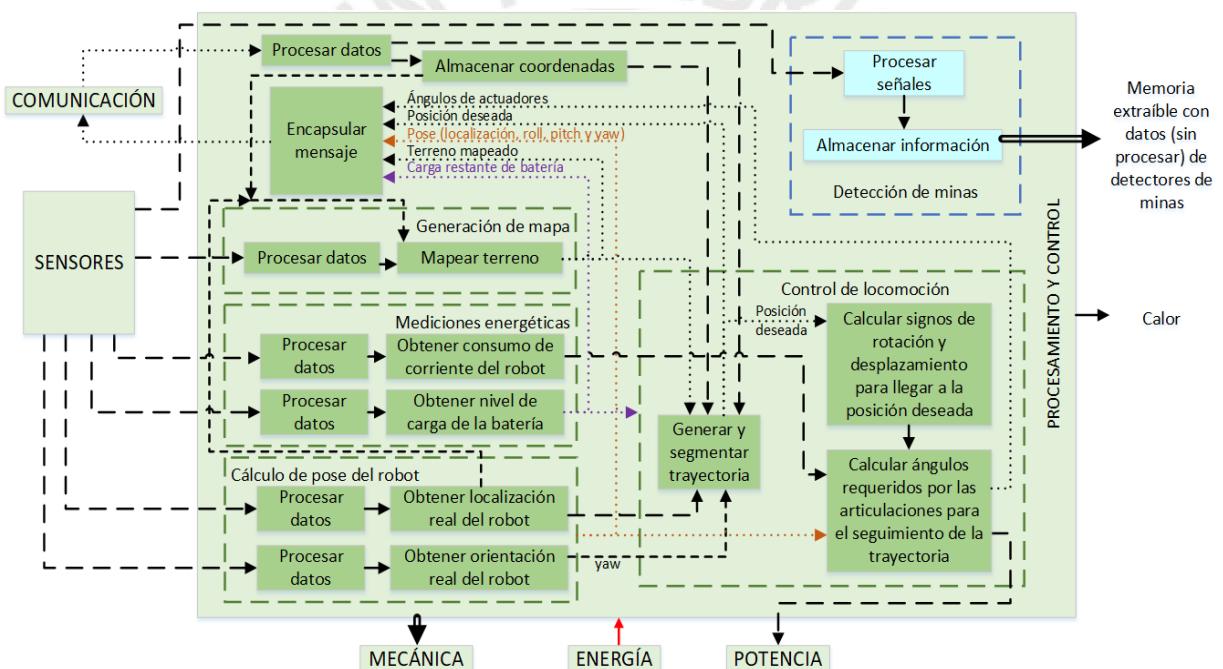


Figura 3.11: Diagrama de funciones del subsistema de procesamiento/control. Elaboración propia.

Además, se denomina *pose* [66], a la información conjunta de localización y orientación del tórax del robot. Por otra parte, considerar que para la nomenclatura de la representación de la inclinación tridimensional, se usa la *tripleta de ángulos roll-pitch-yaw* (RPY).

- Subsistema de comunicación

En la Figura 3.12, se expone el diagrama de funciones del subsistema de comunicación. Su función es permitir la comunicación inalámbrica del robot con la base remota. Se envía a dicha estación la trama de datos generada en el

subsistema de procesamiento y control. Dicha trama de datos está compuesta por: los ángulos de las articulaciones del robot; la posición deseada para el robot, es decir, la localización del extremo final del siguiente segmento de ruta al que debe dirigirse; la pose, que contiene información de la localización y la orientación tridimensional del robot (conjunto de ángulos RPY); los datos del terreno y el mapa generado; y la carga restante de la batería. Como fue mostrado en la Figura 3.3, la estación de monitoreo también presenta un subsistema de comunicación idéntico al que se observa en la Figura 3.12, completándose así la diáda de transceptores requerida para ejecutar una comunicación bidireccional.

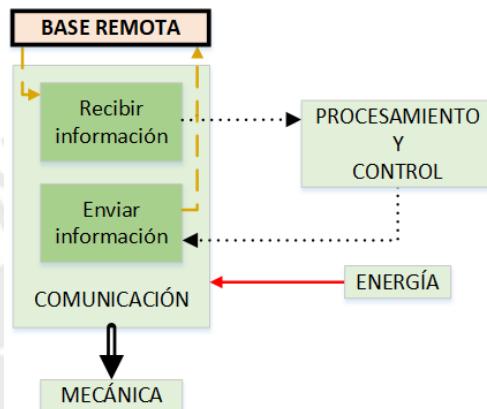


Figura 3.12: Diagrama de funciones del subsistema de comunicación. Elaboración propia.

### 3.3. Matrices morfológicas del robot

En las siguientes subsecciones se presentan las matrices morfológicas del robot. Cada una de ellas contiene componentes que realizan cada una de las funciones requeridas por el robot, de acuerdo a la estructura de funciones detallada en la sección anterior. En el Anexo B, se adjuntan las matrices morfológicas completas, que incluyen todas las figuras de los portadores de solución.

No es parte del alcance de la tesis ejecutar el diseño ni proponer portadores de solución para el desarrollo de la base remota de comunicación con el robot.

En cada una de las matrices morfológicas se realiza una combinación de diversos componentes compatibles entre sí, de manera que se puedan ejecutar todas las funciones del robot. De esta manera, se generan tres conceptos de solución, que serán descritos con más profundidad en la siguiente sección.

Los tres conceptos de solución están etiquetados según la leyenda de colores mostrada en la Tabla 3.1. Estos se forman eligiendo, para cada función parcial de las matrices morfológicas, al portador de solución cuya casilla hexagonal está sombreada con el color correspondiente al concepto de solución.

Tabla 3.1: Leyenda de colores de los conceptos de solución generados en las matrices morfológicas.

Elaboración propia.

Ordinal del concepto de solución	Color
1	Rojo
2	Verde
3	Azul

### 3.3.1. Detección de minas

En la Tabla 3.2, se presenta la matriz morfológica que contiene los portadores de solución de las funciones del subsistema de detección de minas. Estos corresponden a las funciones de la Figura 3.5 cuyos bloques tienen fondo de color celeste. Se incluyen los circuitos que permiten la generación y recepción de los ecos de las ondas electromagnéticas desde y hacia el sensor de minas, así como el almacenamiento de energía. Estos procesos operan independientemente de los demás subsistemas del robot, permitiendo que el móvil cumpla la función de sistema de transporte de la carga útil, y así pueda escanear todo el terreno minado.

El sistema de detección es diseñado de manera tal que las ondas electromagnéticas que emiten no afectan a los demás componentes electrónicos del robot [43], [67]. Como se mencionó en los alcances, este parte del diseño ingenieril va más allá de los objetivos de la presente tesis, por lo que se seleccionan los portadores de solución existentes.

Tabla 3.2: Matriz morfológica del subsistema de detección de minas. Elaboración propia.

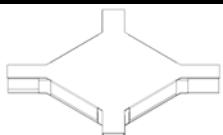
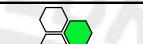
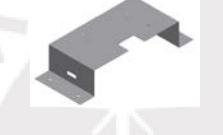
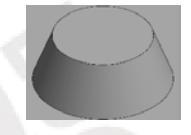
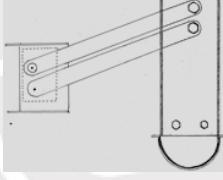
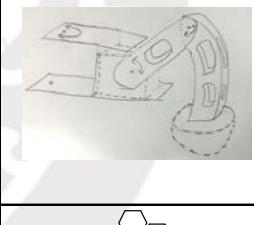
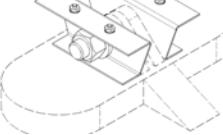
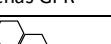
DETECCIÓN DE MINAS			
FUNCIONES PARCIALES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Sensar presencia de minas en el terreno	Detector de metales	Antena GPR	Sensor híbrido (MD con GPR)
			
Procesar señales	Circuito especializado para MD	Circuito especializado existente para antenas GPR	Circuito especializado existente para antenas híbridas
Energizar sistema de detección			
	Memoria Flash SD extraíble	Memoria Flash Micro SD extraíble	
Almacenar información			

Se elige usar en todos los conceptos de solución la mejor tecnología de detección de minas encontrada en la literatura: sensores híbridos que fusionan MD y antenas GPR. Estos sensores presentan la tasa más baja de falsos positivos, como fue mostrado en la sección 2.1.

### 3.3.2. Mecánica

En Tabla 3.3, se muestra la matriz morfológica del subsistema mecánico. La materia prima utilizada para construir el tórax de los conceptos de solución es plancha metálica de aluminio. Además, las cubiertas superiores no metálicas se fabrican mediante tecnología de manufactura digital aditiva por impresión 3D.

Tabla 3.3: Matriz morfológica del subsistema mecánico. Elaboración propia.

MECÁNICA			
FUNCIONES PARCIALES	PORTADORES DE SOLUCIÓN		
	1	2	3
Albergar / soportar / proteger componentes varios (tórax)	 Forma de estrella	 Forma octogonal	 Forma cilíndrica
			
Albergar / soportar / proteger componentes varios (cubierta superior)	 Chapa metálica doblada	 Tronco de semiesfera	 Tronco de cono
			
Extremidades	Permitir balanceo del cuerpo central para traslación		
	Mantener horizontal el cuerpo central durante traslación		
	Permitir giros sobre su propio eje		
Transmitir cargas dinámicas hacia el suelo	Embutido semiesférico de chapa metálica	 Embutido semiesférico de chapa metálica	 Esfera flexible que soporta altas presiones
			
Unir detectores de minas al tórax para formar el cuerpo central	Unión atornillada usando chapa metálica doblada	 Unión atornillada usando chapa metálica doblada	 Unión atornillada usando una estructura impresa en 3D para antenas GPR
			

### 3.3.3. Telemetría: sensores y comunicación

En la Tabla 3.4, se expone la matriz morfológica del apartado de telemetría, el cual abarca las funciones relacionadas a los subsistemas de sensado y comunicación. Para determinar la orientación, se podría usar un giroscopio mecánico, cuya rotación sería medida, por ejemplo, con un codificador rotatorio. Sin embargo, se aumenta el tamaño, peso, y complejidad. En el mercado peruano, se pueden encontrar versiones miniaturizadas de módulos para medición de orientación que utilizan tecnología de *sistemas microelectromecánicos* (MEMS, por sus siglas en inglés) con las que se consigue tener un circuito integrado que contiene varios sensores iniciales, como giroscopios, acelerómetros, y/o magnetómetros (como el sensor GY-85). Dichos sensores se agrupan en un módulo, llamado *unidad de medición inercial* (IMU, por sus siglas en inglés).

Tabla 3.4: Matriz morfológica del apartado de telemetría. Elaboración propia.

TELEMETRÍA					
FUNCIONES PARCIALES		PORTADORES DE SOLUCIÓN			
		1	2	3	4
Sensores	Sensar obstáculos	Sensor LIDAR 	Telémetro láser de distancias 	Cámaras en estéreo 	Sensor híbrido (LIDAR con cámara estéreo) 
	Sensar corriente	Sensor de Efecto Hall 	Diseño electrónico analógico usando OpAmps basado en resistencia shunt 		
	Sensar voltaje de batería	Conversor analógico a digital (ADC) 	Circuito divisor de voltaje 	Medidor de carga de baterías 	
	Sensar orientación del robot (roll y pitch)	Acelerómetro electrónico 	Giroscopio mecánico con encoder 	Acelerómetro y giroscopio electrónico 	Unidad de medición inercial de 9 ejes (IMU) 
	Sensar orientación del robot (yaw)	Magnetómetro electrónico 	Unidad de medición inercial de 9 ejes (IMU) 		
Comunicación	Comunicación bidireccional con la base remota	Tranceptor por modulación de frecuencia (FM) 	Tranceptor por modulación de amplitud (AM) 		

### 3.3.4. Eléctrica: energía, potencia y actuadores

En la Tabla 3.5, se presenta la matriz morfológica del apartado eléctrico, que engloba los componentes encargados de las funciones de los subsistemas de energía, potencia, y actuadores.

Tabla 3.5: Matriz morfológica del apartado eléctrico. Elaboración propia.

		ELÉCTRICA			
FUNCIONES PARCIALES		PORTADORES DE SOLUCIÓN			
		1	2	3	4
Energía	Acondicionar voltaje de alimentación para procesamiento y control	Circuito buckboost a 5V	Circuito elevador de voltaje a 5V	Reductor de voltaje	
	Energizar sensores	Batería de Litio Cerámico	Batería de Polímero de Litio	Batería de Ión de Litio	Batería de Níquel-Cadmio
	Energizar módulo de comunicación				
	Energizar procesadores				
	Acondicionar voltaje de alimentación de potencia	Circuito buckboost regulable	Circuito elevador de voltaje fijo	Reductor de voltaje	
Potencia					
	Energizar drivers de actuadores	Batería de Litio Cerámico	Batería de Polímero de Litio	Batería de Ión de Litio	Batería de Níquel-Cadmio
Actuadores	Accionar actuadores	Driver para servomotores	Driver para motores a pasos	Microcontrolador esclavo	Circuito analógico basado en PUT
Actuadores	Transformar E. Eléctrica a E. Mecánica	Servomotores	Motores a pasos		

### 3.3.5. Procesamiento y control

En la Tabla 3.6, se tiene la matriz morfológica del subsistema de procesamiento y control, la cual permite ver la relación entre los portadores de solución, desde la perspectiva tanto del hardware como del software.

Tabla 3.6: Matriz morfológica del subsistema de procesamiento y control. Elaboración propia.

FUNCIONES PARCIALES		PROCESAMIENTO Y CONTROL									
		PORTADORES DE SOLUCIÓN				HARDWARE					
		SOFTWARE				1		2		3	
Algoritmos	Generación de mapa 2D con obstáculos	Usando odometría visual y de las patas	Algoritmo tipo RRT	Usando obstáculos del terreno como hitos		Ordenador de placa reducida (SBC)	Microcontrolador	Módulo integrado en placa de desarrollo			
	Cálculo de localización real del robot										
	Mediciones energéticas	Lectura del registro ADC del controlador									
	Cálculo de orientación real del robot	Geometría y filtro digital en aceleraciones	Filtro digital integrador de velocidad angular	Fusión de señales con filtro digital	Filtro digital de señales del magnetómetro						
	Almacenamiento coordenadas ingresadas al robot	Memoria volátil interna	Memoria no volátil interna	Memoria no volátil externa							
	Generación de trayectorias	Algoritmo de cobertura total de un polígono cerrado	Usando obstáculos del terreno como hitos	Usando grilla del terreno							
	Comunicación con la base remota	Uso de librerías del transceptor electrónico	Programación de los registros del transceptor electrónico								
	Cálculo de ángulos requeridos de las articulaciones	Cinemática inversa	Inteligencia Artificial	Machine Learning	Algoritmo híbrido: Inteligencia Artificial Bioinspirada con Machine Learning	Ordenador de placa reducida (SBC)	Circuito integrado de aplicación específica (ASIC)	Microcontrolador	Módulo integrado en placa de desarrollo		

### 3.4. Conceptos de solución

Los conceptos de solución se generan a partir de la combinación de las alternativas propuestas en las matrices morfológicas. Estos son evaluados posteriormente con el objetivo de determinar el más óptimo para el desarrollo del proyecto.

En general, todos los conceptos de solución propuestos comparten el mismo subsistema de detección de minas, así como la estructura que permite la fijación del sensor híbrido ALIS (encontrado en: [45], [67]) en el centro y debajo del tórax de cada robot. Para una mejor visualización, dicha conexión mecánica es dibujada por separado.

En la Figura 3.13 se observa el sensor ALIS y la estructura metálica que lo une con el tórax del robot. Por simplicidad del dibujo, el tórax no es mostrado. Se tienen dos chapas metálicas dobladas, que actúan como elementos de unión ensamblados al tórax mediante dos tornillos por cada chapa. Ambas chapas se unen al sensor ALIS mediante un tornillo transversal perpendicular a las mismas.

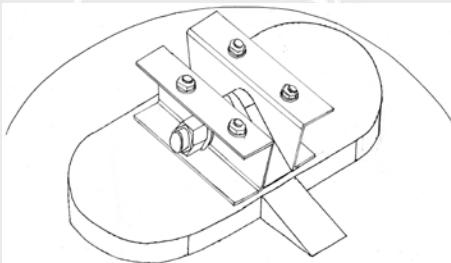


Figura 3.13: Boceto de la estructura de unión del sensor ALIS con el tórax. Elaboración propia.

Con respecto a la manufactura del tórax, se propone cortar dos chapas metálicas usando láser o agua a presión. Estas chapas, luego de ser dobladas, serán unidas entre sí usando tornillos y uniones angulares metálicas. El tórax de cada concepto de solución presenta planos de simetría, para simplificar el diseño mecánico y los algoritmos de control a utilizar.

Por otro lado, debido a que usar servomotores presenta una simplificación considerable del control de posiciones angulares de las articulaciones (ya que solo se requiere de una señal PWM por parte del controlador), se optó por usarlos en todos los conceptos de solución. Además, todas las propuestas de solución comparten el uso de un circuito que permita la comunicación bidireccional inalámbrica con la base remota utilizando *modulación de frecuencia* (FM, por sus siglas en inglés).

El algoritmo de control general de trayectorias del móvil presenta procedimientos de generación de mapa del terreno, cálculo de localización del robot, y generación de trayectoria de cobertura completa; ya que se quiere que el robot explore toda

la región poligonal delimitada por las coordenadas ingresadas. En consecuencia, los conceptos de solución presentados presentan una lógica de control que contempla un algoritmo SLAM de cobertura completa.

Todos los conceptos de solución utilizan algoritmos de navegación ya encontrados y validados en la literatura. Dichas funciones son: localización, mapeo, y generación de trayectorias. Estos algoritmos seleccionados, cuyas características son mostradas en la Tabla 3.7, se complementan con la lógica de control de articulaciones descrita en los apartados individuales de cada concepto de solución. Considerar que se conserva el etiquetado de colores mostrado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.7: Características de los algoritmos de navegación para los conceptos de solución del robot.

Elaboración propia.

Concepto de solución	Funciones del algoritmo			Sensores requeridos	Validación ejecutada en la literatura
	Cálculo de localización del robot	Generación de mapa 2D del terreno	Generación de trayectoria de cobertura completa		
Rojo	Algoritmo de descomposición en secciones (usando obstáculos del terreno como hitos)			De distancia infrarrojos omnidireccionales	Simulación e implementación física
Verde	Algoritmo de fusión de información odometría visual y de las patas	Algoritmo Hameed sobre un polígono cerrado		Cámaras estéreo, IMUS en cada eslabón de las patas	Implementación física
Azul	Algoritmo de Belter-Skrzypczynski (tipo RRT)	Algoritmo Spiral-STC		De distancia infrarrojos omnidireccionales, sensores iniciales, sensores de fuerza en los extremos de las patas	Simulación e implementación física



SLAM

### 3.4.1. Concepto de solución 1

En la Figura 3.14 se muestra una versión del robot detector de minas, la cual tiene un tórax en forma de estrella. Se propone el uso de un sensor LIDAR (acrónimo de *Laser Imaging Detection and Ranging*), de manera que se pueda determinar las ubicaciones de los obstáculos en el terreno y así aplicar el algoritmo de Wong et al. [62] para generación de trayectorias. Además, se utiliza un sensor IMU para tener información de la orientación tridimensional del robot.

Este robot tiene 8 GDL en total (2 articulaciones por cada una de sus 4 patas) y presenta dos planos de simetría, lo que simplifica considerablemente el diseño y podría usarse como ventaja para reducir el espacio búsqueda de posibles configuraciones de las articulaciones del robot. Es por ello que se elige usar un sistema de control compuesto por un algoritmo híbrido de inteligencia artificial (IA) bioinspirada y aprendizaje de máquina (ML) basado en generalización del conocimiento.

Con respecto al tórax, la chapa inferior tendrá una geometría que permita realizar dobleces en ángulo recto hacia arriba, para formar las secciones verticales del tórax que son rectas. En las patas, se usa un *mecanismo de cuatro barras* [68], cuyos eslabones están fabricados de aluminio (planchas metálicas cortadas y dobladas), fundición gris (bielas), y acero (perfil estructural cuadrado).

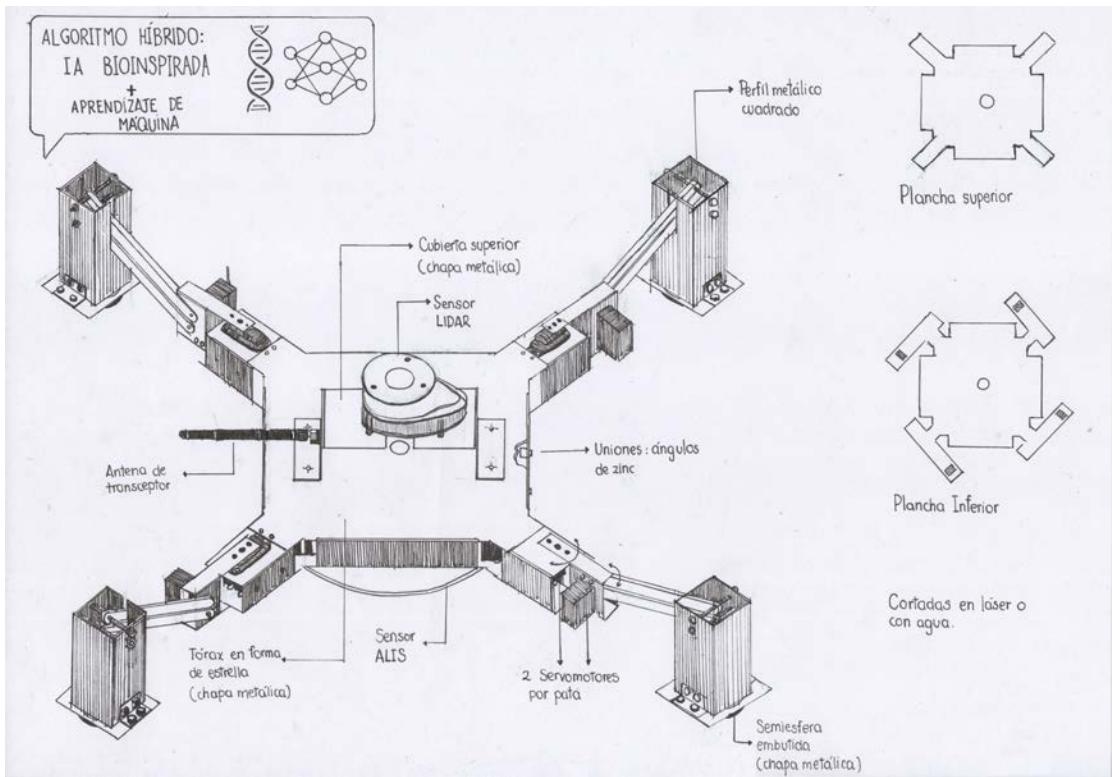


Figura 3.14: Boceto del concepto de solución 1 - Cuerpo en forma de estrella. Elaboración propia.

### 3.4.2. Concepto de solución 2

En este concepto de solución se propone utilizar un tórax octogonal, como se ve en la Figura 3.15. El robot presenta una cámara estéreo y sensores IMU en los eslabones de las patas, para poder aplicar una técnica de SLAM basada en utilizar información de odometría visual y de las extremidades del robot [59]. Se propone utilizar el algoritmo Hameed [6] para generar el algoritmo de cobertura total.

Este robot tiene 8 GDL (2 articulaciones por cada una de sus 4 patas) en total y también tiene dos planos de simetría, como el concepto 1, lo que facilita el uso de un algoritmo de ML, ya que se puede reducir el espacio de búsqueda aplicando técnicas de data augmentation. Por ejemplo, si el objetivo del entrenamiento era que el robot se desplace hacia adelante, pero en la etapa de exploración se consiguió una secuencia de acciones que lo movieron un poco hacia atrás, se puede asumir que el verdadero objetivo era ir en reversa, y haciendo un conjunto de modificaciones geométricas, se habría conseguido un grupo de pasos que generen un resultado deseado.

Se propone cortar (usando láser o agua a presión) dos chapas metálicas para construir el tórax. Al igual que en el caso anterior, la chapa inferior tendrá una geometría que permita realizar dobleces en ángulo recto hacia arriba, para formar las secciones laterales verticales del tórax. Con respecto a las patas, se propone que sean tres tipos de eslabones: el fémur, compuesto por dos pares de planchas paralelas; dos bielas metálicas; y una tibia, compuesta por dos planchas paralelas unidas por nervios y uniones angulares rectas de zinc.

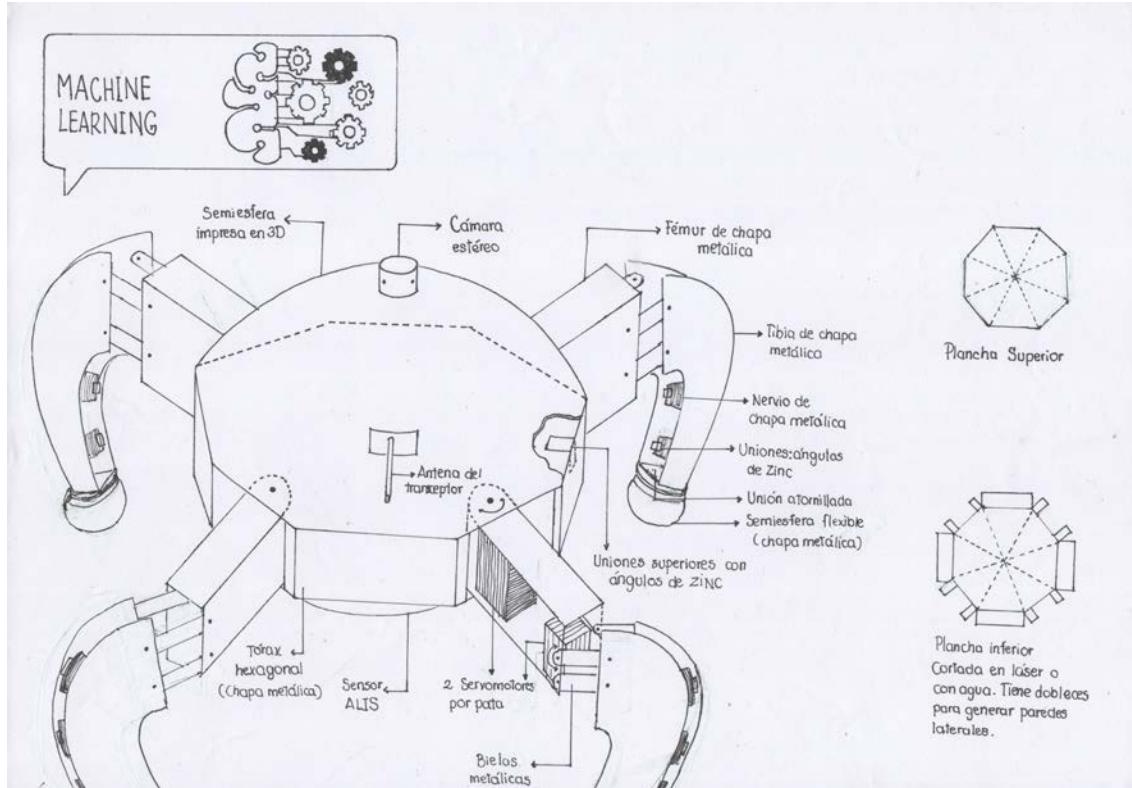


Figura 3.15: Boceto del concepto de solución 2 - Cuerpo octogonal. Elaboración propia.

### 3.4.3. Concepto de solución 3

El tercer concepto de solución tiene un tórax cilíndrico (véase la Figura 3.16). El diseño contempla el uso de sensores iniciales, sensores de fuerza en los extremos de las patas, y un sensor LIDAR. Este último es usado para detectar obstáculos y al mismo tiempo localizar al robot en un mapa, con el algoritmo Belter-Skrzypczynski [60] (que es de tipo RRT). Esta información será utilizada para generar una trayectoria usando algoritmo Spiral-STC [61] que divide al terreno en una grilla para realizar la exploración.

Este robot tiene 12 GDL en total y también tiene dos planos de simetría, como los otros conceptos de solución previamente presentados. De esta manera, en este concepto de solución se simplifican los cálculos que requieren utilizar sus algoritmos de control de articulaciones basados en cinemática inversa.

Las tapas del tórax se fabrican usando dos círculos hechos de chapas metálicas delgadas. Asimismo, las caras laterales del tórax son de chapas rectangulares de aluminio dobladas ligeramente para tener forma cilíndrica. Además, se propone que las patas sean fabricadas utilizando manufactura digital.

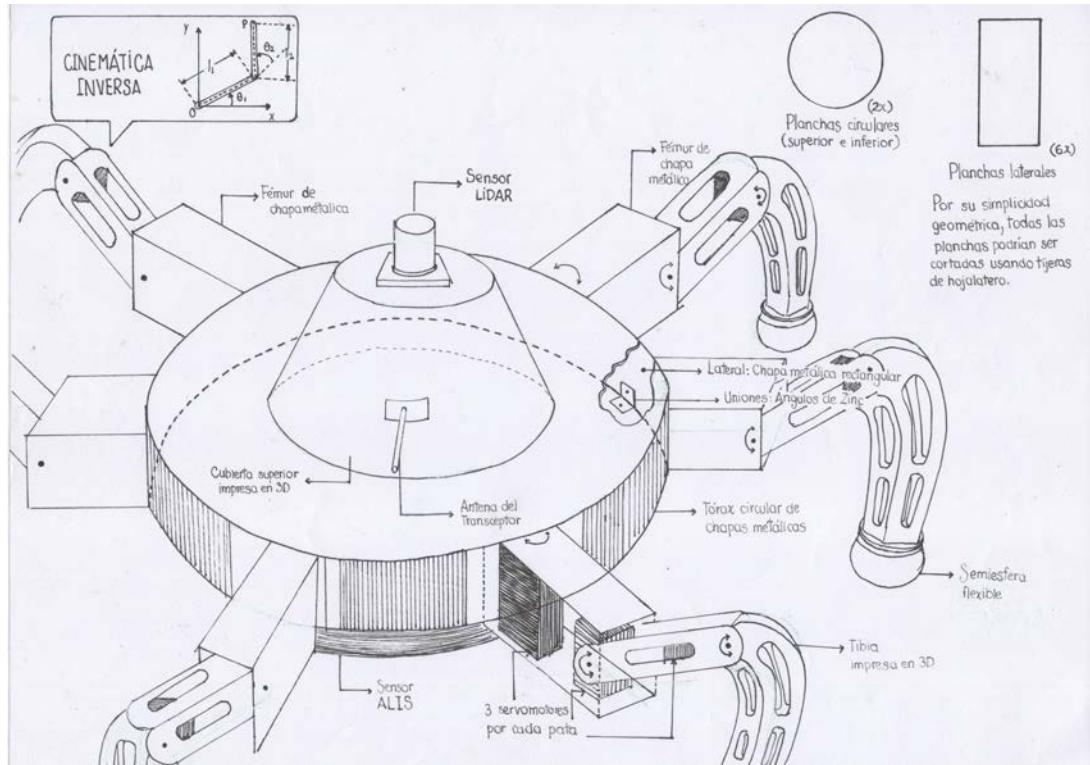


Figura 3.16: Boceto del concepto de solución 3 - Cuerpo cilíndrico. Elaboración propia.

### 3.5. Evaluación técnico-económica

De acuerdo a la norma VDI 2225, se establecen distintos criterios de diseño en la fase conceptual, evaluando aspectos técnicos y económicos de cada solución planteada. En la Tabla 3.8, se muestra la evaluación técnica de los conceptos de solución mostrados anteriormente. La Tabla 3.9 muestra la evaluación económica. Los criterios de evaluación poseen un peso diferente en la suma ponderada de acuerdo a los niveles de importancia en el sistema completo.

Tabla 3.8: Evaluación técnica de los conceptos de solución. Elaboración propia.

Soluciones		S1		S2		S3		Ideal		
Nº	Criterio de Evaluación	g	p1	g * p1	p2	g * p2	p3	g * p3	pIdeal	g * pIdeal
1	Función principal	4	4	16	4	16	4	16	4	16
2	Tamaño	4	3	12	2	8	2	8	4	16
3	Velocidad de procesamiento	2	4	8	4	8	2	4	4	8
4	Durabilidad	4	3	12	3	12	2	8	4	16
5	Simplicidad	2	3	6	4	8	2	4	4	8
6	Eficiencia Energética	1	2	2	2	2	2	2	4	4
7	Seguridad	3	4	12	3	9	3	9	4	12
<b>Total</b>				<b>68</b>		<b>63</b>		<b>51</b>		<b>80</b>
<b>Valor técnico</b>				<b>0.85</b>		<b>0.79</b>		<b>0.64</b>		<b>1</b>

p: Puntaje de 0 a 4, donde 0 = No satisface, 1 = Apenas aceptable, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal). g: Peso ponderado de acuerdo a la importancia de los criterios de evaluación.

Tabla 3.9: Evaluación económica de los conceptos de solución. Elaboración propia.

Soluciones			S1		S2		S3		Ideal	
Nº	Criterio de Evaluación	g	p1	g * p1	p2	g * p2	p3	g * p3	pIdeal	g * pIdeal
1	Bajo número de piezas	3	3	9	3	9	2	6	4	12
2	Fácil adquisición de materiales	3	3	9	2	6	3	9	4	12
3	Costo de manufactura	3	3	9	4	12	2	6	4	12
4	Costo de la tecnología	2	3	6	2	4	3	6	4	8
5	Fácil mantenimiento	3	3	9	2	6	2	6	4	12
<b>Total</b>				<b>42</b>		<b>37</b>		<b>33</b>		<b>56</b>
<b>Valor técnico</b>				<b>0.75</b>		<b>0.66</b>		<b>0.59</b>		<b>1</b>

p: Puntaje de 0 a 4, donde 0 = No satisface, 1 = Apenas aceptable, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal). g: Peso ponderado de acuerdo a la importancia de los criterios de evaluación.

En la Figura 3.13 se muestra una gráfica normalizada de los valores ponderados de la evaluación técnica, para una mejor comparación de los valores asignados a los criterios. Se realiza un análisis similar para el caso de la evaluación económica, el cual es mostrado en la Figura 3.14.

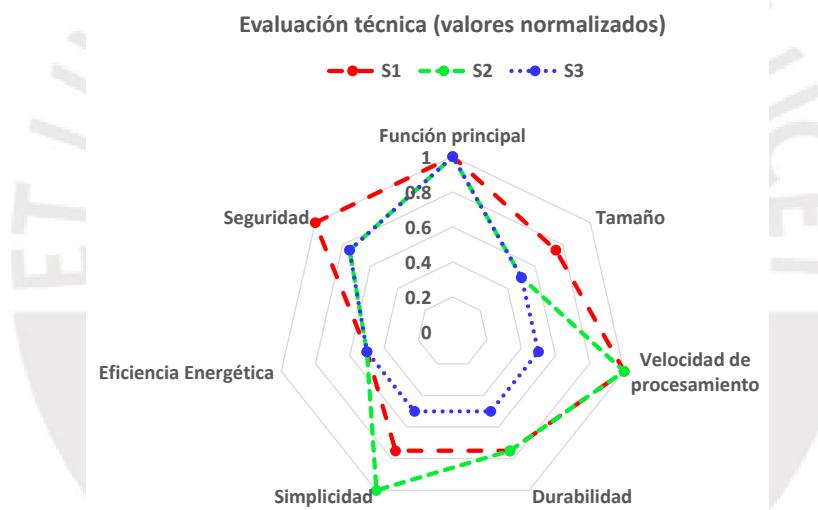


Figura 3.17: Evaluación técnica normalizada de los conceptos de solución. Elaboración propia.

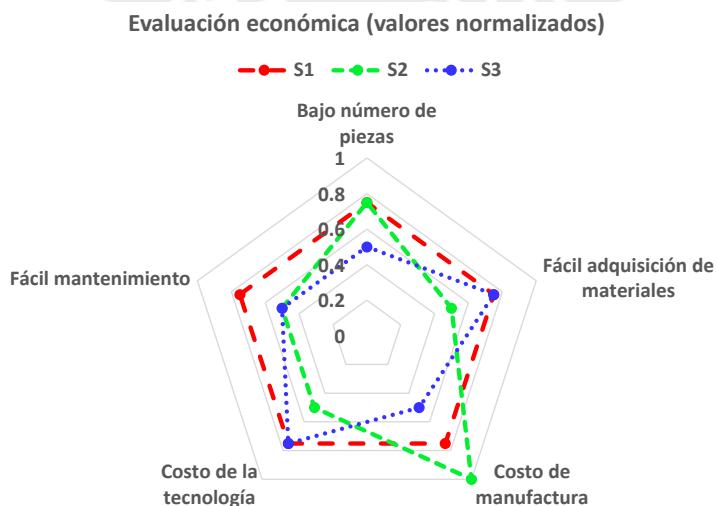


Figura 3.18: Evaluación económica normalizada de los conceptos de solución. Elaboración propia.

Con los resultados de las tablas anteriores se realiza el análisis técnico-económico que permite determinar el concepto solución óptimo. La Figura 3.19 muestra el diagrama de evaluación de las tres soluciones planteadas, comparadas con la recta de soluciones idealmente balanceadas. Se observa que el concepto de solución 1 se acerca más a la solución ideal (la cual tiene coordenada (1,1)) en comparación con las otras propuestas de solución. Además, tiene un balance razonable entre el valor económico y el técnico (por estar cerca a la recta de soluciones idealmente balanceadas). Por lo tanto, este concepto de solución va a ser tomado como base del diseño ingenieril, el cual será desarrollado en los siguientes capítulos.

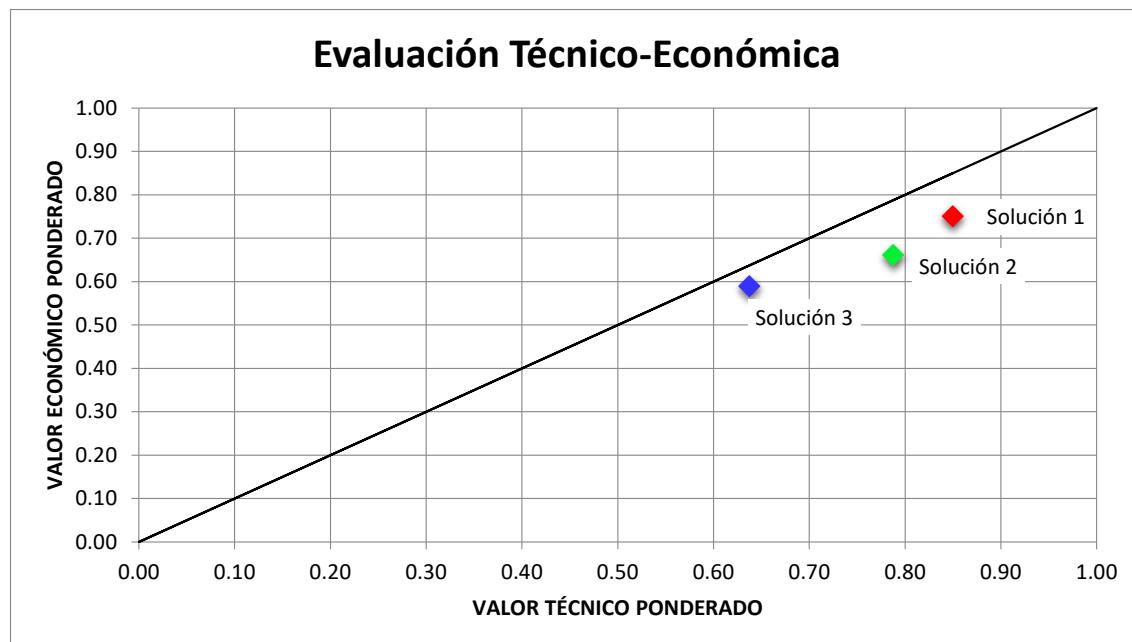


Figura 3.19: Gráfica de comparación técnico-económica de los conceptos de solución. Elaboración propia.

### 3.6. Transición del diseño conceptual al diseño ingenieril

Como fue mostrado en el presente capítulo, el diseño conceptual fue realizado agrupando las funciones del robot en cinco partes: detección de minas, mecánica, telemetría, eléctrica, y procesamiento/control. Para una descripción más detallada de las matrices morfológicas del diseño conceptual, véase el Anexo B.

En la etapa de diseño ingenieril, se considera que el robot presenta tres dominios: mecánico (que hace referencia al desarrollo del subsistema mecánico), electrónico (que abarca los apartados de telemetría y eléctrico, junto con el hardware del subsistema de procesamiento y control), y algorítmico (que desarrolla el software del subsistema de procesamiento y control).

## CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO

En este capítulo y en los dos posteriores se ejecuta el desarrollo del concepto de solución óptimo en base al análisis realizado en el capítulo anterior. El presente capítulo describe aspectos relevantes del dominio mecánico. En primer lugar, se realiza el análisis necesario para garantizar que el robot no detone las minas al posarse sobre ellas. Luego, se hace un análisis dinámico del mecanismo de las patas. Posteriormente, se hacen simulaciones para dimensionar el espesor de las planchas metálicas que se usarán en la fabricación del robot. Se finaliza esta sección enlistando los planos mecánicos. La memoria de cálculo se adjunta en el Anexo C.

### 4.1. Diseño para no sobrepasar la presión umbral de detonación de las minas antipersonales metálicas enterradas

Una característica fundamental del robot es que es capaz de posarse sobre las minas, sin activarlas. Para ello, se hacen un análisis de la masa total del robot, y luego se calcula el factor de seguridad (FS) del robot frente a explosiones.

#### 4.1.1. Cálculo de la masa total del robot

- Cálculo de la masa de los elementos metálicos

Se pueden calcular las masas de las piezas mecánicas a ser manufacturadas, con información de su volumen obtenida del software de modelamiento tridimensional. Los resultados del cálculo de dichas masas son mostrados ver en la Tabla 4.1. Se considera que la densidad de los elementos mecánicos es uniforme.

Tabla 4.1: Cálculo de las masas de los elementos mecánicos a ser manufacturados. Elaboración propia.

Ubicación en el robot	Nombre del elemento	Material	Densidad [kg/cm <sup>3</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Cantidad	Masa [g]
Tórax	Tapa Inferior	Aluminio 6061	2.70	132,560.88	1	357.91
	Tapa Superior	Aluminio 6061	2.70	86,544.15	1	233.67
	Cubierta Superior	Aluminio 6061	2.70	10,774.72	1	29.09
	Unión con sensor ALIS	Aluminio 6061	2.70	4,286.97	2	23.15
Patas	Coxa	Aluminio 6061	2.70	7,914.37	4	85.48
	Biela	Aluminio 6082	2.70	13,184.34	4	142.39
	Manivela	Aluminio 6082	2.70	13,879.56	4	149.90
	Disco de unión	Aluminio 6082	2.70	2,320.57	4	25.06
	Pie esférico	Aluminio 6061	2.70	3,732.40	4	40.31
	Pierna perfil	Aluminio 6060	2.70	46,423.41	4	501.37
MASA TOTAL DE ELEMENTOS MECÁNICOS						1,588.34

- Cálculo de las masas de los elementos de todos los subsistemas del robot

En la Tabla 4.2, se muestra el cálculo estimado de la masa total del robot. Para las masas de los elementos electrónicos, se estima un valor de 2.2 kg (esta aproximación será validada luego de realizarse la selección de componentes

electrónicos), y los valores de las masas de las piezas mecánicas se extraen de la Tabla 4.1.

Tabla 4.2: Estimación de la masa total del robot. Elaboración propia.

Elementos	Masa [g]
Componentes electrónicos (estimado)	2,200.00
Piezas mecánicas	1,588.34
Varios (tornillos, cables, entre otros)	300.00
<b>Masa Total del Robot</b>	<b>4,088.34</b>

#### 4.1.2. Factor de seguridad de explosión

En la Tabla 4.3, se verifica que la presión generada por el robot en sus puntos de contacto con el suelo no ocasiona que detone la mina, en caso se pose sobre alguna. El detalle de los cálculos se indica en el Anexo C.

Tabla 4.3: Verificación de seguridad de explosión del robot. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro del área de contacto [mm]	45.00	[mm]
Masa Máxima Admisible [g]	4,770.00	[g]
<b>Factor de Seguridad de Explosión</b>	<b>1.17</b>	-

#### 4.2. Características del mecanismo de las patas del robot

De acuerdo al concepto de solución óptima descrito en la subsección 3.4.1, el mecanismo de las patas debe tener simetría respecto al plano sagital. Además, debe estar compuesto por 4 patas con 2 GDL en cada pata (un servomotor en cada articulación). Considerar que los servomotores que unen las patas con el tórax, y que permiten que estas realicen giros sobre un eje vertical, se denominan de *tipo A*. Por otro lado, los servomotores que permiten cambiar la elevación de las patas, son llamados de *tipo B*.

Los servomotores de tipo A tienen permitido girar hasta  $75^\circ$  en cada sentido para permitir flexibilidad de giro del robot (véase la Figura 4.1). Los servomotores de tipo B serán analizados posteriormente.

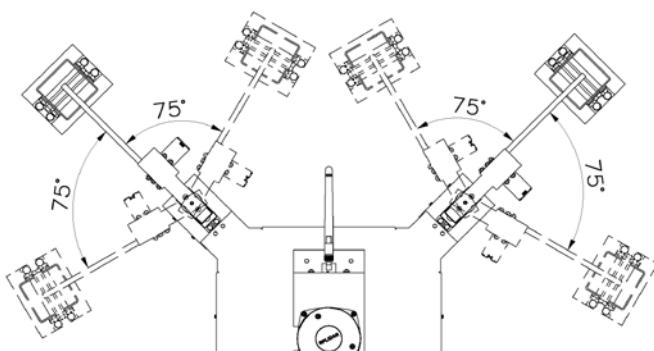


Figura 4.1: Rango de valores angulares de los servomotores de tipo A (desde una vista superior del robot).  
Elaboración propia.

Buscando simplificar el proceso de diseño mecánico, considerando que la región a escanear es un terreno semiárido de tipo II (véanse los requerimientos mecánicos, en la subsección 3.1.2), se asume que las patas siempre permanecerán verticales durante la caminata, tal como fue mencionado en los alcances de la tesis. Con respecto a las patas de robots con mecanismos similares, se ha reportado en la literatura [30], [69] que la rotación de los eslabones en contacto con el piso es despreciable al momento de subir y bajar el tórax, pero presentan un desplazamiento horizontal.

En el análisis del mecanismo de las patas, se va a calcular el torque necesario para elevar el tórax del robot usando las cuatro patas. Además, para comprobar que el robot no va a resbalar y caer durante la elevación del tórax, se va a calcular el coeficiente de fricción del robot  $\mu_{robot}$ , dividiendo el módulo de la fricción entre la fuerza normal en el punto de contacto con el suelo. Siguiendo el criterio propuesto por Roosen [70], se requiere que la fricción en los puntos de contacto no exceda a la fricción cinética  $f_k$  para conseguir estabilidad ante deslizamiento.

A continuación, se realiza el diseño del mecanismo que permite el levantamiento del cuerpo central del robot con los servomotores de tipo B, ya que esas son las articulaciones que requieren el mayor torque en sus actuadores. Con el torque calculado, se podrá realizar la selección del servomotor. Considerar que el análisis dinámico se hace relativo al robot, considerándolo fijo y que las patas se pueden subir y bajar. Al cambiar el sistema de referencia a uno que considere al eslabón 3 como fijo en tierra, lo que cambian son los signos de las aceleraciones verticales, pero no los módulos.

#### 4.2.1. Análisis cinemático del levantamiento del robot

- Relaciones cinemáticas

En la Figura 4.2, se muestra la sección de la pata del robot considerada para el análisis cinemático y cinético. También se presenta el correspondiente diagrama cinemático del mecanismo, el cual se usará para las formulaciones y cálculos.

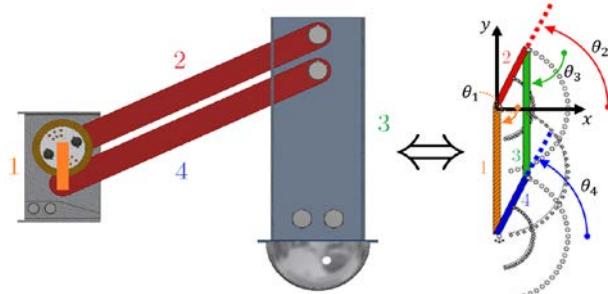


Figura 4.2: Modelamiento CAD de la sección transversal (izquierda) y diagrama cinemático del mecanismo de levantamiento de las patas del robot (derecha). Elaboración propia.

Se procede a realizar el análisis cinemático del mecanismo mostrado en la Figura 4.2. Considerar que los eslabones son los segmentos que unen las articulaciones de las piezas del mecanismo, cuyas longitudes se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Longitudes de los eslabones del mecanismo de las patas del robot.

Elaboración propia.

Símbolo	Eslabón	Longitud [m]
<i>a</i>	1	0.020
<i>b</i>	2	0.150
<i>c</i>	3	0.020
<i>d</i>	4	0.150

Considerando las cuatro patas en conjunto, se puede cambiar la altura del cuerpo central al realizarse el giro del eslabón 2, como consecuencia de la rotación de los ejes de los servomotores de tipo B. El mecanismo genera también un giro del eslabón 4. Para tener estabilidad durante la caminata, se diseña el mecanismo para que el eslabón 3 presente únicamente traslación durante su movimiento, pero no rotación; lo cual será verificado más adelante en esta sección del documento.

Se calcula la cantidad de GDL del mecanismo, según la Fórmula de Grübler [71]:

$$G = 3 (W - 1) - 2 p_1 - p_2, \quad (4.1)$$

donde:

- $W$  es la cantidad de eslabones del mecanismo.
- $p_1$  es la cantidad de pares cinemáticos de primer grado.
- $p_2$  es la cantidad de pares cinemáticos de segundo grado.

Considerando que el mecanismo tiene cuatro eslabones, que forman cuatro pares cinemáticos de primer grado (pares de rotación), y ningún par cinemático de segundo grado; se tiene que:

$$G = 3 (4 - 1) - 2 (4) - 0 \Rightarrow G = 1, \quad (4.2)$$

por lo que el sistema tiene un único grado de libertad.

Según Mata et al. [68], este mecanismo se denomina *mecanismo de cuatro eslabones*. Para clasificarlo, se aplica el criterio de Grashof [68]:

$$S + L \leq P + Q, \quad (4.3)$$

donde:

- $S$  es la longitud de la barra más corta.
- $L$  es la longitud de la barra más larga.
- $P$  y  $Q$  son las longitudes de las dos barras restantes.

Al reemplazar los valores, se cumple la condición para ser un *mecanismo Grashof*. Físicamente, esto indica que al menos uno de los eslabones puede girar una revolución completa [68], [72]. Considerando este resultado, junto con las longitudes de los eslabones de la cadena cinemática (véase la Tabla 4.4), se la puede clasificar como un mecanismo de cuatro eslabones *en configuración abierta*.

Entonces, se pueden despejar los valores de los ángulos de los eslabones 3 y 4, en función del único grado de libertad  $\theta_2$ . Considerando que es un mecanismo Grashof de cuatro eslabones en configuración abierta, Hirschhorn indica que se deben tomar las soluciones negativas de las ecuaciones cuadráticas resultantes del análisis geométrico. Resolviendo [72], se tienen los ángulos de los eslabones 3 y 4:

$$\theta_4 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 A C}}{2 A} \right) \Leftrightarrow \theta_4 = \theta_4(a, b, c, d, \theta_2) , \quad (4.4)$$

$$\theta_3 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-E - \sqrt{E^2 - 4 D F}}{2 D} \right) \Leftrightarrow \theta_3 = \theta_3(a, b, c, d, \theta_2) . \quad (4.5)$$

En dichas relaciones, considerar que:

- $k_1 = \frac{d}{a}$  (4.6)

- $k_2 = \frac{d}{c}$  (4.7)

- $k_3 = \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2 a c}$  (4.8)

- $k_4 = \frac{d}{b}$  (4.9)

- $k_5 = \frac{c^2 - d^2 - a^2 - b^2}{2 a b}$  (4.10)

- $A = \cos \theta_2 - k_1 - k_2 \cos \theta_2 + k_3$  (4.11)

- $B = -2 \sin \theta_2$  (4.12)

- $C = k_1 - (k_2 + 1) \cos \theta_2 + k_3$  (4.13)

- $D = \cos \theta_2 - k_1 + k_4 \cos \theta_2 + k_5$  (4.14)

- $E = B$  (4.15)

- $F = k_1 + (k_4 - 1) \cos \theta_2 + k_5$  (4.16)

Se continúa con el análisis para hallar las velocidades angulares de los eslabones 3 y 4 ( $\omega_3$  y  $\omega_4$ , respectivamente). Despejando [68], resulta:

$$\omega_4 = \frac{a \omega_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)}{c \sin(\theta_4 - \theta_3)} , \quad (4.17) \quad \omega_3 = \frac{a \omega_2 \sin(\theta_4 - \theta_2)}{b \sin(\theta_3 - \theta_4)} . \quad (4.18)$$

Asimismo, se hace el cálculo de las aceleraciones angulares de los eslabones [68]:

$$\alpha_4 = \frac{C E - B F}{A E - B D} , \quad (4.19) \quad \alpha_3 = \frac{C D - E F}{A E - B D} . \quad (4.20)$$

Se definen los siguientes parámetros para dichas expresiones:

- $A = c \sin \theta_4$  (4.21)

- $B = b \sin \theta_3$  (4.22)

- $C = a \alpha_2 \sin \theta_2 + a \omega_2^2 \cos \theta_2 + b \omega_3^2 \cos \theta_3 - c \omega_4^2 \cos \theta_4$  (4.23)

- $D = c \cos \theta_4$  (4.24)

- $E = b \cos \theta_3$  (4.25)

- $F = a \alpha_2 \cos \theta_2 - a \omega_2^2 \sin \theta_2 - b \omega_3^2 \sin \theta_3 + c \omega_4^2 \sin \theta_4$  (4.26)

Por conveniencia matemática, se considera que el eje de las ordenadas tiene como vector unitario al número complejo imaginario  $j$ .

La formulación matemática planteada es válida para el caso general de la geometría de los eslabones mostrado en la Figura 4.3. Sin embargo, por simplicidad de diseño, se modelan los eslabones como barras delgadas. De esta manera, el ángulo  $\beta_i$  para cada eslabón  $i$  queda definido con un valor de cero. Además, los ángulos  $\theta_i$  se miden positivamente en sentido antihorario, partiendo desde su respectiva línea de referencia horizontal. Considerar que los centroides de cada eslabón se representan con  $G_i$ .

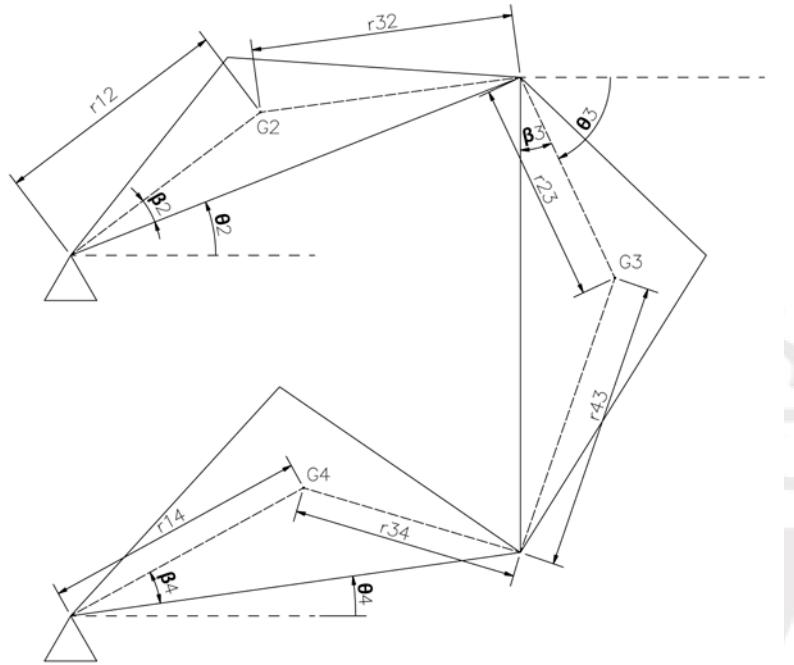


Figura 4.3: Relaciones geométricas presentes en el mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.

Partiendo de las relaciones demostradas por Mata et al. [68] y Hirschhorn [72], se calculan las aceleraciones lineales de los centros de masa, para los eslabones del mecanismo de cuatro barras presente en el robot (considerando las relaciones geométricas mostradas en la Figura 4.3):

$$\vec{a}_{G_2} = r_{12}[-\alpha_2 \sin(\theta_2 + \beta_2) - \omega_2^2 \cos(\theta_2 + \beta_2)] + j r_{12}[\alpha_2 \cos(\theta_2 + \beta_2) - \omega_2^2 \sin(\theta_2 + \beta_2)]. \quad (4.27)$$

Considerando la aceleración del centroide del eslabón 3 ( $G_3$ ) como una aceleración relativa al polo  $O_{32}$  (que se ubica en la articulación que une los eslabones 2 y 3), se tiene:

$$\vec{a}_{O_{32}} = -a [\alpha_2 \sin \theta_2 + \omega_2^2 \cos \theta_2 + j[-\alpha_2 \cos \theta_2 + \omega_2^2 \sin \theta_2]], \quad (4.28)$$

$$\vec{a}_{G_3/O_{32}} = r_{23}[-\alpha_3 \sin(\theta_3 + \beta_3) - \omega_3^2 \cos(\theta_3 + \beta_3) + j [\alpha_3 \cos(\theta_3 + \beta_3) - \omega_3^2 \sin(\theta_3 + \beta_3)]], \quad (4.29)$$

$$\Rightarrow \vec{a}_{G_3} = \vec{a}_{O_{32}} + \vec{a}_{G_3/O_{32}}. \quad (4.30)$$

Procediendo análogamente al cálculo de  $\vec{a}_{G_2}$ , se tiene que:

$$\vec{a}_{G_4} = r_{14}[-\alpha_4 \sin(\theta_4 + \beta_4) - \omega_4^2 \cos(\theta_4 + \beta_4)] + j r_{14}[\alpha_4 \cos(\theta_4 + \beta_4) - \omega_4^2 \sin(\theta_4 + \beta_4)]. \quad (4.31)$$

Como fue mostrado, se despejaron las velocidades y aceleraciones angulares de los dos eslabones restantes 3 y 4, en función de parámetros relacionados al eslabón 2. Este eslabón controla el único GDL del mecanismo, por lo que su cinemática es conocida. Notar que el eslabón 1 permanece fijo en todo momento respecto al plano del mecanismo de cuatro barras de la pata, con lo que se conocen sus variables cinemáticas, tanto lineales como angulares (en esencia, se tiene que sus velocidades y aceleraciones, tanto angulares como lineales, son nulas).

De esta manera, se tienen calculadas las aceleraciones de los centroides de los eslabones, con lo que se tiene resuelta la cinemática del mecanismo.

- **Simulación cinemática del mecanismo de cuatro eslabones**

Se requiere que las patas del sistema se mantengan lo más verticales posibles, para mejorar la estabilidad durante la caminata. Esto quiere decir que el eslabón 3 debe permanecer vertical, ya que es el que está unido a los pies del robot. Las dimensiones del mecanismo de cuatro barras elegido (véase la Tabla 4.4), permiten cumplir este requerimiento, lo cual se verifica usando una simulación cinemática. Se emplea el simulador de movimiento en dos dimensiones llamado Working Model 2D v6.0 (de “Addlink Software Científico Ltd.”).

Una metodología usual utilizada para el análisis cinemático de mecanismos consiste en asumir una trayectoria arbitraria deseada, y luego calcular las cargas necesarias para generarla [73]. En la Figura 4.4, se comprueba que ante una entrada escalón en la velocidad angular del eslabón 2, la velocidad angular del eslabón 3, permanece nula en todo instante de tiempo, ya que dicho eslabón permanece vertical. Gráficamente, este resultado puede ser observado en la Figura 4.2 siguiendo las trayectorias que recorren los extremos dicho eslabón.

El tiempo de simulación fue de 2.5 segundos, ante una entrada escalón de velocidad angular unitaria en el eslabón 2. El ángulo inicialmente es  $\theta_2 = -80^\circ$  y su valor final llega a  $\theta_2 \approx 65^\circ$ . Este es el rango de ángulos permitidos para los servomotores de tipo B. Se observa en la Figura 4.4 que, efectivamente, la velocidad angular del eslabón 3 es nula y constante.

Velocidad angular del eslabón 2 (Entrada: Escalón unitario)



Velocidad angular del eslabón 3 (Salida: Giro despreciable)

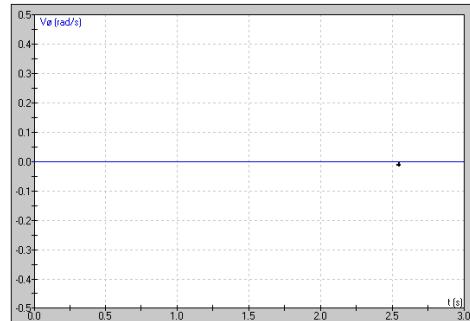


Figura 4.4: Simulación cinemática del mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.

#### 4.2.2. Análisis dinámico del levantamiento del robot

- Diagramas de cuerpo libre

En la Figura 4.5, se presenta el diagrama de cuerpo libre (DCL) de los eslabones 2, 3 y 4 de dos patas no contiguas del robot (etiquetadas como A y C), desde una perspectiva que permita su análisis dinámico como movimiento plano, para así obtener las ecuaciones de movimiento del mecanismo.

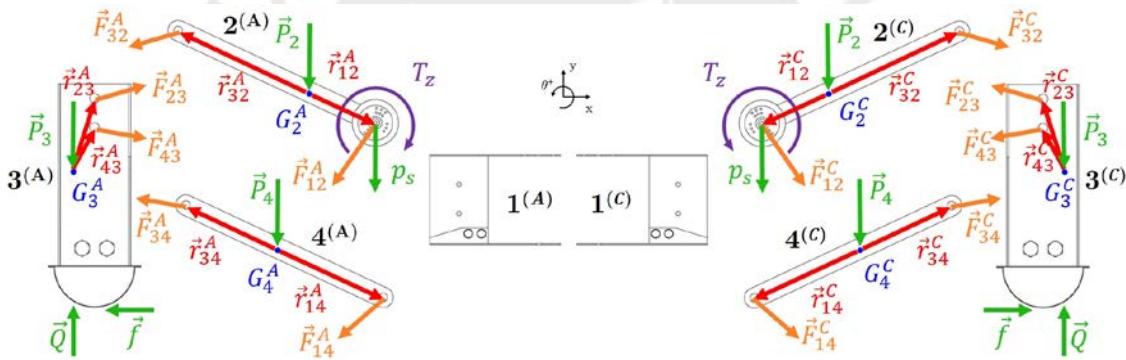


Figura 4.5: Diagramas de cuerpo libre de los elementos que componen dos patas no contiguas del robot: pata A en la izquierda y pata C en la derecha. Elaboración propia.

En los DCL, se usa la simbología mostrada en la Tabla 4.5. La línea de acción de la reacción vertical del piso contiene al centro de masa  $G_3$  del eslabón 3. Notar que el centro de masa  $G_3$  divide simétricamente al eslabón 3, pero en la Figura 4.5 fue colocado a un lado para no sobrecargar la figura. El tórax del robot no es mostrado por completo, solamente se coloca la representación de los eslabones 1 para cada pata (A y C). Además, considerar en las formulaciones la simetría respecto al eje Y mostrado. Por otro lado, el vector  $\vec{r}_{P_i}$  es un vector nulo para todos los eslabones, debido a que la fuerza externa  $\vec{P}_i$  es el peso de cada eslabón.

En el cálculo del torque, se considera que el cuerpo central del robot tiene  $3.14 \text{ kg}$  de masa (considerando los elementos mecánicos del tórax de la Tabla 4.1 y la estimación de la masa de los componentes electrónicos de la Tabla 4.2), y se estima que los servomotores tienen  $50 \text{ g}$  de masa, generando un peso  $p_s$ .

Tabla 4.5: Variables usadas en el análisis dinámico del mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.

Símbolo	Magnitud física
$\vec{F}_{ij}$	Reacción del eslabón $i$ sobre el eslabón $j$ .
$\vec{r}_{ij}$	Posición de la fuerza $\vec{F}_{ij}$ respecto del centroide $G_i$ del eslabón $i$ .
$\vec{P}_i$	Peso $\vec{P}_i$ del eslabón $i$ .
$\vec{r}_{P_i}$	Posición de la fuerza $\vec{P}_i$ respecto del centroide $G_i$ del eslabón $i$ .
$Q = W_C/4$	Fracción del módulo del peso estimado del cuerpo central del robot ( $W_C$ ) que soporta cada una de las cuatro patas.
$\lambda$	Distancia entre el centro de masa del eslabón 3 y el punto de contacto.
$\vec{f}$	Fricción en los puntos de contacto del suelo (en cada pata del robot).
$\vec{T}_z$	Torque requerido para controlar el movimiento del único grado de libertad de la cadena cinemática presente en cada pata del robot.

- Ecuaciones de movimiento

Se aplica el principio de D'Alembert [74] para el análisis dinámico del mecanismo de la Figura 4.5, considerando que los cuerpos son sistemas rígidos de partículas. Para calcular las inercias de los eslabones de cadenas cinemáticas presentes en este tipo de robots, se suele asumir que toda la masa de cada elemento se concentra sobre su respectivo centro de masa [73]. De esta manera, se obtienen las ecuaciones de movimiento para los eslabones de la pata C:

Eslabón 2 en la pata C:

$$\Sigma F_x: \quad F_{12_x} + F_{32_x} + P_{2_x} = m_2 a_{G_{2_x}}, \quad (4.32)$$

$$\Sigma F_y: \quad F_{12_y} + F_{32_y} + P_{2_y} - p_s = m_2 a_{G_{2_y}}, \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \tau: \quad T_z + p_s r_{12_x} + (r_{12_x} F_{12_y} - r_{12_y} F_{12_x}) + (r_{32_x} F_{32_y} - r_{32_y} F_{32_x}) + (r_{P_{2_x}} P_{2_y} \\ - r_{P_{2_y}} P_{2_x}) = I_{G_2} \alpha_2. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Eslabón 3 en la pata C:

$$\Sigma F_x: \quad F_{23_x} + F_{43_x} + P_{3_x} + f = m_3 a_{G_{3_x}}, \quad (4.35)$$

$$\Sigma F_y: \quad F_{23_y} + F_{43_y} + P_{3_y} + Q = m_3 a_{G_{3_y}}, \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \tau: \quad (r_{23_x} F_{23_y} - r_{23_y} F_{23_x}) + (r_{43_x} F_{43_y} - r_{43_y} F_{43_x}) + (r_{P_{3_x}} P_{3_y} - r_{P_{3_y}} P_{3_x}) \\ + f \lambda = I_{G_3} \alpha_3. \end{aligned} \quad (4.37)$$

Eslabón 4 en pata C:

$$\Sigma F_x: \quad F_{14_x} + F_{34_x} + P_{4_x} = m_4 a_{G_{4_x}}, \quad (4.38)$$

$$\Sigma F_y: \quad F_{14_y} + F_{34_y} + P_{4_y} = m_4 a_{G_{4_y}}, \quad (4.39)$$

$$\Sigma\tau: \quad \left( r_{14_x} F_{14_y} - r_{14_y} F_{14_x} \right) + \left( r_{34_x} F_{34_y} - r_{34_y} F_{34_x} \right) + \left( r_{P4_x} P_{4_y} - r_{P4_y} P_{4_x} \right) = I_{G_4} \alpha_4. \quad (4.40)$$

Considerar que las componentes de los vectores  $\vec{r}_{ij}$  tienen signo, variando según el valor del ángulo  $\theta_2$ . Además, notar que los valores  $P_{4_y}$  tienen signo negativo. Ordenando las variables, se forma para la pata C un sistema lineal de 9 ecuaciones y 10 incógnitas, el cual se muestra en su representación matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r_{12_y} & +r_{12_x} & -r_{32_y} & +r_{32_x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +r_{23_y} & -r_{23_x} & -r_{43_y} & +r_{43_x} & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +r_{34_y} & -r_{34_x} & -r_{14_y} & -r_{14_x} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{12_x} \\ F_{12_y} \\ F_{32_x} \\ F_{32_y} \\ F_{43_x} \\ F_{43_y} \\ F_{14_x} \\ F_{14_y} \\ T_z \\ f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m_2 a_{G_2_x} - P_{2_x} \\ m_2 a_{G_2_y} - P_{2_y} + p_s \\ I_{G_2} \alpha_2 - r_{P2_x} P_{2_y} + r_{P2_y} P_{2_x} - p_s r_{12_x} \\ m_3 a_{G_3_x} - P_{3_x} \\ m_3 a_{G_3_y} - P_{3_y} - Q \\ I_{G_3} \alpha_3 - r_{P3_x} P_{3_y} + r_{P3_y} P_{3_x} \\ m_4 a_{G_4_x} - P_{4_x} \\ m_4 a_{G_4_y} - P_{4_y} \\ I_{G_4} \alpha_4 - r_{P4_x} P_{4_y} + r_{P4_y} P_{4_x} \end{bmatrix}. \quad (4.41)$$

Se realiza un análisis análogo con la pata A, y se obtienen 9 ecuaciones más (3 por cada eslabón) y 8 incógnitas más (correspondientes a las fuerzas internas de cada pata). Con esta información, se construye una simulación de la dinámica de los eslabones del mecanismo. Notar que las fuerzas que interactúan en las dos patas restantes están en un plano ortogonal al plano XY de la Figura 4.5, por lo que no afectan la dinámica analizada. La formulación completa se muestra en el Anexo C, y los valores de las variables presentadas en las ecuaciones se encuentran en el Anexo D. Se emplean herramientas del entorno Simulink 8.7, incluidas en el software MATLAB R2016a (marca con derechos reservados por "The MathWorks, Inc."). Se resuelve el sistema de ecuaciones completo, durante cada instante de la simulación, de manera que se conozcan las reacciones internas del mecanismo, la fricción, y el torque de entrada  $T_z$ , para todo instante de tiempo.

Se realiza una simulación de la dinámica de la cadena cinemática de la pata C, considerando que las cuatro patas del robot se mueven de la misma manera: una entrada escalón de aceleración angular igual a  $-\pi/18 \text{ rad/s}^2$  durante 2 segundos, para lograr que  $\theta_2$  vaya de  $+10^\circ$  a  $-10^\circ$ , lo que hace que el tórax del robot se eleve (véase el mecanismo de la Figura 4.2). Además, se considera una velocidad angular  $w_2$  inicial nula. El diagrama de bloques de la simulación se muestra en la Figura 4.6. Los bloques que corresponden a funciones personalizadas, contienen las ecuaciones matemáticas que describen la dinámica previamente desarrollada. Los códigos de programación correspondientes se encuentran en el Anexo D.

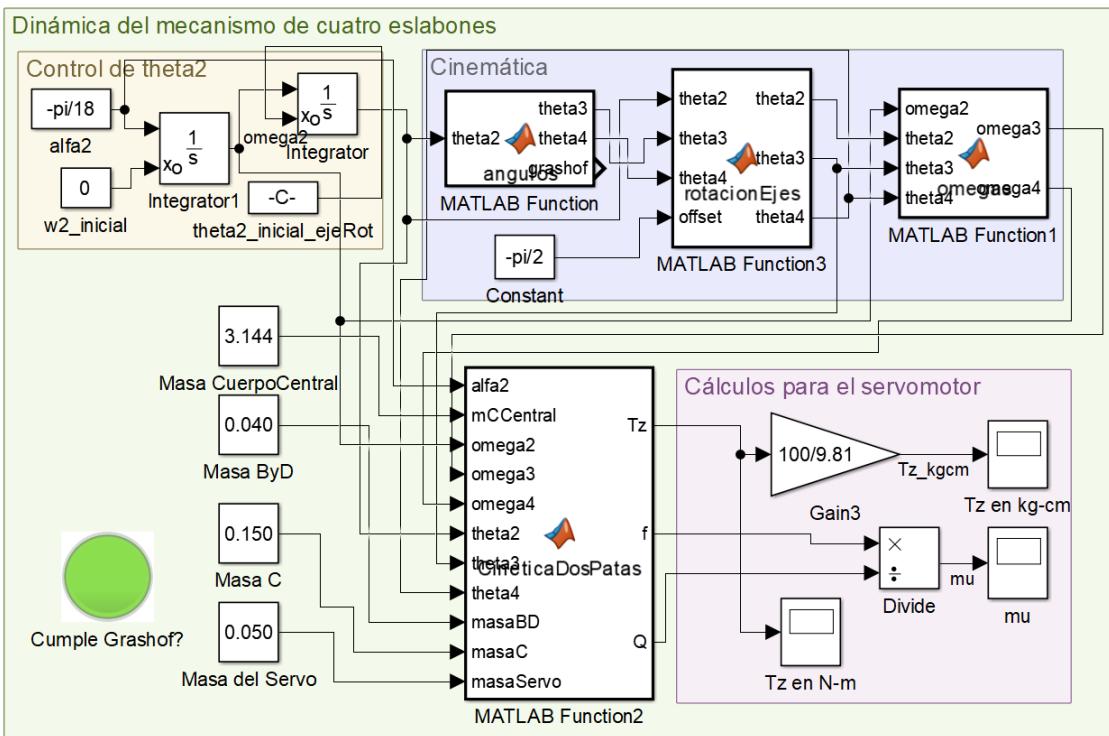


Figura 4.6: Simulación de la dinámica del mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia

#### • Cálculo de la fricción

Con el diagrama de bloques de la Figura 4.6 se puede calcular el coeficiente de fricción del robot  $\mu_{robot}$  en la pata C. Como se mencionó, de acuerdo al criterio de estabilidad de Roosen, se requiere que no se exceda el coeficiente de fricción cinético. Se encontró en la literatura que el coeficiente de fricción para una pata de aluminio contra un suelo granular es de 0.40 [75]. Se encontraron también distintos valores de fricción de patas robóticas de aluminio con otros suelos [76], [77], pero ninguno menor que 0.1. Debido a que el coeficiente de fricción máximo obtenido en la simulación es de 0.012 (véase la Figura 4.7), se comprueba la estabilidad del robot en el caso crítico de levantar y bajar el tórax.

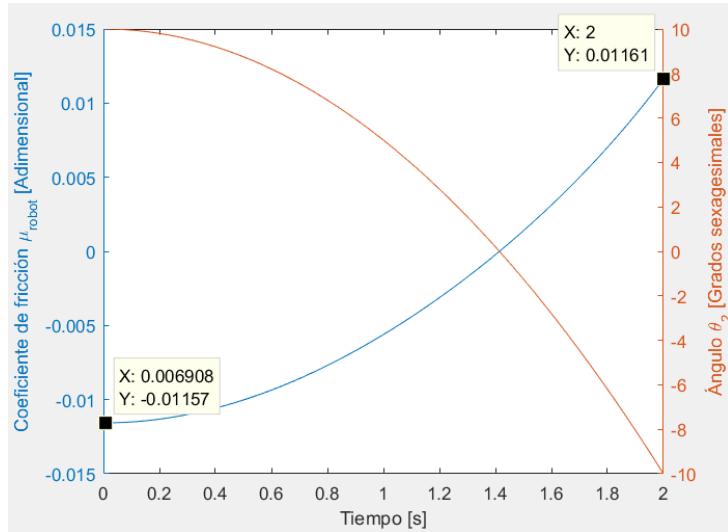


Figura 4.7: Variación del coeficiente de fricción  $\mu_{robot}$  y el ángulo  $\theta_2$  en la simulación. Elaboración propia.

Por otro lado, se observa en la Figura 4.7 que cuando el ángulo  $\theta_2$  (inicialmente positivo) va acercándose a 0, es decir, cuando la pata del robot se aleja del tórax; la fricción adquiere un valor negativo (como consecuencia de que el coeficiente  $\mu_{robot}$  sea menor a cero). Esto tiene sentido físicamente, ya que cuando la pata se aleja del tórax la fricción debe apuntar en el sentido contrario al mostrado en el DCL de la Figura 4.5 (es decir, en realidad apunta hacia el centro del robot).

- Cálculo de torque de servomotores

Usando el diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.6, se calcula el torque de entrada requerido por el mecanismo para el transcurso de tiempo definido en la simulación. En la Figura 4.8, se muestra dicha variación del torque de entrada en el tiempo. Se observa que el máximo valor del módulo de torque requerido es de  $4.176 \text{ kgf-cm}$ , que equivale a  $0.409 \text{ N-m}$  (ya que  $100 \text{ kgf-cm} = 9.81 \text{ N-m}$ ).

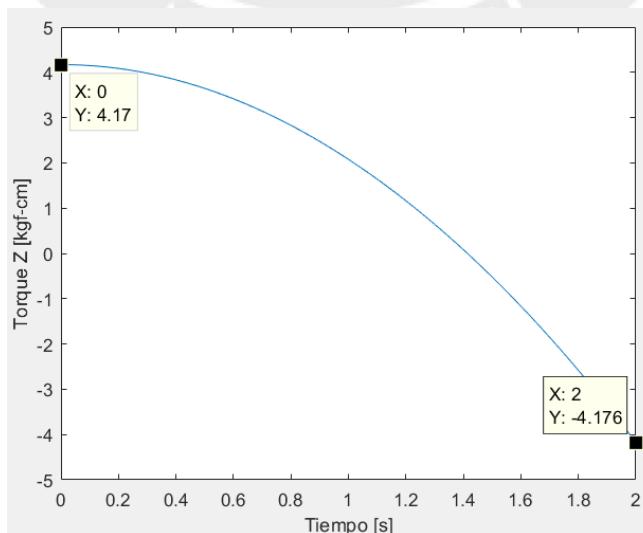


Figura 4.8: Variación del torque requerido por el mecanismo de cuatro barras. Elaboración propia.

Además, se observa en la Figura 4.8 que para la posición angular inicial  $\theta_2 = 10^\circ$ , el torque requerido es inicialmente positivo, y luego va decreciendo. Esto tiene sentido físicamente, ya que a medida que el eslabón 2 va pasando de un valor angular positivo a una posición horizontal, el peso de las patas va haciendo cada vez más torque, lo cual contribuye a que la pata gire más en sentido horario y se requiera cada vez menos la acción del torque  $T_z$  para ejecutar el movimiento.

Análogamente, cuando el ángulo del eslabón 2 pasa de 0 a su valor final de  $\theta_2 = -10^\circ$ , el torque  $T_z$  adquiere un valor cada vez más negativo, ya que busca que la pata gire en sentido horario y el brazo de palanca generado por el peso de las patas va disminuyendo conforme  $\theta_2$  decrece. Por ello, se requiere que  $T_z$  se vuelva más negativo para colaborar a que la pata siga girando en sentido horario.

### 4.3. Simulaciones mediante FEM de cargas en condición estática

Con el objetivo de dimensionar el espesor de los elementos mecánicos más críticos del robot, se realiza una simulación computacional de esfuerzos debidos a cargas estáticas usando el *método de elementos finitos* (FEM, por sus siglas en inglés), sobre la chapa doblada que forma la parte inferior del tórax. Se emplean herramientas de *ingeniería asistida por computadora* (CAE, por sus siglas en inglés) incluidas en el software Autodesk Inventor 2019.

Debido a que la relación entre la longitud de cada pieza y su espesor es muy baja, la simulación considera que dichos elementos son cuerpos delgados para así mejorar la precisión de los resultados. De esta forma, el software utiliza herramientas matemáticas especializadas en mecánica de materiales delgados, lo cual aumenta la fiabilidad del estudio de cada pieza en cuestión, a diferencia de si fuese considerado un cuerpo sólido.

La metodología utilizada es un análisis de convergencia FEM con un factor de reducción del 90%, con cantidad máxima de iteraciones restringida a 10, y con criterio de parada del 0.1% en relación al máximo esfuerzo de Von Misses calculado en cada iteración. Esto quiere decir que el software va a volver a generar la malla que contiene a los elementos finitos en las zonas que presentan un mayor esfuerzo de Von Misses, pero dichos elementos tendrán un tamaño del 90% en comparación a la repetición anterior (como se puede ver en la Figura 4.11 y en la Figura 4.15). De esta forma, se tiene una exactitud mejorada del esfuerzo simulado en las zonas críticas de las planchas dobladas. El análisis tiene un costo computacional y de tiempo mucho mayor comparado a un simple análisis estático con tamaño fijo de los elementos de la malla FEM, pero mejora considerablemente los resultados obtenidos.

Se considera que la masa total del robot es de  $5 \text{ kg}$  para las simulaciones mostradas a continuación. Por seguridad, se toma un valor mayor al presentado previamente en la Tabla 4.2. Además, las cargas se representan usando vectores de color amarillo.

#### 4.3.1. Esfuerzos mecánicos en la plancha inferior del tórax

Se sometió a la plancha inferior del tórax a una fuerza vertical hacia abajo de valor  $5 * 9.81 = 49.05 \text{ N}$ . Esta carga corresponde al peso que debe soportar la parte inferior del tórax del robot. Como se observa en la Figura 4.9, los valores finales de esfuerzo obtenidos (con un ratio de convergencia de aproximadamente 0%), son alrededor de 32% mayores que los calculados en la primera iteración, brindando más fiabilidad a la simulación.

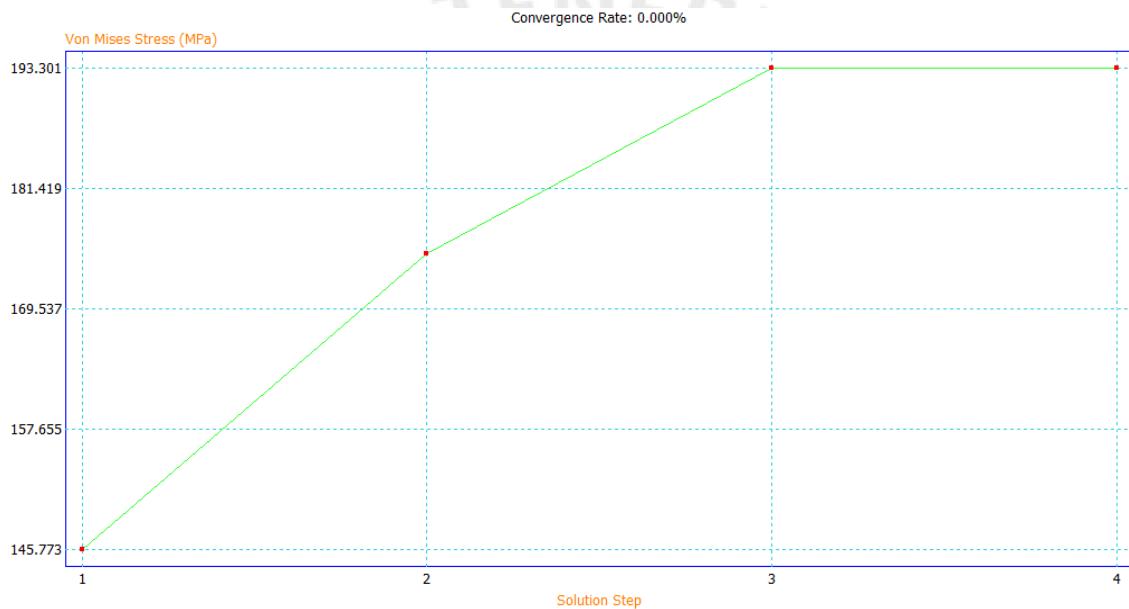


Figura 4.9: Gráfica de la convergencia del máximo esfuerzo encontrado en cada iteración del análisis FEM de la plancha inferior del tórax. Elaboración propia.

En la Figura 4.10 se muestra una vista general de la malla de elementos finitos del tórax, con sus respectivos factores de seguridad obtenidos en la simulación. Para el análisis, se consideraron como empotramientos los extremos en donde la plancha tiene contacto con los servomotores. En la Figura 4.11, se muestra un acercamiento de la malla FEM, que resalta la reducción de tamaño de los elementos finitos en los alrededores de la zona crítica, en la iteración final de la simulación de la pieza.

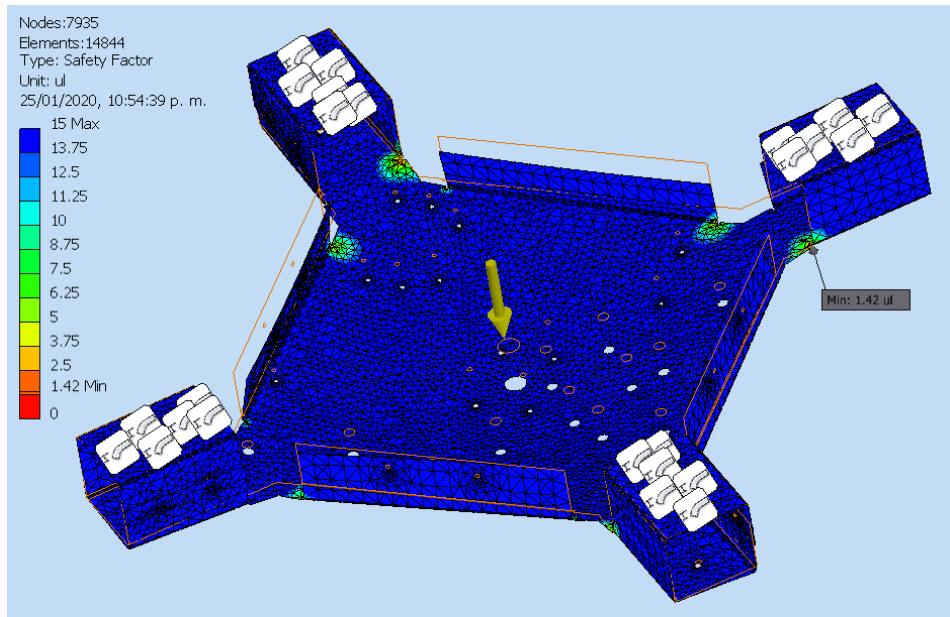


Figura 4.10: Malla de elementos finitos de la plancha inferior (con valores de factor de seguridad).

Elaboración propia.

En el análisis de la plancha metálica fabricada con **aluminio 6061**, de un espesor de **1 mm**, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1.42 (véase la Figura 4.11). Se puede observar que los concentradores de esfuerzos se encuentran en unas ranuras localizadas cerca de los dobleces. Considerando que, al utilizar fabricación por corte láser, no se estarán presentes dichos surcos en la plancha (generados por defecto en el software), no se tendrán estos concentradores de esfuerzos, por lo que el factor de seguridad del tórax será mayor. Si se ignoran dichas ranuras, se tiene un **factor de seguridad mínimo de 6.25** (véase la Figura 4.11).

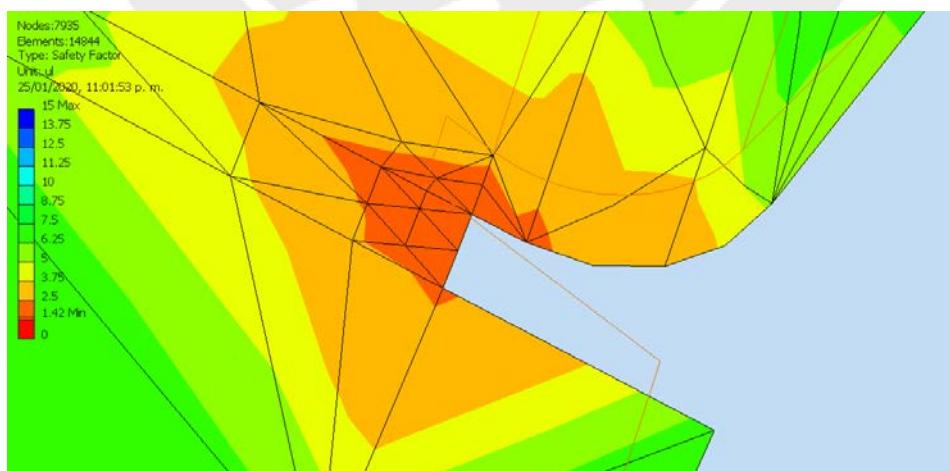


Figura 4.11: Detalle de los elementos finitos generados en el punto crítico de la plancha inferior del tórax.

Elaboración propia.

Se hizo la simulación con el siguiente valor comercial de espesor de planchas de aluminio ( $1.5\text{ mm}$ ) para incrementar el factor de seguridad. Sin embargo, esto aumenta la masa del robot, lo cual es perjudicial para el diseño, ya que se busca que sea lo más liviano posible para que este pueda posarse sobre una mina sin hacerla estallar.

Asimismo, en la Figura 4.12 se observa que la mayor deformación que presenta la plancha inferior del tórax es de  $2.47\text{ mm}$ . Este valor es pequeño, comparado con la longitud lateral del robot, que es de  $714\text{ mm}$ . Por lo tanto, esta deformación que no perjudica el funcionamiento del robot.

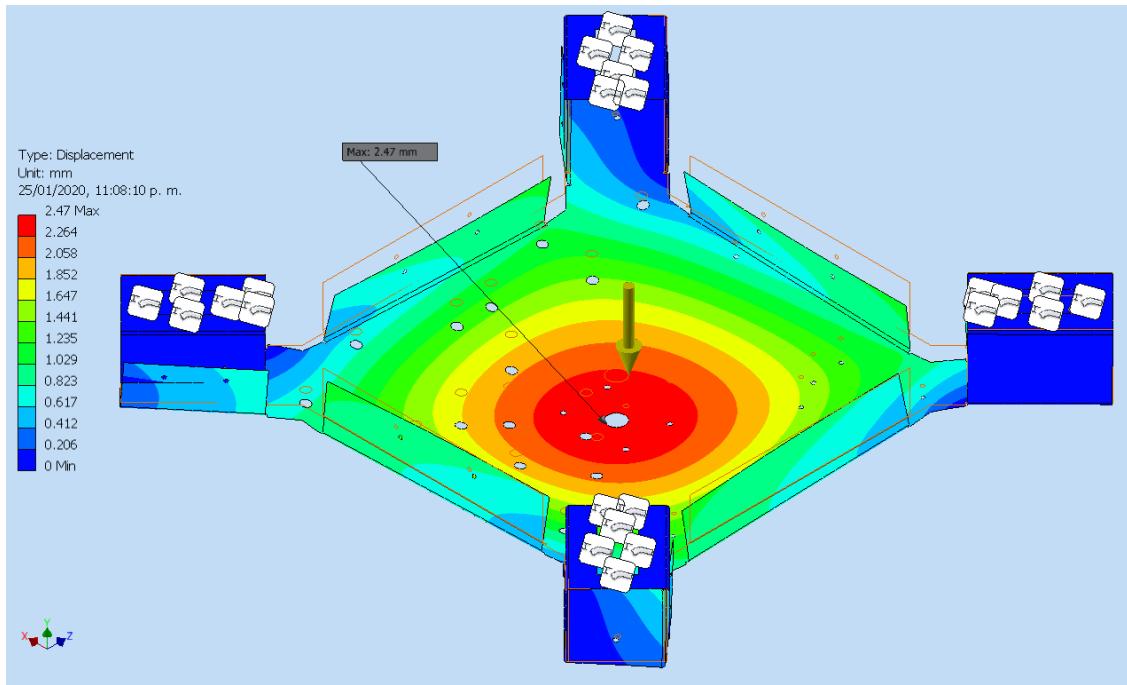


Figura 4.12: Simulación FEM de deformaciones en las regiones de la plancha inferior del tórax.  
Elaboración propia.

#### 4.3.2. Esfuerzos mecánicos en cada extremo de las patas

Se sometió a la plancha embutida a una fuerza vertical hacia arriba con un valor de  $16.35\text{ N}$ . Esta carga corresponde al peso que debe soportar el extremo del robot, en el caso crítico. Es decir, cuando está posado sobre  $L - 1 = 3$  patas. Se observa en la Figura 4.13 que los valores finales de esfuerzo obtenidos (con un ratio de convergencia de aproximadamente  $0.055\%$ ), son  $155\%$  mayores que los calculados en la primera iteración, brindando más fiabilidad a la simulación. En esta pieza resalta claramente la utilidad de utilizar FEM con análisis de convergencia.

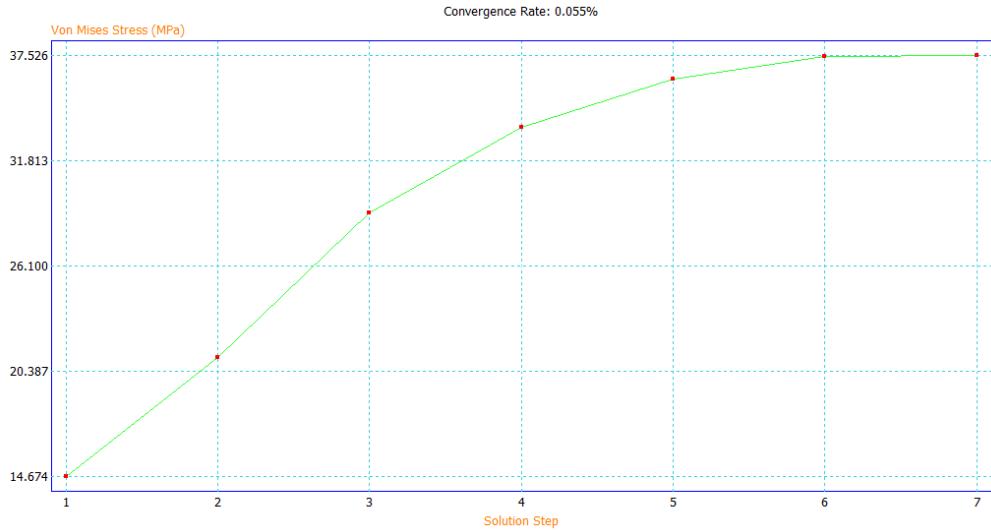


Figura 4.13: Gráfica de la convergencia del máximo esfuerzo encontrado en cada iteración del análisis FEM de cada extremo de las patas. Elaboración propia.

En la Figura 4.14 se muestra una vista general de la malla de elementos finitos de uno de los extremos de las patas del robot. Para el análisis, se consideraron como empotramientos las zonas donde la pieza está atornillada al perfil metálico vertical, el cual es el eslabón 3 del mecanismo de cuatro barras (véanse las subsecciones 4.2.1 y 4.2.2). En la Figura 4.15, se muestra un acercamiento de la malla FEM, que resalta la reducción de tamaño de los elementos finitos en los alrededores de la zona crítica, en la iteración final de la simulación.

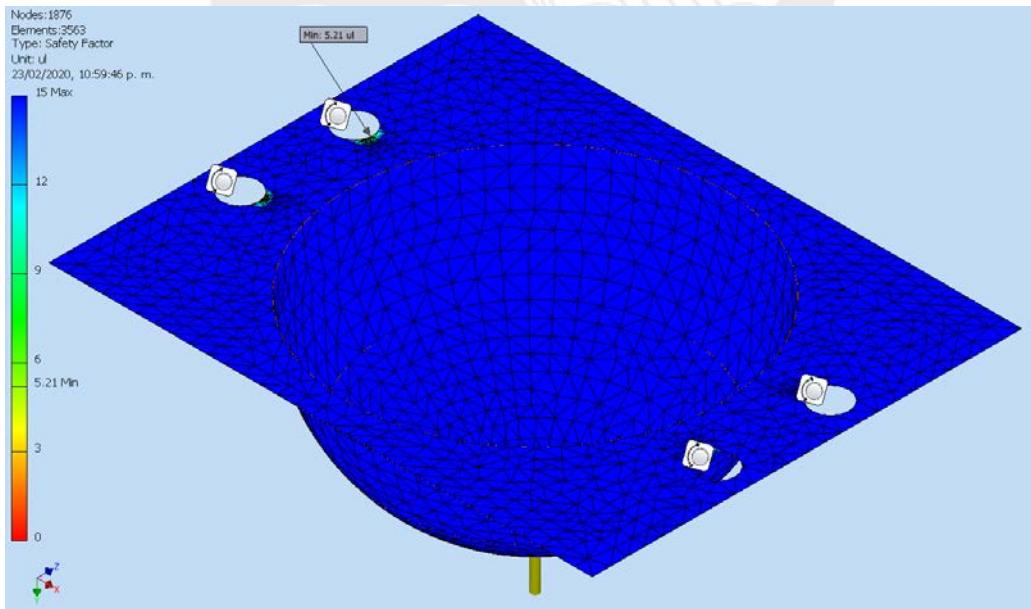


Figura 4.14: Malla de elementos finitos de cada extremo de las patas (con valores de factor de seguridad). Elaboración propia.

En el análisis de dicha plancha metálica fabricada con **aluminio 6061**, de un espesor de **0.5 mm**, se obtiene un **factor de seguridad mínimo de 5.21** (véase la Figura 4.15). Se puede observar que en este elemento está sobredimensionado,

sin embargo, este es el espesor comercial más delgado encontrado. Además, considerar que este análisis FEM ignora los esfuerzos residuales e irregularidades generados por el embutido, por lo que se justifica el elevado factor de seguridad.

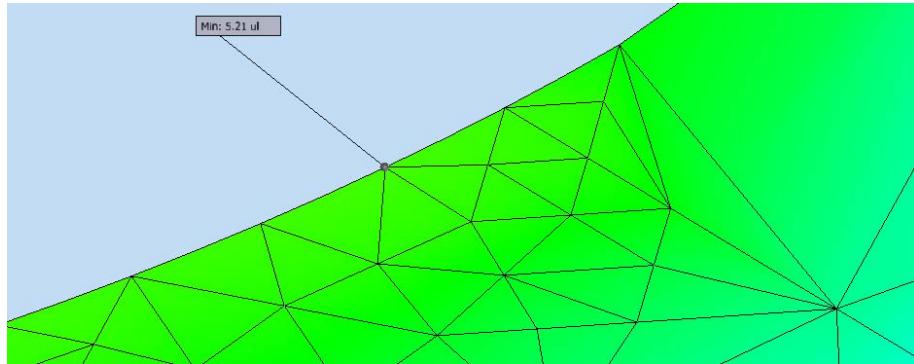


Figura 4.15: Detalle de los elementos finitos generados en el punto crítico de las patas. Elaboración propia.

Asimismo, en la Figura 4.16 se observa que la mayor deformación que presenta la pata semiesférica es de  $15.75 \mu m$  ante una fuerza aplicada uniformemente sobre el casquete esférico mostrado. El aplastamiento es ínfimo, por lo que no afecta la estabilidad ni compromete la funcionalidad del robot.

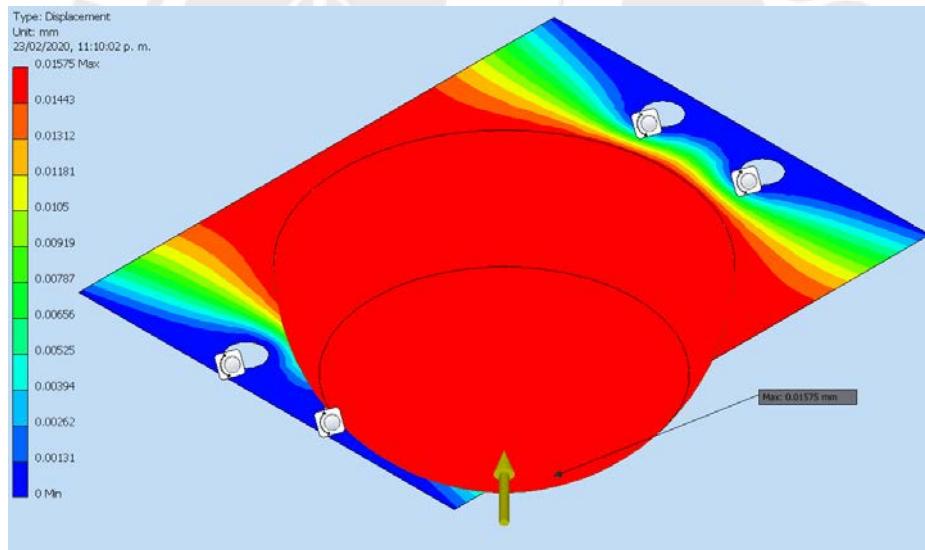


Figura 4.16: Simulación FEM de deformaciones en las regiones de cada extremo de las patas.  
Elaboración propia.

#### 4.4. Estabilidad mecánica durante la caminata

El patrón de caminata para la locomoción va a ser aprendido por el robot a partir de la experiencia recolectada utilizando un algoritmo híbrido. Se utiliza información de la orientación tridimensional del robot para lograr su estabilidad mecánica. Con dicha medición, junto con otras relevantes (como el consumo energético), el robot puede aprender a controlar sus articulaciones para moverse de una manera estable manteniendo su tórax en una inclinación horizontal.

Además, se colocaron los componentes internos del robot de manera que la masa esté equitativamente distribuida en las patas. El centro de masa del robot es cercano al centroide, como se puede observar en la Figura 4.17 tomando como referencia la ubicación del sensor LIDAR. Notar que el centro de su emisor láser circular rotatorio está sobre el centroide del robot. En la Figura 4.17, el origen de coordenadas tomado se encuentra en el centroide del área correspondiente a la cara inferior de la base del tórax. Los códigos de programación utilizados para mostrar dichas coordenadas, se adjuntan en el Anexo D.

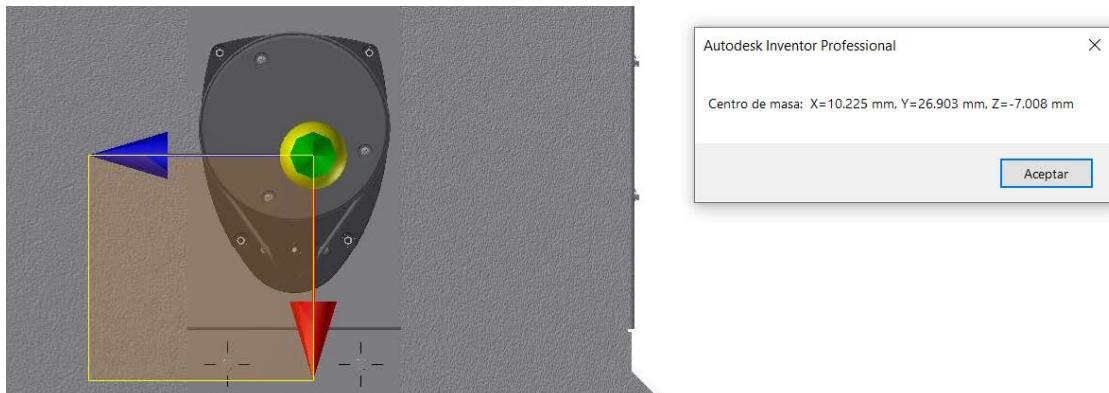


Figura 4.17: Centro de masa del robot arácnido. Elaboración propia.

#### 4.5. Planos mecánicos

En la Tabla 4.6, se enlistan los planos mecánicos del robot arácnido. Los Anexos F y G contienen los planos de ensamble y de despiece, respectivamente. Considerar que SE es un acrónimo que indica que el plano es un subensamblaje.

Tabla 4.6: Lista de planos mecánicos. Elaboración propia.

GRUPO	PLANO	TAMAÑO	TÍTULO DEL PLANO
0	L0	A0	Ensamble General
	L0.A	A2	Base inferior del tórax
	L0.B	A3	Base superior del tórax
1	L1	A3	SE Base inferior
	L1.A	A3	Piezas de trupán
2	L2	A3	SE Sensor de minas
	L2.A	A4	Unión del sensor ALIS con el tórax
3	L3	A2	SE Pata
	L3.A	A3	Unión de las patas con el tórax
	L3.B	A4	Pie semiesférico
	L3.C	A4	Pierna perfil
	L3.D	A4	Biela, Manivela, y Disco de unión
4	L4	A3	SE Base superior
	L4.A	A3	Cubierta superior
	L4.B	A4	Soporte para antena

## CAPÍTULO 5: DISEÑO ELECTRÓNICO

En este capítulo, se hace una revisión de los requerimientos electrónicos para justificación de la selección de los componentes. Las hojas de datos de dichos componentes electrónicos están adjuntadas en el Anexo E. Luego, se hace un cálculo de las masas de los elementos electrónicos, el cual es un dato a ser usado para validar la estimación de masas realizada en el diseño mecánico. Después, se muestra el diagrama de bloques del sistema electrónico del robot que engloba los componentes seleccionados. Además, se muestran el diseño y la simulación de los circuitos electrónicos relevantes. Finalmente, se hace una descripción de la disposición de los componentes en la placa de circuito impreso, así como de la conexión con elementos localizados fuera de dicha tarjeta electrónica. Los cálculos vinculados a este capítulo se encuentran en el Anexo C.

### 5.1. Selección de componentes

Es un requerimiento esencial que todos los componentes electrónicos se puedan comunicar con el controlador principal mediante niveles lógicos digitales de **3.3 voltios**, para así simplificar el diseño evitando el uso de level-shifters.

Además, las corrientes listadas para cada uno de los componentes electrónicos son las máximas para las condiciones de operación del robot. Esto permitirá un adecuado diseño de las fuentes de voltajes requeridas.

Por otro lado, los protocolos de comunicación digitales buscados en los componentes electrónicos son: I<sup>2</sup>C, SPI, UART, y USB; debido a su facilidad de implementación. Durante la selección, para reducir complejidad del diseño, se busca utilizar en total la menor cantidad posible de protocolos de comunicación.

#### 5.1.1. Unidad de medición inercial

En la matriz morfológica del apartado de telemetría (véase la Tabla 3.4), se determinó que la solución debe contener un IMU de 9 GDL para cumplir el requerimiento de tener completamente definida la pose del robot. Esto quiere decir que es necesario un IMU que incluya un acelerómetro, un giroscopio, y un magnetómetro. En la Tabla 5.1, se realiza una comparación de los principales sistemas IMU encontrados.

Tabla 5.1: Principales sensores iniciales encontrados. Fuente: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com).

IMU	Voltaje de alimentación [V]	Consumo de corriente [mA]	Masa [g]	Interfaz	Precio [USD]
LSM9DS1	3.0 – 5.0	6.1	2.5	I <sup>2</sup> C, SPI	14.95
BNO055	3.3 – 5.0	12.3	3.0	I <sup>2</sup> C, UART	34.95
GY85	3.0 – 5.0	6.5	1.2	I <sup>2</sup> C	11.90

Se elige el BNO055, el cual se muestra en la Figura 5.1, debido a que posee circuitos especializados que permiten que la interpretación matemática de la inclinación física pueda ser computada usando cuaterniones, cuyo cálculo es realizado en un hardware especializado dentro del mismo módulo. Si bien es cierto que el módulo tiene un costo más elevado, esta representación permite que la orientación tridimensional del robot sea calculada de una forma más rápida y precisa. Pero la característica más importante es que no presenta el *bloqueo de cardán* (gimbal lock, por su denominación en inglés), el cual puede generar comportamientos erróneos en las mediciones [66].

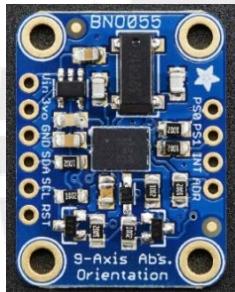


Figura 5.1.1: Módulo BNO055.  
Fuente: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com).



Figura 5.1.2: Módulo BNO055 en el robot (tapa superior transparente). Elaboración propia.

Figura 5.1: Módulo BNO055.

Un parámetro importante requerido para poder implementar la comunicación con el módulo BNO055, es conocer su dirección I<sup>2</sup>C por defecto, la cual es 0x28.

Con el fin de poder ejecutar los algoritmos de caminata descritos en el capítulo previo, se requiere conocer hacia dónde está apuntando el frente del robot. Para ello, este módulo dispone de comandos que le permiten calcular los valores de los ángulos roll-pitch-yaw, a partir de la información de los cuaterniones. Como se mencionó, este procedimiento se realiza dentro del propio IMU.

### 5.1.2. Sensor de obstáculos LIDAR

De acuerdo a la matriz morfológica del apartado de telemetría (véase la Tabla 3.4), el concepto de solución incluye un sensor de obstáculos LIDAR. En este tipo de sensores, se emite un haz de luz hacia un objeto y se mide el tiempo que

transcurre hasta detectar el rayo reflejado. De esta manera se tiene una medición indirecta de la distancia a la que se encuentra dicho objeto, respecto del LIDAR. En la Tabla 5.2, se presentan los requerimientos técnicos para este sensor.

Tabla 5.2: Requerimientos técnicos para el LIDAR. Elaboración propia.

Alcance mínimo [m]	Interfaz
2.0	UART o USB

En la Tabla 5.3, se muestran las características de los módulos LIDAR encontrados, para evaluar su desempeño en los aspectos técnicos requeridos. Además, se listan sus precios en dólares.

Tabla 5.3: Principales sensores LIDAR encontrados. Elaboración propia.

IMU	Alcance máximo [m]	Interfaz	Precio [USD]	Fuente de la información
Parallax LRF 2m	2.4	UART	99.00	<a href="http://www.parallax.com/shop">www.parallax.com/shop</a>
RPLIDAR A1	12.0	UART, USB	114.95	<a href="http://www.slamtec.com/en/lidar/a1">www.slamtec.com/en/lidar/a1</a>
URG 04LX UG01	5.6	USB	1,117.53	<a href="http://www.roscomponents.com">www.roscomponents.com</a>

Se elige el modelo RPLIDAR A1, debido a que es el que tiene un mejor balance de alcance máximo y precio. En la Figura 5.2, se muestra dicho sensor montado en el robot arácnido.



Figura 5.2.1: Sensor RPLIDAR A1.

Fuente: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com).



Figura 5.2.2: Sensor RPLIDAR A1 en el robot.

Elaboración propia.

Figura 5.2: Sensor RPLIDAR A1.

En la Tabla 5.4, se muestran las características más importantes de este sensor.

Tabla 5.4: Características principales del sensor RPLIDAR A1. Fuente: [www.slamtec.com](http://www.slamtec.com).

Voltaje de alimentación [V]	Subsistema de control	Consumo total de corriente [mA]	Masa [g]	Interfaz	Frecuencia de muestreo [Hz]	Rango de detección [m]
4.9 – 5.5	Subsistema de potencia (giro del par emisor-receptor)	360	190	UART, USB	8000	12

### 5.1.3. Sensor de corriente basado en el efecto Hall

De acuerdo al algoritmo diseñado (véase la sección 6.4), se requiere conocer la corriente consumida por el robot, para que sea un parámetro a optimizarse durante el entrenamiento del algoritmo. Al fluir corriente a través de un sensor de efecto Hall, se genera un campo magnético, el cual internamente ocasiona que el sensor genere un voltaje saliente proporcional a dicha corriente. Esta señal de voltaje será medida por un conversor análogo digital. En la Tabla 5.5, se muestran los requerimientos eléctricos a considerar para seleccionar este sensor.

Tabla 5.5: Requerimientos técnicos para el sensor de corriente Hall. Elaboración propia.

Tipo de corriente a medir	Voltaje de alimentación [V]	Rango de corriente soportado [A]
Corriente continua	4.5 – 5.5	$\leq 5$

En la Tabla 5.6, se muestran las características más resaltantes de los sensores Hall encontrados.

Tabla 5.6: Características de los principales sensores de corriente Hall encontrados.

Fuentes: [www.digikey.com](http://www.digikey.com) y [www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com).

Sensor de corriente Hall	Voltaje de alimentación [V]	Rango de corriente soportado [A]	Sensitividad [mV/A]	Precio [USD]
ACS712 05AB	4.5 – 5.5	$\pm 5$	185	4.34
ACS723 05B			400	5.27
LTSR 6-NP	4.75 – 5.25	$\pm 6$	104.16	19.72

Al tener un mayor valor de sensitividad, un cambio en el voltaje como consecuencia de la corriente medida es más grande en comparación con el ruido eléctrico. Es por ello que se elige el sensor ACS723 05B, a pesar de su mayor precio. Dicho circuito integrado es mostrado en la Figura 5.3.



Figura 5.3.1: Módulo ACS723.  
Fuente: [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com).

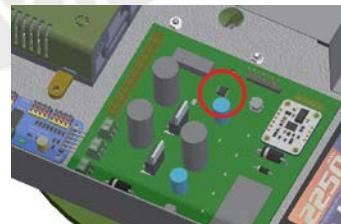


Figura 5.3.2: Módulo ACS723 en el robot (tapa superior transparente). Elaboración propia.

Figura 5.3: Sensor de corriente basado en efecto Hall ACS723.

En la Tabla 5.7, se listan algunas características importantes del sensor.

Tabla 5.7: Características principales del sensor Hall ACS723. Fuente: [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com).

Consumo total de corriente [mA]	Relación entre voltaje de salida $V_{I_{OUT}}$ [V] y corriente medida $I_{medida}$ [A]	Masa [g]	Empaquetado	Precisión del sensor
14	$I_{medida} = (V_{I_{OUT}} - 2.5)/0.4$	1.3	SOIC8	$\pm 3\%$

#### 5.1.4. Conversor análogo digital (ADC)

Este tipo de circuitos integrados permite convertir una señal continua en tiempo y amplitud, en una señal de valores discretos tomados cada cierto tiempo. Estos parámetros están definidos según la resolución del módulo ADC y la frecuencia de muestreo. En el robot, se existen tres canales analógicos a ser medidos: dos para determinar el nivel de carga de cada una de las baterías y uno para la señal del sensor de corriente, cuya selección fue justificada líneas arriba. En la Tabla 5.8, se muestran los requerimientos técnicos para elegir este módulo electrónico.

Tabla 5.8: Requerimientos técnicos para el ADC. Elaboración propia.

Voltaje de alimentación [V]	Cantidad de entradas analógicas	Interfaz
$\leq 5$	$\geq 3$	I <sup>2</sup> C o SPI

En la Tabla 5.9, se hace una comparativa de los principales circuitos ADC encontrados.

Tabla 5.9: Principales ADC encontrados. Fuentes: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com) y [www.microchip.com](http://www.microchip.com).

ADC	Voltaje de alimentación [V]	Cantidad de entradas analógicas	Resolución de lectura [bits]	Interfaz	Precio [USD]
ADS1015	2.0 – 5.0	4	12	I <sup>2</sup> C	9.95
ADS1115			16		14.95
MCP3004	2.7 – 5.5	4	10	SPI	2.14
MCP3008		8			3.75

Se selecciona el circuito integrado MCP3004, mostrado en la Figura 5.4, debido a que es el más económico.



Figura 5.4.1: Módulo MCP3004.

Fuente: [www.microchip.com](http://www.microchip.com).



Figura 5.4.2: Módulo MCP3004 en el robot.

Elaboración propia.

Figura 5.4: Módulo MCP3004.

En la Tabla 5.10, se listan algunas características relevantes de este chip ADC. Considerar que la frecuencia de muestreo está expresada en miles de muestras por segundo (*ksp*s, por sus siglas en inglés). Este circuito integrado será alimentado con 5 V, para tener un mayor rango de valores analógicos de lectura. De acuerdo a su hoja de datos, soporta comunicación SPI de 3.3 V en sus niveles lógicos, al ser alimentado con 5 V.

Tabla 5.10: Características principales del módulo MCP3004. Fuente: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com).

Consumo de corriente [mA]	Masa [g]	Empaquetado	Frecuencia de muestreo [ksp
0.550	0.28	DIP14	75

### 5.1.5. Servomotores

Los servomotores son actuadores de lazo cerrado que permiten mantener una posición angular fijada a un valor programable, bajo distintas condiciones de carga. A diferencia de otros tipos de actuadores, el lazo de control es cerrado por circuitería interna, liberando al procesador de realizar dicha tarea. En la Tabla 5.11, se muestran los requerimientos técnicos para estos transductores.

Tabla 5.11: Requerimientos técnicos de los servomotores del robot. Elaboración propia.

Tipo de servo	Tipo de control	Interfaz	Voltaje del pulso PWM de control [V]	Rotación continua (mayor a 180°)	Masa máxima [g]	Precio [USD]
Miniservo	Digital	PWM	3.3	No requerida	50	< 80

En la Tabla 5.12, se muestran las principales propiedades electromecánicas de los servomotores encontrados, así como su precio en dólares.

Tabla 5.12: Características de los principales servomotores encontrados. Fuente: [www.servocity.com](http://www.servocity.com).

Servomotor	Voltaje de alimentación [V]	Voltaje del pulso PWM de control [V]	Torque Máximo [kgf- cm]		Masa [g]	Precio [USD]
			@V <sub>min</sub>	@V <sub>max</sub>		
HS-5245MG	4.8 – 6.0	3.0 – 5.0	4.4	5.5	32	39.99
HS-7235MH	6.0 – 7.4		3.6	4.4	34	49.99
HS-7245MH	6.0 – 7.4		5.2	6.4	34	69.99
S9257	4.8		27.8		26	64.99

Se selecciona el servomotor HS-7245MH (mostrado en la Figura 5.5), debido al mayor torque que puede entregar. Se observa que este actuador entrega un torque máximo de 5.2 kg-cm al ser alimentado con 6 V, cumpliendo con el requerimiento

de  $4.176 \text{ kg-cm}$  (véase el capítulo de diseño mecánico, subsección 4.2.2), con un FS de 1.25. En total, se requieren 8 servomotores ya que cada una de las 4 patas del robot tiene 2 GDL. Además, se cumple el requerimiento planteado en el diseño mecánico: que el actuador tenga una masa menor a  $50 \text{ g}$  (véase la Tabla 4.5).



Figura 5.5.1: Servomotor HS-7245MH.  
Fuente: [www.servocity.com](http://www.servocity.com).

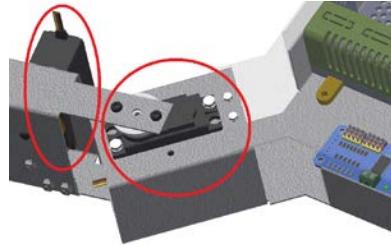


Figura 5.5.2: Dos servomotores HS-7245MH en el robot  
(tapa superior transparente) Elaboración propia.

Figura 5.5: Servomotor HS-7245MH.

En la Tabla 5.13, se muestran algunas características importantes de este actuador.

Tabla 5.13: Características principales del servomotor HS-7245MH. Fuente: [www.servocity.com](http://www.servocity.com).

Consumo de corriente [mA]	Longitud de cable [mm]	Calibre del cable	Tipo de engranajes
360	178	22 AWG	Dentados rectos metálicos

### 5.1.6. Driver de servomotores

Este tipo de driver actúa a modo de tarjeta de expansión, para así poder enviar las señales PWM que permiten controlar la posición angular de los ocho servomotores, con una menor cantidad de pines conectados al controlador principal (solamente dos). En la Tabla 5.14, se muestran los requerimientos a considerar para realizar la selección de este componente.

Tabla 5.14: Requerimientos técnicos del driver de servomotores. Elaboración propia.

Interfaz	Cantidad de servomotores que puede controlar	Voltaje del pulso PWM de control [V]	Voltaje de potencia que soporta [V]
I <sup>2</sup> C o SPI	$\geq 8$	3.3	$\leq 7.4$

En la Tabla 5.15, se muestran las principales características de los drivers de servomotores evaluados.

Tabla 5.15: Características de los principales drivers de servomotores encontrados. Fuente: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com).

Driver	Interfaz	Cantidad de servomotores que puede controlar	Voltaje de control [V]	Voltaje de potencia [V]	Cantidad de pines de control
PCA9685	I <sup>2</sup> C	16	2.3 – 5.5	3.3 – 6.0	2
TLC5947	SPI	24	3.0 – 5.5	5.0 – 30.0	4

En la Figura 5.6, se muestra el driver PCA9685. Se hizo la selección de este dispositivo debido a su facilidad de uso con librerías de programación ya existentes, y porque requiere de una menor cantidad de pines de control.

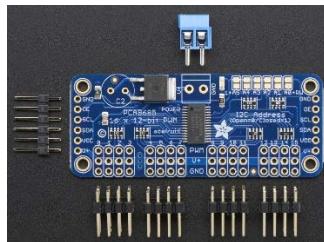


Figura 5.6.1: Driver de servomotores PCA9685.

Fuente: [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com).

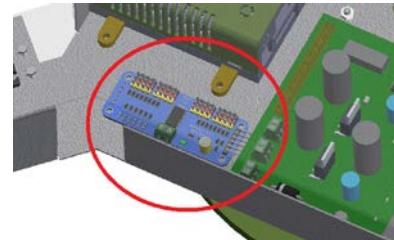


Figura 5.6.2: Driver de servomotores PCA9685 en el robot. Elaboración propia.

Figura 5.6: Driver de servomotores PCA9685.

En la Tabla 5.16, se muestran las características principales de este driver.

Tabla 5.16: Características principales del driver PCA9685. Fuente: [www.naylampmechatronics.com](http://www.naylampmechatronics.com).

Consumo de corriente [mA]		Masa [g]	Dirección I <sup>2</sup> C	Precio [USD]
Interfaz de control	Señales PWM generadas [mA/pin]			
20	10	9	0x40	12.15

Este controlador de servomotores aplica *control en cascada* mediante un circuito dentro del propio módulo. Su diagrama de bloques y el flujo de las señales de control se muestran en la Figura 5.7. Usando esta configuración, este módulo consume una corriente de 100 mA en su etapa de control, de acuerdo a su hoja de datos.

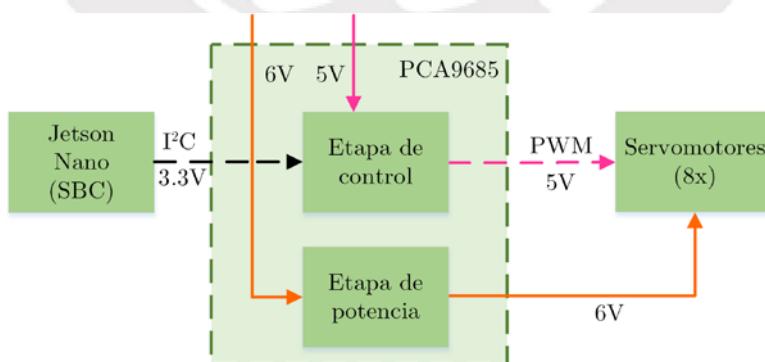


Figura 5.7: Diagrama de bloques del módulo PCA9685. Elaboración propia.

Por otro lado, este dispositivo tiene una dirección I<sup>2</sup>C diferente a la del BNO055, por lo que no habrá conflicto al momento de colocarlos dentro del mismo bus de datos.

### 5.1.7. Transceptor inalámbrico

Los transceptores son dispositivos de comunicación que combinan funcionalidad de recepción y transmisión dentro de un mismo módulo, lo cual reduce el costo y la complejidad del diseño. En la Tabla 5.17, se muestran los requerimientos técnicos para estos transductores.

Tabla 5.17: Requerimientos técnicos del transceptor inalámbrico. Elaboración propia.

Tipo de modulación de onda	Voltaje de alimentación [V]	Interfaz	Alcance [m]
FM	$\leq 5$	I <sup>2</sup> C o SPI	> 1000

En la Tabla 4.5, se muestran las principales características de los transceptores FM encontrados, además de su precio en dólares.

Tabla 5.18: Características de los principales transceptores FM encontrados. Fuente: [www.sparkfun.com](http://www.sparkfun.com).

Servomotor	Voltaje de alimentación [V]	Interfaz	Alcance [m] (con antena externa)	Voltaje del nivel lógico positivo [V]	Masa [g]	Precio [USD]
Módulo LoRa	3.0 – 3.6	I <sup>2</sup> C, SPI, UART	$\approx$ 2000	3.3	0.48	14.95
NRF24LS01	1.9 – 3.6	SPI	$\approx$ 1100		0.56	5.20

Se elige el módulo transceptor NRF24LS01, debido a su bajo precio. En la Tabla 5.19, se muestran el módulo, su ubicación en el robot y sus características más importantes. Se observa que el espectro que utiliza este módulo (2.4 GHz) cumple con la normativa nacional vigente [78].

Tabla 5.19: Características electrónicas del transceptor NRF24LS01 y su ubicación en el robot.

Fuente: [www.openhardware.pe](http://www.openhardware.pe).

Fotografía	Ubicación en el robot	Voltaje de alimentación [V]	Consumo de corriente máximo [mA]	Frecuencia [GHz]
		1.9 – 3.6	13.5	2.4

### 5.1.8. Controlador: Computadora de placa reducida (SBC)

Se elige el computador de placa reducida denominado *Jetson Nano*, el cual se muestra en la Figura 5.8. Fue lanzado al mercado en mayo del 2019, como una iniciativa de NVIDIA Corporation, para impulsar el desarrollo de robótica con inteligencia artificial bioinspirada, bajo la corriente denominada *AI at the edge*. Dicho enfoque busca que las máquinas autónomas tengan suficiente poder computacional para poder realizar entrenamiento e inferencia basados en ciencia de los datos. Este procesador posee una *unidad de procesamiento gráfico* (GPU, por sus siglas en inglés), por lo que permite programación paralelizable. Esto puede lograrse usando programación con *PyTorch*, el cual es una plataforma compatible con los núcleos CUDA de este controlador.



Figura 5.8.1: Controlador Jetson Nano.

Fuente: [developer.nvidia.com](https://developer.nvidia.com).

Figura 5.8.2: Controlador Jetson Nano en el robot.

Elaboración propia.

Figura 5.8: Controlador Jetson Nano.

En la Tabla 5.20, se citan las características principales de este dispositivo.

Tabla 5.20: Características principales del controlador Jetson Nano. Fuente: [developer.nvidia.com](https://developer.nvidia.com).

Voltaje de alimentación [V]	Consumo de corriente [mA]	Masa [g]	GPU	CPU	Precio [USD]
5	2400	136	4 GB LPDDR4 (25.6 GB/s) de 128 núcleos	Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz	99.00

Este controlador, tiene un alto desempeño para realizar cómputo de algoritmos de inteligencia artificial y ML. Además, tiene compatibilidad con diversas librerías relacionadas a la ciencia de datos, lo que facilita la implementación de la lógica de control. En la Figura 5.9, se muestra la comparación de la velocidad de inferencia de las arquitecturas de aprendizaje profundo más comunes en el campo de visión por computadora, medidas en cantidad de imágenes por segundo. Se observa una marcada superioridad del Jetson Nano. No se elige la placa *Coral Dev Board*, debido a su alto costo y, sobre todo, porque únicamente soporta implementaciones basadas en el framework *TensorFlow*.

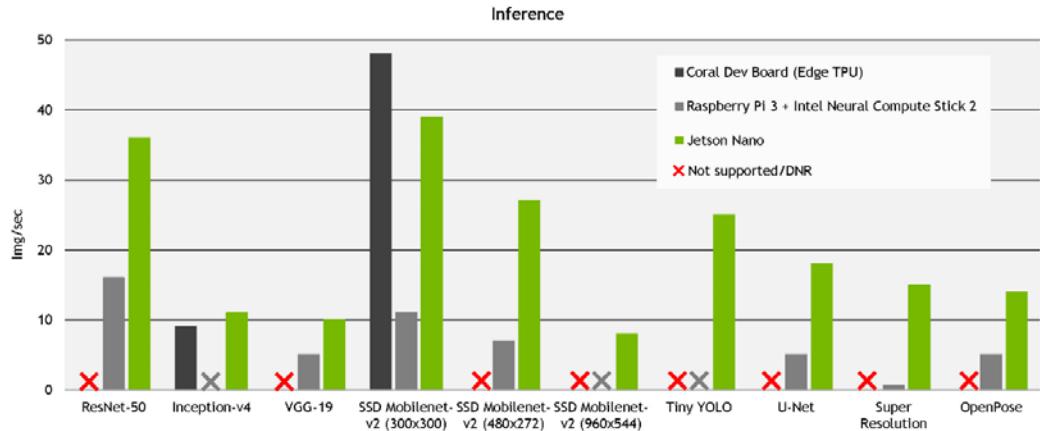


Figura 5.9: Comparación de desempeño de diversas placas de desarrollo para inteligencia artificial.  
Fuente: [developer.nvidia.com](https://developer.nvidia.com).

Se selecciona el cable flex GPIO Breakout para Raspberry Pi, mostrado en la Tabla 5.21, para la conexión del controlador con la tarjeta principal. Debido a que el controlador Jetson Nano comparte el mismo diseño en su socket de pines, este conector es compatible.

Tabla 5.21: Características del cable flex GPIO Breakout para Raspberry Pi. Fuente: [www.adafruit.com](https://www.adafruit.com).

Fotografía	Longitud [mm]	Cantidad de pines	Precio [USD]
	30	40	3.75

### 5.1.9. Regulador de voltaje

En la Tabla 5.22, se muestra el consumo total de corriente del robot, lo que permite seleccionar el regulador adecuado para cada nivel de voltaje requerido.

Tabla 5.22: Consumo de corriente de los elementos electrónicos del robot. Elaboración propia.

Dominio	Tipo de componente	Nombre del componente	Cantidad	Corriente consumida [mA]	Corriente Total Consumida [mA]	Voltaje de alimentación [V]	Potencia consumida [mW]
Sensores	IMU	BNO055	1	12.30	12.30	5	61.50
	De obstáculos	RPLIDAR A1	1	360.00	360.00	5	1,800.00
	Sensor de corriente	ACS723 05B	1	14.00	14.00	5	70.00
	ADC	MCP3004	1	0.55	0.55	5	2.75
Actuadores	Driver de servos	PCA9685	1	100.00	100.00	5	500.00
	Servomotor	HS-7245MH	8	360.00	2,880.00	6	17,280.00
Comunicación	Transceptor	NRF24LS01	1	13.50	13.50	3.3	44.55
Control	Procesador central	Jetson Nano	1	2,500.00	2,500.00	5	12,500.00
POTENCIA ELÉCTRICA TOTAL CONSUMIDA							19,758.80
CORRIENTES CONSUMIDAS AGRUPADAS POR VOLTAJE							44.55
							13.50
							5
							14,934.25
							2,880.00
							17,280.00

Se agrupan las corrientes según sus respectivos niveles de tensión, para así tener los requerimientos para el diseño de las fuentes de voltaje. En la Tabla 5.23, se muestran las corrientes máximas que pueden entregar las fuentes a diseñar, así como el *factor de seguridad* (FS) para cada una de ellas. Las fuentes de 5 y 6 voltios se diseñarán para una corriente nominal de 3 A. Debido a que las corrientes de consumo de los elementos electrónicos de la Tabla 5.23 son las máximas (picos esporádicos no continuos), y no los valores promedios, son aceptables valores de FS cercanos a la unidad.

Tabla 5.23: Requerimientos de corriente de las fuentes de voltaje. Elaboración propia.

Voltaje de la fuente regulada [V]	Corriente que debe suministrar [mA]	Corriente nominal de diseño [mA]	FS
5	2986.85	3000	1.004
6	2880.00	3000	1.042

En la Tabla 5.24, se muestran las principales propiedades de los circuitos de reducción de voltaje encontrados.

Tabla 5.24: Características de los principales reductores de voltaje encontrados.

Fuentes: [www.pololu.com](http://www.pololu.com) y [www.ti.com](http://www.ti.com).

Módulo Step Down	Voltaje de entrada [V]	Voltaje de salida [V]	Corriente de salida [A]	Precio [USD]
D24V50F5	6.0 – 38.0	5	5	14.95
D24V150F6	7.2 – 40.0	6	15	39.95
LM2596	4.5 – 40.0	1.2 – 37.0	3	5.88

Se selecciona el circuito LM2596, mostrado en la Figura 5.10, debido a su bajo costo. Siguiendo las indicaciones de su hoja de datos, se pueden diseñar dos fuentes: una de 5 y otra de 6 voltios; ambas a 3 amperios de corriente.

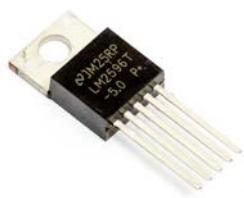


Figura 5.10.1: Módulo LM2596.

Fuente: [www.byggarobot.se](http://www.byggarobot.se).



Figura 5.10.2: Dos módulos LM2596 en el robot.

Elaboración propia.

Figura 5.10: Módulo LM2596.

En la Figura 5.11, se pueden ver las fuentes de voltaje diseñadas tomando como base al módulo LM2596. De acuerdo a la hoja de datos, el voltaje de salida de dicho integrado depende de la resistencia de retroalimentación (conectada al pin 4: FB). Cada uno de estos circuitos debe recibir como entrada un voltaje mayor

en 1.2 V que la salida deseada, de acuerdo a la hoja de datos. El cálculo de las resistencias utilizadas en los circuitos, así como el procedimiento para determinar el voltaje mínimo de entrada, son mostrados en el Anexo C. De esta manera, se tiene el requerimiento para el voltaje mínimo de las baterías del robot. Esta tensión es de 7.2 V, como mínimo, ya que la salida de mayor voltaje es de 6 V, la cual será la que alimente a los servomotores.

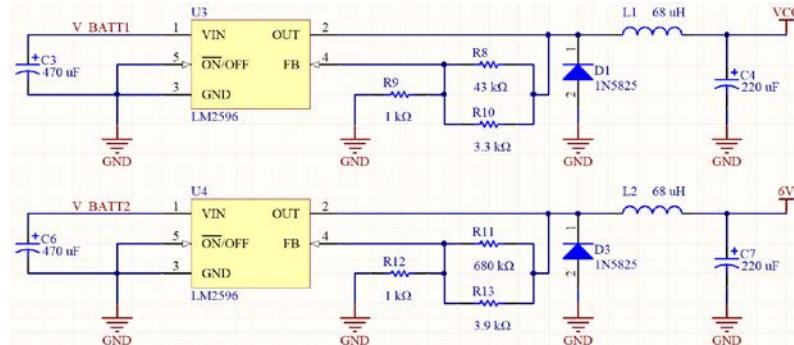


Figura 5.11: Circuito de las fuentes de voltaje de 5 y 6 voltios a 3 amperios usando el módulo LM2596.  
Elaboración propia.

### 5.1.10. Baterías de Polímero de Litio (LiPo)

La alimentación energética interna debe ser tal que garantice una autonomía de 50 minutos como mínimo, según los requerimientos del sistema. Según los cálculos realizados en el Anexo C, se tiene que la capacidad mínima de cada arreglo de baterías es de 3571.43 mAh. Este valor es utilizado para diseñar cada una de las fuentes de voltaje requeridas.

Tabla 5.25: Requerimientos técnicos para la batería del robot (por cada fuente de voltaje).  
Elaboración propia.

Voltaje de salida [V]	Capacidad de la batería [mAh]	Voltaje de entrada [V]
5	3571.43	> 6.2
6		> 7.2

Partiendo de dicha información, se selecciona la batería LiPo marca Lumenier de 2250 mAh de capacidad, la cual se muestra en la Figura 5.12. Esta batería está compuesta internamente por tres celdas de polímero de litio, lo que le permite sobrepasar el umbral mínimo de voltaje de 7.2 V.



Figura 5.12.1: Batería Lumenier 2250.  
Fuente: [www.byggarobot.se](http://www.byggarobot.se).



Figura 5.12.2: Batería Lumenier 2250 en el robot.  
Elaboración propia.

Figura 5.12: Batería Lumenier 2250.

Se colocarán dos baterías en paralelo para cada fuente de voltaje requerido, por lo que el robot requiere de cuatro baterías para funcionar. En la Tabla 5.26, se muestran las características relevantes de la batería seleccionada. Se muestran también sus voltajes mínimo y máximo, correspondientes a cuando está descargada y completamente cargada, respectivamente. Este es un dato de entrada para el diseño del circuito acondicionador de señal, el cual permite medir la capacidad restante de energía en las baterías.

Tabla 5.26: Características principales de la batería Lumenier 2250. Fuente: [www.dekasto.com](http://www.dekasto.com).

Capacidad total del arreglo [mAh]	Voltaje [V]			Ratio de descarga		Masa [g]	Precio [USD]
	Nominal	Mínimo	Máximo	En continuo	En ráfaga		
2250 * 2 = 5500	11.1	9.0	12.6	35C	70C	219	29.99

Tomando en cuenta las características técnicas de esta batería, se selecciona el cargador Tenergy TB6-B. El diseño contempla que, una vez se descarguen las cuatro baterías que se encuentran dentro del robot, estas deberán ser reemplazadas por otro juego de cuatro baterías que fueron cargadas externamente. Por lo tanto, en total se deben adquirir ocho baterías.

### 5.1.11. Resumen de los elementos seleccionados

A continuación, se muestra en la Tabla 5.27, el listado de los elementos electrónicos seleccionados que están alojados en del robot. Además, se muestra la masa total de los mismos. Dicho valor ( $1.99 \text{ kg}$ ) es menor al estimado al calcular el FS de explosión ( $2.2 \text{ kg}$ , véase la Tabla 4.2), validando así el diseño realizado.

Tabla 5.27: Masa de los elementos electrónicos del robot. Elaboración propia.

Dominio	Tipo de componente	Nombre del componente	Cantidad	Masa individual [g]	Masa total [g]
Sensores	IMU	BNO055	1	0.15	0.15
	De obstáculos	RPLIDAR A1	1	190.00	190.00
	Sensor de minas	ALIS	1	500.00	500.00
	Sensor de corriente	ACS723 05B	1	1.30	1.30
	ADC	MCP3004	1	0.28	0.28
Actuadores	Driver de servos	PCA9685	1	9.00	9.00
	Servomotor	HS-7245MH	8	34.00	272.00
Comunicación	Transceptor	NRF24LS01	1	0.56	0.56
Control	Procesador central	Jetson Nano	1	136.00	136.00
Energía	Batería LiPo 2250 mAh	Lumenier	4	219.00	876.00
Conexión	Cable Flex	GPIO Breakout RPi	1	14.00	14.00
MASA TOTAL DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS					1,999.29

## 5.2. Diagrama de bloques del sistema electrónico

En la Figura 5.13, se muestra el diagrama de bloques del robot, el cual engloba y conecta a los componentes ya seleccionados. Las flechas continuas representan flujos de energía, en donde cada color es un nivel de voltaje diferente; mientras que las flechas de líneas discontinuas hacen referencia a transmisión de información. Además, las líneas de color celeste representan intercambio de energía a 3.3 V, las líneas de color rosado, 5 V de voltaje; y se tienen con color naranja las conexiones de 6 V.

El controlador es un *computador de placa reducida* (SBC, por sus siglas en inglés), como fue mostrado en la matriz morfológica del subsistema de procesamiento y control (véase la Tabla 3.6).

Todos los sensores conectados al controlador reciben comandos iniciales para operar, por lo que dichos buses de datos son bidireccionales. En el caso del driver de servomotores, solo hay envío unidireccional de comandos desde el SBC.

Considerar que en el diagrama de bloques de la Figura 5.13, se colocan con fondo verde a los bloques que representan a componentes que irán dentro de la tarjeta electrónica a ser diseñada. Los demás componentes (cuyos recuadros están en celeste), estarán en el tórax del robot, y conectados a la tarjeta mediante cables.

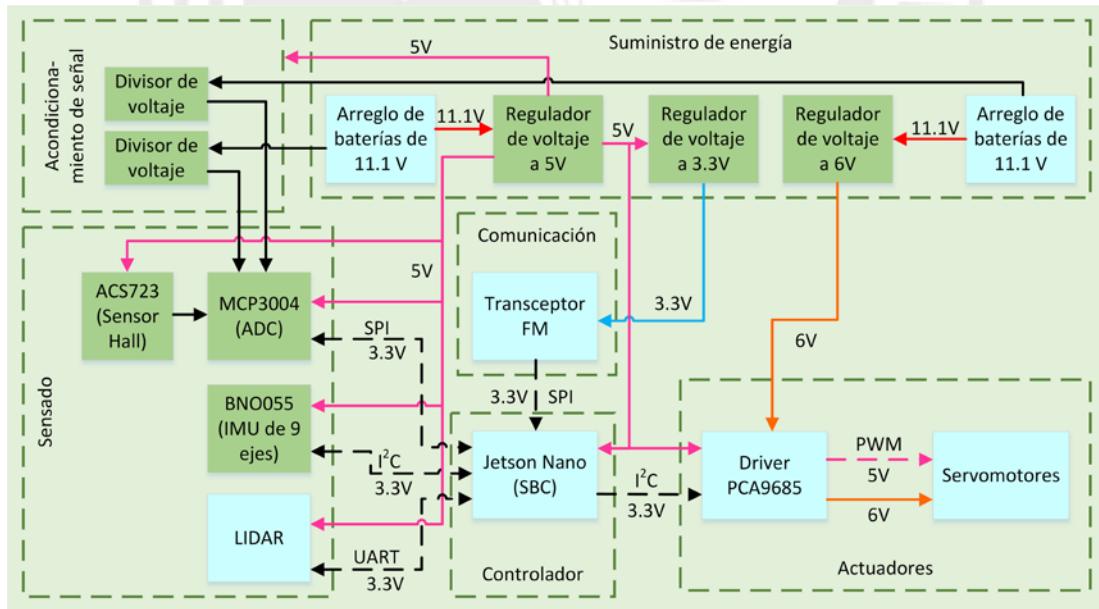


Figura 5.13: Diagrama de bloques del sistema electrónico del robot. Elaboración propia.

## 5.3. Diseño y simulación de la fuente de voltaje para el transceptor

De acuerdo a la Tabla 5.22, se requiere de un voltaje regulado de 3.3 V @ 13.5 mA para el transceptor. Por ello, se hace la selección del diodo zener 1N4728A, cuyas características más importantes se muestran en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28: Características más importantes del diodo zener 1N4728A. Fuente: [www.vishay.com](http://www.vishay.com).

Voltaje de regulación [V]	Potencia [mW]	Corriente de regulación mínima [mA]	Masa [g]	Precio [USD]
3.3	1000	76	0.35	0.207

El circuito diseñado tiene una resistencia limitadora de valor  $R_1 = 56 \Omega$  (valor comercial según el estándar E24 [79]), la cual es calculada en el Anexo C. Se modela el transceptor como una corriente sinusoidal, cuyas características se muestran en la Tabla 5.29. Se busca simular las fluctuaciones del consumo de corriente del transceptor, respetando el consumo máximo indicado en Tabla 5.19.

Tabla 5.29: Características del consumo de corriente simulado del transceptor. Elaboración propia.

Corriente DC [mA]	Corriente AC [mA]	Corriente mínima [mA]	Corriente máxima [mA]	Frecuencia [Hz]
8.4	5.1	$8.4 - 5.1 = 3.3$	$8.4 + 5.1 = 13.5$	5

El circuito resultante se muestra en la Figura 5.14, el cual incluye las sondas que miden las variables de interés durante la ejecución de la simulación.

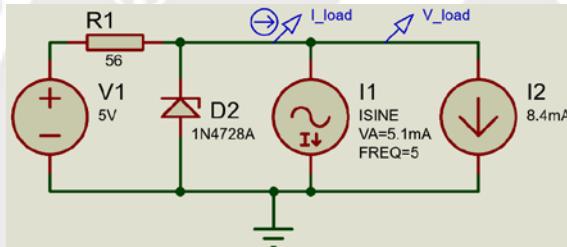


Figura 5.14: Simulación del circuito regulador de voltaje diseñado para el transceptor. Elaboración propia.

En la Figura 5.15, se muestran los resultados de la simulación. Se emplea el software CAD electrónico llamado Proteus Design Suite v8.7 (marca con derechos reservados por “Labcenter Electronics Ltd.”). Se observa que el voltaje mínimo y máximo de la carga, que en este caso sería el transceptor, oscila entre 3.34 y 3.40 V. Dichos valores ocurren cuando la corriente de la carga es máxima y mínima respectivamente. Se comprueba que el voltaje de salida está en el rango permitido para la alimentación del transceptor (de 1.9 a 3.6 voltios, véase la Tabla 5.18).

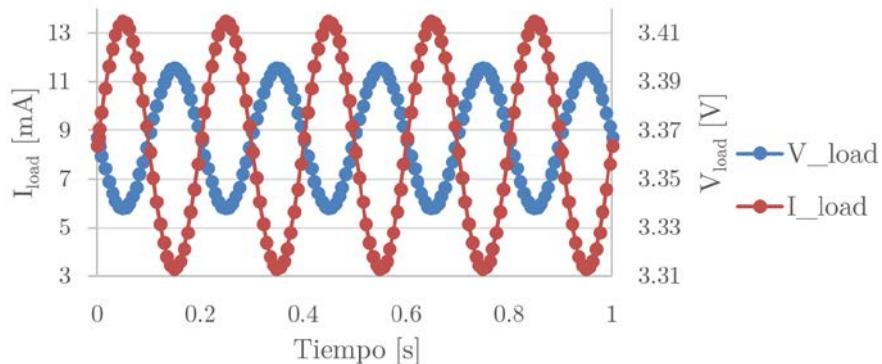


Figura 5.15: Resultados de la simulación de la fuente diseñada para el transceptor. Elaboración propia.

Sin embargo, el fabricante recomienda colocar un condensador en paralelo a la tensión de entrada, de un valor de  $10 \mu F$  como mínimo, para estabilizar el voltaje ante picos de corriente consumida en estado transitorio por el transceptor. Para el diseño, se utilizará un capacitor de  $47 \mu F$ , cuyos parámetros electrónicos se muestran en la Tabla 5.30. El parámetro utilizado para elegirlo es el voltaje máximo que debe soportar el condensador, el cual debe ser mayor a  $5 V$ .

Tabla 5.30: Características más importantes del capacitor para la fuente de voltaje del transceptor.

Fuente: [www.mouser.com](http://www.mouser.com).

Capacitancia $\mu F$	Voltaje máximo [V]	Empaquetado	Tipo de montaje	Masa [g]	Precio [USD]
47	6.3	1206	SMD	0.02	0.13

#### 5.4. Diseño y simulación del circuito para la medición de la carga energética remanente en las baterías

Considerando que la carga restante de la batería Lumenier 2250 está relacionada linealmente con su valor mínimo y máximo de voltaje, se puede diseñar un circuito divisor de voltaje, de manera que se pueda medir dicha señal analógica en un rango que no supere la alimentación del módulo ADC ( $5 V$ , véase la Tabla 5.22).

Por seguridad, en el cálculo de las resistencias se asume que el tope superior del voltaje de entrada es  $14 V$ , el cual es mayor que el voltaje máximo que puede tener una batería Lumenier 2250 ( $12.6 V$ , véase la Tabla 5.26).

Se tiene siguiente la relación para cada divisor de voltaje (en el Anexo C, se detallan los cálculos correspondientes de los valores de las resistencias):

$$V_{BATT_X} = V_{B_{LEVEL_X}} \left( \frac{R_B}{R_A + R_B} \right) \quad (4.42),$$

donde:

- $V_{BATT_X}$ : Es el voltaje del arreglo de baterías  $X$ , en voltios.
- $V_{B_{LEVEL_X}}$ : Es la señal a ser medida por el módulo ADC, en voltios.
- $R_A$  y  $R_B$ : Son las resistencias superior e inferior del circuito, respectivamente. Sus valores están dados en ohmios.

En la Figura 5.16 se muestra la simulación del circuito realizada en el software Proteus Design Suite v8.7. Se modela el voltaje del arreglo de baterías como una señal sinusoidal que varía desde  $9 V$  hasta  $12.6 V$ , y se calcula el voltaje medido por el módulo ADC. No se requiere utilizar un circuito seguidor de voltaje, debido a que es despreciable el ingreso de corriente por el pin de medición de voltaje del módulo ADC.

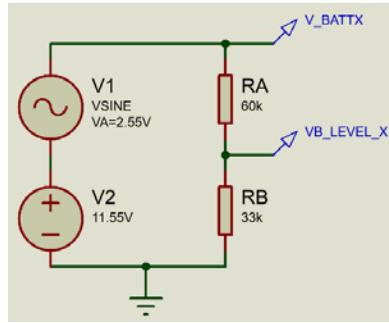


Figura 5.16: Simulación del circuito para medición de carga restante en los arreglos de baterías.  
Elaboración propia.

En la Figura 5.17, se tienen los resultados de la simulación. Se observa que para el rango de valores que puede tomar cada arreglo de baterías (9 V a 12.6 V, véase la Tabla 5.26), el valor de la tensión eléctrica que se mide en el módulo ADC MCP3004 varía desde 3.19 V hasta 4.47 V. Se verifica que las señales medidas no superan el voltaje máximo de alimentación (5 V, véase la Tabla 5.22).

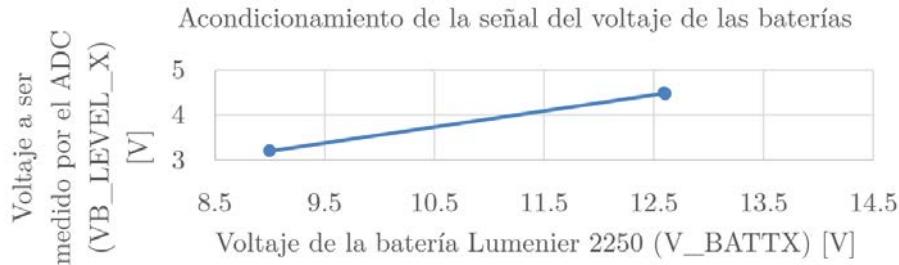


Figura 5.17: Acondicionamiento de la señal de voltaje de las baterías para la medición de carga restante.  
Elaboración propia.

Los circuitos resultantes (uno para cada arreglo de baterías) se muestran en la Figura 5.18. Se añaden capacitores para estabilizar las mediciones frente al ruido eléctrico.

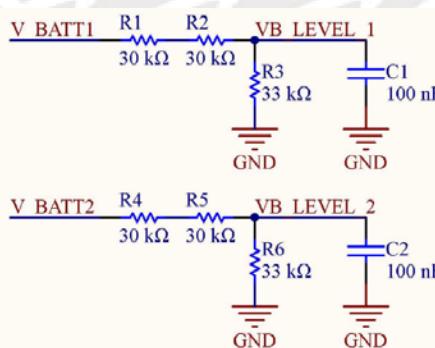


Figura 5.18: Circuitos para la medición de la carga restante en las baterías. Elaboración propia.

## 5.5. Diagramas esquemáticos

En la Figura 5.19, se tienen los diagramas esquemáticos del robot. Se muestran las interconexiones de los elementos que forman parte del circuito principal. Se incluyen los circuitos que fueron presentados previamente en la Figura 5.14 y en la Figura 5.18.

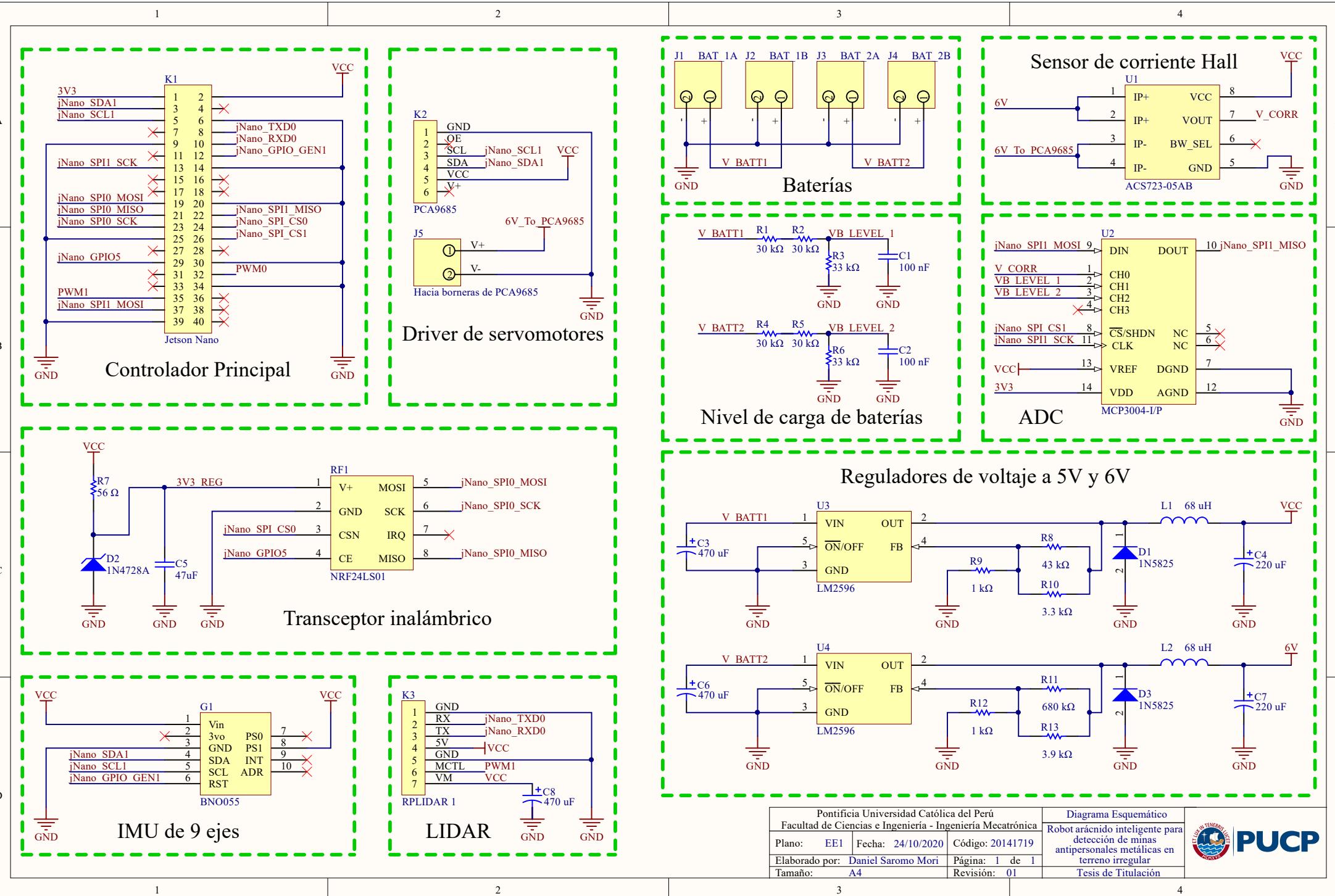


Figura 5.19: Diagramas esquemáticos del robot. Elaboración propia.

## 5.6. Placa de circuito impreso

En la Figura 5.20 se muestra la *placa de circuito impreso* (PCB, por sus siglas en inglés), tomando como base los componentes mostrados en los esquemáticos. Se realizó el modelamiento tridimensional de todas las piezas, para tener las dimensiones finales de la placa electrónica, las cuales son: 100 mm de largo y 100 mm de ancho.

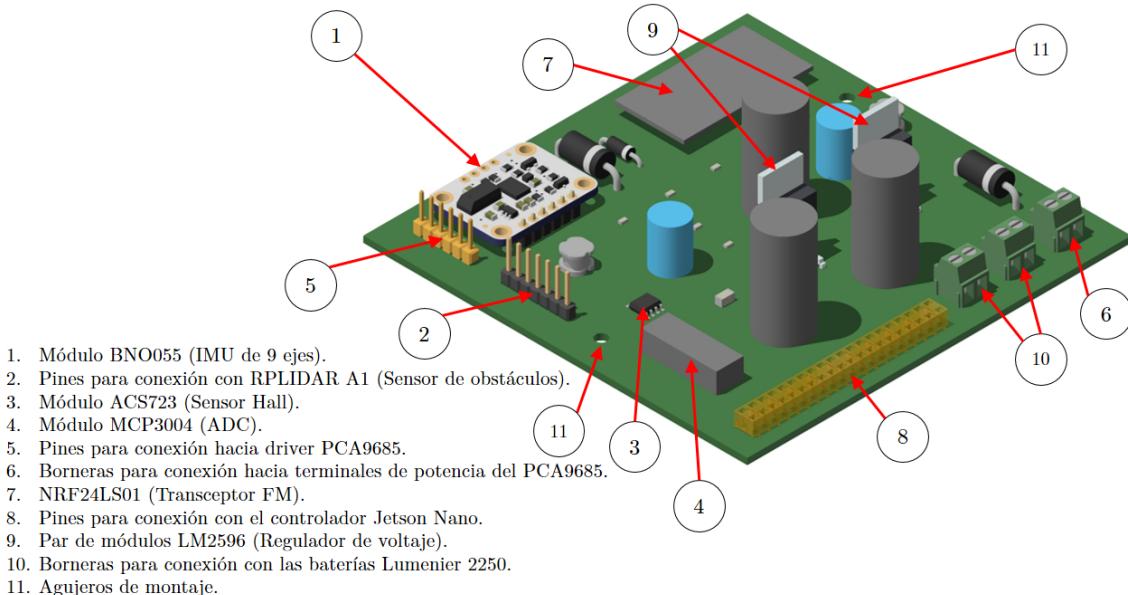


Figura 5.20: Modelamiento tridimensional del PCB. Elaboración propia.

Además, se indica la localización de los componentes más importantes del PCB. En el diseño, se consideró que los conectores deben estar posicionados en los bordes de la placa, para facilitar la interconexión con los elementos que no están en el PCB. Estos son: el sensor RPLIDAR A1, el driver PCA9685, el controlador Jetson Nano, y las cuatro baterías. Además, se generaron los agujeros de montaje, para fijar la tarjeta al tórax del robot mediante dos uniones atornilladas. Debajo de la misma, se colocará una plancha de trupán (fabricada mediante corte láser), para evitar cortocircuitos eléctricos no deseados entre los componentes, ya que la estructura del tórax del robot está fabricada con metal. Considerar que el elemento de índice 8 mostrado en la Figura 5.20 está compuesto por espadines macho. En la Figura 5.21, se muestra el PCB ensamblado al robot.

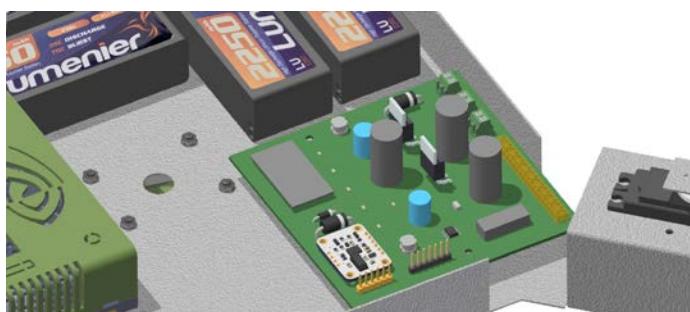


Figura 5.21: Tarjeta PCB en el robot. Elaboración propia.

## 5.7. Conexiones de elementos fuera del PCB

En la Figura 5.22, se muestra el diagrama de conexiones de los ocho servomotores del robot con el driver PCA9685.

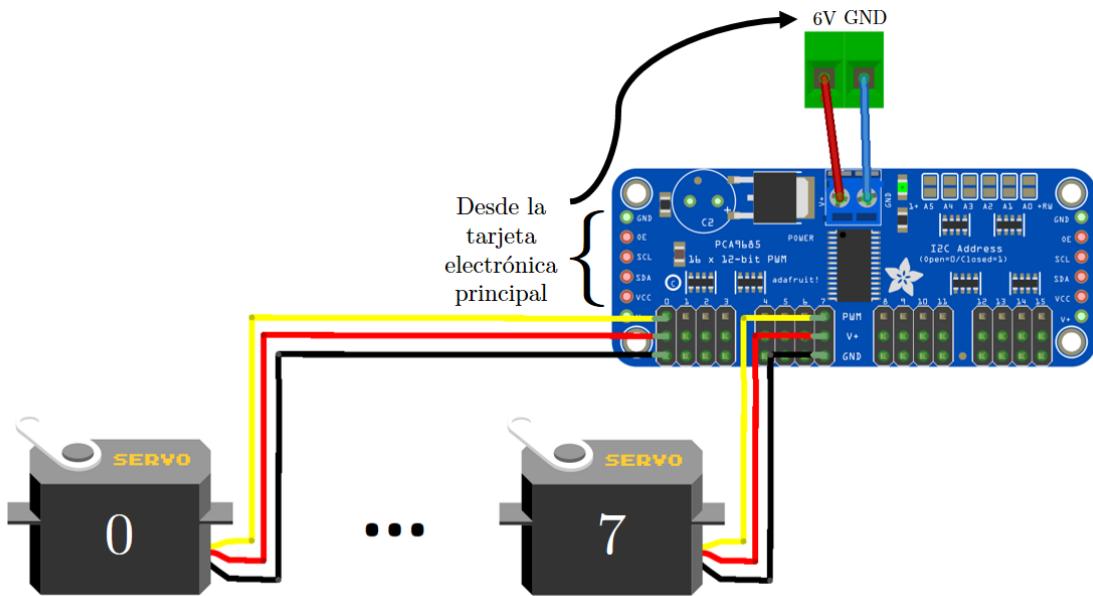


Figura 5.22: Diagrama de conexiones del driver PCA9685 a los servomotores. Elaboración propia.

El controlador Jetson Nano se conecta al PCB usando el cable flex mostrado en la Tabla 5.21. La conexión de los demás elementos hacia el PCB se realiza siguiendo las etiquetas presentes en la misma placa.

# CAPÍTULO 6: DISEÑO ALGORÍTMICO

En el presente capítulo se describen a detalle los algoritmos y su integración con el robot. En primer lugar, se presenta la arquitectura de control del sistema. En segundo lugar, se tiene una descripción de las funciones de navegación realizadas por algoritmos existentes en la literatura, la cual es complementaria a la revisión expuesta en la subsección 2.2.3. En tercer lugar, se muestra el proceso de segmentación de trayectorias, junto con una implementación (cuyos códigos de programación se encuentran en el Anexo D). En cuarto lugar, se analiza la influencia de la pose del robot y el consumo de corriente en los algoritmos de control de articulaciones. En quinto lugar, se expone a detalle el algoritmo híbrido propuesto para el control de las articulaciones del robot a un bajo nivel, el cual utiliza Inteligencia Artificial Bioinspirada y Aprendizaje Automático. En sexto lugar, se tiene el diagrama de flujo con la lógica general de control en un alto nivel. Los cálculos realizados en relación a los algoritmos se detallan en el Anexo C.

## 6.1. Arquitectura de control del sistema

En la Figura 6.1, se observa la arquitectura de control del sistema. Los bloques de color rojo son realizados por algoritmos ya existentes en la literatura. Dichos procesos corresponden a la localización del robot y mapeo del terreno, así como a la generación de trayectorias de cobertura completa. De acuerdo a los alcances de la presente tesis, estos algoritmos no van a ser desarrollados a detalle.

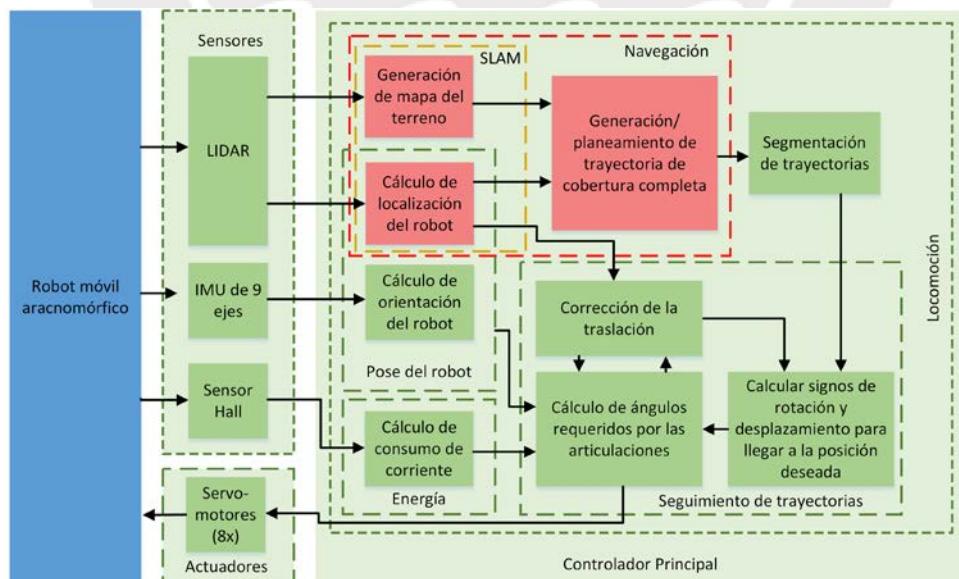


Figura 6.1: Arquitectura de control del robot. Elaboración propia.

En la etapa del diseño de los algoritmos, existen diversos *hiperparámetros* cuyos valores deben ser definidos durante la implementación del sistema completo, considerando viabilidad de tiempos y complejidad, así como el efecto que tiene cada hiperparámetro en el funcionamiento total del sistema.

En las siguientes subsecciones, se profundiza la descripción de los bloques internos de la arquitectura de control mostrada en la Figura 6.1.

## 6.2. Funciones de navegación

La navegación está compuesta por tres funciones: localización del robot, generación del mapa del terreno, y planeamiento de trayectoria de cobertura total. Estas funciones pueden ser ejecutadas por el algoritmo propuesto por Wong et al. [62], el cual fue descrito en la subsección 2.2.3. Este algoritmo recibe información en tiempo real proveniente del sensor LIDAR, y retorna la trayectoria a seguir por el robot, así como su ubicación en el terreno mapeado.

Considerar que las funciones de localización y generación del mapa, necesarias para la navegación, conforman un procedimiento de SLAM (como fue mencionado en la subsección 2.2.3 y señalado en la Tabla 3.7).

La trayectoria de cobertura total generada es entregada a la función de segmentación, mientras que la información de la localización del robot es utilizada por la función de seguimiento de trayectorias.

## 6.3. Segmentación de trayectorias

Una vez se tenga el recorrido deseado, se realiza la segmentación usando el método de interpolación segmentaria lineal, cuyos elementos son denominados *splines polinómicos de primer orden* [80]. Se busca dividir la trayectoria deseada en tramos rectos de poca distancia, de manera que el desplazamiento del robot sea simplificado en dos tareas: rotación sobre su propio eje vertical, y traslación recta sobre cada uno de dichos segmentos. La distancia de los trechos es un hiperparámetro del algoritmo general del sistema de navegación y control.

La obtención de splines a partir de una trayectoria puede ser realizada fácilmente usando las funciones de interpolación de la librería SciPy (versión 1.3.0 utilizada para el ejemplo mostrado líneas abajo). En la Figura 6.2, se observa la segmentación de una trayectoria arbitraria, cuyos códigos de programación se adjuntan en el Anexo D. Notar que, en general, la pendiente de los splines calculados varía en cada par de segmentos adyacentes. Para la nomenclatura del diseño, los nodos son las localizaciones del terreno que están en los extremos de cada segmento y lo delimitan. Además, considerar que el nodo inicial es etiquetado

como `listaNodos[0]` y coincide con la posición del robot en el momento de generación de la trayectoria. Asimismo, los delimitadores son los círculos de color verde que están en los extremos de cada segmento.

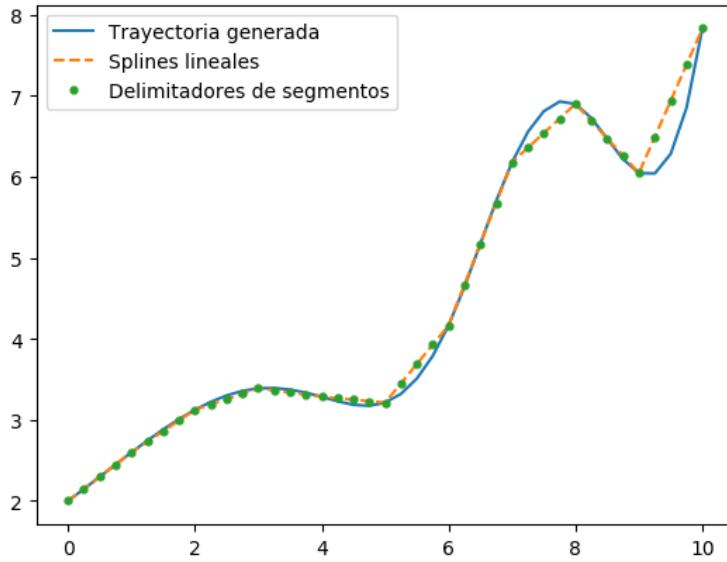


Figura 6.2: Segmentación de la trayectoria generada. Elaboración propia.

#### 6.4. Cálculo de la pose del robot

Se requiere la información de posición y orientación para tener completamente definida la pose del robot. La localización se obtiene del algoritmo de navegación. Un sensor de 9 GDL permite determinar la orientación tridimensional del robot, tal como fue mostrado en la matriz morfológica del apartado de telemetría (véase la Tabla 3.4). Se requiere ejecutar un procesamiento de las señales provenientes de dichos sensores, para calcular la orientación del robot. Dicho procedimiento es detallado en el Anexo C. De esta manera, se conoce toda la información de la pose del robot.

#### 6.5. Cálculo del consumo de corriente

Debido a que se trata de un robot móvil, es necesario optimizar el tiempo de autonomía energética. Entonces, un parámetro importante que debe ser medido es la corriente. Se busca que el robot ejecute movimientos que le permitan desplazarse por el terreno, a la vez que minimiza su consumo de corriente.

De acuerdo a la matriz morfológica del apartado de telemetría (véase la Tabla 3.4), el robot presenta un sensor de efecto Hall. Este sensor entrega una salida de voltaje que varía linealmente con la corriente medida. La relación numérica exacta entre dichas variables fue determinada luego de seleccionar el sensor de efecto Hall, en el capítulo de diseño electrónico (véase la Tabla 5.7).

## 6.6. Cálculo de los ángulos requeridos por las articulaciones utilizando Inteligencia Artificial Bioinspirada y Machine Learning

Como fue mencionado en la sección 6.3, la tarea de desplazamiento de un punto A hacia un punto B puede ser descompuesta en dos acciones: rotación y traslación (ejecutadas en ese orden). El control de las articulaciones durante la locomoción (también denominada caminata), será realizado mediante un algoritmo que combina IA Bioinspirada y ML. Por simplicidad, dicho algoritmo será denominado como *algoritmo híbrido*. Como se mostró en la estructura de funciones del robot (véase la Figura 3.5), los datos de entrada para esta etapa son los signos (sentidos) de rotación y traslación requeridos para llegar en línea recta a la posición deseada. Por lo tanto, se deben entrenar cuatro *agentes inteligentes* de predicción, uno para cada acción, con su signo respectivo. En otras palabras, se tienen las acciones de desplazamiento hacia adelante y hacia atrás, así como hacia la izquierda y hacia la derecha. Los datos de entrada permiten especificar cuál agente será usado en cada episodio de la caminata.

Se busca realizar un diseño sin pérdida de generalidad, por lo que la formulación del algoritmo híbrido se realiza de manera paramétrica.

### 6.6.1. Aspectos preliminares

- Discretización de ángulos de servomotores

Se discretizan las posiciones angulares de los servomotores para disminuir la complejidad de la etapa de entrenamiento del algoritmo híbrido. Se definen tres posiciones angulares permitidas para los ejes de los actuadores, las cuales se muestran en la Figura 6.3. Desde el punto de vista del algoritmo, el controlador envía una señal a los actuadores con el número que identifica a cada ángulo, y el servomotor internamente genera el lazo de control necesario para que dicho ángulo se mantenga fijo ante perturbaciones de cargas dinámicas (véase la subsección 5.1.6).



Figura 6.3: Posiciones angulares permitidas para los servomotores. Elaboración propia.

Los valores exactos de dichos tres ángulos son hiperparámetros que serán determinados en la implementación física del robot, pero el rango de valores angulares que puede tomar cada articulación fue definido en el capítulo de diseño mecánico. Se sugiere dividir el rango angular permitido en dos tramos contiguos de la misma amplitud, e iniciar el ajuste partiendo de dichos valores angulares.

- Nomenclatura y ángulos de los servomotores en el robot

Considerar que la variable  $M$  hace referencia a la cantidad de motores por cada pata, y que  $L$  es la cantidad total de patas del robot. En el robot, se tiene que  $M = 2$  y que  $L = 4$ , como fue mostrado en la Figura 3.14 y en la Figura 4.2.

En la Figura 6.4, se observa la distribución de los ocho servomotores en el robot ( $M * L = 2 * 4 = 8$ ), así como sus tipos (los cuales fueron definidos en la sección 4.2). Las patas se identifican por el valor  $i$  de la variable  $p_i$ . Para los actuadores de tipo A, se muestran con flechas de color negro las etiquetas de las tres posiciones angulares discretizadas. Para los actuadores de tipo B, el ángulo que hace que el extremo de la pata esté en su punto más bajo es la posición angular 0, mientras que el ángulo que hace que tenga su máxima elevación es la posición angular 2. Las posiciones angulares de los actuadores mostradas en la Figura 6.3, corresponden a servomotores de tipo B.

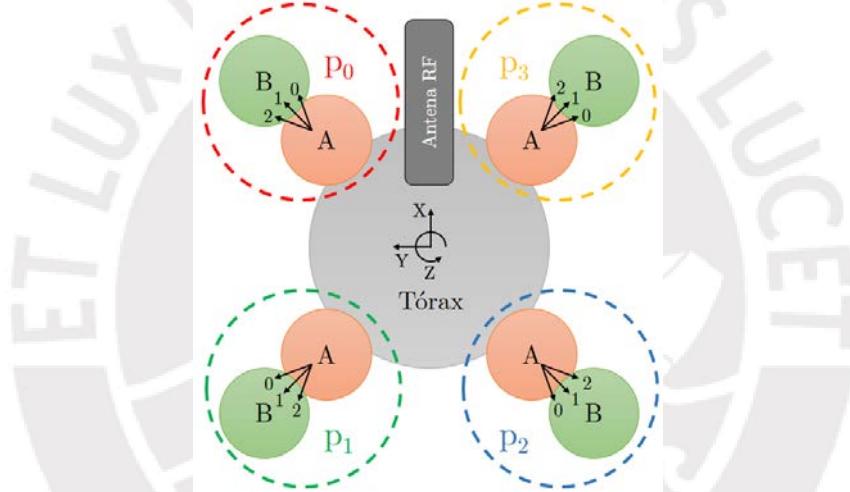


Figura 6.4: Distribución de los servomotores en el robot y ejes de referencia para traslación y rotación.  
Elaboración propia.

Se define la dirección *hacia adelante*, como la orientación a la que apunta la antena RF. Por otro lado, los ángulos que el robot debe girar para apuntar hacia siguiente nodo del desplazamiento, se miden considerando que la dirección de la antena RF es cero radianes y que la dirección creciente es en sentido antihorario (véase la Figura 6.4).

El sistema de coordenadas  $XYZ$  mostrado en la Figura 6.4 es solidario al robot. Los ángulos roll-pitch-yaw (RPY), se miden con respecto a los ejes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , respectivamente. De esta manera, la orientación tridimensional se representa como tres rotaciones ortogonales en torno a tres ejes:  $X$  (roll),  $Y$  (pitch), y  $Z$  (yaw).

- Configuración de las articulaciones

Una *configuración de las articulaciones* es el conjunto de  $\eta = M * L$  valores que representan todas las posiciones angulares que toman las articulaciones del robot, en un instante determinado. Para el robot diseñado, se tiene que  $\eta = M * L = 2 * 4 = 8$ . Por otro lado, de aquí en adelante, se denominará *valor de un actuador* a la posición angular que tiene su articulación asociada. Considerar que el servomotor internamente cierra el lazo de control para mantener la posición angular que se le indique a través de los comandos de control PWM.

### 6.6.2. Etapa de predicción usando técnicas de Machine Learning

- Transiciones entre estados del robot

Se define como *estado*  $E_k$  en un *instante k*, al conjunto de valores de los actuadores  $a_k$  junto con las mediciones de los sensores  $s_k$ . Simbólicamente, se tiene que  $E_k = \{s_k, a_k\}$ . En otras palabras, el vector correspondiente al estado  $E_k$  es el resultado de concatenar los vectores  $s_k$  y  $a_k$ . Para pasar de un estado  $E_{k-1}$  a un estado  $E_k$ , se ejecuta un *paso*, cuyas etapas internas se describen en la Figura 6.5. El flujo temporal de los procesos internos de un paso es mostrado con flechas de líneas continuas. Se considera que  $k$  es el estado “actual” y que  $S$  hace referencia a la cantidad de mediciones de los sensores realizadas en cada estado. Las mediciones recibidas de los sensores permiten evaluar la eficiencia de la caminata y la estabilidad del robot, y serán descritas más adelante en esta sección. El esquema mostrado en la Figura 6.5, es utilizado cuando el robot requiere determinar los ángulos de sus articulaciones para ejecutar la acción de rotación y la acción de desplazamiento en línea recta. En el diagrama de flujo de la lógica general de control del robot, se determina en qué momento el agente debe realizar cada acción. Recordar que los signos (sentidos) de dichas acciones, es un dato de entrada para determinar cuál es el agente inteligente que será utilizado.

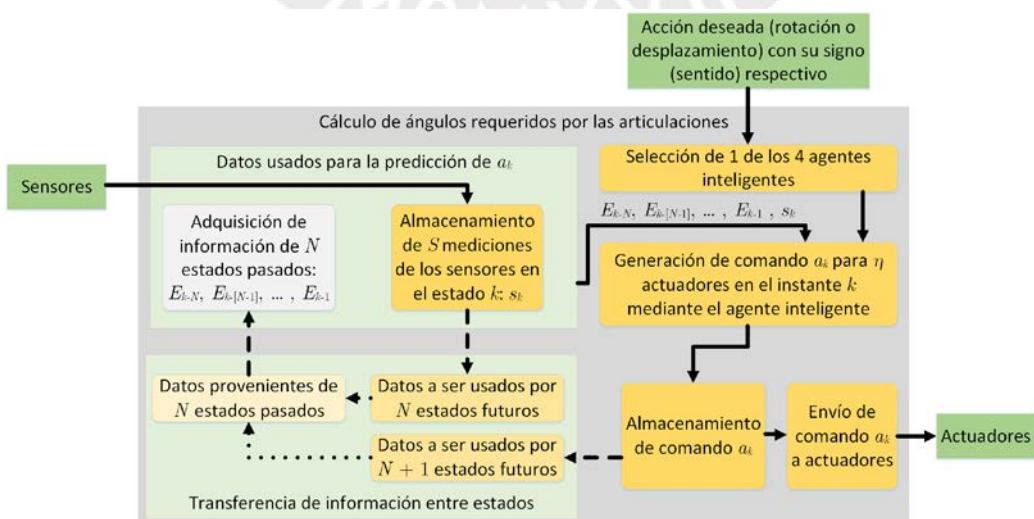


Figura 6.5: Etapas que conforman un paso  $k$  de la caminata del robot. Elaboración propia.

- Mediciones sensoriales relevantes para aprendizaje y predicción

De la información de su pose, el robot necesita conocer tanto su posición como el valor de su ángulo yaw, para verificar que está avanzando en la dirección deseada. Por lo tanto, se requiere conocer su ubicación. Esta es medida por el procedimiento SLAM del algoritmo de navegación del robot utilizando coordenadas cartesianas con respecto de un sistema de referencia  $X_OY_O$  fijo en tierra. Además, se requiere que durante su locomoción, mantenga su cuerpo central lo más horizontal posible, lo cual se puede lograr tratando de mantener nulos los ángulos roll y pitch. Asimismo, se busca que la caminata minimice el consumo de corriente que hacen los servomotores, por lo que el algoritmo debe aprender pasos energéticamente eficientes.

Entonces, las mediciones sensoriales requeridas por el algoritmo son: posición en eje  $X_O$  y en el eje  $Y_O$ , los ángulos RPY, y la corriente consumida. De esta forma, se tiene que la cantidad de variables sensadas en cada instante  $k$  es  $S = 6$ .

- Objetivos de los agentes predictores: rotar y desplazar el robot

Dada una configuración del robot (con ciertas condiciones iniciales), se tienen cuatro agentes de inferencia. Estos se entrena para predecir cuales deben ser los siguientes valores angulares de los  $\eta = 8$  actuadores, de manera que el robot cumpla la acción asociada a cada uno de ellos, tomando como entrada información actual y pasada del robot (este procedimiento es explicado a detalle en la presente sección). Es decir, un agente se encarga de predecir la configuración de las articulaciones del siguiente estado del robot, que permita que el robot gire con un desplazamiento yaw positivo; otro agente para la rotación en otro sentido; otro agente va a aprender a ejecutar un paso que desplace al robot en línea recta *hacia adelante*; y el último agente va a aprender cómo generar un desplazamiento hacia atrás. Bajo este esquema, para cada agente predictor de determinada acción con su signo respectivo (sea rotar o desplazar al robot), se requieren de  $\eta = 8$  clasificadores de un *target* (variable objetivo) cada uno. Se puede observar que se trata de un problema de Machine Learning Supervisado. Considerar que son  $\eta = 8$  targets, debido a que son ocho los números que describen completamente una configuración física del robot, ya que esa es la cantidad de GDL que presenta.

- Información necesaria para la predicción del siguiente estado

Con el objetivo de saber cuál debe ser la siguiente configuración de los actuadores al momento de seguir el patrón y así cumplir una tarea determinada (rotar o desplazarse, en cierto sentido), se considera que únicamente se necesita conocer el valor de los sensores del robot en el momento de realizarse la predicción ( $s_k$ ) y la información de los  $N$  estados anteriores, como se observa en la Figura 6.5. En

otras palabras, se requieren valores pasados de actuadores y mediciones pasadas de los sensores, además de la medición sensorial actual. Para el diseño, se asume que con  $N = 3$ , se tiene información suficiente para realizar la predicción.

En la Figura 6.6 se muestra el proceso de predicción del vector de valores de los actuadores del instante  $k$  ( $a_k$ ). Nuevamente, las líneas con flechas continuas indican el flujo temporal, y permiten identificar el orden en el que se consigue la información para cada uno de los estados  $E_k$ . Considerar que se elige uno de los cuatro agentes inteligentes, dependiendo de los sentidos de rotación y desplazamiento ingresados a esta etapa de cálculo de ángulos de las articulaciones, como fue mostrado en la arquitectura de control (véase la Figura 6.1).

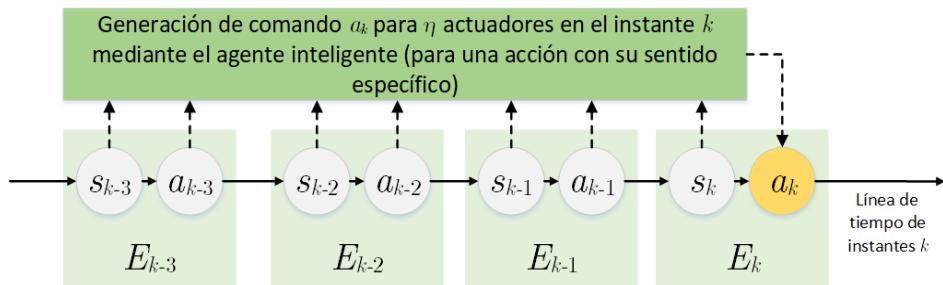


Figura 6.6: Predicción de ángulos de las articulaciones para el instante  $k$  para  $N = 3$ . Elaboración propia.

El algoritmo diseñado calcula los ángulos requeridos por las articulaciones, de manera que el robot pueda seguir la trayectoria previamente generada y segmentada. Una vez el robot adopte físicamente la configuración generada por el agente predictor, se toman y se almacenan las mediciones de los sensores. Luego, se procede a hacer la predicción para el siguiente instante, y así sucesivamente.

Es importante notar que la cantidad de combinaciones de las posibles posiciones angulares que pueden tomar en conjunto todas las articulaciones del robot, hacen que el planeamiento de la trayectoria en robots con locomoción por patas sea compleja y de alto costo computacional. Es por ello que se diseña el robot con simetría bilateral. Se tiene un plano vertical que divide a la estructura mecánica en dos secciones simétricas: izquierda y derecha (véase la Figura 6.4). De esta manera se reducen las configuraciones posibles del robot (véase el Anexo C).

- **Agentes predictores: esquema de entradas y salidas**

Recordar que  $s_k$  y  $a_k$  son vectores que contienen la información de los sensores y valores de los actuadores, para el instante  $k$ . Se tiene que estos vectores tienen longitud de  $S = 6$  y  $\eta = 8$ , respectivamente. En la Figura 6.7, se observan las variables de entrada y salida de los predictores durante la locomoción, de acuerdo a la leyenda de colores mostrada en la Tabla 6.1. Notar que el signo de las rotaciones y desplazamientos es un dato de entrada para el algoritmo híbrido.

Instante (k)	Variación de estados en cada instante											
	E <sub>-3</sub>	E <sub>-2</sub>	E <sub>-1</sub>	E <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	
0	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
1	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
2	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
3	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
4	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
5	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
6	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	
7	s <sub>3</sub> a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub> a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub> a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub> a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub> a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub> a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub> a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub> a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub> a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub> a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub> a <sub>7</sub>	

Figura 6.7: Variación del uso de los agentes durante la locomoción del robot.

Elaboración propia.

Tabla 6.1: Leyenda de los colores de fondo de las casillas de la Figura 6.7. Elaboración propia.

Acción a ejecutar por el agente	Variables para los $\eta = 8$ predictores de cada agente	
	De entrada	De salida
Rotación		
Desplazamiento		

El uso de un agente para la rotación y otro para la traslación es alternado, ya que el robot busca ejecutar intermitentemente giros y desplazamientos (en ese orden), para realizar el seguimiento de la trayectoria segmentada. Sin embargo, el entrenamiento de los agentes se realiza individualmente.

Durante la caminata, se sigue la estructura de cada paso, que fue presentada en la Figura 6.5, y detallada en la Figura 6.6. Como se observa, se requieren inicialmente  $N = 3$  estados (instantes con valores negativos de  $k$ ), para poder empezar a ejecutar el algoritmo. Para estas condiciones iniciales, se deben generar comandos con valores aleatorios para los actuadores, y así el robot pueda explorar un poco el terreno antes de iniciar con su locomoción. De esta manera, se tiene que los agentes tienen la arquitectura externa descrita en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Arquitectura externa de los agentes inteligentes. Elaboración propia.

Cantidad de entradas	Cantidad de salidas
$N * \eta + (N + 1) * S = 3 * 8 + (3 + 1) * 6 = 48$	$\eta = M * L = 2 * 4 = 8$

La selección del modelo de inferencia a utilizarse solo puede ser realizada una vez se tengan datos experimentales con los que entrenar los agentes inteligentes. Debido a su plasticidad en el modelamiento de patrones complejos, se sugiere utilizar modelos de ANN para los predictores.

Asimismo, para poder implementar el algoritmo de ML, se requiere una base de datos con la cual entrenar el modelo. Debido a que se requieren datos aplicados específicamente para el robot diseñado en la presente tesis, se tendrá que generar dicho *dataset*. Con el fin de determinar cuáles son las secuencias más adecuadas

que permiten que el robot genere determinada acción, y usarlas en el entrenamiento de los predictores, se requiere una *función de recompensa* (o *fitness*) que las califique numéricamente.

### 6.6.3. Etapa de generación del dataset

- Funciones de recompensa o fitness

La función de recompensa utilizada durante el entrenamiento es lo que distingue al agente predictor para la acción de rotación del agente encargado de generar los comandos de traslación. Se propone que esta función de fitness sea una suma ponderada de las mediciones de los  $S = 6$  sensores dada cierta configuración del robot, cuyos coeficientes son hiperparámetros que deben ser ajustados con la implementación del robot. Es imposible poder determinar a priori los valores exactos de estos coeficientes sin tener datos experimentales, pero en la Tabla 6.3 se dejan planteados de forma cualitativa sus signos y sus magnitudes. Además, en dicha tabla se muestran los signos de los coeficientes para los agentes que realizan rotación y desplazamiento positivos. Para los dos agentes restantes, se coloca el signo opuesto a cada coeficiente de la ponderación. El sistema de coordenadas *XY* usado es solidario al robot, como fue mostrado en la Figura 6.4.

Tabla 6.3: Representación cualitativa de los coeficientes en las funciones de recompensa para las acciones positivas de locomoción (rotación y desplazamiento). Elaboración propia.

	Variable	Coefficiente	Justificación
Rotación	Desplazamiento lineal positivo en el eje <i>X</i>	---	Se espera que durante la rotación, el robot no experimente desplazamientos lineales
	Desplazamiento lineal positivo en el eje <i>Y</i>		
	Ángulo roll	-	Se busca que el robot se mantenga lo más horizontal posible pero sin restringirle libertad de balanceo
	Ángulo pitch		
	Desplazamiento angular positivo del ángulo yaw	+++	El objetivo de la rotación es girar en el sentido positivo del ángulo yaw
Desplazamiento	Corriente consumida	--	Los pasos ejecutados deben minimizar el consumo de corriente
	Desplazamiento lineal positivo en el eje <i>X</i>	+++	Se espera que el desplazamiento lineal sea únicamente sobre el eje <i>X</i> (en la dirección a la que apunta la antena RF)
	Desplazamiento lineal positivo en el eje <i>Y</i>	---	
	Ángulo roll	-	Se busca que el robot se mantenga lo más horizontal posible pero sin restringirle libertad de balanceo
	Ángulo pitch		
	Desplazamiento angular positivo del ángulo yaw	---	Se desea que el desplazamiento se haga en línea recta
	Corriente consumida	--	Los pasos ejecutados deben optimizar el consumo de corriente

Considerar que la suma ponderada es una función de recompensa que se busca maximizar, por lo que tendrá un valor numérico mayor si es que el robot se acerca al comportamiento deseado para la acción correspondiente a cada agente.

- **Definición del procedimiento para generación del dataset de entrenamiento**

Se hace un entrenamiento para cada una de las cuatro tareas a aprender. Dichas tareas corresponden a las acciones de desplazamiento y rotación, para los sentidos positivo y negativo. Luego del entrenamiento, se envían a los actuadores un número  $\tau_0$  de configuraciones aleatorias de los actuadores, y se guardan en memoria las mediciones de los sensores en cada uno de los instantes discretos. Este valor  $\tau_0$  es un hiperparámetro que controla un *tradeoff*: a mayor cantidad de datos recolectados, mayor desempeño predictivo del aprendizaje, pero también involucra un mayor tiempo. Se propone que  $\tau_0 = 1000$ , debido a la cantidad de entradas y salidas de los predictores (véase la Tabla 6.2). Luego, para tener una mayor rapidez de cómputo, se calcula de manera offline el valor de la función de recompensa para cada una de dichas configuraciones. Los coeficientes del fitness varían de acuerdo a la acción a aprender, siguiendo las directivas de la Tabla 6.3. Después, se conservan únicamente el  $\tau_{0_p} = 70\%$  de las muestras de mayor recompensa, y se las considera como el conjunto de datos para entrenamiento de los  $\eta = 8$  predictores por cada uno de los cuatro agentes inteligentes. El valor  $\tau_{0_p}$  es otro hiperparámetro.

#### **6.6.4. Etapa de optimización usando técnicas de Computación Evolutiva**

- **Reducción del espacio de búsqueda aplicando algoritmos genéticos**

A pesar de haber utilizado la simetría para la simplificación del espacio de estados del algoritmo, este número sigue siendo muy grande. Notar que la simetría reduce el espacio de estados relacionado a la acción de desplazamiento en línea recta. El cálculo del tamaño del universo de secuencias de configuraciones posibles del robot se realiza en el Anexo C.

Se propone aprovechar la existencia de una función de recompensa que clasifica a las muestras y acoplarla a un *algoritmo genético* (GA, por sus siglas en inglés [81]). De esta manera, se van a ejecutar en el robot secuencias que son parecidas a aquellas que ya han demostrado efectividad, utilizando de mejor manera el tiempo y esfuerzo aplicados a la ejecución del algoritmo en el robot físico. Se hace la descripción del algoritmo genético, de manera general, por lo que es aplicable a cualquiera de las cuatro funciones de fitness correspondientes a cada una de las tareas que debe aprender el robot. Considerar que el símbolo para hacer referencia

a cualquiera de las cuatro funciones de recompensa es  $\mathcal{F}(s_u)$ , las cuales se evalúan para un conjunto de mediciones de sensores  $s_u$  en un instante  $u$ .

Sin embargo, aún con el enfoque de algoritmos genéticos, se requiere una exploración inicial aleatoria, para así tener la población inicial con la que ejecutar la optimización genética. Entonces, se hace la ejecución de  $\tau_0$  configuraciones aleatorias, para así obtener  $\tau_0 - N$  muestras. Recordar que  $N = 3$ . En la Figura 6.8, se muestra el proceso de obtención de los primeros 8 individuos para el GA. Se observa que se tiene un único conjunto de mediciones de los sensores ( $s_{-3}$ ) obtenido de condiciones físicas iniciales aleatorias. Es necesario generar reiteradas veces las  $\tau_0$  configuraciones iniciales, para aumentar la cantidad de muestras.

Iteración $h$	Variación de los estados en cada transición episódica																					
	E <sub>-3</sub>	E <sub>-2</sub>	E <sub>-1</sub>	E <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>											
0	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
1	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
2	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
3	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
4	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
5	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
6	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>
7	s <sub>-3</sub>	a <sub>-3</sub>	s <sub>-2</sub>	a <sub>-2</sub>	s <sub>-1</sub>	a <sub>-1</sub>	s <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	s <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	a <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>	a <sub>4</sub>	s <sub>5</sub>	a <sub>5</sub>	s <sub>6</sub>	a <sub>6</sub>	s <sub>7</sub>	a <sub>7</sub>

Figura 6.8: Exploración aleatoria de secuencias para generar población de individuos del GA.  
Elaboración propia.

En la Figura 6.9, se muestra el proceso de representación de un individuo  $j$  para el algoritmo genético, a partir de una de las  $\tau_0 - N$  muestras recolectadas.

Se observa que el valor de recompensa combina el fitness “actual” (para el estado  $j$ ) y el historial de fitness a lo largo de los  $N = 3$  estados anteriores. El símbolo  $\xi < 1$  representa al factor de decaimiento. Este hiperparámetro permite que el algoritmo genético no solo optimice su estado final, sino también las secuencias que le permitieron llegar hasta allí. Considerar que con un mayor valor de decaimiento, se tiene una mayor importancia de los estados pasados en el fitness. Se propone que inicialmente  $\xi = 0.85$ .

Como se observa en la Figura 6.9, el cromosoma de cada individuo, está formado por  $(N + 1) * (\eta) = (3 + 1) * 8 = 24$  genes, los cuales pueden tomar 3 valores como alelos, debido a que se discretizaron las posiciones angulares de los servomotores a dicha cantidad. Aquí resalta la ventaja de utilizar esta cantidad de valores, ya que reduce considerablemente el espacio de búsqueda del GA.

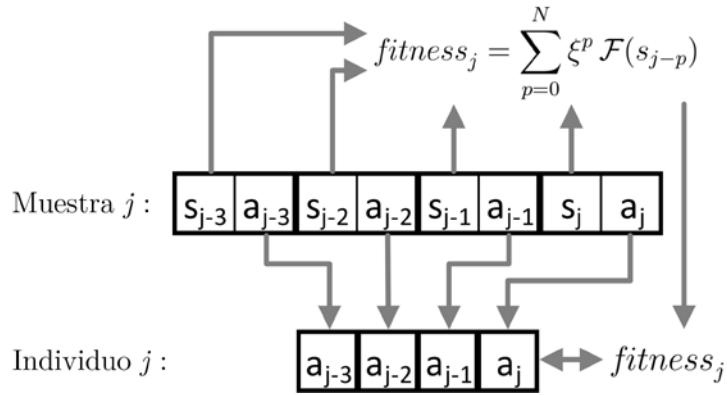


Figura 6.9: Generación del fitness y del individuo correspondientes a una determinada muestra en el GA.  
Elaboración propia.

- **Parámetros del algoritmo genético**

Los operadores genéticos de selección, cruzamiento, y mutación; deben ser elegidos y optimizados con datos experimentales. Sin embargo, se plantean los parámetros iniciales de acuerdo a las condiciones del problema. Estos parámetros son mostrados en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Parámetros propuestos para el algoritmo genético. Elaboración propia.

Tipo de operador genético	Elección	Justificación
Selección	Método de la ruleta	Este método es el más usado en problemas de maximización
Cruzamiento	Multipunto sin permutación: 3 puntos, $p_c = 0.6$	Debido a que no se tienen soluciones inadmisibles (cualquier configuración del robot con los 3 dígitos para los genes es realizable), no se requiere un operador de permutación. La probabilidad de cruzamiento en este tipo de operador suele ser entre 0.6 y 0.99.
Mutación	Bitwise para cada gen	Debido a que los alelos son valores enteros.

Con el objetivo de evaluar el valor de fitness de los individuos de las nuevas generaciones del algoritmo genético, se requieren sus respectivas mediciones de los sensores. Por ello, se tienen que ejecutar en el robot las secuencias de movimientos indicados en sus cromosomas, siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 6.8.

## 6.7. Cálculo de los sentidos de rotación y desplazamiento requeridos para llegar al siguiente nodo de la ruta segmentada

Luego de realizarse el entrenamiento del algoritmo híbrido, se tomarán muestras del ángulo que rota el robot en un paso de su caminata. La cantidad de muestras es un hiperparámetro. Se hace un ajuste gaussiano, para tener el valor de la esperanza (promedio) de la rotación, así como su desviación estándar.

En la Figura 6.10, se muestra un ajuste de distribución de probabilidad gaussiana, con datos arbitrarios, para ilustrar el método propuesto. Sus códigos de programación se encuentran en el Anexo D.

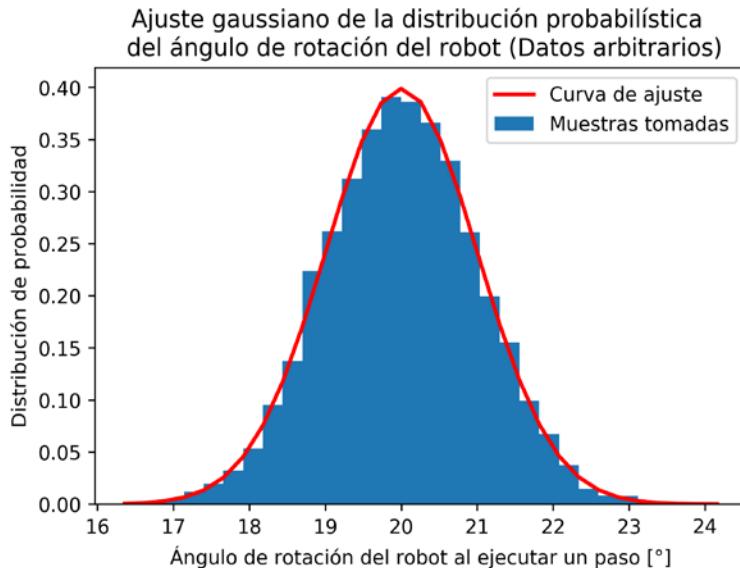


Figura 6.10: Ajuste gaussiano de la distribución probabilística de la rotación. Elaboración propia.

En la Figura 6.11, se muestra el diagrama de flujo que representa la lógica de la función de cálculo de sentidos de rotación y desplazamiento. La variable  $\alpha$  representa la dirección del vector traslación deseado, relativo el robot. Se observa que se multiplica por dos al valor de la desviación estándar, porque en una distribución probabilística gaussiana aproximadamente el 95% de todos los valores se encuentran en el rango de  $\mu \pm 2\sigma$ . De esta manera, se tiene que el valor esperado de la rotación es  $\phi \pm \delta$ .

Con respecto al cálculo del sentido de rotación, el algoritmo verifica si luego de girar un ángulo  $\phi$ , la posición angular final se encuentra cerca al ángulo  $\alpha$  en un valor de  $\delta$ , como mínimo. En otras palabras, la función comprueba si al rotar con determinada incertezza representada por la distribución normal, el rango de valores de salida incluye al ángulo  $\alpha$ . El signo de la rotación requerida se devuelve en la variable  $\gamma$ . Si no se requiere rotación, el programa devuelve un valor de  $\gamma = 0$ .

Se hace uso de la fórmula matemática del *arcotangente de dos parámetros* (*atan2*), debido a que esta función retorna el valor de la tangente inversa con su signo correspondiente, de manera que dicho ángulo calculado esté en el cuadrante correcto. Esto no ocurre si se usa la función de la arcotangente simple.

El producto punto de los vectores  $\vec{D}$  y  $\vec{V}$  se utiliza para obtener el sentido del desplazamiento. La función retorna  $\pi = 1$  si es hacia adelante, y  $\pi = 0$  si es hacia atrás.

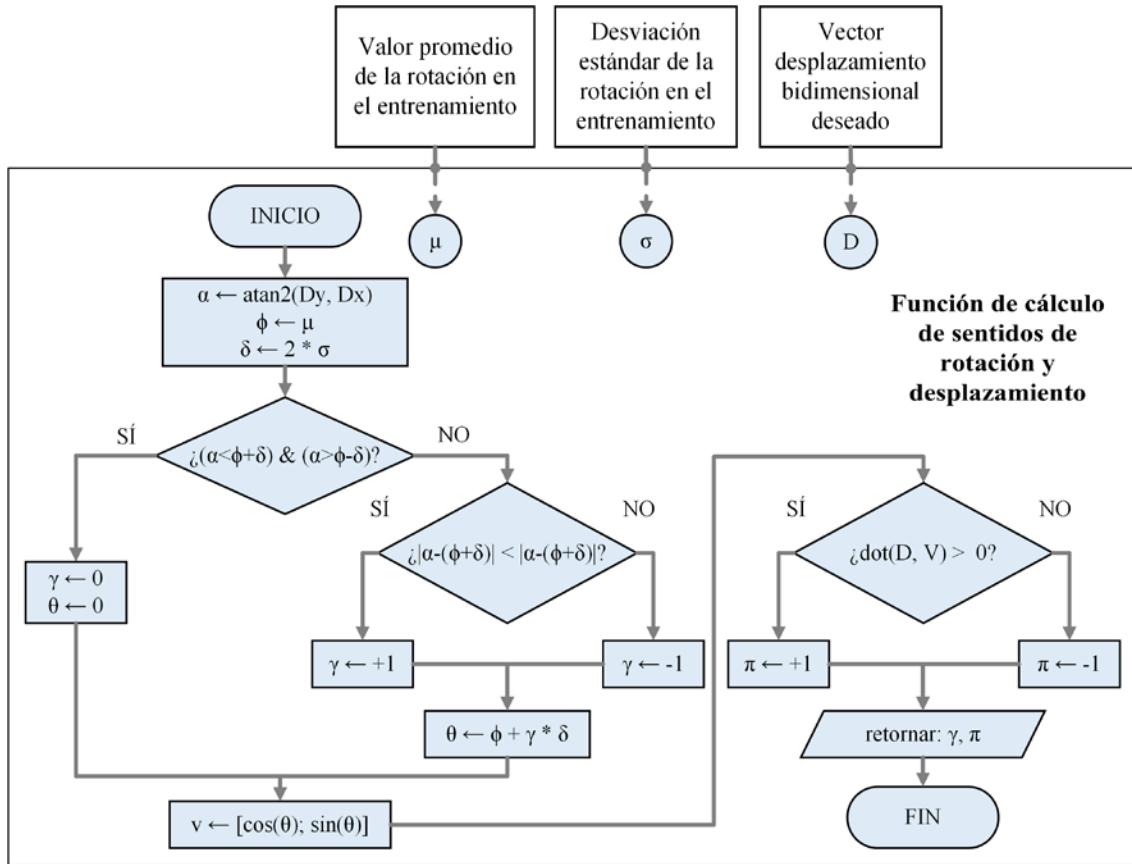


Figura 6.11: Diagrama de flujo de la función de cálculo de los sentidos de rotación y desplazamiento.  
Elaboración propia.

## 6.8. Lógica general de control

El algoritmo de traslación del robot, llamado **Función de Locomoción**, consta de tres etapas: generación, segmentación, y seguimiento de trayectorias. Esta función cubre la lógica general de control del robot. En la Figura 6.12, se describe dicha función mediante un diagrama de flujo. Esta se encarga de definir, en un alto nivel, la lógica que sigue el robot durante su desplazamiento, ya sea al momento de realizar el escaneo del terreno minado, o durante su locomoción hacia un punto de destino final previamente ingresado por el usuario en la terminal de control de la base remota. El cálculo de los ángulos que deben tener las articulaciones de las patas del robot será ejecutado por el algoritmo híbrido presentado en la sección anterior. Los valores de las variables  $A$  y  $B$  son ingresados desde la base remota, mientras que el valor del radio de tolerancia  $\rho$  es un hiperparámetro fijado en la etapa de pruebas preliminares del robot con el algoritmo híbrido ya entrenado, luego de evaluar el desempeño del seguimiento de trayectorias.

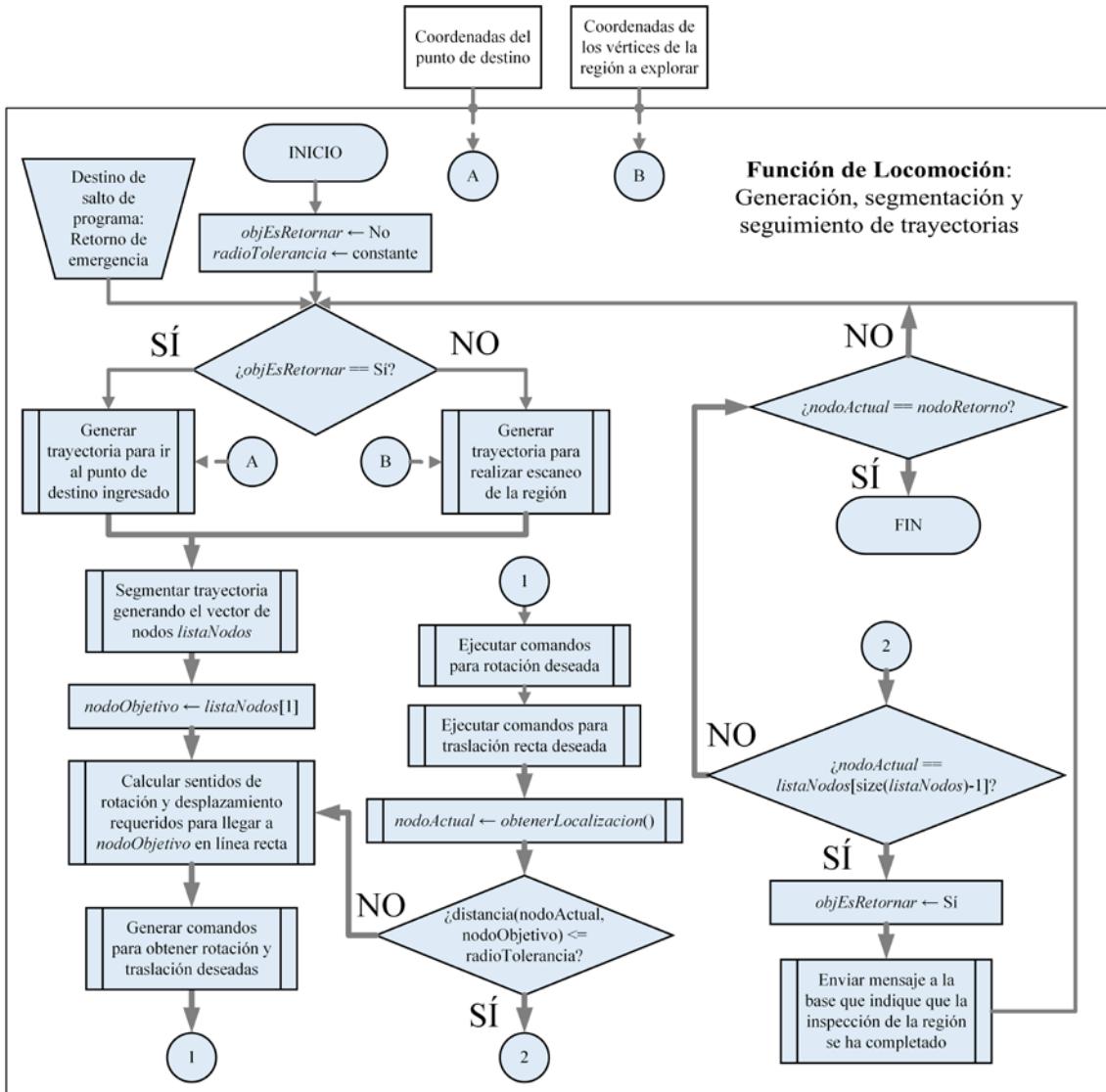


Figura 6.12: Diagrama de flujo del algoritmo de locomoción del robot. Elaboración propia.

Una condición esencial para realizar la segmentación de las trayectorias, es que la longitud de los tramos sea suficientemente pequeña como para que la aproximación mediante segmentación de la ruta (véase la sección 6.3) sea lo suficientemente parecida a la trayectoria original. Debido a que para realizar el escaneo de una zona se requiere que el robot pase encima de dicha área, es aceptable si, durante el seguimiento de trayectorias, el robot llega a pasar más de una vez por una misma zona. Sin embargo, este no es un comportamiento óptimo, y debe ser evitado (en lo posible) para reducir el tiempo de escaneo de la región completa. Esto se consigue ajustando correctamente los hiperparámetros de los algoritmos de seguimiento de trayectorias, y calibrando los algoritmos de navegación y segmentación.

La lógica de control presentada en el diagrama de flujo (véase la Figura 6.12), permite que el robot ejecute un seguimiento de la trayectoria ya segmentada. El

proceso de seguimiento de trayectorias se enfoca en trasladar al robot hacia el final de cada segmento de camino, considerando el posible error de no llegar a alcanzar dicha localización, al incluir el radio de tolerancia  $\rho$ .

En la Figura 6.13 se muestran un par de ejemplos de trayectorias siguiendo el procedimiento descrito en el diagrama de flujo (véase la Figura 6.12), para así tener un mejor entendimiento del algoritmo planteado.

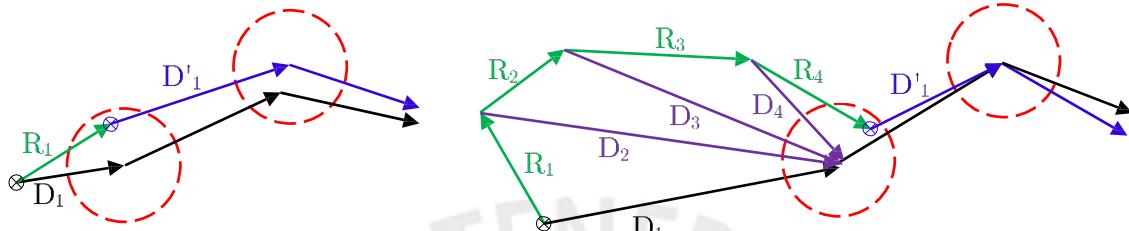


Figura 6.13: Verificación conceptual del algoritmo de locomoción. Elaboración propia.

La leyenda de símbolos utilizados se encuentra en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Leyenda de símbolos de la verificación conceptual del algoritmo de locomoción.  
Elaboración propia.

Símbolo	Descripción
$k$	Instante de la caminata.
$\vec{D}_k$	Trayectoria deseada del robot para el instante $k$ , como resultado de la generación y posterior segmentación de una ruta de cobertura completa.
$\vec{R}_k$	Trayectoria real del robot luego de ejecutarse los comandos correspondientes al instante $k$ .
$\vec{D}'_k$	Trayectoria deseada del robot para el instante $k$ , recalculada luego de que el robot logre alcanzar el nodo anterior, con un error menor al radio de tolerancia.

Se observa en la Figura 6.13 que si la posición final del robot luego de ejecutar un paso está dentro del radio de tolerancia, el nodo objetivo es el siguiente nodo de la trayectoria segmentada. De no ser así, el robot va a seguir intentando llegar a una posición dentro del radio de tolerancia.

Además, en la Figura 6.13 las flechas de color azul representan las trayectorias deseadas recalculadas, mientras que las flechas de color negro representan las trayectorias originales. Se puede observar que, en general, al recalcular las trayectorias no necesariamente se van a generar los mismos nodos que en el cálculo previo. Esto se debe a que desde la nueva posición real del robot, puede que el algoritmo generador de trayectorias de cobertura completa encuentre una

trayectoria óptima para el barrido del campo minado que sea distinta a la anterior. Además, se recalcula la trayectoria para que el robot pueda tener conocimiento del estado más reciente de los obstáculos en el terreno.

Durante la implementación, considerar que se envían las señales de control para generar el movimiento, con sus respectivos retardos vía software. Esto se realiza para garantizar que el siguiente comando sea enviado luego de que se hayan ejecutado físicamente los movimientos anteriores.

Por otro lado, se asume que el hiperparámetro de longitud máxima de los segmentos es suficientemente pequeño y que el algoritmo híbrido está adecuadamente entrenado, de manera que el desplazamiento del robot es despreciable durante la ejecución de la rotación.

En caso el robot detecte alguna falla (por ejemplo, si el nivel de carga de la batería es menor al mínimo requerido para que el robot opere adecuadamente), o si el robot recibe desde la base remota el comando de retorno, se hará la llamada a una función de interrupción, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 6.14. Al ser ejecutada, permitirá que el robot se aleje lo máximo posible del campo minado, dirigiéndose hacia las coordenadas del punto de retorno ya ingresadas.

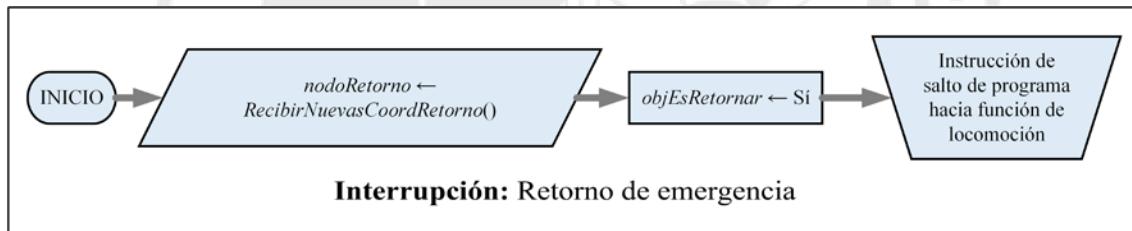


Figura 6.14: Diagrama de flujo de la función de interrupción para ejecutar el retorno de emergencia.  
Elaboración propia.

La instrucción de salto de programa mostrada en la Figura 6.14 se acopla al diagrama de flujo desarrollado en la Figura 6.12, pero conservando los valores de *nodoRetorno* y *objEsRetornar* asignados durante la interrupción.

## CAPÍTULO 7: INTEGRACIÓN DEL ROBOT ARÁCNIDO INTELIGENTE

El presente capítulo muestra la integración del sistema mecatrónico. Se tiene una descripción del sistema completo y de sus características más resaltantes. Además, se muestra la disposición de los componentes internos del robot. Finalmente, se explican los procedimientos a realizar para poder utilizar el sistema completo.

### 7.1. Descripción del robot arácnido inteligente para detección de minas antipersonales metálicas en terreno irregular

En la Figura 7.1 se observa una vista del modelamiento virtual del robot. Se resalta la capacidad del móvil para desplazarse en terreno irregular. Los ocho grados de libertad de las patas del robot le permiten explorar terrenos que los móviles convencionales (con locomoción basada en ruedas) no podrían.

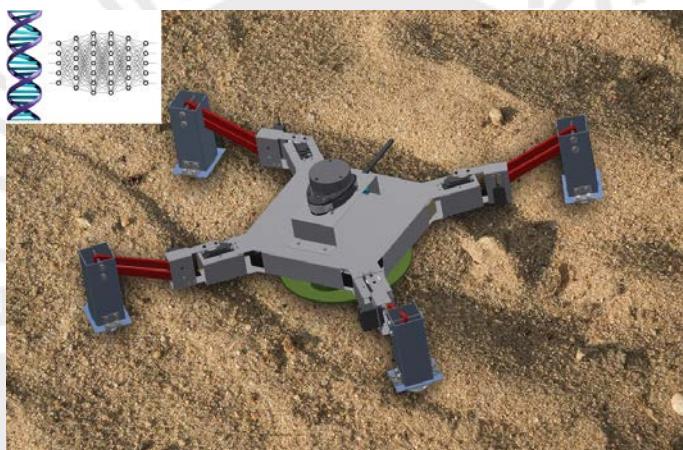


Figura 7.1: Modelamiento tridimensional del sistema mecatrónico. Elaboración propia.

Los detectores de minas comerciales más comunes tienen un ratio de falsos positivos del 99.9%. El robot presenta una marcada superioridad en su eficiencia de detección, ya que está diseñado para poder transportar un sensor de alta fiabilidad. Se eligió el sensor ALIS, cuya tasa de falsos positivos es de 35% [67].

Un aporte innovador del diseño radica en el algoritmo de locomoción propuesto. Esta metodología se basa en técnicas de Inteligencia Artificial Bioinspirada y Machine Learning (ML), lo que permite que el robot se adapte al terreno específico sobre el cual debe operar. Con un mayor uso del robot, este va a adquirir mayor experiencia de caminata, por lo que su desempeño mejorará con el tiempo.

Se realizó una vista seccionada del sistema para apreciar con mayor detalle la distribución de los componentes internos dentro del tórax del robot, la cual se presenta en la Figura 7.2. La cubierta que sostiene al sensor LIDAR y la tapa superior del tórax se muestran transparentes.

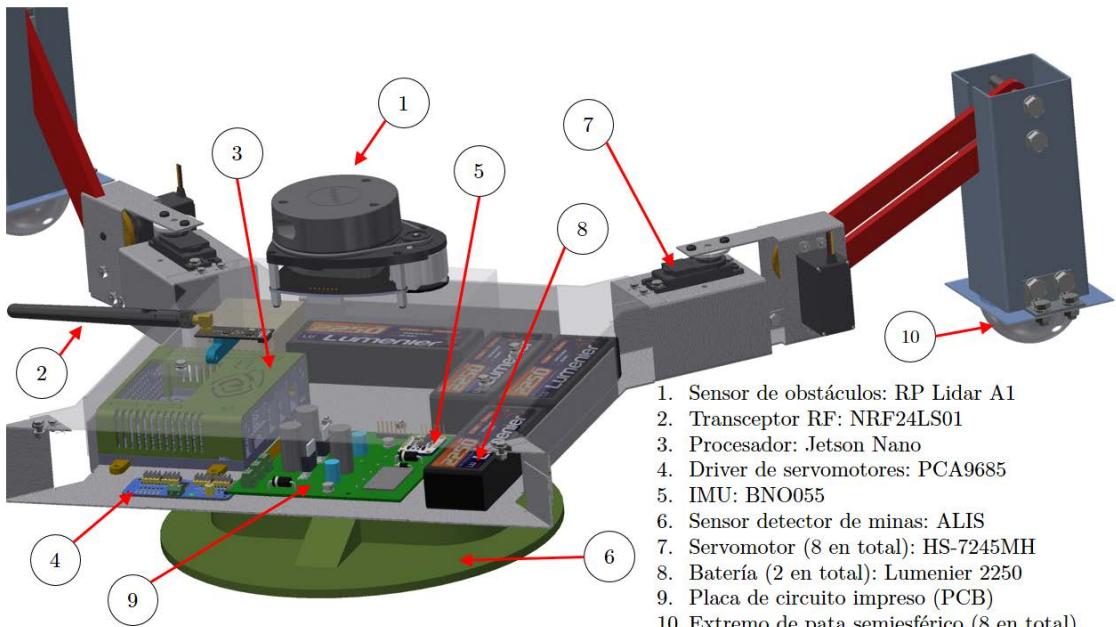


Figura 7.2: Modelamiento tridimensional del robot arácnido (vista seccionada). Elaboración propia.

## 7.2. Funcionamiento del sistema completo

Debido a que el control del robot se realiza con técnicas basadas en aprendizaje de máquina, se requiere de una etapa previa en la que el robot explore su entorno y aprenda a controlar su movimiento, basándose en su propia experiencia. Se tienen entonces tres etapas a realizar para lograr el funcionamiento del robot, las cuales son descritas a continuación. Las primeras dos etapas se realizan una única vez, mientras que la tercera etapa forma parte de la operación habitual del robot.

### 7.2.1. Etapa de entrenamiento del algoritmo híbrido

El entrenamiento del robot es realizado en un ambiente controlado. Se debe contar con un espacio en el que el robot sea libre de desplazarse y en donde haya presencia de obstáculos, como piedras u otros objetos que puedan ser colocados. Un campo de fútbol sin pasto podría ser un buen entorno a elegir. El objetivo de esta etapa es extraer información suficiente para el entrenamiento del algoritmo híbrido, de manera que el robot aprenda a controlar los ángulos de los actuadores de sus articulaciones (control de posición en un bajo nivel) que permiten que se ejecute la caminata. La definición del procedimiento para generar el dataset de entrenamiento, así como la descripción del algoritmo de locomoción; fue realizado en la sección 6.6, correspondiente al diseño del software de control.

### 7.2.2. Etapa de pruebas del algoritmo de seguimiento de trayectorias

Se traslada el robot hacia una región geográfica que tenga características similares a las del terreno minado que se desea explorar. En esta etapa se realiza el ajuste de los hiperparámetros del algoritmo de control de locomoción que permita que el

robot realice el seguimiento de trayectorias, el cual fue mostrado en el diagrama de funciones (véase la Figura 3.5). De esta manera, el robot va a aprender a desplazarse en un ambiente no tan ideal como el que tuvo en la etapa del entrenamiento del algoritmo, sino en un entorno con obstáculos y condiciones ambientales más realistas. Se busca que el ambiente de entrenamiento sea lo más parecido que se pueda al entorno final de operación del robot

### 7.2.3. Etapa de exploración del terreno minado

En primer lugar, se traslada el robot al terreno que se desea escanear. Se lo ubica en una posición conocida, de manera que se puedan calcular desde allí las coordenadas del polígono que delimita la región que se desea escanear. Se asume que se tiene información de las coordenadas de dichos vértices. Con el robot posicionado, los operadores lo encienden. Al ocurrir ello, se instancia el origen de coordenadas fijo en tierra ( $X_OY_O$ ), como la posición inicial en la que se encuentra el robot. Luego, los operadores se dirigen a la base remota, desde la cual se comunicarán con el robot. Se podrían tener un enjambre de estos robots, operando al mismo tiempo, para realizar el escaneo de una manera más rápida, los cuales serían monitoreados desde la base remota.

A continuación, se envía al robot las coordenadas de los vértices de la región a explorar, tomando como origen cartesiano a su posición inicial. Luego, los operadores ingresan las coordenadas del *punto de destino final*. Este punto podría ser la posición inicial del robot, o alguna posición en la cual se deseé recoger al robot, una vez terminado el proceso de escaneo de la región. Después de ello, se envía la señal de activación al robot para que inicie su funcionamiento.

El robot genera una trayectoria de cobertura completa, considerando que su ubicación final deseada es el punto de destino final previamente ingresado. El móvil se va a desplazar, mientras el arreglo de sensores de minas escanea continuamente el terreno. Internamente, el escáner de minas tiene una antena emisora de ondas electromagnéticas y otra receptora. El funcionamiento del detector de minas es independiente de los demás sistemas del robot, como fue mencionado en la sección 1.4. La información de los sensores de minas será almacenada, para poder generar un mapa de ubicación de las minas una vez se haya completado el escaneo de la región (es decir, de manera offline).

El robot ejecuta las funciones de generación, segmentación, y seguimiento de trayectorias, hasta que se haya cubierto el área cuyas coordenadas fueron ingresadas previamente. Finalmente, el robot llegará al punto de destino final y los operadores podrán ir a recogerlo en dicha ubicación.

## CAPÍTULO 8: ESTIMACIÓN DE COSTOS

En el presente capítulo, se hace una estimación de los costos relacionados a la implementación del robot. El detalle de los cálculos de los costos está en el Anexo C. Además, las cotizaciones correspondientes se encuentran en el Anexo H.

Se considera que los costos de importación son el 50% del precio del componente. Asimismo, las tasas de cambio son 1 USD = S/. 3.35 y 1 EUR = S/. 3.69.

### 8.1. Costos de materiales

En la Tabla 8.1, se presentan los costos de los componentes electrónicos presentes en el robot. Todos los componentes son importados del extranjero.

Tabla 8.1: Estimación de los costos de los componentes electrónicos del robot. Elaboración propia.

Dominio	Tipo de componente	Nombre del componente	Cantidad	Precio individual [S.]	Precio individual [S.]	Costo de importación [S.]	SUBTOTAL [S.]
Sensores	IMU	BNO055	1	34.95	117.08	58.54	175.62
	De obstáculos	RPLIDAR A1	1	114.95	385.08	192.54	577.62
	Sensor de minas	ALIS	1	3,500.00	11,725.00	5,862.50	17,587.50
	Sensor de corriente	ACS723 05B	1	5.27	17.65	8.83	26.48
	ADC	MCP3004	1	2.14	7.17	3.58	10.75
Actuadores	Driver de servos	PCA9685	1	14.95	50.08	25.04	75.12
	Servomotor	HS-7245MH	8	69.99	234.47	117.23	2,813.60
Comunicación	Transceptor	NRF24LS01	1	5.20	17.42	8.71	26.13
Control	Procesador central	Jetson Nano	1	99.00	331.65	165.83	497.48
Energía	Batería LiPo 2250 mAh	Lumenier	8	29.99	100.47	50.23	1,205.60
	Cargador	Tenergy TB6-B	1	64.99	217.72	108.86	326.57
Conexión	Cable Flex	GPIO Breakout RPi	1	3.75	12.56	6.28	18.84
COSTO TOTAL DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS [S.]							23,341.33

A continuación, la Tabla 8.2 muestra los costos de las materias primas necesarias para la manufactura de los componentes mecánicos.

Tabla 8.2: Estimación de los costos de las materias primas. Elaboración propia.

Cant.	Descripción de materia prima	Plano	Elementos relacionados	Costo de importación	Costo unitario	SUBTOTAL [S.]
1	Plancha de aluminio de 1 mm de espesor	L0.A	Base inferior del tórax	-	117.25	117.25
		L0.B	Base superior del tórax			
		L2.A	Unión del sensor ALIS con el tórax			
		L3.A	Unión de las patas con el tórax			
		L4.A	Cubierta superior			
		L4.B	Soporte para antena			
1	Plancha de aluminio de 0.5 mm de espesor	L3.B	Pie semiesférico	11.90	23.80	35.70
1	Plancha de trupán tamaño A4 de 3 mm de espesor	L1.A	Separador de baterías	-	5.00	5.00
		L1.A	Base para tarjeta PCB			
		L1.A	Base para controlador de servomotores			
1	Perfil de aluminio cuadrado L50x50x1.5 de 3 metros de largo	L3.C	Pierna perfil	-	81.51	81.51
4	Barra cuadrada de aluminio 6082 T6 de 45x45x540 mm	L3.D	Biel	18.04	36.09	216.53
			Manivela			
			Disco de unión			
COSTO TOTAL DE MATERIAS PRIMAS [S.]						455.99

## 8.2. Costo de fabricación y ensamble

En la Tabla 8.3, se tienen los costos de manufactura de las piezas del robot, según las cotizaciones realizadas (véase el Anexo H).

Tabla 8.3: Estimación de los costos de manufactura de las piezas mecánicas. Elaboración propia.

Cant.	Nombre del elemento	Plano	Proceso de manufactura	Costo de manufactura	SUBTOTAL [S.]
1	Base inferior del tórax	L0.A	Corte láser a aluminio	225.00	225.00
	Base superior del tórax	L0.B	Corte láser a aluminio		
	Unión del sensor ALIS con el tórax	L2.A	Corte láser a aluminio		
	Cubierta superior	L4.A	Corte láser a aluminio		
4	Unión de las patas con el tórax	L3.A	Corte láser a aluminio	25.00	100.00
	Pie semiesférico	L3.B	Corte láser a aluminio		
1	Base inferior del tórax	L0.A	Doblado de chapa	20.00	20.00
1	Base superior del tórax	L0.B	Doblado de chapa	15.00	15.00
1	Unión del sensor ALIS con el tórax	L2.A	Doblado de chapa	10.00	10.00
1	Cubierta superior	L4.A	Doblado de chapa	15.00	15.00
4	Unión de las patas con el tórax	L3.A	Doblado de chapa	25.00	100.00
4	Pie semiesférico	L3.B	Embutido	25.00	100.00
1	Base para tarjeta PCB	L1.A	Corte láser a trupán	1.00	1.00
	Separador de baterías		Corte láser a trupán		
	Base para controlador de servomotores		Corte láser a trupán		
4	Pierna perfil	L3.C	Corte con arco de sierra, taladrado y limado	15.00	60.00
4	Biela	L3.D	Fresado y taladrado CNC	20.00	80.00
4	Manivela	L3.D	Fresado y taladrado CNC	15.00	60.00
4	Disco de unión	L3.D	Fresado y taladrado CNC	10.00	40.00
1	Soporte para antena	L4.B	Impresión 3D	13.10	13.10
1	Placa de circuito impreso (PCB)	-	-	25.00	25.00
COSTO TOTAL DE MANUFACTURA [S.]					864.10

Asimismo, se tienen los costos de ensamble en la Tabla 8.4. El costo por hora es bajo, debido a que no se requiere de mano de obra altamente capacitada.

Tabla 8.4: Estimación de los costos de ensamble. Elaboración propia.

Cant.	Nombre del elemento	Plano	Horas estimadas	Costo/Hora	Costo de ensamble	SUBTOTAL [S.]
1	Ensamble General	L0	1.50	16.00	24.00	24.00
1	SE Base inferior	L1	4.50	16.00	72.00	72.00
1	SE Sensor de minas	L2	1.50	16.00	24.00	24.00
4	SE Pata	L3	3.00	16.00	48.00	192.00
1	SE Base superior	L4	1.50	16.00	24.00	24.00
1	Tarjeta PCB	-	6.00	16.00	96.00	96.00
Encargado de supervisión de la calidad del ensamble [S.]					432.00	
COSTO TOTAL DE ENSAMBLE [S.]					864.00	

### 8.3. Costo de diseño

En la Tabla 8.5, se muestra la estimación de los costos de diseño ingenieril.

Tabla 8.5: Estimación de los costos de diseño. Elaboración propia.

Rubro	Unidad	Valor
Honorarios por hora	S/. / hora	40.00
Cantidad de horas semanales	horas / semana	8.00
Cantidad de semanas	semanas	15.00
<b>COSTO TOTAL DEL SISTEMA</b>	S/.	<b>4,800.00</b>

### 8.4. Otros costos por hora

En la Tabla 8.6, se muestra la estimación de los costos de programación, el costo de las pruebas preliminares con el robot ya ensamblado y programado (tiempo requerido para poder ajustar los hiperparámetros, entre otras pruebas), el costo de traslado a la zona de operación (tiempo requerido para movilizar al robot desde y hacia la región que se desea escanear), y el costo por el tiempo requerido para realizar pruebas en la zona de operación (para hacer los ajustes finales para dejarlo listo para el usuario final). Notar que el costo de programación es el mayor de esta sección, tanto en cantidad de horas como en el costo por hora; ya que por tratarse de la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje de máquina, se requiere de un mayor tiempo y una mano de obra más especializada.

Tabla 8.6: Estimación de otros costos por hora. Elaboración propia.

Concepto	Horas estimadas	Costo/Hora	Costo [S.]
Programación	50	30.00	1,500.00
Pruebas preliminares	20	10.00	200.00
Traslado a zona de operación	10	20.00	200.00
Pruebas en zona de operación	5	15.00	75.00
<b>TOTAL DE OTROS COSTOS</b>			<b>1,975.00</b>

### 8.5. Costo total

En la Tabla 8.7, se tiene la estimación de la inversión económica necesaria para poder ejecutar el proyecto (en caso se quiera fabricar un único robot): S/. 32 800.42. Este valor equivale a \$ 9 791.17 (USD).

Tabla 8.7: Estimación del costo total del robot. Elaboración propia.

Rubro	Precio total [S.]
Componentes electrónicos	23,341.33
Materias primas	455.99
Fabricación	864.10
Ensamble	864.00
Diseño	4,800.00
Otros costos	1,975.00
Costos imprevistos	500.00
<b>COSTO DEL SISTEMA MECATRÓNICO</b>	<b>32,800.42</b>

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Conclusiones

- En la presente tesis, se logró diseñar un robot móvil que permite trasladar un sensor detector de minas antipersonales en terreno irregular. Este sistema mecatrónico utiliza extremidades articuladas para su locomoción, para tener flexibilidad de movimiento.
- La metodología seguida ha permitido diseñar el robot satisfaciendo los requerimientos definidos para el proyecto (véanse el subcapítulo 3.1 y el Anexo A).
- Se ha logrado diseñar un algoritmo innovador para el aprendizaje de una tarea de alta complejidad, como lo es el control de caminata de un robot móvil poliarticulado. Este algoritmo híbrido resuelve un problema de múltiples variables de salida, buscando optimizar una métrica de recompensa.
- Se ha logrado realizar un modelamiento dinámico del mecanismo de cuatro barras, el cual fue simulado en el software Simulink, considerando el análisis del hundimiento de las patas del robot delimitado en los alcances de la tesis.
- Si bien el costo total del robot es elevado (9 791.17 USD, véase el capítulo de costos, subcapítulo 8.5), representa alrededor del 60% del precio de los sistemas comerciales actuales (superior a 15 000 EUR, véase [41]). Sin embargo, estos últimos no basan su locomoción en patas, lo cual agrega una ventaja para el robot diseñado en la presente tesis.

- Recomendaciones

- Mejorar el robot para que sea capaz de detectar múltiples tipos de minas (además de las antipersonales metálicas), al portar sensores más avanzados. Estos explosivos podrían ser las minas antitanque o las que basan su activación en principios químicos, por ejemplo. Debido a que el sistema es modular, se le pueden acoplar fácilmente otros sensores utilizando una estructura apropiada de unión con el tórax del robot.
- Se podrían aplicar las ecuaciones, relaciones, y códigos de programación presentados en esta tesis, para otros proyectos que involucren el uso del mecanismo de cuatro barras utilizado en las patas del robot. Esto se puede lograr debido a que las formulaciones y simulaciones están parametrizadas.
- Mejorar el diseño mecánico al utilizar un mayor número de patas. Se incrementa la complejidad de la estructura y de los algoritmos de control,

pero este cambio permite que el robot tenga una mayor masa, al aumentar el área en contacto con el suelo.

- Con respecto al dominio electrónico, agregar sensores más sofisticados (como cámaras), para tener mayor información que puedan usar los algoritmos de navegación.
- Analizar experimentalmente el impacto de considerar que  $N = 3$  estados pasados es la cantidad ideal de información que se requieren los agentes inteligentes para determinar cuál es el siguiente paso de la caminata. Se necesitaría un número mucho mayor de datos para poder determinar si dicho valor es adecuado, o si es necesario modificarlo.
- Usar un enfoque de multiagentes robóticos, para aumentar la probabilidad de que las minas sean detectada correctamente. Esto se puede conseguir debido al bajo costo del sistema propuesto, en comparación con las demás alternativas encontradas [41]. Se ha encontrado en la literatura un análisis de las ventajas del uso de robots desminadores en enjambre, para el desminado humanitario, en un entorno simulado [82].
- Sería provechoso realizar la comparación entre el algoritmo de caminata propuesto contra los enfoques tradicionales para este tipo de tareas. Comúnmente, se usan técnicas de control moderno o aprendizaje por refuerzo. Debido a que ya se tiene definida la función objetivo a optimizar, esta puede ser utilizada como función de recompensa para un nuevo agente. Sin embargo, debido a que este enfoque de aprendizaje requiere una mayor cantidad de datos de entrenamiento, sería muy conveniente contar con un entorno simulado del robot para poder entrenar preliminarmente al agente, y luego trasladarlo a una implementación física.
- Usar simuladores físicos de robots, como *Gazebo*, para acelerar el proceso de entrenamiento y calibración de los hiperparámetros.
- Aplicar *redes neuronales recurrentes* (RNN [83], por sus siglas en inglés), *redes de larga memoria de corto plazo* (LSTM [84], por sus siglas en inglés) o sus respectivas variantes basadas en el uso de *perceptrones auto-rotantes* (ARP [85], por sus siglas en inglés), para aprovechar la información temporal de los datos durante la secuencia de caminata y así optimizar los resultados del aprendizaje.
- Desarrollar manuales de usuario adecuadamente documentados, tanto para la operación del robot en el terreno, así como para su ensamblaje y mantenimiento (de los tipos preventivo y correctivo).

## REFERENCIAS

- [1] K. D. Atherton, “New Spider munition upgrades keep humans in the loop,” 2018. [Online]. Available: <https://www.c4isrnet.com/c2-comms/2018/10/19/new-spider-munition-upgrades-keep-humans-in-the-loop/>. [Accessed: 26-Mar-2019].
- [2] International Committee of the Red Cross (ICRC), “Minas antipersonales,” 2005. [Online]. Available: <https://www.icrc.org/es/guerra-y-derecho/armas/minas-antipersonal>. [Accessed: 03-Apr-2019].
- [3] R. Schütte, *Civilian Protection in Armed Conflicts*. Berlín: Springer, 2015.
- [4] International Campaign to Ban Landmines (ICBL), “Why landmines are still a problem,” 2017. [Online]. Available: <http://www.icbl.org/en-gb/problem/why-landmines-are-still-a-problem.aspx>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [5] ONU, “La paz y la seguridad internacionales - Minas terrestres,” 2009. [Online]. Available: <http://www.un.org/es/aboutun/booklet/mines.shtml>. [Accessed: 26-Mar-2019].
- [6] I. A. Hameed, “Motion planning for autonomous landmine detection and clearance robots,” *2016 Int. Work. Recent Adv. Robot. Sens. Technol. Humanit. Demining Counter-IEDs, RST 2016*, pp. 1–5, 2017.
- [7] International Campaign to Ban Landmines (ICBL), “Mine Ban Treaty,” 2017. [Online]. Available: <http://www.icbl.org/en-gb/the-treaty.aspx>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [8] International Committee of the Red Cross (ICRC), “The anti-personnel mine ban convention,” 2018.
- [9] ONU, “Día Internacional de información sobre el peligro de las minas y de asistencia para las actividades relativas a las minas - 4 de abril,” 2005. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/events/mineawarenessday/>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [10] R. Thakur and W. Maley, “The Ottawa convention on landmines: A landmark humanitarian treaty in arms control?,” *Glob. Gov.*, vol. 5, no. 3, pp. 273–302, 1999.
- [11] International Campaign to Ban Landmines (ICBL), “Maps,” 2017. [Online]. Available: <http://www.icbl.org/en-gb/resources/multimedia/maps.aspx>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [12] BBC News, “Chile - Peru border closed over landmine hazard,” 2012.

- [Online]. Available: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-17106329>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [13] RPP Noticias, “Tacna: Daniel Urresti advierte peligro en triángulo terrestre,” 2014. [Online]. Available: <https://rpp.pe/peru/actualidad/tacna-daniel-urresti-advierte-peligro-en-triangulo-terrestre-noticia-720128>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [14] El Comercio Perú, “Peruano murió tras pisar una mina en frontera Perú-Chile,” 2016. [Online]. Available: <https://elcomercio.pe/peru/tacna/peruano-murio-pisar-mina-frontera-peru-chile-270831>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [15] El Comercio Perú, “Dos peruanos heridos por explosión de mina en Chile,” 2016. [Online]. Available: <https://elcomercio.pe/peru/tacna/dos-peruanos-heridos-explosion-mina-chile-255130>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [16] BBC News, “La olvidada frontera minada entre Chile y Perú,” 2012. [Online]. Available: [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/05/120527\\_chile\\_peru\\_frontera\\_minas\\_jpt](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/05/120527_chile_peru_frontera_minas_jpt). [Accessed: 02-Apr-2019].
- [17] N. E. Walsh and W. S. Walsh, “Rehabilitation of landmine victims - the ultimate challenge.,” *Bull. World Health Organ.*, vol. 81, no. 9, p. 665, 2003.
- [18] ONU, “Asistencia para las actividades relativas a las minas,” 2017.
- [19] A. Franco Gambioa, “Daño y reconstrucción de la cotidianidad en covíctimas y sobrevivientes de minas antipersonales en colombia,” *Nómadas*, pp. 114–131, 2013.
- [20] L. Tekin, F. Zor, S. Akarsu, S. K. Tuncer, S. Öztürk, and S. Öztürk, “Quality of life and functionality of patients with heel reconstruction after landmine explosions,” *PM R*, vol. 5, no. 7, pp. 591–595, 2013.
- [21] International Committee of the Red Cross (ICRC), “Colombia: surviving a mine accident - ICRC,” 2008. [Online]. Available: <https://www.icrc.org/en/doc/resources/documents/feature/2008/colombia-mines-feature-250908.htm>. [Accessed: 29-Mar-2019].
- [22] J. E. Restrepo, E. A. Yara, J. Cano Betancur, and L. N. Tavera, “Perfil emocional de un grupo de militares colombianos víctimas de minas antipersona o artefactos explosivos improvisados,” *Rev. Colomb. Psiquiatr.*, vol. 43, no. 2, pp. 87–95, 2014.
- [23] Geneva International Centre for Humanitarian Demining, “IMAS glossary,” 2011. [Online]. Available: <https://www.gichd.org/resources/imas-glossary>.

glossary/letter/D/. [Accessed: 27-Mar-2019].

- [24] M. K. Habib, “Mine clearance techniques and technologies for effective humanitarian demining,” *J. Conv. Weapons Destr.*, vol. 6, no. 1, p. 17, 2002.
- [25] J. Ishikawa and K. Furuta, *Anti-personnel landmine detection for humanitarian demining*. London: Springer, 2009.
- [26] J. E. Restrepo, E. A. Yara, J. Cano Betancur, and L. N. Tavera, “Perfil emocional de un grupo de militares colombianos víctimas de minas antipersona o artefactos explosivos improvisados,” *Rev. Colomb. Psiquiatr.*, vol. 43, no. 2, pp. 87–95, 2014.
- [27] BBC News, “Tu primer error será el último: la peligrosa tarea de los militares que limpian las minas en la frontera entre Chile y Perú a 4.000 metros de altura,” 2018. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-43061122>. [Accessed: 02-Apr-2019].
- [28] D. Mikulic, *Design of Demining Machines*. London: Springer, 2013.
- [29] P. Gonzalez De Santos, E. Garcia, J. Estremera, and M. A. Armada, “DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 36, no. 9, pp. 545–558, 2005.
- [30] P. Gonzalez de Santos, J. A. Cobano, E. Garcia, J. Estremera, and M. A. Armada, “A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions,” *Mechatronics*, vol. 17, no. 8, pp. 417–430, 2007.
- [31] I. Doroftei and Y. Baudoin, “A concept of walking robot for humanitarian demining,” *Ind. Robot An Int. J.*, vol. 39, no. 5, pp. 441–449, 2012.
- [32] A. Byagowi and P. Kopacek, *Using a humanoid robot for demining land mines*, vol. 42, no. 25. IFAC, 2011.
- [33] M. K. Habib, *Humanitarian Demining: the Problem, Difficulties, Priorities, Demining Technology and the Challenge for Robotics*, no. May. IntechOpen, 2012.
- [34] M. Sezgin, “A novel detection warning signal creation method for hand-held GPR applications,” *Proc. 13th Internarional Conf. Gr. Penetrating Radar, GPR 2010*, no. July 2010, 2010.
- [35] J. C. Habumuremyi, Y. Baudoin, and P. Kool, “Adaptive Neuro-fuzzy Control of AMRU-5, a six-legged walking robot,” *Proc. IARP WS Hudem*, 2004.

- [36] P. Kopacek, T. Magyar, and L. Silberbauer, *HUMI - A mobile robot for landmine detection*, vol. 45, no. 22. IFAC, 2012.
- [37] A. Tripković, V. Radonić, D. Primorac, L. Giunio, M. Biočić, and B. Lukšić, “Injuries from Antitank Mines in Southern Croatia,” *Mil. Med.*, vol. 169, no. 4, pp. 320–324, 2015.
- [38] C. Yilmaz, H. T. Kahraman, and S. Soyler, “Passive mine detection and classification method based on hybrid model,” *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 47870–47888, 2018.
- [39] M. A. Mohana, A. M. Abbas, M. L. Gomaa, and S. M. Ebrahim, “Discrimination between landmine and mine-like targets using wavelets and spectral analysis,” *NRIAG J. Astron. Geophys.*, vol. 2, no. 1, pp. 54–66, 2013.
- [40] South African History Online, “South Africa completes destroying its stockpile of anti-personnel mines,” 1997. [Online]. Available: <https://www.sahistory.org.za/dated-event/south-africa-completes-destroying-its-stockpile-anti-personnel-mines>. [Accessed: 07-Apr-2019].
- [41] D. Portugal, L. Marques, and M. A. Armada, “Deploying field robots for humanitarian demining: challenges, requirements and research trends,” *Mob. Serv. Robot.*, pp. 649–656, 2015.
- [42] H. Kasban, O. Zahran, S. M. Elaraby, M. El-Kordy, and F. E. Abd El-Samie, “A comparative study of landmine detection techniques,” *Sens. Imaging*, vol. 11, no. 3, pp. 89–112, 2010.
- [43] M. A. Yarleque, S. Alvarez, and H. J. Martinez, “FMCW GPR radar mounted in a mini-UAV for archaeological applications: First analytical and measurement results,” *Proc. 2017 19th Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. ICEAA 2017*, pp. 1646–1648, 2017.
- [44] H. Schubert and A. Kuznetsov, *Detection of Explosives and Landmines - Methods and Field Experience*. St. Petersburg, Russia: Springer, 2002.
- [45] M. Sato, J. Fujiwara, T. Kido, and K. Takahashi, “ALIS evaluation tests in Croatia,” *Detect. Sens. Mines, Explos. Objects, Obs. Targets XIV*, vol. 7303, p. 73031B, 2009.
- [46] X. Núñez-Nieto, M. Solla, P. Gómez-Pérez, and H. Lorenzo, “GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques,” *Remote Sens.*, vol. 6, no. 10, pp. 9729–9748, 2014.
- [47] El Peruano, “Reglamento Nacional de Edificaciones,” Lima, 08-Jun-2006.

- [48] M. O. Sorin and M. Nițulescu, “Hexapod robot leg dynamic simulation and experimental control using Matlab,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 14, no. PART 1, pp. 895–899, 2012.
- [49] M. K. Habib, *Service Robots and Humanitarian Demining*, vol. 2. 2018.
- [50] K. Nonami *et al.*, “Development and control of mine detection robot COMET-II and COMET-III,” *JSME Int. J. Ser. C Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf.*, vol. 46, no. 3, pp. 881–890, 2003.
- [51] K. Nonami and Y. Ikeda, “Walking control of COMET-III using discrete time preview sliding mode controller,” in *RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2004, vol. 4, pp. 3219–3225.
- [52] M. Y. Rachkov, L. Marques, and A. T. De Almeida, “Multisensor demining robot,” *Auton. Robots*, vol. 18, no. 3, pp. 275–291, 2005.
- [53] K. Arikawa and S. Hirose, “Development of quadruped walking robot TITAN-VIII,” pp. 208–214, 2002.
- [54] S. Hirose *et al.*, “Quadruped walking robot centered demining system - Development of TITAN-IX and its operation,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, no. April, pp. 1284–1290, 2005.
- [55] M. Ahmed, M. R., M. Billah, and S. Farh, “Walking Hexapod Robot in Disaster Recovery: Developing Algorithm for Terrain Negotiation and Navigation,” *New Adv. Technol.*, pp. 328–333, 2012.
- [56] R. S. King, *BiLBIQ : a biologically inspired robot with walking and rolling locomotion*. 2013.
- [57] I. A. Hameed, D. D. Bochtis, and C. G. Sorensen, “Driving angle and track sequence optimization for operational path planning using genetic algorithms,” *Appl. Eng. Agric.*, vol. 27, no. 6, pp. 1077–1086, 2011.
- [58] I. A. Hameed, “Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain,” *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 74, no. 3–4, pp. 965–983, 2014.
- [59] A. Stelzer, H. Hirschmüller, and M. Görner, “Stereo-vision-based navigation of a six-legged walking robot in unknown rough terrain,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 31, no. 4, pp. 381–402, 2012.
- [60] D. Belter and P. Skrzypczyński, “Integrated motion planning for a hexapod robot walking on rough terrain,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1 PART 1, pp. 6918–6923, 2011.
- [61] Y. Gabriely and E. Rimon, “Spiral-stc: An on-line coverage algorithm of

- grid environments by a mobile robot," in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, 2002, vol. 1, pp. 954–960.
- [62] S. C. Wong and B. A. MacDonald, "Complete Coverage by Mobile Robots Using Slice Decomposition Based on Natural Landmarks," pp. 683–692, 2010.
- [63] El Peruano, "Reglamento de la ley de seguridad y salud en el trabajo de los estibadores terrestres y transportistas manuales," Lima, pp. 1–9, 08-Jun-2009.
- [64] P. Kopacek, "Robots for humanitarian demining," in *Advances in Automatic Control*, New York, NY, USA: Springer, 2004, pp. 159–172.
- [65] T. Osa, V. Tangkaratt, and M. Sugiyama, "Hierarchical reinforcement learning via advantage-weighted information maximization," *arXiv Prepr. arXiv1901.01365*, 2019.
- [66] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, 1st ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2013.
- [67] M. Sato, "GPR evaluation test for humanitarian demining in Cambodia," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 4322–4325, 2010.
- [68] A. Simón Mata *et al.*, "Fundamentals of machine theory and mechanisms," 2016.
- [69] J. Habumuremyi, P. Kool, and Y. Baudoin, "Adaptive Neuro-Fuzzy Control of AMRU5, a six-legged walking robot," 2004.
- [70] S. Roosen, "Ground-contact friction estimation and slip prevention in bipedal robots," University of Melbourne, 2012.
- [71] J. E. Shigley, J. J. Uicker, G. R. Pennock, and Others, *Theory of machines and mechanisms*, vol. 1. Oxford University Press New York, NY, 2011.
- [72] J. Hirschhorn, *Kinematics and dynamics of plane mechanisms*. McGraw-Hill, 1962.
- [73] B. Na and K. Kong, "Design of a One Degree-of-Freedom Quadruped Robot Based on a Mechanical Link System: Cheetaroid-II," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 21, pp. 409–415, 2016.
- [74] R. C. Hibbeler, K. B. Yap, and S. C. Fan, *Mechanics for Engineers: Dynamics*. Pearson, 2013.
- [75] C. Li, T. Zhang, and D. I. Goldman, "A terradynamics of legged locomotion

- on granular media,” *Science*, vol. 339, no. 6126, pp. 1408–1412, 2013.
- [76] M. Branda, Y. M. Shiguematsu, K. Hashimoto, and A. Takanishi, “Material recognition cnns and hierarchical planning for biped robot locomotion on slippery terrain,” in *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016, pp. 81–88.
- [77] C. P. Ridgewell, “Humanoid robot friction estimation in multi-contact scenarios,” Virginia Tech, 2017.
- [78] El Peruano, “Normativa de la asignación del espectro radioeléctrico,” Lima, pp. 17–19, 13-Feb-2019.
- [79] S. P. Platt, “Preferred value series for resistors and capacitors.” 2003.
- [80] C. De Boor, C. De Boor, E.-U. Mathématicien, C. De Boor, and C. De Boor, *A practical guide to splines*, vol. 27. springer-verlag New York, 1978.
- [81] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial intelligence: a modern approach*. Malaysia; Pearson Education Limited, 2016.
- [82] R. Cassinis, G. Bianco, A. Cavagnini, and P. Ransenigo, “Strategies for navigation of robot swarms to be used in landmines detection,” *1999 3rd Eur. Work. Adv. Mob. Robot. Eurobot 1999 - Proc.*, pp. 211–218, 1999.
- [83] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, “Learning representations by back-propagating errors,” *Nature*, vol. 323, no. 6088, pp. 533–536, 1986.
- [84] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “Long Short-Term Memory,” *Neural Comput.*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.
- [85] D. Saromo, E. Villota, and E. Villanueva, “Auto-Rotating Perceptrons,” *LatinX AI Work. NeurIPS 2019*, 2019.